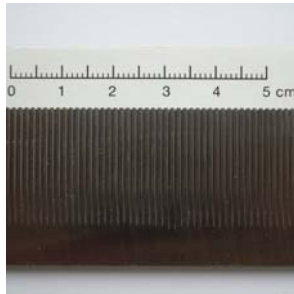
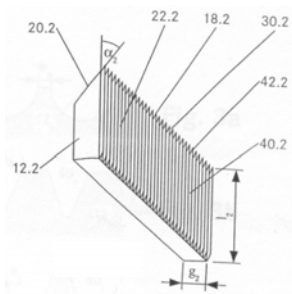


WHFF-Projekt Nr. 2008.01

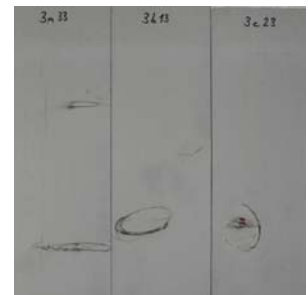
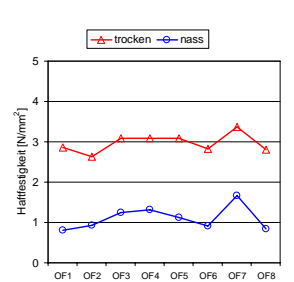
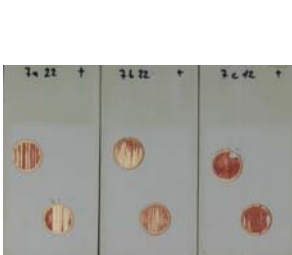
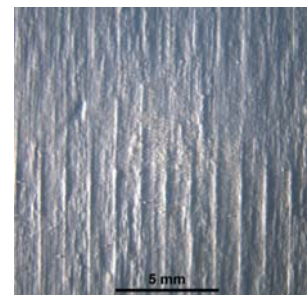
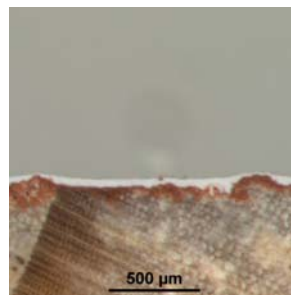
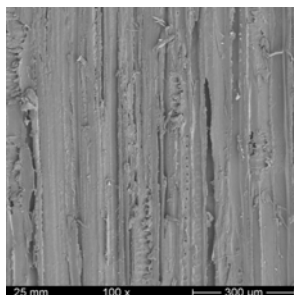
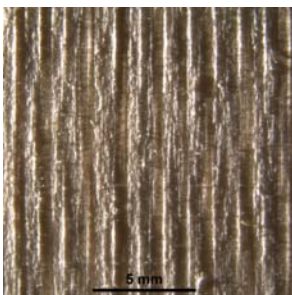
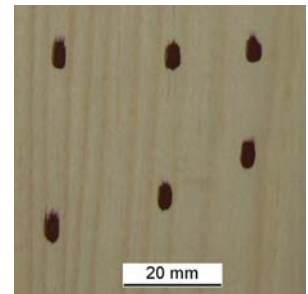
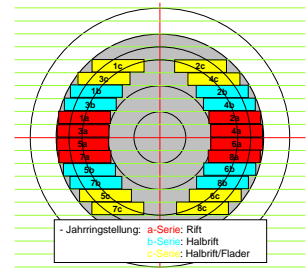
Strukturhobeln

Charakterisierung und Auswirkungen einer innovativen Oberflächenbearbeitung für zu beschichtende Hobelware

Wissenschaftlicher Schlussbericht



OF	Hobeln		Schleifen	
	Typ	Zustand	Typ	Zustand
1	Rotaplan	neu	ohne	
2		stumpf		
3	Rotaplan+	neu	Körnung	neu
4	Schleifen	stumpf	60-80	
5		neu		stumpf
6		stumpf		
7	Struktur-	neu	ohne	
8	hobeln	stumpf		



Kontakt:

Martin Arnold
Empa, Abt. Holz
Überlandstr. 129
8600 Dübendorf

Tel.: 044 / 823 46 83 (direkt)
E-Mail: martin.arnold@empa.ch

Inhalt

Vorwort	3
Zusammenfassung	5
1 Einleitung	7
1.1 Ausgangslage	7
1.1.1 Problemstellung	7
1.1.2 Zusammenhang zwischen Oberflächenstruktur und Beschichtungsqualität	8
1.2 Idee Strukturhobeln	8
1.3 Fragestellungen / Ziele	9
1.4 Projektorganisation	10
1.5 Terminologie	10
2 Untersuchungsprogramm	11
2.1 Versuchsvarianten	12
2.2 Probenmaterial	13
2.2.1 Rohhobler	13
2.2.2 Hobeln / Schleifen	14
2.2.3 Beschichtung	15
2.2.4 Einzelproben für Untersuchungen	15
2.3 Untersuchungsmethoden	16
2.3.1 Charakterisierung Holzoberfläche und Beschichtung	16
2.3.1.1 Struktur Holzoberfläche	17
2.3.1.2 Benetzungsverhalten Holzoberfläche	18
2.3.1.3 Beschichtung	19
2.3.2 Leistungsmerkmale beschichtetes Holz	19
2.3.2.1 Witterungsbeständigkeit	19
2.3.2.2 Haftfestigkeit	20
3 Ergebnisse	23
3.1 Charakterisierung Holzoberfläche und Beschichtung	23
3.1.1 Struktur Holzoberfläche	23
3.1.2 Benetzungsverhalten Holzoberfläche	32
3.1.3 Beschichtung	36
3.2 Leistungsmerkmale beschichtetes Holz	40
3.2.1 Witterungsbeständigkeit	40
3.2.2 Haftfestigkeit	44
3.3 Zusammenhänge und Wechselwirkungen zwischen Kenngrössen	49
4 Schlussfolgerungen	55
4.1 Gesamtbeurteilung	55
4.2 Umsetzung / Forschungsbedarf	56
Literatur	57
Normen	59

Vorwort

Der vorliegende Bericht dokumentiert die Ergebnisse des WHFF-Projektes Nr. 2008.01 'Strukturhobeln - Charakterisierung und Auswirkungen einer innovativen Oberflächenbearbeitung für zu beschichtende Hobelware', welches von der Abteilung Holz der Empa zusammen mit der Firma Kälin & Co. AG als Industriepartner durchgeführt wurde.

Ein wirksamer und dauerhafter Oberflächenschutz ist ein entscheidender Faktor für die Verwendung von Holz im Aussenbereich. Von dessen erfolgreicher Realisierung hängt ab, inwieweit die vielfältigen Ansprüche der Architekten und Bauherren bezüglich Ästhetik und Dauerhaftigkeit erfüllt werden können. Obwohl sich Holz seit Jahrhunderten als Material im Aussenbereich bewährt hat, ist der Schutz der Oberfläche vor einer Schädigung durch Umwelteinflüsse noch immer nicht befriedigend gelöst. Laufende Qualitätsverbesserungen sind daher ein Muss für die produzierenden Betriebe und immer wieder Anlass zu entsprechenden Forschungs- und Entwicklungsprojekten. Aufgrund der vielfältigen Wechselwirkungen im System Holz-Beschichtung und der extremen Beanspruchung der Holzoberfläche im Aussenbereich sind realistischerweise allerdings kaum alles umfassende Lösungen zu erwarten, sondern vielmehr punktuelle Verbesserungen in kleinen Schritten.

Die Untersuchungen befassen sich mit der Optimierung eines solchen spezifischen Teilbereiches im System Holz-Beschichtung, der mechanischen Bearbeitung der Holzoberfläche als vorbereitender Prozess für eine nachfolgende Beschichtung. Das primäre Anwendungsgebiet sind industriell beschichtete Vollholz-Fassadenschalungen für den Aussenbereich. Ziel des Projektes ist die Abklärung der grundsätzlichen Wirksamkeit eines innovativen Hobelverfahrens unter Verzicht eines zusätzlichen Schleifvorganges. Für die industrielle Umsetzung und Ausweitung der Anwendungsgebiete sind weitere, vertiefte Untersuchungen und Optimierungen notwendig.

Folgende Organisationen und Personen waren massgeblich an der Durchführung des Projektes beteiligt:

- Empa, Abt. Holz, Dübendorf: Martin Arnold, Anja Fischer, Daniel Heer, Tina Künniger
- Kälin & Co. AG, Hobelwerk, Winterthur: Robert Ammann, Hans-Ulrich Kipfer
- Fonds zur Förderung der Wald- und Holzforschung, c/o BAFU, Abt. Wald, Bern: Michael Gautschi

Zusammenfassung

In diesem Projekt werden die Auswirkungen einer innovativen Hobeltechnik mit fein gezahnten Messern ('Strukturhobeln') für industriell beschichtete Fassadenschalungen im Aussenbereich wissenschaftlich untersucht. Angestrebt wird ein effizienterer Bearbeitungsprozess mit einer verbesserten Oberflächenqualität unter Verzicht auf einen nur ungenügend steuerbaren Schleifprozess.

Problemstellung / Ziele

Üblicherweise wird in der Schweiz zu beschichtende Hobelware nach dem Hobeln zusätzlich geschliffen, um allfällige Hobelfehler (z.B. Hobelschläge, Faserausrisse) zu beseitigen und eine saubere, gleichmässige Holzoberfläche für die Applikation der Beschichtung zu erreichen. Die spanende Oberflächenbearbeitung führt jedoch häufig zu Schäden an der Zellstruktur des Holzes. Zudem ist der Schleifprozess ungenügend steuerbar und relativ teuer. Zur Erzielung einer feinen, definierten Strukturierung der Holzoberfläche (ähnlich einer geschliffenen Oberfläche, aber ohne ungewollte Zellverletzungen) hat der beteiligte Industriepartner fein gezahnte Hobelmesser für den Einsatz in modernen Hobelautomaten entwickelt.

Das vorliegende Projekt hat zum Ziel, die Auswirkungen und den Nutzen dieser neuen Hobeltechnik aufzuzeigen und diese weiterzuentwickeln. Das Projekt beinhaltet insbesondere die

- Charakterisierung der Oberflächenstruktur und der Benetzungseigenschaften der neuartigen Holzoberflächen
- Quantifizierung der Auswirkungen auf die Qualität einer nachfolgenden Oberflächenbeschichtung bezüglich Haftfestigkeit und Witterungsbeständigkeit
- Vorbereitung von weiterführenden Forschungsarbeiten (z.B. KTI-Projekt)

Untersuchungsprogramm / Vorgehensweise

Die Untersuchungen beinhalten die vergleichende Charakterisierung der Eigenschaften und der Leistungsfähigkeit von 32 Kombinationen von Oberflächenbearbeitung (8 Varianten), Beschichtung / Applikation (3 Varianten) und Holzart (Fichte, Kiefer).

Die 8 verschiedenen Varianten der Oberflächenbearbeitung ermöglichen einen Vergleich von herkömmlich gehobelten und teilweise zusätzlich geschliffenen Holzoberflächen mit dem neuartigen Strukturhobeln. Zusätzlich wurde der Einfluss des Schärfezustandes der Werkzeuge durch die beiden Extreme von neuen respektive abgenutzten Hobelmessern und Schleifbändern einbezogen.

Um für alle Versuchvarianten möglichst vergleichbare Proben bezüglich Holzqualität und Jahrringstellung zu benutzen, wurde Rohhobler verwendet, welche systematisch aus dem Stammquerschnitt speziell eingeschnittener Rundholzstämmen entnommen wurden.

Das Untersuchungsprogramm gliedert sich in die zwei Bereiche 'Charakterisierung der Holzoberflächen' (Struktur der unbeschichteten und beschichteten Oberflächen, Benetzungsverhalten) und 'Leistungsmerkmale beschichtetes Holz' (Witterungsbeständigkeit, Haftfestigkeit).

Die mechanische Oberflächenbearbeitung (Hobeln, Schleifen) sowie die Beschichtung der Rohhobler erfolgte unter industriellen Bedingungen beim Industriepartner. Die wissenschaftlichen Untersuchungen wurden an der Empa durchgeführt.

Ergebnisse

Die mechanische Oberflächenbearbeitung beeinflusst das System Holz-Beschichtung folgendermassen:

- **Visuelles Erscheinungsbild / Oberflächenstruktur:** Hobeln und Schleifen führen zu makro- und mikroskopisch gut sichtbaren Unterschieden im Erscheinungsbild der Holzoberflächen. Die mit neuen Messern lediglich gehobelten Oberflächen wirken relativ kompakt und glatt und lassen noch verschiedene holzanatomische Details erkennen. Demgegenüber sind die geschliffenen Oberflächen durch viele lose Holzfasern geprägt, welche die Details der darunterliegenden Holzstruktur verdecken. Die gemessene Rauigkeit ist bei geschliffenen Oberflächen deutlich grösser als bei gehobelten Oberflächen. Abgenutzte Hobelmesser und das Schleifen führen zu vermehrten Faserausrisen und oberflächennahen Zellschäden. Auf den mit neuen Messern strukturgehobelte Oberfläche ist eine deutliche 'Riffel'-Struktur erkennbar, die Oberfläche wirkt jedoch insgesamt ebenfalls sehr glatt.
- **Benetzungsverhalten:** Das unterschiedliche Benetzungsverhalten der (chemisch identischen) Holzoberflächen deutet auf einen erheblichen Einfluss der durch die Bearbeitungsvarianten erzeugten unterschiedlichen Oberflächenstrukturen hin. Die geschliffenen Oberflächen benetzen tendenziell stärker als die lediglich gehobelten. Die mit neuen Messern strukturgehobelte Oberfläche nimmt eine Zwischenstellung zwischen den geschliffenen und den lediglich gehobelten Oberflächen ein.
- **Beschichtungsaufbau:** Die untersuchten Oberflächenbearbeitungs-Varianten haben keinen erkennbaren Einfluss auf die Eindringung der Grundierungen und die durchschnittliche Schichtdicke. Hingegen beeinflusst die Struktur der Holzoberfläche die Gleichmässigkeit des Beschichtungsfilms, indem bei relativ glatten Oberflächen der Beschichtungsfilm sehr gleichmässig und glatt wird. Unregelmässigkeiten der Holzoberfläche ergeben hingegen auch eine ungleichmässige Schichtdicke. Auf den strukturgehobelten Oberflächen sind die 'Riffel' auch noch im beschichteten Zustand erkennbar. An deren Spitze ist die Schichtdicke vermindert.
- **Haftfestigkeit:** Auf geschliffenen Oberflächen haften Beschichtungen generell besser als auf herkömmlich gehobelten. Die mit neuen Messern strukturgehobelte Oberfläche zeigt aber mit Abstand die höchste Haftfestigkeit aller untersuchten Bearbeitungsvarianten. Dies ist besonders deutlich bei der Nasshaftung festzustellen. Die Haftfestigkeit der Beschichtung ist auf Ästen ca. 40% geringer als im störungsfreien Holz. Mit der beschränkten Probenzahl konnte jedoch bei Ästen kein Einfluss der Oberflächenbearbeitung nachgewiesen werden.
- **Witterungsbeständigkeit:** Bezüglich Rissbildung durch eine Bewitterung ist kein genereller Unterschied zwischen gehobelten und geschliffenen Oberflächen festzustellen. Vielmehr scheint sich in der Witterungsbeständigkeit die Summe verschiedener positiver oder negativer Faktoren auszuwirken. Besonders ungünstig verhalten sich die mit neuen Werkzeugen gehobelt/geschliffene Oberfläche und die mit abgenutzten Messern strukturgehobelte Oberfläche, während die mit neuen Messern strukturgehobelte Oberfläche die geringste Rissbildung aufweist.

Schlussfolgerungen

Die Ergebnisse des Projektes erlauben folgende Schlussfolgerungen:

- Mit neuen (scharfen) Messern strukturgehobelte Oberflächen zeigen ein spezielles Verhalten, welches je nach betrachteter Eigenschaft eher gehobelten oder eher geschliffenen Oberflächen entspricht oder sich gar von beiden abhebt. Die beobachteten Effekte sind meist relativ klein, aber teilweise statistisch signifikant. Mit den getesteten Beschichtungssystemen wurde insbesondere ein positiver Effekt bezüglich Haftfestigkeit und Witterungsbeständigkeit festgestellt. Zur Oberflächenbearbeitung für eine nachfolgende, filmbildende Beschichtung kann Strukturhobeln damit als effiziente Alternative zum herkömmlichen Hobeln/Schleifen eingesetzt werden.
- Abgenutzte Werkzeuge wirken sich grundsätzlich negativ auf Oberflächenstruktur und Leistungsmerkmale aus. Der rechtzeitige Werkzeugwechsel ist daher entscheidend für die Produktqualität. Einsatz und Einfluss des Jointens müssen in diesem Zusammenhang ebenfalls genauer abgeklärt werden.
- Aufgrund der komplexen Wechselwirkungen zwischen den drei Systemkomponenten Trägermaterial (Holz), Beschichtungsstoff und Applikation sowie zwischen Oberflächeneigenschaften und Leistungsmerkmalen ist kein einfacher Kausalzusammenhang Rauigkeit → Benetzung → Haftfestigkeit → Witterungsbeständigkeit gegeben. Trotz den festgestellten generellen Trends sind daher Voraussagen zum Verhalten spezifischer Behandlungs-Kombinationen schwierig und neue Produktionsprozesse müssen zwingend durch Versuche abgesichert werden.

1 Einleitung

1.1 Ausgangslage

Die Qualität von beschichteter Hobelware wird vom Zusammenwirken der drei Systemkomponenten Trägermaterial (Holz), Beschichtungsstoff und Applikation bestimmt. Nur wenn alle drei Komponenten aufeinander abgestimmt sind, wird ein optimales Ergebnis erzielt. Dies gilt insbesondere auch bei Fassadenschalungen im Aussenbereich, wo Holzsubstrat und Beschichtung durch die Bewitterung stark beansprucht werden. Bei Holz als Trägermaterial von Beschichtungen ist dessen Oberflächenqualität mitentscheidend für die Qualität und die Dauerhaftigkeit der Beschichtung. Qualitätsbestimmende Faktoren sind dabei eine gleichmässige Filmbildung sowie eine genügende Haftung der Beschichtung auf dem Holz.

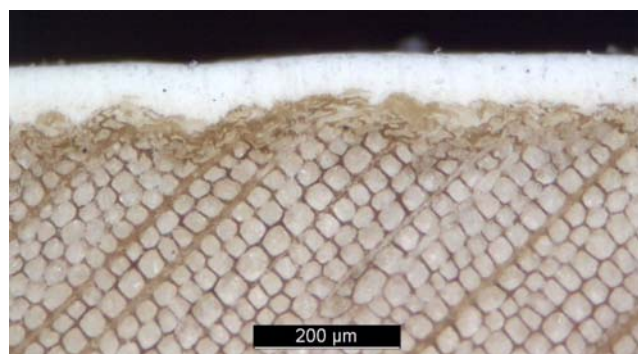
Die Dauerhaftigkeit einer Fassade hängt allerdings nicht nur von der Qualität des verwendeten Materials ab, sondern ebenso stark von Detailkonstruktion und Montage. Diese Faktoren können allerdings durch das Hobelwerk respektive den Beschichter nur beschränkt beeinflusst werden und sind daher nicht Gegenstand der vorliegenden Untersuchungen.

1.1.1 Problemstellung

Üblicherweise wird in der Schweiz zu beschichtende Hobelware nach dem Hobeln zusätzlich geschliffen, um allfällige Hobelfehler (z.B. Hobelschläge, Faserausrisse) zu beseitigen und eine saubere, gleichmässige Holzoberfläche für die Applikation der Beschichtung zu erreichen. Die Kombination von Hobeln und Schleifen ist jedoch aus folgenden Gründen nicht immer optimal:

- Die spanende Oberflächenbearbeitung verursacht häufig Schäden an der Zellstruktur des Holzes, welche die Grenzschicht Holz-Beschichtung schwächen (Bild 1). Insbesondere unter Feuchtebeanspruchung kann dies zum nachträglichen Anquellen und Aufrichten der Holzfasern, sowie zu Haftungsproblemen der Beschichtung führen.
- Der Schleifprozess ist nur ungenügend steuerbar, insbesondere im Bereich von Profilierungen und Kantenrundungen. Einem potentiellen Nutzen für die Oberflächenqualität (Egalisierung, feine Strukturierung für gute Beschichtungshaftung) stehen immer auch Nachteile (Zellschäden, festsitzender Staub) gegenüber.
- Der zusätzliche Prozessschritt des Schleifens verursacht Kosten (Schleifaggregat, Schleifmittel), dessen Nutzen ist jedoch umstritten.

Bild 1: Querschnitt durch eine beschichtete Holzprobe mit Beschädigungen der Zellstruktur des Holzes, hervorgerufen durch mechanische Überbeanspruchung bei der spanenden Oberflächenbearbeitung.



- ← Beschichtung
- ← Grenzschicht Holz-Beschichtung mit beschädigten Holzzellen
- ← Holzsubstrat

Die beschriebene Problematik hat sich auch im Rahmen des kürzlich abgeschlossenen KTI-Projektes 6948.2 IWS-IW 'Dauerhafter Holzoberflächenschutz auf der Basis von Nanocomposites' (Arnold et al. 2007) gezeigt. Als mögliche Optimierungsmassnahmen wurden unter anderem Verbesserungen bei der Oberflächenqualität der rohen (d.h. gehobelten / geschliffenen) Hobelware empfohlen. In Zusammenarbeit mit dem beteiligten Hobelwerk soll mit dem vorliegenden Projekt der Zusammenhang zwischen der Oberflächenstruktur des Holzes und der Qualität einer nachfolgenden Beschichtung untersucht und abgeklärt werden, inwieweit mit einer neuartigen Hobeltechnik diesbezüglich Verbesserungen erzielt werden können.

1.1.2 Zusammenhang zwischen Oberflächenstruktur und Beschichtungsqualität

Der grundsätzliche Zusammenhang zwischen Oberflächeneigenschaften und Qualität einer Beschichtung wurde schon mehrfach belegt (Böttcher 1977, Feist 1988, Williams et al. 2000, de Moura und Hernandez 2006). Infolge der Vielzahl von chemischen und mechanischen Wechselwirkungen ist der Einfluss der Oberflächenstruktur auf die Benetzung, Eindringung, Haftung und Dauerhaftigkeit einer Beschichtung je nach Kombination von Holzart und Beschichtungsstoff unterschiedlich (Williams und Feist 1994, de Meijer et al. 1998, Stehr et al. 2001, Hernandez und Cool 2008). Wichtige analoge Erkenntnisse sind auch aus dem Gebiet der Holzverklebung bekannt (Vick 1999, COST Action E13 2002, Hernandez und Rojas 2002, Singh et al. 2002, Kamke und Lee 2007). Generell wird angenommen, dass sich rauhe Oberflächen (gesägt, geschliffen) gut für Lasuren eignen, während gehobelte vorteilhafter sind bei schichtbildenden Beschichtungen. Es besteht jedoch keine grundsätzliche Einigkeit, ob für beschichtete Fassadenschalungen für den Aussenbereich lediglich gehobelte oder zusätzlich geschliffene Oberflächen besser geeignet sind (siehe 1.1.1).

Immer wieder hingewiesen wird auf die Gefahr von Gefügeschädigungen durch eine spanende Oberflächenbearbeitung (Pahlitzsch 1966, Pahlitzsch 1970, Stewart und Crist 1982, Murmanis et al. 1986, Riegel 1997, Stehr und Johansson 2000, Carrano et al. 2004), wobei insbesondere bei Nadelholz häufig über gequetschte Holzzellen in der oberflächennahen Schicht berichtet wird.

Die Verbesserung der Witterungsbeständigkeit von Holz im Aussenbereich durch Oberflächenschutz ist seit vielen Jahren ein Arbeitsschwerpunkt der Abteilung Holz (Arnold 2003, Richter 2005). Zum Einfluss der Oberflächenbeschaffenheit auf die Leistungsfähigkeit von Beschichtungen sind bereits aus früheren Studien Erfahrungen vorhanden (Arnold et al. 1992, Richter et al. 1994). Dies gilt auch für die Prüfung der Haftfestigkeit von Beschichtungen (Turkulin et al. 2002, Arnold et al. 2007). Die Struktur der Holzoberflächen ('Rauhigkeit') wurde ebenfalls bereits früher sowohl mechanisch mittels Profilometer (Richter et al. 1994, Schirle und Richter 2002) als auch berührungslos mittels Lasertriangulation (Arnold et al. 1992) erfasst. Im Bereich der Holzverklebung wurde der Einfluss der Oberflächeneigenschaften insbesondere bei 1K-PUR Klebstoffen untersucht (Schirle und Richter 2002).

1.2 Idee Strukturhobeln

Die Firma Kälin & Co. AG, Hobelwerk, Winterthur hat vor diesem Hintergrund fein gezahnte Hobelmesser für den Einsatz in modernen Hobelautomaten entwickelt (Bild 2).

Bild 2a: Prinzipskizze der gezahnten Hobelmesser (aus Patentanmeldung).

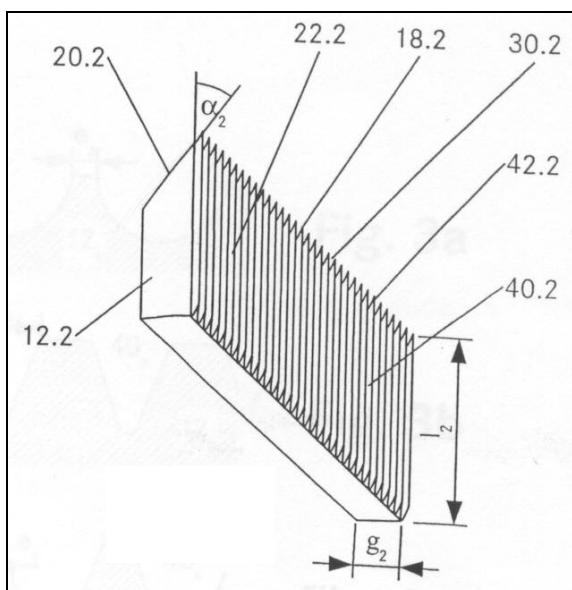
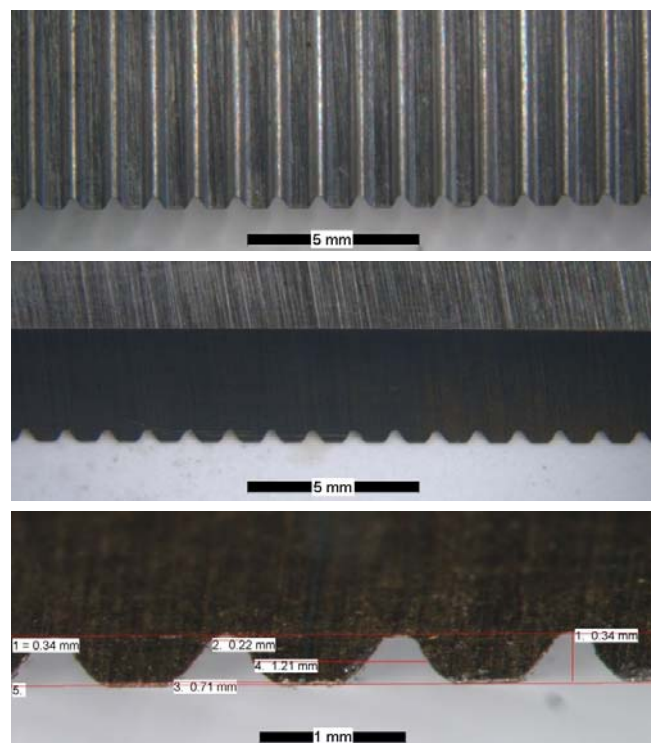


Bild 2b: Schnittkanten der Struktur-Hobelmesser: Eingefräste Rillen auf Spanfläche (oben), Sicht auf Fase (Mitte) und vermasste 'Zahnung' (unten).



Die fein gezahnte Schnittkante wird durch eingefräste Rillen auf der Spanfläche von herkömmlichen Hobelmessern erzeugt (Bild 2). Die Messer können somit in einem normalen Messerkopf eingespannt und nachgeschliffen werden.

Mit diesen Messern soll - ähnlich einer geschliffenen Oberfläche, aber ohne ungewollte Zellverletzungen - eine feine, definierte Strukturierung der Holzoberfläche erzielt werden. So könnte ein nachfolgender Schleifprozess überflüssig gemacht und eine verbesserte Haftung der Beschichtung (insbesondere auch auf den Ästen) erreicht werden.

Die Verwendung von gezahnten Hobelmessern ist keine grundsätzlich neue Idee. Sogenannte Zahnhobel werden schon lange zum Aufrauen von Holzoberflächen für eine nachfolgende Verleimung eingesetzt (Lohmann 2003). Allerdings war deren Anwendung bisher auf den manuellen Einsatz mit Handhobeln beschränkt.

Zum Schutz ihrer Erfindung hat die Firma Kälin ein Europäisches Patent angemeldet (EP07405340, Anmeldedatum: 30.11.2007).

1.3 Fragestellungen / Ziele

Das vorliegende Projekt hat zum Ziel, die Auswirkungen und den Nutzen dieser neuen Hobeltechnik aufzuzeigen. Es beinhaltet insbesondere vertiefte wissenschaftliche Untersuchungen zur Struktur und den Eigenschaften der durch das Strukturhobeln erzeugten Oberflächen.

Die Hauptpunkte sind:

- Charakterisierung der Oberflächenstruktur und der Benetzungseigenschaften der neuartigen Holzoberflächen
- Quantifizierung der Auswirkungen auf die Qualität einer nachfolgenden Oberflächenbeschichtung bezüglich Haftfestigkeit und Witterungsbeständigkeit
- Vorbereitung von weiterführenden Forschungsarbeiten (z.B. KTI-Projekt)

Bedeutung des Projektes für Forschung und Praxis

Für eine gezielte Verbesserung des Gesamtsystems Holz-Beschichtung sind vertiefte Kenntnisse über die spezifischen Wechselwirkungen zwischen den einzelnen Komponenten unabdingbar. Dabei spielt die Holzoberfläche als Grenzschicht eine besondere Rolle. Das vorliegende Projekt bringt neben der konkreten Anwendung für beschichtete Fassadenschalungen auch generelle Erkenntnisse zur Optimierung von beschichtetem Holz. Zudem ergeben sich auch Anknüpfungspunkte für die Verklebung von Holz, wo eine optimale Oberflächenqualität ebenfalls entscheidend ist für eine gute Benetzung und die Ausbildung einer belastbaren Verbindung.

Neben der erwarteten Verbesserung der Oberflächenqualität (insbesondere im Bereich von Profilierungen, Kantenrundungen und Ästen) hat das Strukturhobeln auch grosse fertigungstechnische Vorteile. Zum einen könnten mit dem Verzicht auf einen zusätzlichen Schleifprozess Kosten gespart werden und zum anderen würde die Beschränkung der Vorschubgeschwindigkeit durch das Schleifen (max. 70 m/min) wegfallen.

Fassadenschalungen für den Aussenbereich werden in der Schweiz zunehmend in einem industriellen Prozess bereits im Hobelwerk fertig beschichtet. Die dem Verband Schweizerischer Hobelwerke angeschlossenen Firmen produzieren zur Zeit gesamthaft ca. 1 Mio m²/Jahr beschichtete Hobelwaren. Hier liegt das primäre potentielle Anwendungsgebiet der neuen Hobeltechnik. Bei einer Ausweitung der Anwendungen auf die Holzverklebung und speziell auf Laubholz ist die wirtschaftliche Bedeutung noch erheblich grösser.

Thematische Eingliederung in die Schwerpunkte des WHFF

Das vorgeschlagene Projekt bezieht sich insbesondere auf die thematischen Schwerpunkte 3 'Innovation konzentriert sich auf die Optimierung von Prozessen und Produktionsmethoden' und 4 'Projekte kommen bevorzugt aus der Praxis und werden in Zusammenarbeit mit den Forschungsinstitutionen angegangen', indem es eine von einem KMU entwickelte Idee wissenschaftlich untersucht und damit deren gezielte Weiterentwicklung ermöglicht.

1.4 Projektorganisation

Basierend auf Ergebnissen einer Vorstudie wurde im März 2008 ein Finanzierungsgesuch an den Fonds zur Förderung der Wald- und Holzforschung eingereicht. Die Finanzierungszusage erfolgte im Juni 2008. Das Projekt hatte eine Laufzeit von 1.5 Jahren (01.07.2008 – 31.12.2009).

Funktion und Aufgaben der Projektpartner sind in Tabelle 1 summarisch zusammengestellt. Das Projekt wurde durch die Abteilung Holz der Empa koordiniert und durchgeführt (Projektleitung durch Martin Arnold, Gruppenleiter Holztechnologie/Oberflächentechnologie). Als Industriepartner war die Firma Kälin & Co. AG, Hobelwerk und Holzfarben, Winterthur beteiligt. Die Finanzierung des Projektes erfolgte je zur Hälfte durch Eigenleistungen der Projektpartner und durch einen Beitrag aus dem Fonds zur Förderung der Wald- und Holzforschung.

Tabelle 1: Projektpartner - Funktion und Aufgaben

Partner	Funktion	Aufgaben
Empa, Abt. Holz, Dübendorf	- Gesuchsteller - Wissenschaftliche Projektleitung	- Planung und Durchführung der wissenschaftlichen Untersuchungen - Wissenschaftliche und finanzielle Berichterstattung
Kälin & Co. AG, Hobelwerk und Holzfarben, Winterthur	- Industriepartner	- Idee, Patent - Bereitstellung Rohmaterial (Rohhobler) - Oberflächenbearbeitung (Hobeln, Schleifen) - Industrielle Beschichtungsapplikation
Fonds zur Förderung der Wald- und Holz-forschung, Bern	- Förderstelle	- Projektbeurteilung, -bewilligung - Finanzierung

1.5 Terminologie

Für das in diesem Projekt untersuchte Hobelverfahren mit gezahnten Hobelmessern wird der Begriff 'Strukturhobeln' verwendet (siehe 1.2). Damit soll zum Ausdruck gebracht werden, dass mit diesem Verfahren strukturierte Oberflächen erzeugt werden.

Unter dem Begriff 'Fassadenschalung' wird im vorliegenden Zusammenhang ein industriell hergestelltes, fertig beschichtetes Vollholzprodukt zur Weiterverarbeitung durch einen Holzbauer verstanden.

Bezüglich Beschichtung werden bevorzugt die in den europäischen Normen EN 927-1 und EN 971-1 festgelegten Begriffe verwendet. In Tabelle 2 sind einige wichtige Begriffe aufgelistet.

Tabelle 2: Wichtige Begriffe zum Thema Beschichtung von Holz im Aussenbereich

Begriff	Synonyme	Bedeutung / Definition
Substrat	Untergrund	Trägermaterial für die Beschichtung (= Holz)
Beschichtungsstoff	Anstrichstoff, Lack	Oberbegriff für filmbildende Produkte in flüssiger, pasten- oder pulverförmiger Form
Beschichtung	Beschichtungssystem	Gesamtheit der auf einen Untergrund aufgetragenen Schichten aus Beschichtungsstoffen
Grundierung	Sperrschicht	erste, direkt auf den Untergrund aufgetragene Schicht eines Beschichtungssystems
Deckschicht	Schlussbeschichtung, dekorative Schicht	letzte Schicht eines Beschichtungssystems

2 Untersuchungsprogramm

Die Untersuchungen beinhalten die vergleichende Charakterisierung der Eigenschaften und der Leistungsfähigkeit von 32 Kombinationen von Oberflächenbearbeitung (8 Varianten), Beschichtung / Applikation (3 Varianten) und Holzart (Fichte, Kiefer).

Die Projektarbeiten wurden in 5 thematischen Arbeitspaketen (AP) durchgeführt (Tabelle 3). Die wissenschaftlichen Untersuchungen fanden dabei vorwiegend im AP 3 mit der Charakterisierung der rohen Holzoberfläche und deren Beschichtbarkeit, sowie im AP 4 mit der Erfassung der Leistungsmerkmale des beschichteten Holzes bezüglich Witterungsbeständigkeit und Haftfestigkeit statt.

Das Probenmaterial wurde unter industriellen Bedingungen bei der Firma Kälin produziert. Die wissenschaftlichen Untersuchungen erfolgten an der Empa.

Tabelle 3: Arbeitspakete und Methoden

Arbeitspaket	Inhalt	Methoden / Details	Partner
1 Grundlagen	Vorstudie (<i>Vorleistung</i>)	Licht- / Elektronenmikroskopie	Empa, Kälin
	Stand Forschung / Technik	Literaturstudie	
	Versuchsvarianten	Oberflächenbearbeitung, Beschichtung, Holzart	
2 Produktion Probenmaterial	Oberflächenbearbeitung	industriell produzierte Schalungsbretter (gemäss festgelegten Versuchsvarianten)	Kälin
	Beschichtung		
	Einzelproben für Versuche	Zuschnitt, Versiegelung Schnittkanten	Empa
3 Charakterisierung Holzoberflächen und Beschichtung	Oberflächenqualität	Licht- / Elektronenmikroskopie	Empa
	Topographie, Rauigkeit	Profilometer / Lasertriangulation	
	Benetzungsverhalten	Kontaktwinkel, Tropfenform	
	Beschichtungsaufbau	Licht- / Elektronenmikroskopie	
4 Leistungsmerkmale beschichtetes Holz	Witterungsbeständigkeit	natürliche und künstliche Bewitterung	Empa
	Haftfestigkeit	mechanischer Abreissversuch	
5 Projektleitung	Administration	administrative Projektabwicklung	Empa
	Datenauswertung, Berichterstattung	Projektsitzungen, Zwischen- und Schlussbericht	Empa, Kälin

Der zeitliche Ablauf des Projektes ist in Bild 3 dargestellt.

Bild 3: Zeitlicher Projektlauf

Arbeitspaket	2008						2009												
	7	8	9	10	11	12	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	
1 Literaturstudie, Versuchsplanung																			
2 Produktion Probenmaterial																			
3 Oberflächenqualität / Rauigkeit																			
4 Freibewitterungen (12 Monate)																			
5 Datenauswertung																			

2.1 Versuchsvarianten

Die Versuchsvarianten basieren auf der systematischen Kombination der drei Komponenten:

- Oberflächenbearbeitung
- Beschichtung / Applikation
- Holzart

Die Oberflächenbearbeitung erfolgte in 8 verschiedenen Varianten (Tabelle 4). Diese ermöglichen einen Vergleich von herkömmlich gehobelten und teilweise zusätzlich geschliffenen Holzoberflächen mit dem neuartigen Strukturhobeln. Zusätzlich wurde der Einfluss des Schärfezustandes der Werkzeuge durch die beiden Extreme von neuen respektive abgenutzten Hobelmessern und Schleifbändern einbezogen.

Tabelle 4: Varianten Oberflächenbearbeitung (die 3 wichtigsten Vergleichsvarianten sind grau hinterlegt)

Id	Hobeln		Schleifen		Vorschub- geschwindigkeit
	Typ	Zustand	Typ	Zustand	
OF1	Hobeln herkömmlich	neu ¹	ohne		35 m/min
OF2		abgenutzt ²			
OF3	Hobeln herkömmlich + Schleifen	neu ¹	Körnung 80	neu	
OF4		abgenutzt ²		abgenutzt ⁴	
OF5		neu ¹			
OF6		abgenutzt ²			
OF7	Strukturhobeln	neu ¹	ohne		22 m/min
OF8		abgenutzt ³			

¹ frisch geschärfte Hobelmesser

² abgenutzte Hobelmesser aus laufender Produktion (nach ca. 170'000 Lfm, nur Fichte/Tanne)

³ abgenutzte Hobelmesser aus laufender Produktion (nach ca. 40'000 Lfm, eingesetzt für Spezialsortimente und diverse Holzarten, daher ca. Faktor 2 bei Lfm im Vergleich zu OF2), auf separatem Hobelautomat

⁴ abgenutzte Schleifbänder aus früherer Produktion

Die 3 Beschichtungsvarianten basieren auf den beim Industriepartner üblicherweise verwendeten Beschichtungssystemen und Applikationsmethoden (Tabelle 5). Es wurden 2 verschiedene Grundierungen (lösemittelhaltig, wässrig) mit 2 Applikationsverfahren (Fluten-Walzen-Bürsten, Spritzen) aufgebracht. Die Deckschicht war bei allen Varianten identisch (wässrig, Spritzen). Für einen Teil der Untersuchungen (AP3) wurde auch unbeschichtetes Probenmaterial verwendet.

Tabelle 5: Varianten Beschichtung / Applikation

Id	Grundierung (Auftrag trocken ca. 35 g/m ²) Sicht- und Rückseite			Deckschicht (Auftrag trocken ca. 70 g/m ²) nur Sichtseite, gleich für alle Varianten		
	Typ	FK ¹	Applikation	Typ	FK ¹	Applikation
GR1	lösemittelhaltig ² (rot pigmentiert)	37%	FWB ⁴	wässrig (grau) ⁷	50%	Spritzen ⁶
GR2			Spritzen ⁵			
GR3	wässrig (rot pigmentiert) ³	52%	Spritzen ⁶			

¹ gemessener Feststoffgehalt

² Standard-Grundierung Firma Kälin

³ Spezialformulierung mit gleichem Pigment wie GR1 / GR2

⁴ maschinelles Fluten-Walzen-Bürsten

⁵ manuell mit Spritzpistole

⁶ maschinell im Spritzautomat

⁷ Standard-Decklack Firma Kälin

Die Untersuchungen wurden mit 2 Holzarten durchgeführt, wobei Fichte (**FI**) als Standard-Holzart mit allen 3 Beschichtungsvarianten kombiniert wurde (Tabelle 6). Kiefer (**KI**) wurde wegen seiner höheren Rohdichte und dem Gehalt an Inhaltsstoffen als zweite Holzart gewählt (Leistungstests nur mit Beschichtung GR1).

Insgesamt umfassten die Untersuchungen somit 32 Versuchsvarianten (Tabelle 6).

Tabelle 6: Übersicht Versuchsvarianten

Oberflächenbearbeitung	Beschichtung / Applikation					
	Holzart					
	GR1		GR2		GR3	
	FI	KI	FI	KI	FI	KI
OF1 - OF8	X	X	X	(nur Benetzung)	X	(nur Benetzung)

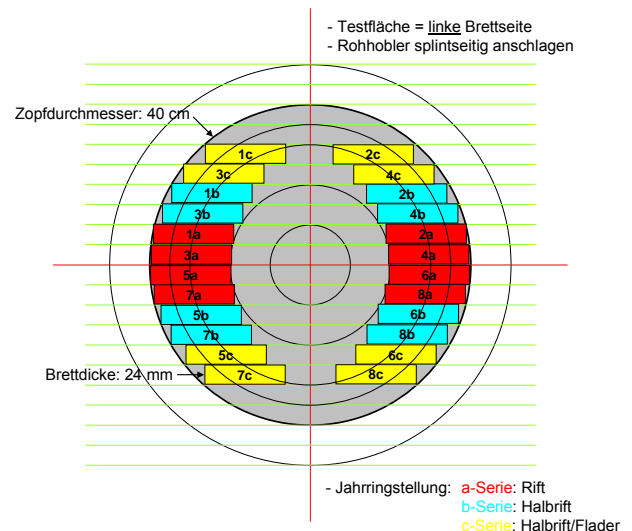
2.2 Probenmaterial

2.2.1 Rohhobler

Um für den Vergleich der Oberflächen- und Beschichtungsvarianten möglichst vergleichbare Proben bezüglich Holzqualität und Jahrringstellung zu erhalten, wurden die Rohhobler systematisch aus dem Stammquerschnitt speziell eingeschnittener Rundholzstämmen entnommen (Bild 4).

Im Auftrag der Firma Kälin wurden in einer Sägerei vier 5 m-Stämme (3 FI, 1 KI) mit einem Zopfdurchmesser von mindestens 40 cm in 24 mm Klotzbretter eingeschnitten (Tabelle 7). Daraus wurden je 3 x 8 Rohhobler (entsprechend 3 Jahrringstellungen und 8 Varianten Oberflächenbearbeitung) von 5 m Länge nach einem fixen Muster aus jeweils 4 benachbarten respektive aus dem gleichen Stammquerschnittsbereich stammenden Klotzbrettern gesägt (Bild 4). Damit wurde sichergestellt, dass in den verschiedenen Versuchsvarianten der gleiche Mix von Jahrringstellungen (Rift, Halbrift, Halbrift-Tangential) enthalten war. Alle Rohhobler wurden entsprechend ihrer Herkunft bezüglich Stamm und Querschnittsbereich beschriftet und getrocknet (Bild 5).

Bild 4: Einschnittschema Rohhobler.

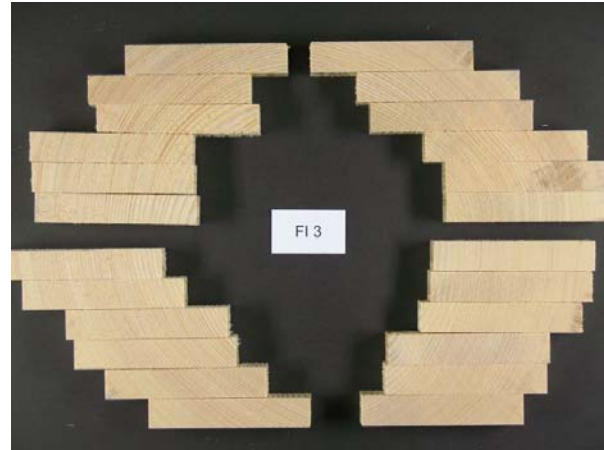


Die Proben der Fichten-Stämme 1 und 2 wiesen eine ähnliche, eher geringe Rohdichte auf, während die Dichte beim Stamm 3 und bei den Kiefernproben relativ hoch war (Tabelle 7). Infolge der systematischen Zuweisung der Proben zu den verschiedenen Versuchsvarianten war die Rohdichte in den Versuchskollektiven praktisch identisch. Wegen der für Hobelwaren untypisch grossen Stammdurchmesser wiesen die Rohhobler eine insgesamt geringere Astigkeit als üblich auf.

Tabelle 7: Details Rundholz / Rohhobler

Id	Holzart	Details			
		Stamm	Dimensionen	Qualität	Rohdichte [g/cm ³]
FI	Fichte (einheim.)	1	Länge: 5 m,	Bläue / Rotstreif, wenig Äste	0.41
		2	mind. 40 cm		
		3	Zopfdurch-	Rotstreif, mittlere Astigkeit	0.51
KI	Kiefer (Föhre)	4	messer	astfrei, vornehmlich Kernholz, stark harzhaltig	0.63

Bild 5: Frisch eingeschnittene Rohhobler (links) und Brettquerschnitte mit rekonstruierter Lage im Stammquerschnitt (rechts).



2.2.2 Hobeln / Schleifen

Die 500 Laufmeter Rohhobler wurden im Hobelwerk der Firma Kälin auf deren Vierseiten-Hobelautomaten gehobelt und geschliffen (Sollquerschnitt 100 x 18 mm, vollkantig). Die spezifische Bearbeitung gemäss den festgelegten Versuchsvarianten (siehe Tabelle 4) erfolgte jeweils nur auf der Sichtseite (linke, d.h. splintseitige Brettseite) mit einer Spanstärke von 0.3 - 0.5 mm. Dazu wurde jeweils der Haupt-Messerkopf (Rotaplan, 10 Messer) mit den entsprechenden Messern bestückt respektive ausgewechselt sowie das Schleifaggregat durch Auswechseln respektive Abdecken des Schleifbandes angepasst (Bilder 6 a und b). Die Rückseite und die Schmalseiten wurden mit standardmässigen Messerköpfen gehobelt.

Bild 6a: Hobelautomat mit Spindel für den Haupt-Messerkopf (links) und Rotaplan-Messerkopf bestückt mit Struktur-Hobelmessern (Schärfe-Zustand: abgenutzt für OF8, rechts).



Bild 6b: Schleifaggregat im Hobelautomat mit eingesetztem Schleifband (OF3 - OF6, links) und Abdeckung zur Verhinderung des Schleifens (OF1, OF2, OF7, rechts).



2.2.3 Beschichtung

Vor der Beschichtung wurden von den 5 m langen gehobelten Schalungsbrettern 2 m für die Verwendung als unbeschichtetes Probenmaterial abgetrennt (siehe 2.2.4). Die verbleibenden 300 Laufmeter wurden danach gemäss den festgelegten Beschichtungsvarianten (siehe Tabelle 5) durch den Industriepartner Kälin beschichtet (Bild 7). Die Probenbretter der 3 Fichtenstämmen wurden dabei systematisch auf die 3 Beschichtungsvarianten verteilt. Die Beschichtung erfolgte gestaffelt innerhalb einer Woche nach der Oberflächenbearbeitung.

Bild 7: Auftrag der Grundierungen im Flut-Walz-Bürst-Verfahren (GR1, links) und im Spritzautomat (GR3, rechts)



2.2.4 Einzelproben für Untersuchungen

Das gesamte Probenmaterial wurde danach zur weiteren Untersuchung an die Empa gebracht. Aus den unbeschichteten und beschichteten Schalungsbrettern wurden gemäss Probenplan (Bild 8) rund 1400 Einzelproben für die weiteren Untersuchungen zugeschnitten (Bild 9). Zur besseren Ausnutzung des verfügbaren Probenmaterials wurde die Reihenfolge der Entnahme innerhalb der Schalungsbretter variabel gehalten. Besondere Beachtung beim Zuschnitt wurde dem Vorhandensein von Ästen geschenkt, da diese je nach Untersuchung notwendig oder unerwünscht waren. Vor den weiteren Untersuchungen wurden die Proben im Klimaraum bei 20°C/65% r.F. gelagert (Bild 9 rechts).

Durch das gewählte System von axialen Folgeproben ist eine optimale Vergleichbarkeit zwischen unbeschichteten und beschichteten Oberflächen sowie zwischen den verschiedenen Untersuchungs-Kenngrössen innerhalb eines Schalungsbrettes gegeben. Pro Versuchsvariante standen 3 Wiederholungsproben mit unterschiedlicher Jahringstellung zur Verfügung (siehe 2.2.1).

Bild 8: Zuschnittschema Einzelproben (bezüglich Probenverwendung siehe 2.3)

Zustand	Details Einzelproben								
unbeschichtet	Tests	Benetzungsverhalten (Kontaktwinkel)	Oberflächenstruktur (Morphologie)		Oberflächenqualität (Mikroskopie)		Dichte (JR-Bild)	Breite und Länge nicht masstäblich gezeichnet!	
	Details								
	Äste ¹⁾	Nein	Nein	Ja ²⁾	Nein	Ja ³⁾	Nein		
	Breite [mm]	*	*	*	*	*	*		
2000	Länge [mm]	250	100	100	20	20	20		
beschichtet	Tests	Freibewitterung	QUV		Haftfestigkeit (Adh.)			Beschichtung (Mikroskopie)	Referenz
	Details		(Adh. trock)	(Adh. nass)	trocken	nass	trocken		
	Äste ¹⁾	Ja	Nein	Nein	Nein	Nein	Ja ²⁾	Nein	Nein
	Breite [mm]	*	74	74	*	*	*	*	*
3000	Länge [mm]	360	150	150	150	150	150	20	200

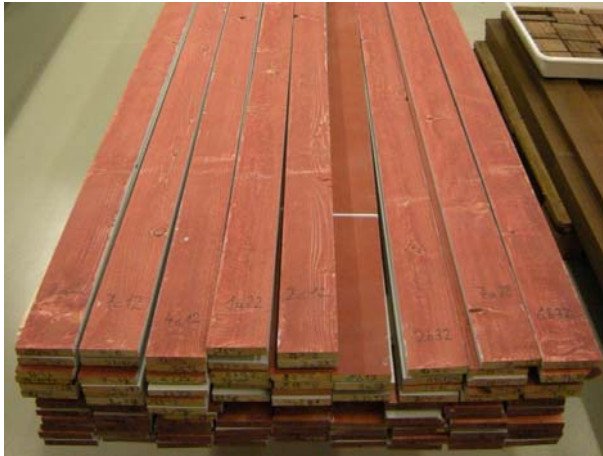
* = Breite original belassen

¹⁾ Äste sind nur bei FI vorhanden

²⁾ soviele Proben wie möglich schneiden (alle brauchbaren Äste, ca. >10mm)

³⁾ falls genügend Äste vorhanden, sonst Abschnitt ohne Äste

Bild 9: Beschriftete Rückseiten der beschichteten Schalungsbretter (links) und Einzelproben bei der Klimatisierung im Klimaraum (rechts).



2.3 Untersuchungsmethoden

Das Untersuchungsprogramm wurde gemäss den Inhalten der Arbeitspakete 3 und 4 definiert und gliedert sich dementsprechend in die zwei Bereiche 'Charakterisierung der Holzoberflächen' und 'Leistungsmerkmale beschichtetes Holz' (Tabelle 8). Details zu den einzelnen Methoden werden in den nachfolgenden Abschnitten erläutert.

Wo nicht anders vermerkt, wurden die Prüfungen an klimatisierten Proben entsprechend einer Holzfeuchte von 12% durchgeführt (siehe 2.2.4). Die Untersuchungsmethoden stützen sich wo möglich auf auch in der Schweiz gültige EN oder ISO-Normen ab. Die genauen Referenzen zu den verwendeten Normen sind am Schluss dieses Berichtes aufgeführt.

Tabelle 8: Übersicht Untersuchungsprogramm

Arbeitspaket		Oberfläche	Parameter	Methoden / Details
3	Charakterisierung Holzoberflächen und Beschichtung	unbeschichtet	Oberflächenqualität	Licht- / Elektronenmikroskopie: - Erscheinungsbild Oberfläche (inkl. Äste) - Erfassung Schädigung Zellstruktur
			Topographie, Rauigkeit	Profilometer mit Lasertriangulation: - Oberflächenprofil, Rauigkeitskenngrossen
			Benetzungsverhalten	Kontaktwinkel, Verlaufsform Tropfen (Wasser / Grundierungen)
4	Leistungsmerkmale beschichtetes Holz	beschichtet	Beschichtungsaufbau	Licht- / Elektronenmikroskopie: - Erscheinungsbild Oberfläche - Schichtaufbau/-dicke (ISO 2808, Methode 6A)
			Witterungsbeständigkeit	Bewitterungsversuche: - natürlich (1 Jahr, EN 927-3) - künstlich (1000h, EN 927-6)
			Hafffestigkeit	mechanischer Abreissversuch (ISO 4624): - Abreissfestigkeit, Bruchart - trocken / nass, unbewittert / bewittert

2.3.1 Charakterisierung Holzoberfläche und Beschichtung

Das Ziel dieses ersten Untersuchungsblocks ist die morphologische Beschreibung der unbeschichteten und beschichteten Oberflächen. Aufgrund der Heterogenität einer Holzoberfläche ist die Auswahl des gewählten Oberflächenbereiches für Fotos oder Messungen immer zufallsbehaftet. Eine entsprechende Erhöhung der Anzahl der durchzuführenden Beobachtungen für eine statistische Erfassung der Variabilität ist wegen des grossen Erfassungsaufwandes jedoch meist nicht möglich.

2.3.1.1 Struktur Holzoberfläche

Die Struktur der Holzoberflächen wurde zum einen visuell (mikroskopisch) und zum anderen anhand eines gemessenen Oberflächenprofils beurteilt. Die Beobachtungen und Messungen erfolgten sowohl im störungsfreien Holz als auch auf Ästen an den dafür vorgesehenen Brettabschnitten (siehe Bild 8).

Das visuelle Erscheinungsbild der Holzoberflächen mit unterschiedlicher Oberflächenbearbeitung wurde ohne weitere Präparation an den zugeschnittenen Brettabschnitten mit einem Stereomikroskop (Zeiss Stemi SV11) erfasst. Um die vorhandenen Strukturen besser sichtbar zu machen, wurden die Oberflächen mittels Seitenlicht (flach einfallendes Auflicht) beleuchtet. Der dabei erzeugte Schatten lässt die durch die Oberflächenbearbeitung entstandenen Strukturen gut erkennen. Die fotografische Dokumentation von ausgewählten Oberflächenausschnitten erfolgte mit einer angeschlossenen Videokamera.

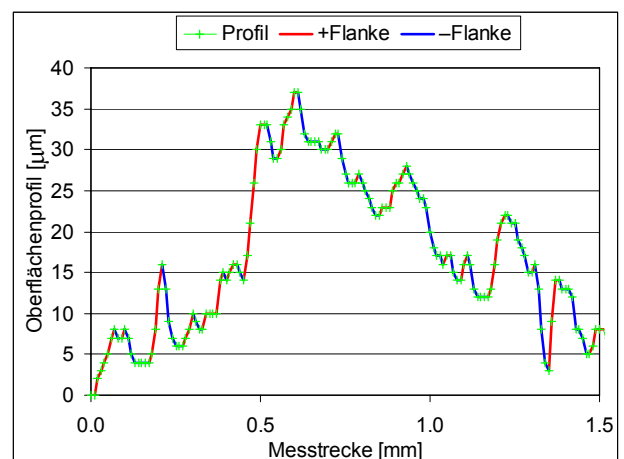
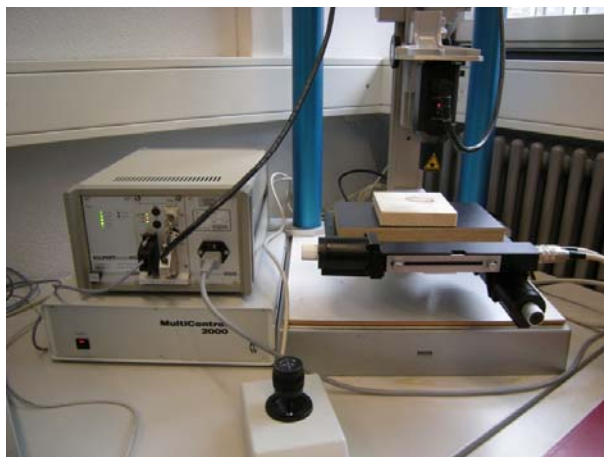
Die Oberflächen wurden zusätzlich auch im Rasterelektronenmikroskop (REM) untersucht (Jeol JSM 6300). Für die Abbildung von stark strukturierten Oberflächen ist diese Methode aufgrund der grossen Tiefenschärfe besonders geeignet. Dazu wurden kleinere Proben mit ca. 5 mm² Fläche aus der Oberfläche heraus präpariert, auf einem Probenhalter fixiert, im Vakuumschrank getrocknet und abschliessend mit einer 7 nm dünnen Platinschicht bedampft. Wiederum wurden ausgewählte Oberflächenausschnitte fotografisch dokumentiert.

Die Erfassung von oberflächennahen Zellschädigungen erfolgte an den Querschnitten von beschichteten Proben (siehe 2.3.1.3). Gleichzeitig mit der Erfassung der Trockenschichtdicke wurde das Ausmass der Zellschädigungen über die gesamte Brettbreite auf einer dreistufigen Skala bewertet (0: keine, 1: leichte, 2: starke Zellschäden).

Messtechnisch wird die Topographie resp. die Rauigkeit von Oberflächen anhand von Höhenprofilen über eine definierte Messtrecke erfasst. Für die vorliegenden Untersuchungen wurden die Oberflächenprofile quer zur Faserrichtung berührungslos mit einem Laser-Triangulationssensor vermessen (OTM2, Wolf&Beck, Bild 10). Pro Probe wurde jeweils eine zufällig ausgewählte, 10 mm lange Messtrecke erfasst (5 mm bei Ästen). Die vertikale Messwertauflösung beträgt 1 µm, die Rasterweite in der Oberflächen-Ebene 10 µm.

Der Vergleich der Oberflächenrauigkeit erfolgte sowohl grafisch anhand der Profilkurven als auch anhand eines berechneten Rauigkeitswertes. In den normierten Auswerteverfahren für die Oberflächenrauigkeit sind dazu Profilfilter vorgesehen, welche das Oberflächenprofil in eine Welligkeit und die eigentliche Rauigkeit trennt. Diese Profilfilter liefern jedoch bei Holzoberflächen in der Regel nicht optimale Ergebnisse, da die 'Welligkeit' (Brettverformungen, Jahrringstruktur) meist sehr unregelmässig ist und durch die 'regelmässigen' Filter nur sehr vereinfacht abgebildet werden kann. Deshalb wurde im vorliegenden Fall ein spezieller Rauigkeitswert berechnet, welcher direkt aus dem ursprünglichen Oberflächenprofil abgeleitet wird und primär die 'Feinrauigkeit' erfasst (d.h. Porenstruktur und Bearbeitungsspuren auf Zellniveau). Dazu wurden im gemessenen Oberflächenprofil alle aufeinanderfolgenden Höhendifferenzen mit gleichem Vorzeichen zu einer 'Objektflanke' zusammengefasst (Bild 10 rechts). Als Rauigkeitskennwert wurde der Mittelwert aus allen absoluten Höhendifferenzen dieser Objektflanken über die Messtrecke berechnet. Dieser Kennwert entspricht in der Definition und der Grössenordnung in etwa dem häufig verwendeten Mittenrauhwert R_a .

Bild 10: Messaufbau mit Laser-Triangulationssensor und gesteuertem X-Y-Tisch (links) sowie Ausschnitt eines Oberflächenprofils mit eingezeichneten 'Objektflanken' (rechts)

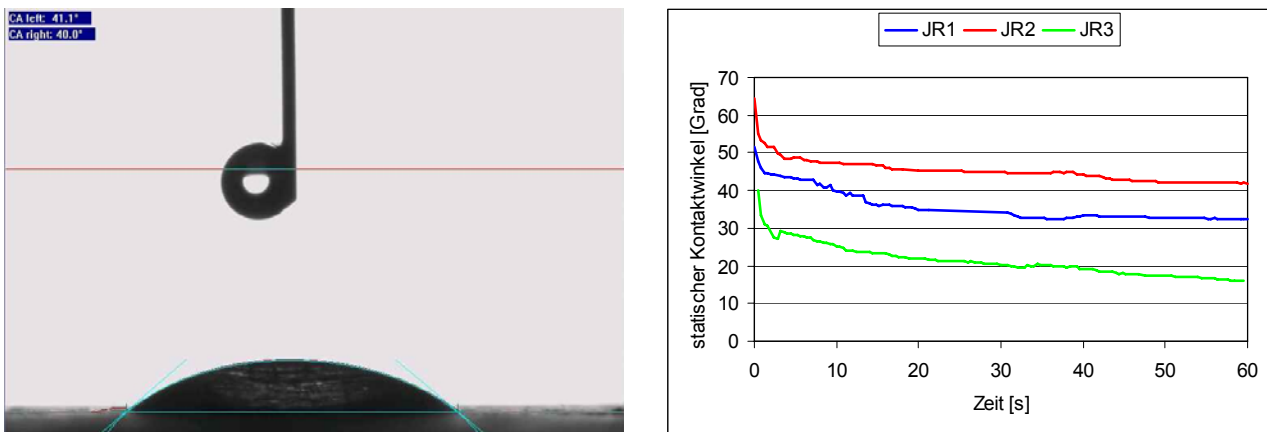


2.3.1.2 Benetzungsverhalten Holzoberfläche

Das Benetzungsverhalten einer Holzoberfläche wird als Indikator für die Filmbildung und das Eindringen von Beschichtungsstoffen angesehen. Im vorliegenden Projekt wurde das Benetzungsverhalten anhand des Kontaktwinkels zwischen der Oberfläche und einem aufgetragenen Tropfen (Wasser oder Grundierung) sowie anhand der Verlaufsform des Tropfens auf der Holzoberfläche charakterisiert. Gemessen wurde in ausgewählten Jahrringen auf den rohen Holzoberflächen (ohne Strukturstörungen, entsprechend der gängigen Praxis ohne Entfernung des Schleifstaubes) in klimatisiertem Zustand (siehe 2.2.4).

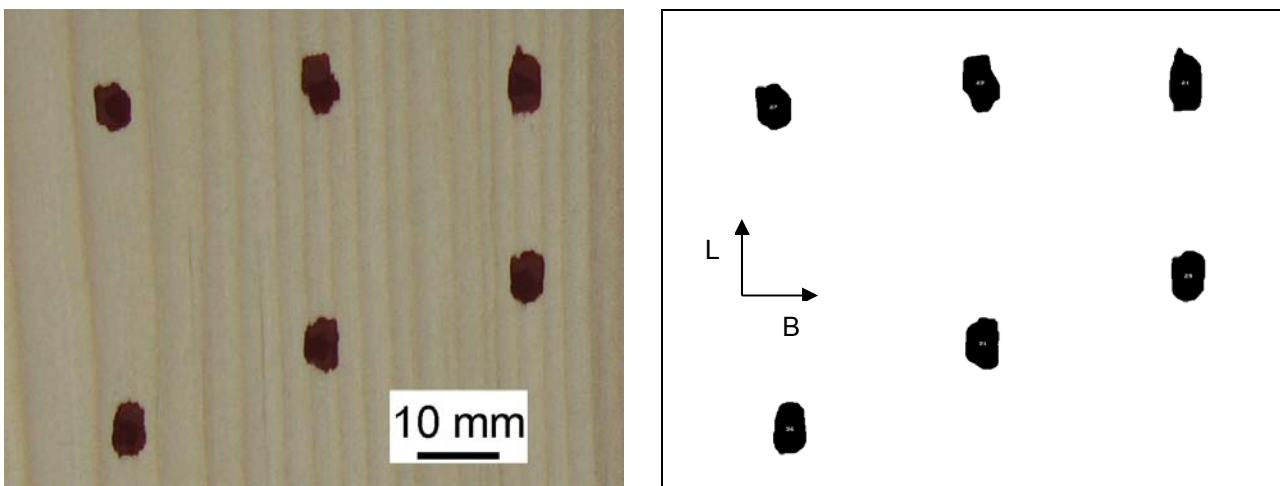
Die Kontaktwinkelmessungen erfolgten nach der statischen Sessile-Drop-Methode an kleinen Tropfen (5.5 µl bei Wasser und bei Grundierung GR3, 5.0 µl bei Grundierung GR1/2), welche via eine Dosierspritze auf die Prüfoberfläche aufgebracht und über eine angeschlossene Videokamera während einer definierten Messzeit gefilmt wurden (dataphysics SCA 20). Die optischen Daten wurden mit der integrierten Software ausgewertet, wobei zur Tropfenkonturerkennung (in Faserrichtung des Holzes) das Ellipsen-Fitting gewählt wurde (Bild 11). An jeweils 3 Tropfen pro Probe wurde so der Verlauf des Kontaktwinkels für Wasser und die 2 Grundierungen (GR1/2 respektive GR3, siehe Tabelle 5) über eine Messzeit von 60 s erfasst. Für die weitere Auswertung wurde der Kontaktwinkel 1 s nach der Tropfen-Beaufschlagung verwendet.

Bild 11: Kontaktwinkelmessung an einem Wassertropfen 1s nach Auftreffen auf die Oberfläche (links) und Verlauf des Kontaktwinkels bei 3 Jahrringen auf einer gehobelten Oberfläche (rechts)



Als weiteres Kriterium für das Benetzungsverhalten der Holzoberflächen wurde das Ausbreitungsverhalten anhand der Form von (teilweise auch eingedrunenen) Tropfen der rot pigmentierten Grundierungen erfasst. Dazu wurden die für die Kontaktwinkelmessung aufgetragenen Tropfen (je 6 pro Probe) nach vollständiger Trocknung fotografiert und bildanalytisch ausgemessen (Bild 12). Als charakteristisches Mass für die Tropfenform wurde das Verhältnis von Tropfenlänge zu Tropfenbreite (Formfaktor L/B) berechnet.

Bild 12: Tropfenformen mit Grundierung GR1/2 nach Spreitung respektive Eindringung (links) und entsprechendes digitalisiertes Schwarz-Weiss-Bild für die bildanalytischen Auswertung (rechts)



2.3.1.3 Beschichtung

Das visuelle Erscheinungsbild der beschichteten Oberflächen wurde gleich wie bei den unbeschichteten Holzoberflächen sowohl im Lichtmikroskop als auch im Rasterelektronenmikroskop untersucht (siehe 2.3.1.1).

Die Bestimmung der Trockenschichtdicke erfolgte in Anlehnung an ISO 2808 (Verfahren 6A) mit einem Lichtmikroskop im Auflichtmodus (20er Objektiv) an mit einer Rasierklinge überschrittenen Brettquerschnitten. Die Schichtdicke wurde via integriertem Masstab im Okular an 10 Stellen verteilt über die gesamte Breite der Sichtfläche gemessen (Auflösung: 5 µm). Die Schichtdicke ist dabei definiert als die Schicht auf (oberhalb) der Holzoberfläche (EN 927-3), d.h. die in die Holzstruktur eingedrungene Beschichtung wird nicht einbezogen. Wo erkennbar, wurden die Schichtdicken von Grundierung und Deckschicht separat erfasst.

Gleichzeitig wurde der Beschichtungsaufbau und die Schäden an den obersten Zellreihen beurteilt sowie entsprechende Auffälligkeiten (z.B. variable Schichtdicken, Blasen) fotografisch festgehalten.

2.3.2 Leistungsmerkmale beschichtetes Holz

Das Ziel des zweiten Untersuchungsblocks ist die Erfassung von möglichen Unterschieden bei den Leistungsmerkmalen des beschichteten Holzes als Folge des veränderten Zusammenwirkens der drei Systemkomponenten Trägermaterial (Holz), Beschichtungsstoff und Applikation. Dazu wurden als umfassende Leistungstests künstliche und natürliche Bewitterungsversuche durchgeführt. Da durch die verschiedene Oberflächenbearbeitung primär die Grenzschicht Holz-Beschichtung beeinflusst wird, wurde zusätzlich die Haftfestigkeit der Beschichtung als besonders wichtige Eigenschaft separat untersucht.

2.3.2.1 Witterungsbeständigkeit

Die Witterungsbeständigkeit der beschichteten Probenbretter wurde anhand künstlicher und natürlicher Bewitterungsversuche gemäss EN 927 untersucht (Tabelle 9). Die Bewitterungsversuche bezweckten dabei nicht in erster Linie die Überprüfung der Witterungsbeständigkeit der verwendeten Beschichtungssysteme, sondern die Erkennung von generellen Unterschieden im Witterungsverhalten aufgrund der verschiedenen mechanischen Bearbeitung der Holzoberfläche.

Tabelle 9: Übersicht Bewitterungsmethoden

Bewitterungsart	Details	Beurteilung	
natürlich	Freibewitterung gemäss EN 937-3 45°, Südexposition, Bewitterungsgelände Empa, Dübendorf Dauer: 1 Jahr, 24.10.08 - 20.10.09	- Gesamteindruck (ISO 4628-1) - Rissbildung (ISO 4628-4) - Abblätterung (ISO 4628-5) - Schimmelbildung (nur natürliche Bewitterung)	visuelle Beurteilung auf Skala 0 (keine Veränderung) bis 5 (sehr starke Veränd.) (gemäss Anweisungen in EN 927-3/-6)
künstlich	gemäss EN 927-6 Gerätetyp: QUV/se/spray (Q-Panel, USA), Fluoreszenz-UV-Lampen (UVA 340) und Wasser (Kondensation und Spray) Dauer: 1000 h	- <i>Haftfestigkeit (mechanischer Abreissversuch ISO 4624, Gitterschnitt ISO 2409)</i>	

Da insbesondere das Witterungsverhalten respektive die Beschichtungshaftung im Astbereich von Interesse sind, wurden für die Freibewitterung gezielt Probenbretter mit Ästen bereitgestellt (siehe Bild 8). Um eine stirnseitige kapillare Wasseraufnahme zu verhindern, wurden die Schnittkanten mit einer weitgehend feuchteundurchlässigen 2K-PUR-Lackfarbe versiegelt. Wie bei den anderen Versuchen, standen pro Versuchsvariante 3 Wiederholungsproben mit unterschiedlicher Jahrringstellung zur Verfügung.

Die natürliche Bewitterung (Freibewitterung) erfolgte in Anlehnung an EN 927-3 auf einer gegen Süden ausgerichteten 45°-Ebene auf dem Freibewitterungsgelände der Empa in Dübendorf (Bild 13, links). In Abweichung zur Norm waren die Längsseiten der Proben auf den Bewitterungsgestellen aber nicht horizontal, sondern vertikal ausgerichtet. Die Freibewitterung dauerte 1 Jahr von Oktober 2008 bis Oktober 2009.

Die künstliche Bewitterung erfolgte während 1000 h gemäss EN 927-6 durch eine alternierende Beanspruchung mit Fluoreszenz-UV-Licht und Wasser (Kondensation und Spray) nach einem speziell für Holzbeschichtungen optimierten Bewitterungszyklus (Bild 13, rechts).

Die Beurteilung des Witterungsverhaltens wurde aufgrund der spezifischen Fragestellung auf ausgewählte Kriterien beschränkt, namentlich Gesamteindruck (Allgemeines Aussehen), Rissbildung und Abblätterung. Diese visuellen Beurteilungen basieren auf einer qualitativen Beschreibung des Ausmasses der Veränderung auf einer Skala von 0 (keine Veränderung) bis 5 (sehr starke Veränderung). Der Probenzustand nach Bewitterung wurde zusätzlich fotografisch dokumentiert. Bei der Beurteilung des Witterungsverhaltens wurden die Astbereiche separat erfasst. Ein Vergleich der Schimmelbildung (oberflächlicher Pilzbewuchs) war nur bei natürlicher Bewitterung möglich. Die Haftfestigkeit nach Bewitterung wurde im Rahmen der spezifischen Untersuchungen erfasst (siehe 2.3.2.2).

Bild 13: Natürliche Freibewitterung (links) und künstlicher Bewitterungsversuch mit QUV (rechts)



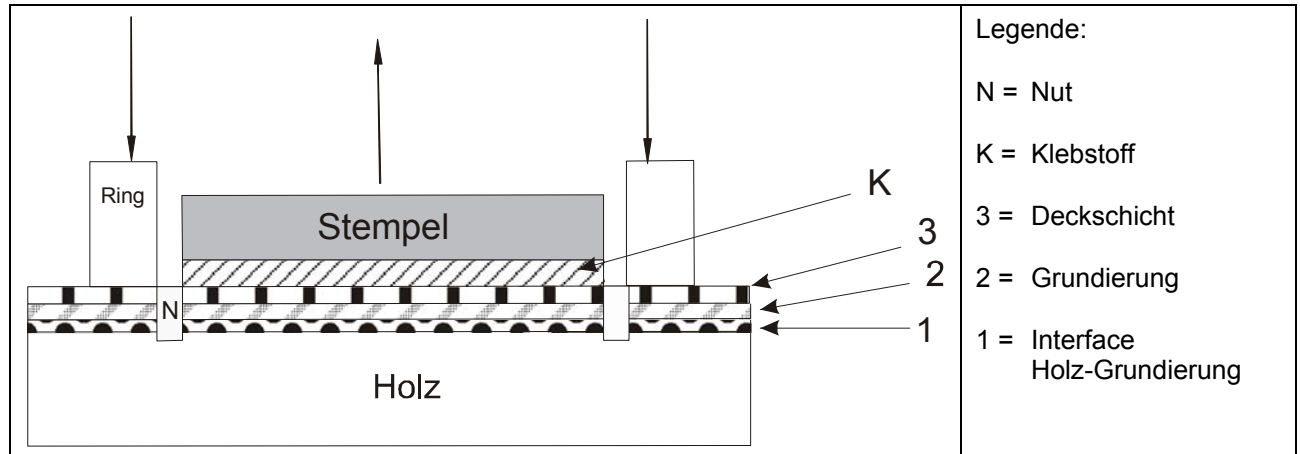
2.3.2.2 Haftfestigkeit

Die Prüfung der Haftfestigkeit der Beschichtungen erfolgte primär mit einem mechanischen Abreissversuch. Gemäss den Normvorgaben zur Beurteilung der Witterungsbeständigkeit wurde bei den Freibewitterungsproben alternativ eine Gitterschnittprüfung durchgeführt

Der mechanische Abreissversuch gemäss ISO 4624 ergibt ein quantitatives Mass für die Haftfestigkeit. Dabei werden auf die Beschichtung aufgeklebte metallische Prüfstempel mit einem Zugprüfgerät abgezogen und sowohl die Abhebefestigkeit als auch die Art und Lage des Bruches (Bruch im Holz, zwischen Holz und Grundierung, innerhalb Beschichtung) erfasst. Um insbesondere die Nasshaftung der Beschichtung zu beurteilen, wurde in Ergänzung zur Normvorschrift die Prüfung nicht nur im trockenen Zustand durchgeführt, sondern auch nach einer vorgängigen Befeuchtung des Interface-Bereiches Holz-Beschichtung. Dazu wurden zwei parallele Probensätze verwendet.

Pro Probe wurden 2 Prüfstempel (Ø20 mm) mit einem Spezialklebstoff auf die Beschichtung geklebt. Nach dem Aushärten des Klebstoffes wurde mit einem speziellen Fräskopf eine kreisförmige Nut entlang des Umfanges des Prüfstempels ausgefräst und damit der überschüssige Klebstoff und die Beschichtung bis ins Substrat hinein durchgetrennt. Für die Trockenprüfung wurde eine Schnitttiefe von 0.2 mm und für die Nassprüfung eine Tiefe von 1.5 mm gewählt. Die tiefere umlaufende Nut wurde für die Nassprüfung zur vorgängigen Befeuchtung des Interface-Bereiches Holz-Beschichtung mit Wasser gefüllt (Einwirkungszeit: 4h). Zur Sichtbarmachung der Unterfeuchtung der Beschichtung wurde das Wasser eingefärbt (Neolan Glaucin E-A acid-blue 9). Die Prüfstempel wurden danach auf einer Universalprüfmaschine (Zwick) mit einer gleichmässigen Geschwindigkeit (1mm/min) senkrecht zur Probenoberfläche abgezogen. Die Kräfteinleitung erfolgte über ein Kugelgelenk. Um das Auftreten eines Biegemoments in der Prüffläche zu verhindern, wurde der Prüfstempel gegen einen Ring gezogen (Bild 14).

Bild 14: Schematische Darstellung (Querschnitt) des mechanischen Abreissversuches gemäss ISO 4624



Die Gitterschnittprüfung gemäss ISO 2409 ist ein Prüfverfahren zur Abschätzung des Widerstandes einer Beschichtung gegen Trennung vom Untergrund. Sie dient als einfache Prüfung zur Aufdeckung von schwerwiegenden Haftungsproblemen und ist Teil des Beurteilungsprogrammes bei den Bewitterungsversuchen. Die Prüfung erfolgte mit einem ZCC 2080 Zehntner Gitterschnitt-Prüfer im trockenen Zustand (20°C/65% r.F.). Mit den scharfen Klingen des Mehrschneidergerätes wurde dazu ein bis zum Untergrund reichendes Gittermuster (im 45°-Winkel zur Faserrichtung) in die Beschichtung geschnitten. Der Abstand der 6 parallelen Schnitte voneinander betrug 2 mm. Anschließend wurde ein 25 mm breiter Klebeband (Haftfestigkeit von 10±1 N) mit leichtem Druck auf das Gittermuster geklebt und gleichmässig in Faserrichtung abgezogen. Bewertet wurde (im Vergleich mit entsprechenden Bildvorlagen in der Norm) die abgelöste Anzahl von Beschichtungsquadraten auf einer Skala von 0 bis 5, wobei die Beurteilung '0' keine Ablösungen, der Wert '5' grossflächige Ablösungen bedeutet.

3 Ergebnisse

In einem ersten Schritt werden nachfolgend Charakteristik und Leistungsmerkmale der Oberflächenbearbeitungs-Varianten separat bezüglich verschiedener Aspekte dargestellt. Ein Teil der Darstellungen ist auf die wichtigsten Oberflächenvarianten OF1, OF3 und OF7 beschränkt. In einem zweiten Schritt werden dann Zusammenhänge und Wechselwirkungen zwischen einzelnen Aspekten näher untersucht.

Die Beurteilung erfolgt in erster Linie anhand von mikroskopischen Aufnahmen und grafischen Messwert-Darstellungen von Unterschieden zwischen den verschiedenen Oberflächenbearbeitungs-Varianten. Bei metrisch skalierten Messdaten wurde teilweise zusätzlich varianzanalytisch eine Überprüfung der statistischen Signifikanz von Unterschieden mittels multiplen Mittelwertsvergleichen (Fisher's least significant difference) durchgeführt. Bei den ordinal skalierten visuellen Beurteilungen wurde aufgrund der fehlenden Normalverteilung auf detaillierte statistische Mittelwertsvergleiche verzichtet.

Neben der jeweiligen Bearbeitungsmethode haben natürlich auch verschiedene Holz- respektive Wuchseigenschaften (Dichte, Faserverlauf, Jahrringbreite) einen grossen Einfluss auf die Qualität der bearbeiteten Holzoberfläche. Um den diesbezüglichen Einfluss auf den Vergleich des Oberflächenbearbeitungs-Effektes zu minimieren, wurden wie bereits früher erläutert, die Rohhobler speziell für diese Versuche eingeschnitten und nach einem systematischen Schema aus dem Stammquerschnitt entnommen (siehe 2.2.1). Damit wurde erreicht, dass das Probenmaterial in den verschiedenen Versuchsvarianten bezüglich Holzqualität und Jahrringstellung sehr ähnlich zusammengesetzt und daher gut vergleichbar ist. Vereinzelt waren jedoch leichter Buchs, Bläue und Rotstreif vorhanden.

Die Untersuchungen konzentrierten sich auf ausgewählte Bereiche auf der planen Sichtfläche ohne wesentliche Strukturstörungen. Eine entsprechende Untersuchung der Effekte im Astbereich war nur beschränkt möglich, da die für den Einschnitt der Rohhobler verwendeten Rundholzstämmen eine insgesamt geringe Astigkeit aufwiesen. Die Anzahl der Proben mit Ästen war dadurch beschränkt und die vorhandenen Äste wurden prioritär für Bewitterungsversuche verwendet. Zudem ist die Vergleichbarkeit von Ästen aufgrund ihrer sehr unterschiedlichen Ausprägung generell eingeschränkt.

3.1 Charakterisierung Holzoberfläche und Beschichtung

Der erste Untersuchungsblock umfasst die morphologische Beschreibung der unbeschichteten und beschichteten Oberflächen.

3.1.1 Struktur Holzoberfläche

Die verschiedenen Bearbeitungsvarianten führen zu makro- und mikroskopisch gut erkennbaren Unterschieden im Erscheinungsbild der Holzoberflächen. Ausgewählte Beispiele von unbeschichteten Holzoberflächen unter dem Lichtmikroskop sind für Fichte in Bild 15 und für Kiefer in Bild 16 zusammengestellt. Oberflächen von Fichtenproben im Rasterelektronenmikroskop (REM) sind in Bild 17 dargestellt. Schliesslich sind in Bild 18 entsprechende lichtmikroskopische Aufnahmen von Ästen enthalten.

Bewertung:

- Zwischen den lediglich gehobelten (OF1-2, OF7-8) und den geschliffenen Oberflächen (OF3-6) besteht ein augenfälliger Unterschied im visuellen Erscheinungsbild. Die mit neuen Messern lediglich gehobelten Oberflächen (OF1, OF7) wirken relativ kompakt und glatt und lassen verschiedene holzanatomische Details erkennen (angeschnittene Zellen, Holzstrahlen, Hoftüpfel). Demgegenüber sind die geschliffenen Oberflächen durch viele lose Holzfasern geprägt und lassen kaum mehr Details der darunterliegenden Holzstruktur erkennen (Bilder 15-18).
- Der (Un-)Schärfeszustand der eingesetzten Werkzeuge zeigt sich vor allem bei den lediglich gehobelten Varianten und im Astbereich. Bei abgenutzten Hobelmessern (OF2, OF8) sind erwartungsgemäss vermehrt Faserausrisse zu beobachten. Unterschiede infolge des Schärfeszustandes der Schleifbänder sind weniger offensichtlich.

Bild 15: Unbeschichtete Holzoberflächen (Fichte1, Rift) bei 8 Bearbeitungsvarianten (Lichtmikroskop)

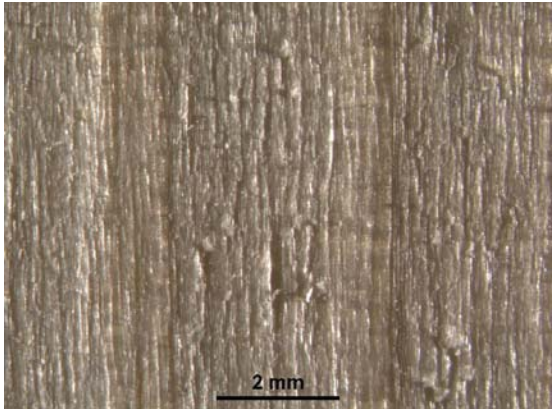
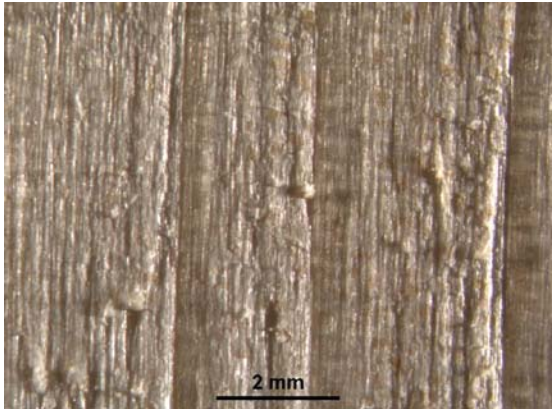
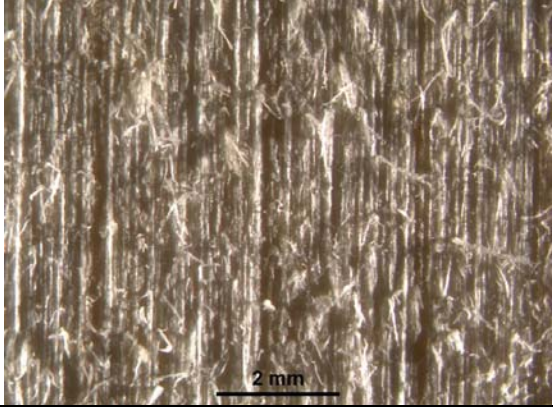
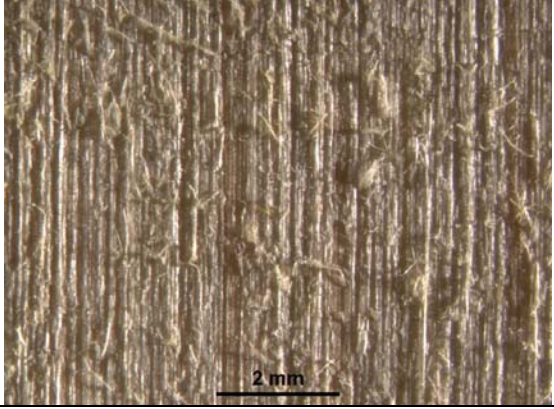
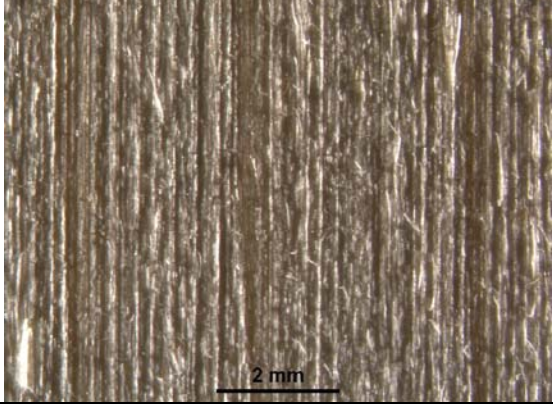
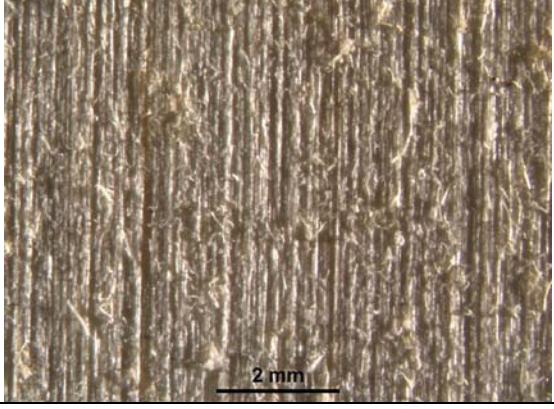
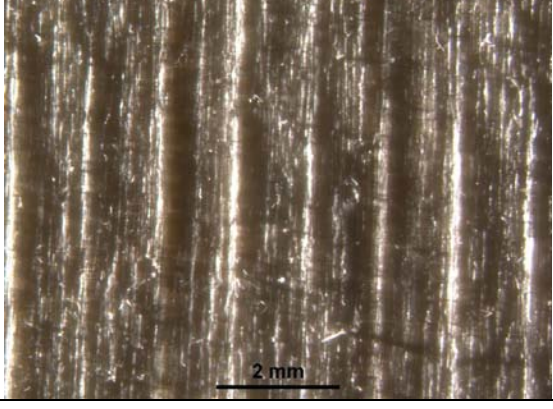
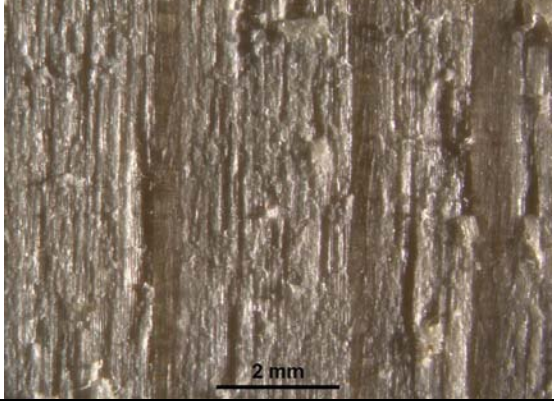
	Zustand Hobelmesser: neu	Zustand Hobelmesser: abgenutzt
Hobeln herkömmlich	<p>OF1</p> 	<p>OF2</p> 
Hobeln herk. + Schleifen (neu)	<p>OF3</p> 	<p>OF4</p> 
Hobeln herk. + Schleifen (abgen.)	<p>OF5</p> 	<p>OF6</p> 
Strukturhobeln	<p>OF7</p> 	<p>OF8</p> 

Bild 16: Unbeschichtete Holzoberflächen (Kiefer, Rift) bei 8 Bearbeitungsvarianten (Lichtmikroskop)

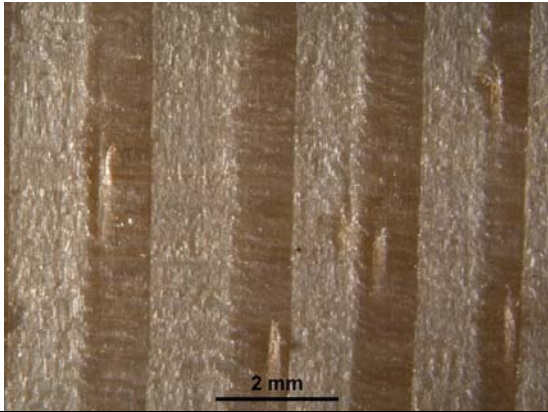
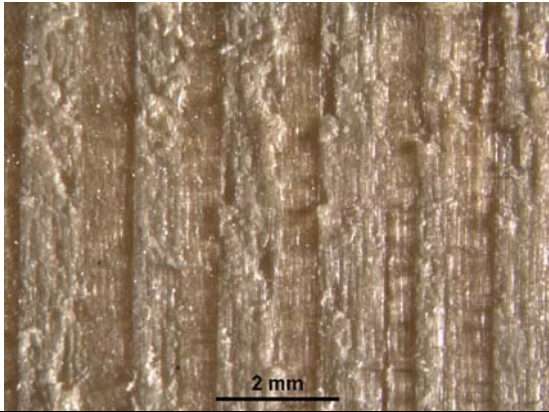
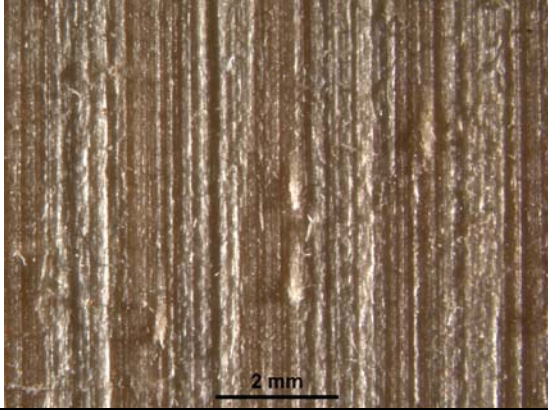
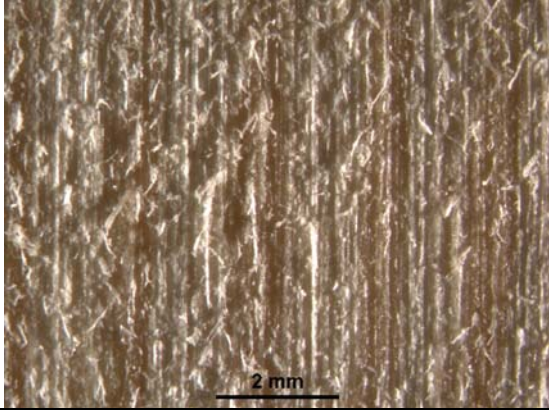
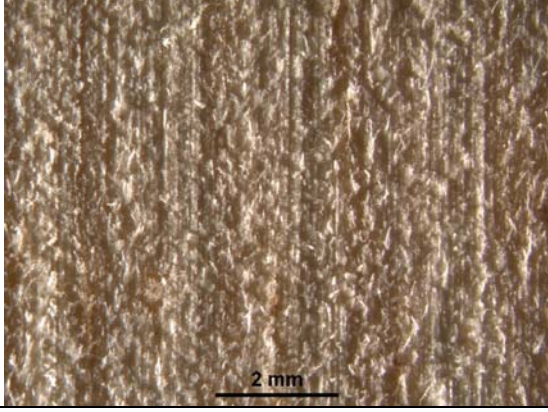
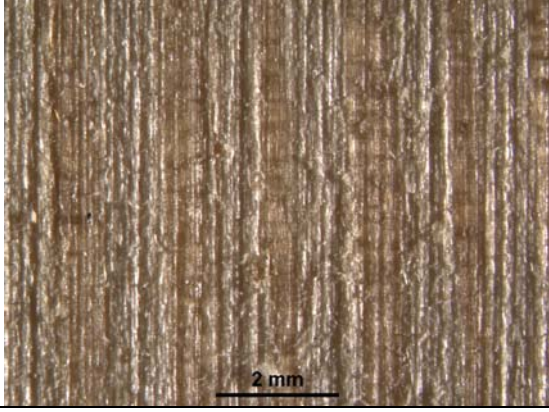
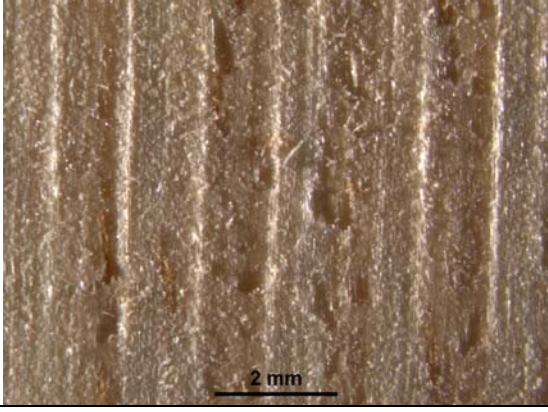
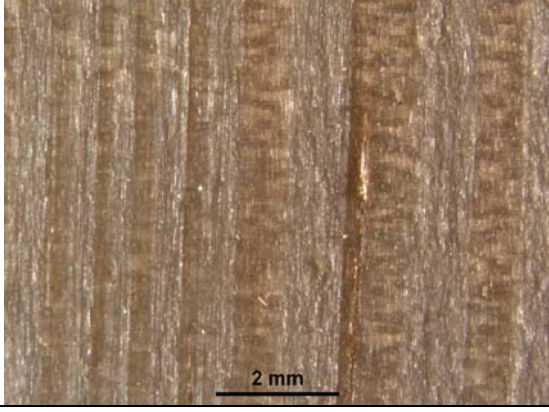
	Zustand Hobelmesser: neu	Zustand Hobelmesser: abgenutzt
Hobeln herkömmlich	OF1 	OF2 
Hobeln herk. + Schleifen (neu)	OF3 	OF4 
Hobeln herk. + Schleifen (abgen.)	OF5 	OF6 
Strukturhobeln	OF7 	OF8 

Bild 17: Unbeschichtete Holzoberflächen (Fichte3, Rift) bei 8 Bearbeitungsvarianten (REM)

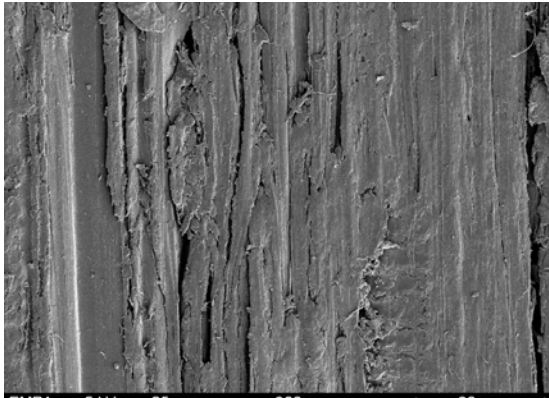
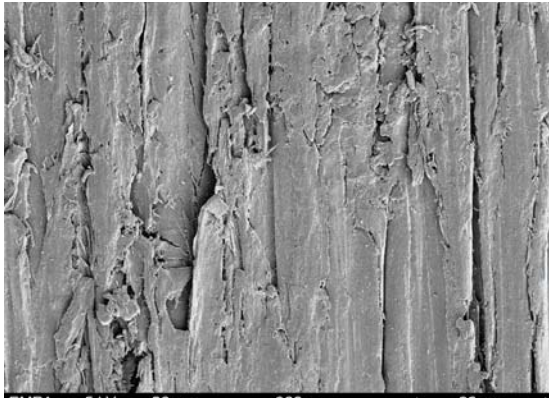
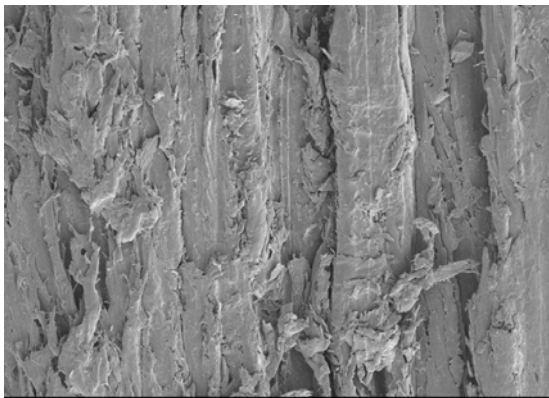
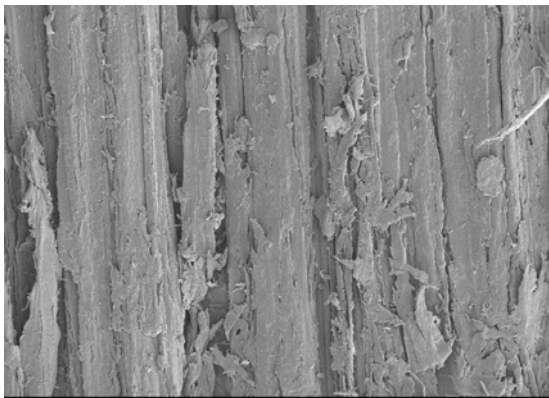
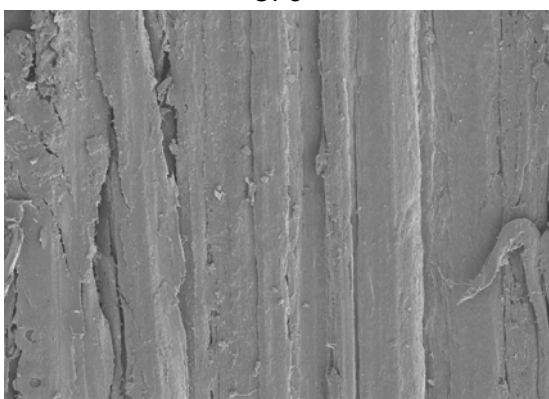
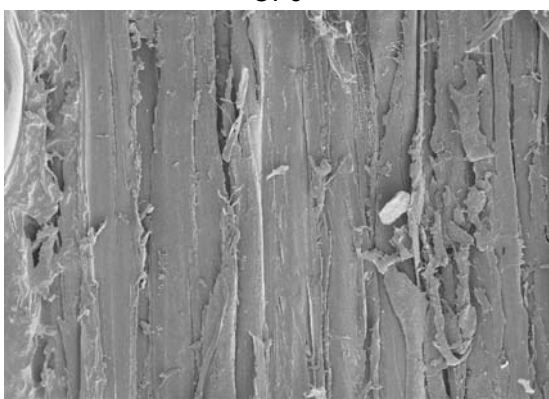
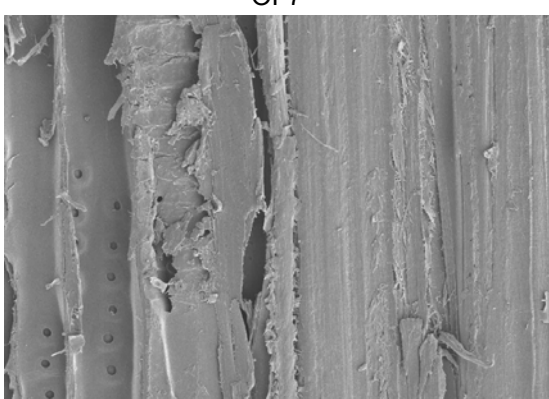
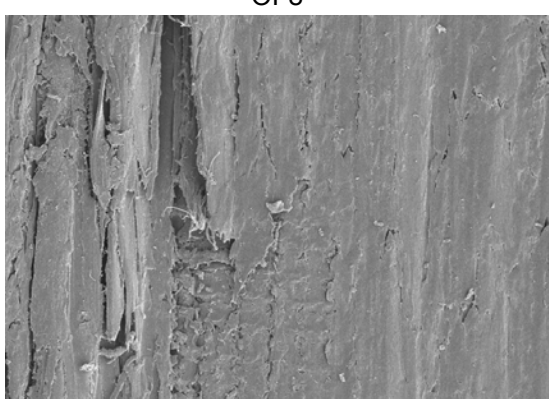
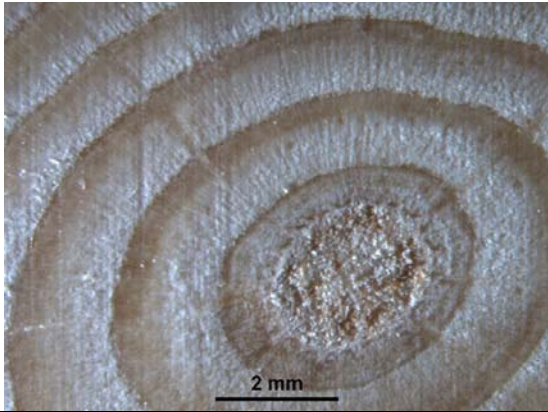
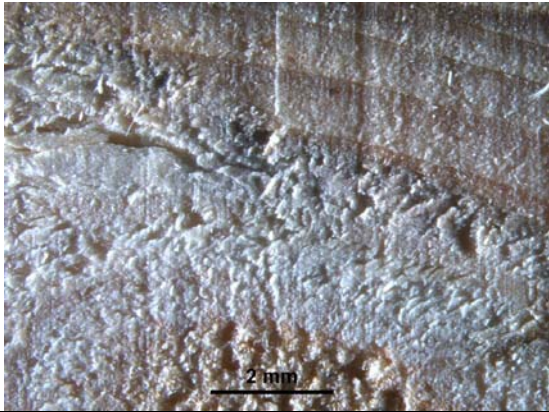
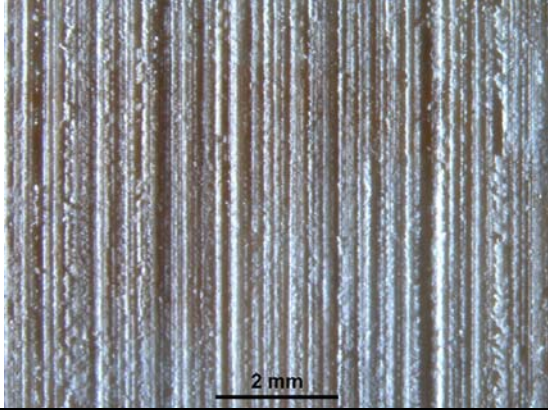
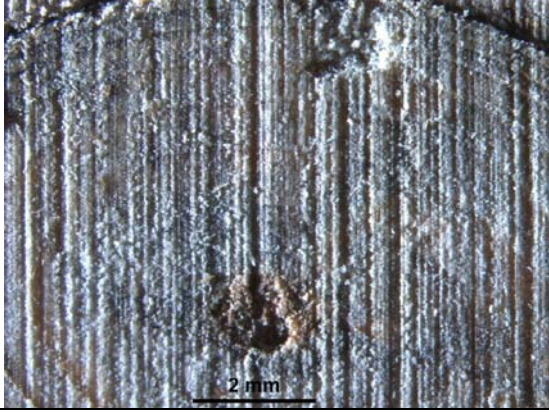
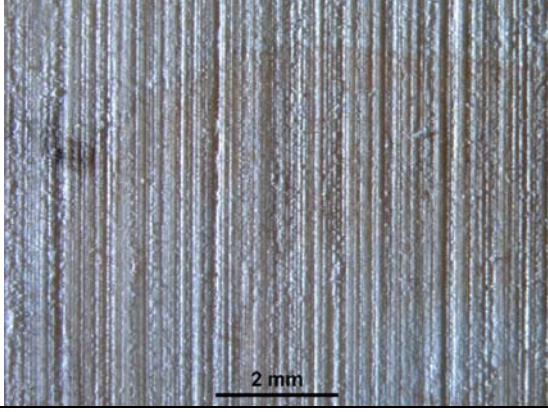
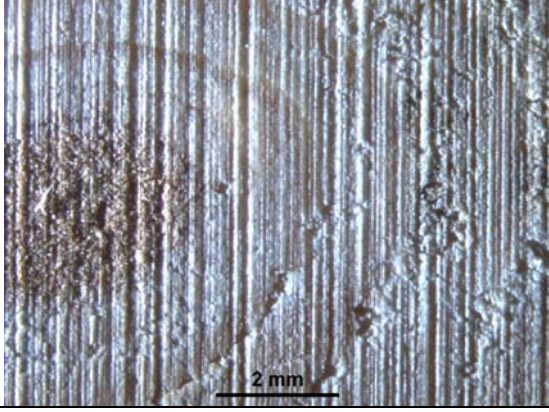
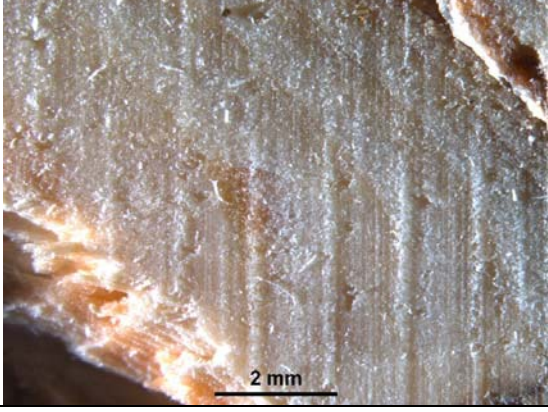
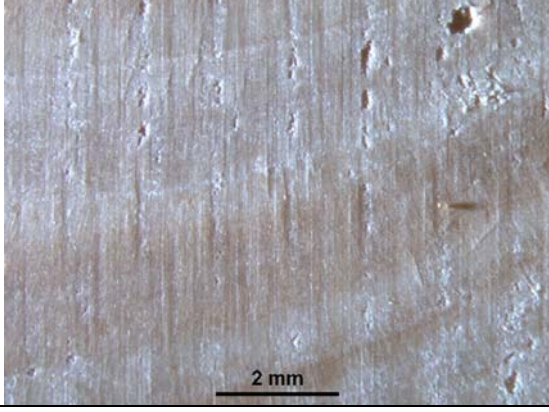
	Zustand Hobelmesser: neu	Zustand Hobelmesser: abgenutzt
Hobeln herkömmlich	<p>OF1</p>  <p>EMPA 5 kV 25 mm 300 x 90 µm</p>	<p>OF2</p>  <p>EMPA 5 kV 26 mm 300 x 90 µm</p>
Hobeln herk. + Schleifen (neu)	<p>OF3</p>  <p>EMPA 5 kV 26 mm 300 x 90 µm</p>	<p>OF4</p>  <p>EMPA 5 kV 26 mm 300 x 90 µm</p>
Hobeln herk. + Schleifen (abgen.)	<p>OF5</p>  <p>EMPA 5 kV 25 mm 300 x 90 µm</p>	<p>OF6</p>  <p>EMPA 5 kV 25 mm 300 x 90 µm</p>
Strukturhobeln	<p>OF7</p>  <p>EMPA 5 kV 25 mm 300 x 90 µm</p>	<p>OF8</p>  <p>EMPA 5 kV 25 mm 300 x 90 µm</p>

Bild 18: Unbeschichtete Astoberflächen (Fichte) bei 8 Bearbeitungsvarianten (Lichtmikroskop)

	Zustand Hobelmesser: neu	Zustand Hobelmesser: abgenutzt
Hobeln herkömmlich	<p>OF1</p> 	<p>OF2</p> 
Hobeln herk. + Schleifen (neu)	<p>OF3</p> 	<p>OF4</p> 
Hobeln herk. + Schleifen (abgen.)	<p>OF5</p> 	<p>OF6</p> 
Strukturhobeln	<p>OF7</p> 	<p>OF8</p> 

- Die mit neuen Messern strukturgehobelte Oberfläche (OF7) wirkt besonders glatt, obwohl eine deutliche 'Riffel'-Struktur erkennbar ist (Bilder 15-16). Im Unterschied zur herkömmlich gehobelten Oberfläche (OF1) ist zudem ein leichter Hobelschlag vorhanden, welcher die Riffelstruktur streifenartig hervortreten lässt. Dies ist wahrscheinlich darauf zurückzuführen, dass die Messer nicht im Messerkopf geschliffen und auch nicht gejointet wurden.
- Besonders gut sichtbar sind die Bearbeitungsspuren auf dem vergleichsweise harten Holz der Äste (Bild 18). Das Schleifen mit dem relativ grobkörnigen Band hinterlässt charakteristische Schleifspuren, wobei die Struktur der Äste (wie beim störungsfreien Holz) teilweise verdeckt wird (OF3-6). Die Riffelstruktur ist selbst bei den abgenutzten Strukturhobelmessern noch erkennbar (OF8).
- Die Riffel auf den strukturgehobelten Oberflächen erscheinen in einem regelmässigen Muster von rund 1.2 mm Abstand, was dem Abstand der Zahnung auf den Hobelmessern entspricht (siehe Bild 2b). Die maximale (Basis-)Breite der Riffel beträgt ca. 0.3-0.5 mm, deren Höhe ca. 0.03 bis 0.05 mm.

Das Ausmass von oberflächennahen Zellschädigungen ist ein wichtiges Qualitätsmerkmal für zu beschichtende Holzoberflächen. Deren Erfassung erfolgte gleichzeitig mit der Bestimmung der Trockenschichtdicke an Querschnitten der beschichteten Proben über die gesamte Breite der Sichtfläche (bei 9 Fichten- respektive 3 Kiefer-Proben pro Oberflächenbearbeitungs-Variante). Beispiele der visuellen Bewertung zeigt Bild 19, die Ergebnisse sind in Bild 20 dokumentiert.

Bild 19: Beispiele der visuellen Bewertung von oberflächennahen Zellschädigungen (Fichte, Rift, GR1)

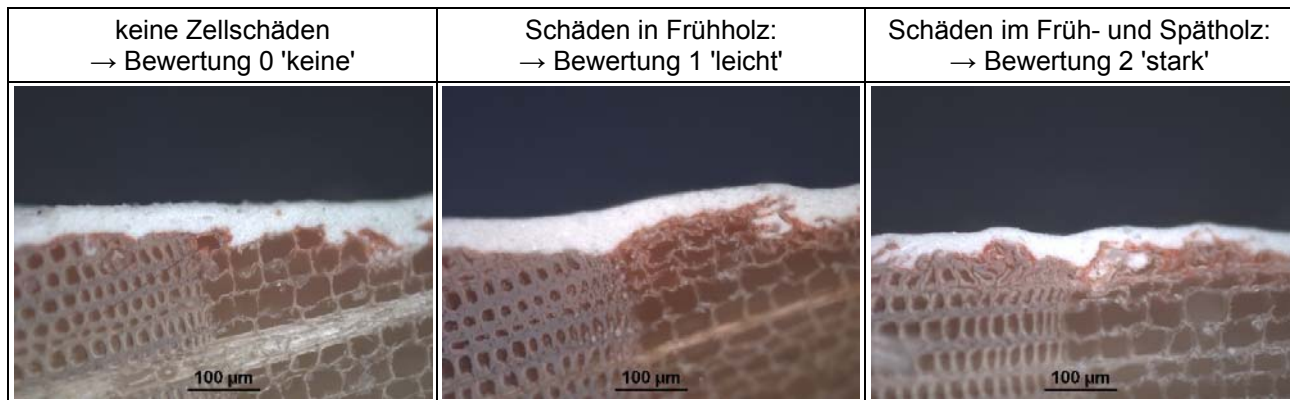
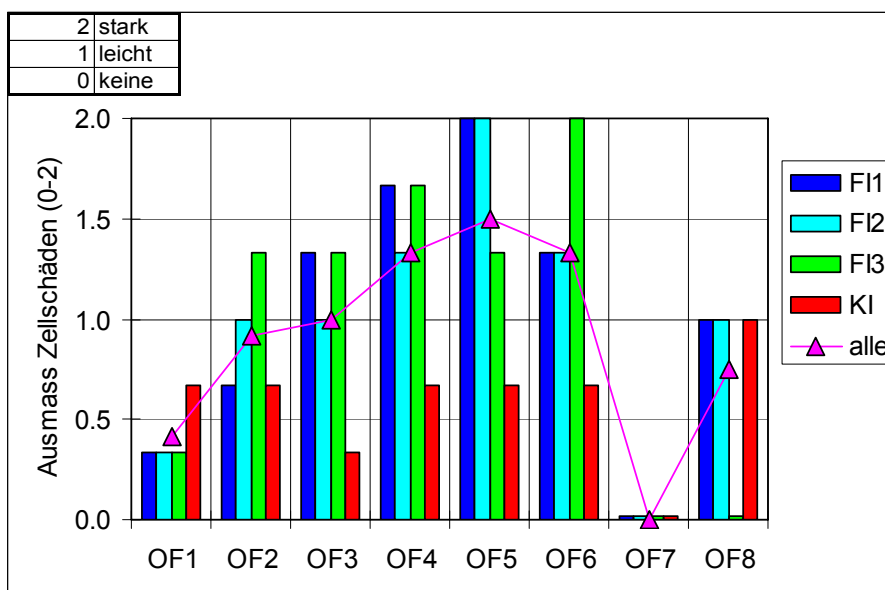


Bild 20: Ausmass von oberflächennahen Zellschädigungen bei den verschiedenen Oberflächenbearbeitungs-Varianten und Holzarten (respektive Rundholzstämmen)



Bewertung:

- Bei den mit neuen Messern gehobelten Oberflächen (OF1, OF7) sind nur geringe Zellschäden zu beobachten, wobei bei der strukturgehobelten Oberfläche (OF7) überhaupt keine Schädigungen festgestellt wurden. Demgegenüber sind bei den geschliffenen Oberflächen (OF3-6) die oberflächennahen Zellen relativ häufig beschädigt (primär im Frühholz).
- Die Zellschäden entstehen sowohl beim Hobeln als auch beim Schleifen, wobei sich das Schleifen besonders negativ auswirkt. Der (Un-)Schärfeszustand der Werkzeuge (Hobelmesser, Schleifband) spielt ebenfalls eine erhebliche verschlechternde Rolle (z.B. OF2 versus OF1 oder OF8 versus OF7).
- Die strukturgehobelten Oberflächen (OF7-8) weisen leicht geringere Zellschäden auf als herkömmlich gehobelte Oberflächen (OF1-2). Dieser Effekt ist wahrscheinlich primär auf das Weglassen des Jointens bei den Strukturhobelmessern zurückzuführen.
- Zwischen den 3 Fichtenstämmen sind insgesamt nur geringe Unterschiede im Schadensausmass vorhanden. Die Kiefernproben weisen, wahrscheinlich aufgrund der höheren Rohdichte, geringere Zellschäden auf.

Grundlage für eine messtechnische Beurteilung der Topographie resp. Rauhigkeit der unbeschichteten Holzoberfläche bilden die gemessenen Oberflächenprofile. Ausgewählte Beispiele sind in Bild 21 enthalten. Die eingehendere Auswertung erfolgt anhand der aus den Profildaten berechneten durchschnittlichen 'Feinrauhigkeit' (Bild 22), welche durch statistische Mittelwertvergleiche ergänzt werden (Tabelle 10).

Bewertung:

- Die Beurteilung der Topographie respektive der Rauhigkeit anhand der gemessenen Oberflächenprofile ist grundsätzlich schwierig, weil darin verschiedenste Elemente der anatomischen Struktur und von Bearbeitungsspuren überlagert sind (Bild 21). Da die mechanische Bearbeitungstechnik der untersuchten Oberflächenvarianten grundsätzlich ähnlich ist, sind auch keine offensichtlichen Unterschiede in der generellen Topographie zu erwarten. Das 'störungsfreie' Holz weist eine wesentlich ausgeprägtere Strukturierung auf als die Äste. Neben vorhandenen Brettverformungen sind die Oberflächenprofile insbesondere stark durch die Jahrringstruktur (Wechsel von Früh- und Spätholz) geprägt. Die Riffelstruktur ist in den Profilen der strukturgehobelten Oberflächen (OF7-8) nicht erkennbar, da die anderen Strukturelemente (Anatomie, Hobelspuren) in der gleichen Grössenordnung liegen.
- Die berechnete 'Feinrauhigkeit' zeigt hingegen klare Unterschiede zwischen den verschiedenen Oberflächenbearbeitungs-Varianten (Bild 22). Die durchschnittliche Grösse der erfassten Strukturobjekte ('Feinrauhigkeit') liegt im Bereich von 2-9 μm . Die lediglich gehobelten Oberflächen (OF1-2, OF7-8) weisen in der Regel eine geringere Rauhigkeit auf als die geschliffenen (OF3-6). Die Feinrauhigkeit der geschliffenen Oberfläche OF6 bei Kiefer ist ungewöhnlich gering und muss als 'Ausreisser' betrachtet werden. Der Schärfeszustand der Werkzeuge ist, mit Ausnahme bei den geschliffenen Ästen, in der Feinrauhigkeit nicht erkennbar.
- Im Unterschied zum visuellen Erscheinungsbild (siehe Bilder 15-18) sind bezüglich Feinrauhigkeit zwischen den herkömmlich gehobelten (OF1-2) und den strukturgehobelten Oberflächen (OF7-8) wertemässig keine Unterschiede auszumachen. Auch zwischen den verschiedenen geschliffenen Oberflächen sind, mit Ausnahme der Äste, die Unterschiede eher gering.
- Die Streubreite der Feinrauhigkeit ist bei geschliffenen Oberflächen grösser als bei lediglich gehobelten. Dies ist ein Hinweis auf eine grössere strukturelle Inhomogenität der Oberflächen aufgrund der ausgeprägteren Bearbeitungsspuren.
- Die lediglich gehobelten Oberflächen sind bei Kiefer geringfügig rauher als bei Fichte. Die geschliffenen Oberflächen zeigen hingegen eine vergleichbare Feinrauhigkeit.
- Bei den Ästen ist die Feinrauhigkeit generell deutlich geringer als beim störungsfreien Holz, was den häufigen visuellen Eindruck einer eher glatten Oberfläche bei Ästen bestätigt. Hingegen zeigen die mit neuen Hobelmessern und neuen Schleifbändern bearbeiteten Äste (OF3) eine deutlich höhere Feinrauhigkeit, welche im Bereich des geschliffenen störungsfreien Holzes liegt. Diese Beobachtung entspricht dem lichtmikroskopischen Befund (siehe Bild 18).
- Die statistischen Mittelwertvergleiche deuten eine Gruppenbildung bezüglich Feinrauhigkeit von lediglich gehobelten und geschliffenen Oberflächen an (Tabelle 10). Bei einer wertemässigen Sortierung sind die geschliffenen Oberflächen jeweils in der 'raueren' Hälfte zu finden, wobei insbesondere die Oberfläche OF3 immer einen der grössten Werte aufweist. Aufgrund der relativ grossen Streuungen sind jedoch nur wenige Differenzen statistisch signifikant (z.B. bei Fichte).

Bild 21: Beispiele von Oberflächenprofilen der 8 Bearbeitungsvarianten bei Fichte, Kiefer und FI-Ästen

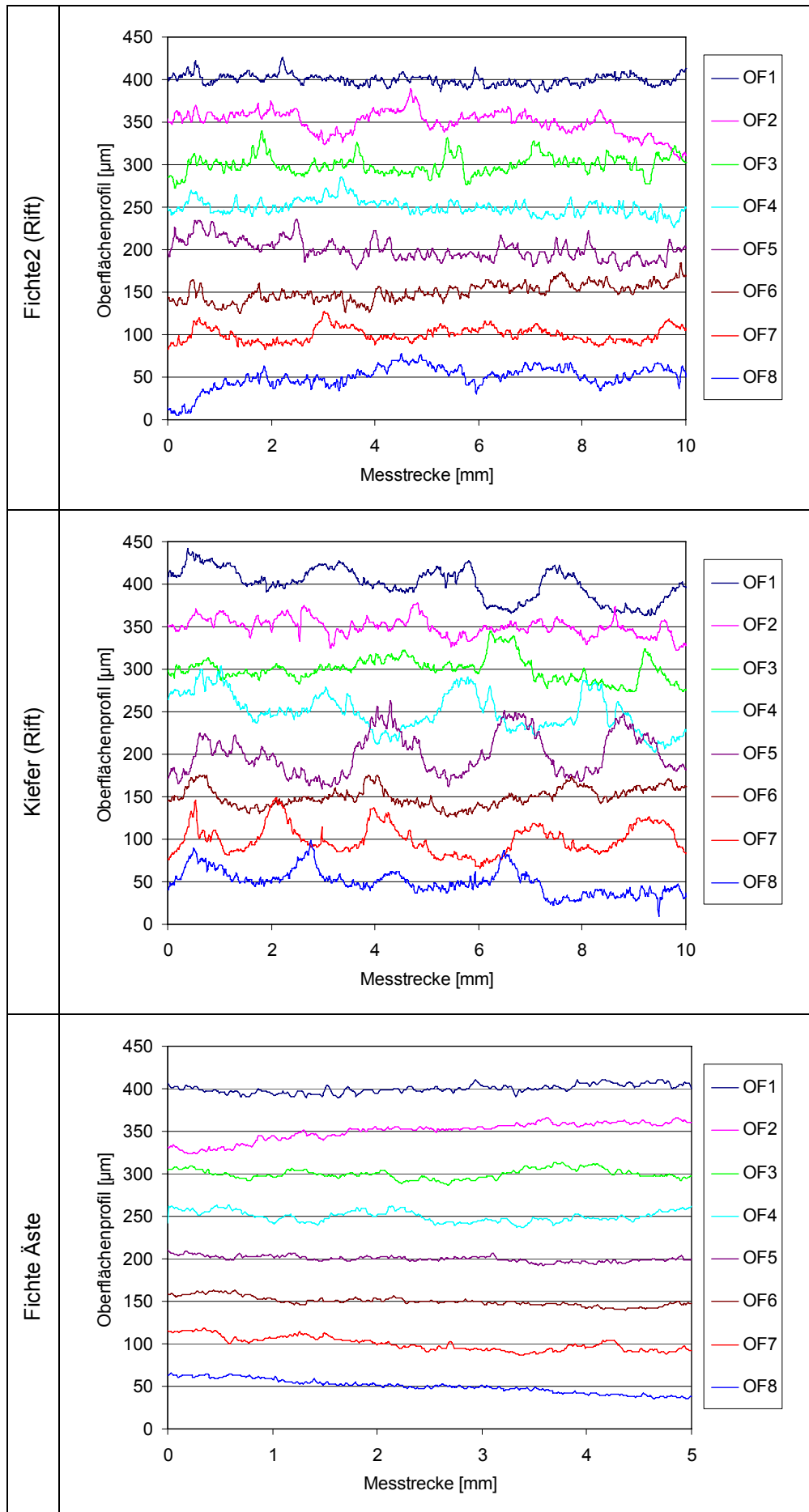


Bild 22: Mittelwert und Streuung der Feinrauigkeit der 8 Bearbeitungsvarianten bei Fichte (FI), Kiefer (KI) und Fichten-Äste (FI Ast). Der Fehlerbalken zeigt die Standardabweichung zwischen den Wiederholungssproben (FI n=9, KI n=3, FI Ast n=2).

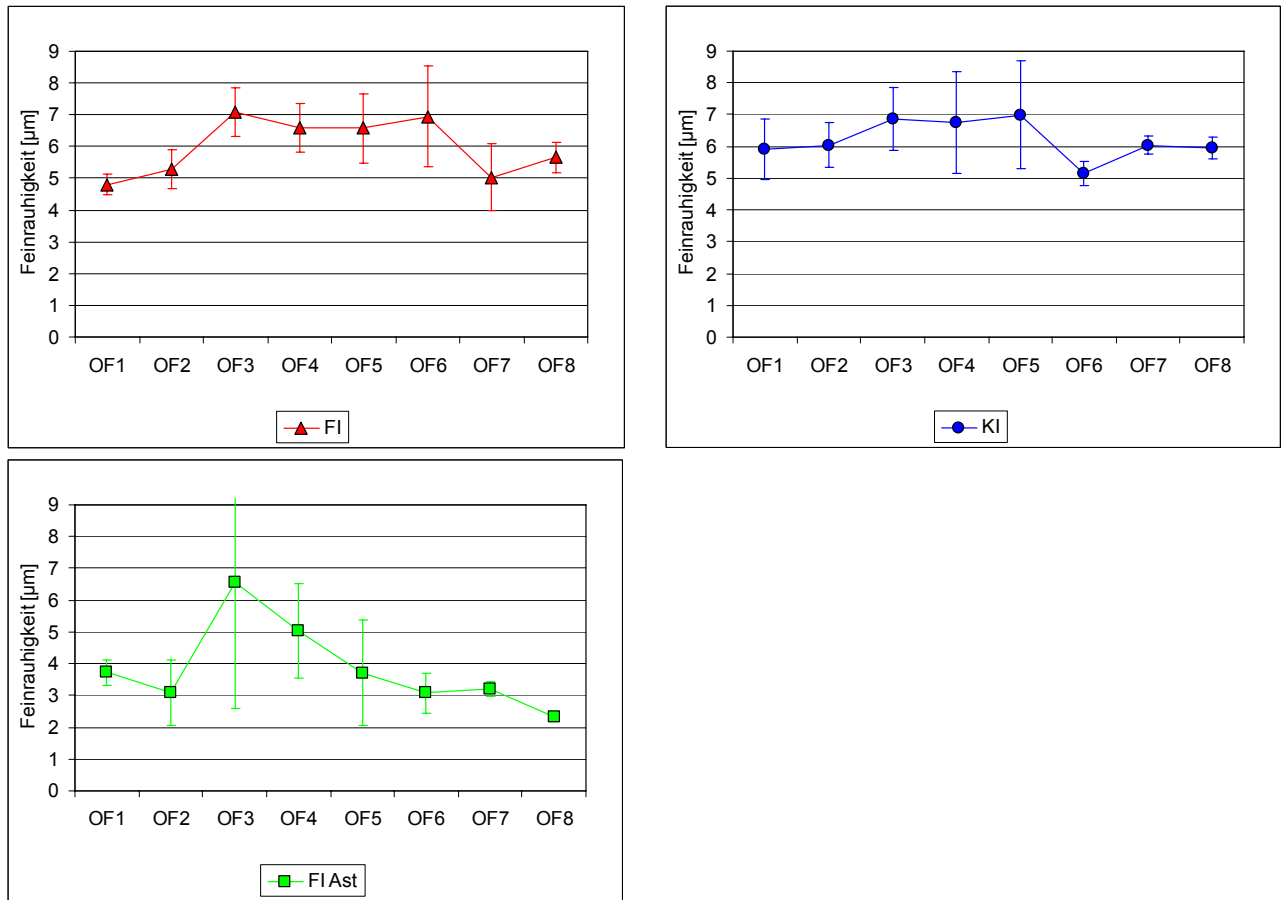


Tabelle 10: Statistische Differenzen zwischen den 8 Bearbeitungsvarianten: Feinrauigkeit

Fichte				Kiefer				Fichte Äste			
Alpha		0.05		Alpha		0.05		Alpha		0.05	
Error Degrees of Freedom		64		Error Degrees of Freedom		16		Error Degrees of Freedom		8	
Error Mean Square		0.839731		Error Mean Square		1.016875		Error Mean Square		2.772275	
Critical Value of t		1.99773		Critical Value of t		2.11991		Critical Value of t		2.30600	
Least Significant Difference		0.863		Least Significant Difference		1.7454		Least Significant Difference		3.8395	
Means with the same letter are not significantly different.				Means with the same letter are not significantly different.				Means with the same letter are not significantly different.			
t Grouping	Mean	N	OF	t Grouping	Mean	N	OF	t Grouping	Mean	N	OF
A	7.0922	9	3	A	6.9933	3	5	A	6.545	2	3
A	6.9378	9	6	B	6.8733	3	3	B	5.045	2	4
A	6.6044	9	4	B	6.7367	3	4	B	3.725	2	1
A	6.5689	9	5	B	6.0433	3	2	B	3.715	2	5
B	5.6533	9	8	B	6.0400	3	7	B	3.200	2	7
B	5.2833	9	2	B	5.9433	3	8	B	3.090	2	2
B	5.0244	9	7	B	5.9100	3	1	B	3.080	2	6
B	4.8022	9	1	B	5.1333	3	6	B	2.310	2	8

3.1.2 Benetzungsverhalten Holzoberfläche

Trotz der aufgrund der Holzartwahl gleichen chemischen Zusammensetzung (innerhalb einer Holzart) zeigen die verschiedenen Oberflächen teilweise ein unterschiedliches Benetzungsverhalten. Dies deutet auf einen erheblichen Einfluss der durch die Bearbeitungsvarianten erzeugten unterschiedlichen Oberflächenstrukturen hin.

Der Einfluss der mechanischen Bearbeitung auf das Benetzungsverhalten der Holzoberflächen bezüglich Kontaktwinkel an Wasser- oder Grundierungs-Tropfen geht aus den Bildern 23-24 und Tabelle 11 hervor. Zur Interpretation des Kontaktwinkels: Bei einer Messung an Wassertropfen bezeichnet man bei geringen Kontaktwinkeln ($<90^\circ$) eine Oberfläche als hydrophil, bei Winkeln $>90^\circ$ als hydrophob (wasserabweisend).

Bewertung:

- Bereits aus dem Verlauf des Kontaktwinkels an einem Wassertropfen über die Beobachtungszeit von 60 s sind deutliche Unterschiede zwischen den 3 hauptsächlichen Oberflächen zu erkennen (Bild 23). Während der Wassertropfen auf der herkömmlich gehobelten Oberfläche (OF1) relativ stabil liegen bleibt, dringt er bei der geschliffenen Oberfläche (OF3) rasch und oft vollständig ins Holz ein. Das Verhalten der strukturgehobelten Oberfläche (OF7) liegt zwischen diesen beiden Varianten, mit einer anfänglich raschen Benetzung und anschließender Stabilisierung. Kiefer ist aufgrund des höheren Gehaltes an Inhaltsstoffen deutlich wasserabweisender als Fichte.
- Für die detaillierte Auswertung wird als Kennwert der Kontaktwinkel 1 s nach der Tropfen-Beaufschlagung verwendet, weil dieser Wert für alle Oberflächen und Testflüssigkeiten verfügbar ist. Er ist als Mass für die initiale Benetzung einer Oberfläche anzusehen. Dabei zeigen sich insbesondere Unterschiede zwischen den Testflüssigkeiten (Wasser, Grundierungen) und den beiden Holzarten (Bild 24). Die lösemittelhaltige Grundierung GR1/2 zeigt eine stärkere Benetzung (kleinerer Kontaktwinkel) als Wasser oder die wässrige Grundierung GR3. Während die Benetzung mit Wasser bei Fichte deutlich grösser ist als bei Kiefer, ist sie bei der lösemittelhaltigen Grundierung GR1/2 bei beiden Holzarten ähnlich und bei der wässrigen Grundierung GR3 bei Fichte sogar etwas geringer als bei Kiefer.
- Die Unterschiede zwischen den verschiedenen Oberflächenbearbeitungs-Varianten sind bei Fichte ausgeprägter als bei Kiefer. Tendenziell benetzen die geschliffenen Oberflächen (OF3-6) stärker als die lediglich gehobelten (OF1-2, OF7-8). Die herkömmlich gehobelten (OF1-2) und die strukturgehobelten Oberflächen (OF7-8) zeigen ein ähnliches Benetzungsverhalten und auch der Schärfezustand der Werkzeuge hat keinen erkennbaren Einfluss. Eine eher geringe Differenzierung ist bei der wässrigen Grundierung GR3 (hoher Festkörpergehalt) vorhanden, wobei hier allerdings die Streuungen zwischen den einzelnen Tropfen vergleichsweise klein sind. Eine besonders starke Benetzung mit Wasser ist bei der geschliffenen Oberfläche OF3 auf Fichte zu beobachten.

Bild 23: Verlauf des Kontaktwinkels an einem Wassertropfen bei 3 verschiedenen Bearbeitungsvarianten während 60 s nach Beaufschlagung (Messung auf 3 Jahrringen pro Probe)

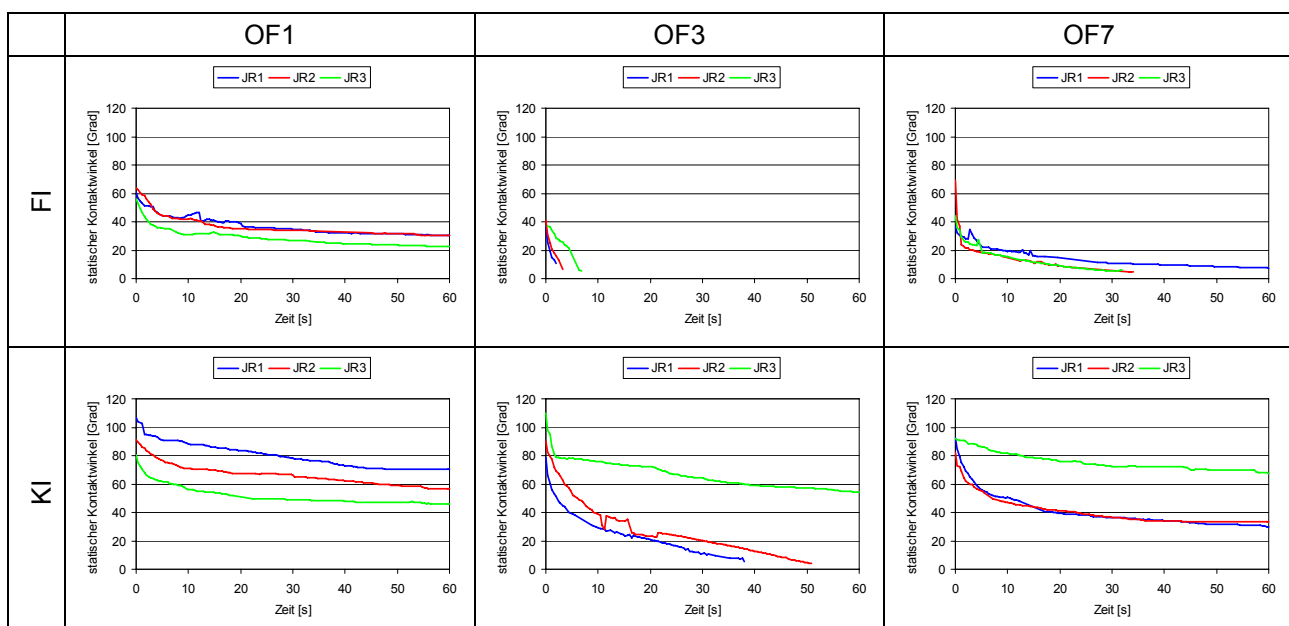


Bild 24: Mittelwert und Streuung des Kontaktwinkels an Wasser- respektive Grundierungs-Tropfen bei allen 8 Bearbeitungsvarianten. Der Fehlerbalken zeigt die Standardabweichung zwischen den einzelnen Tropfen pro Variante (FI n=27, KI n=9).

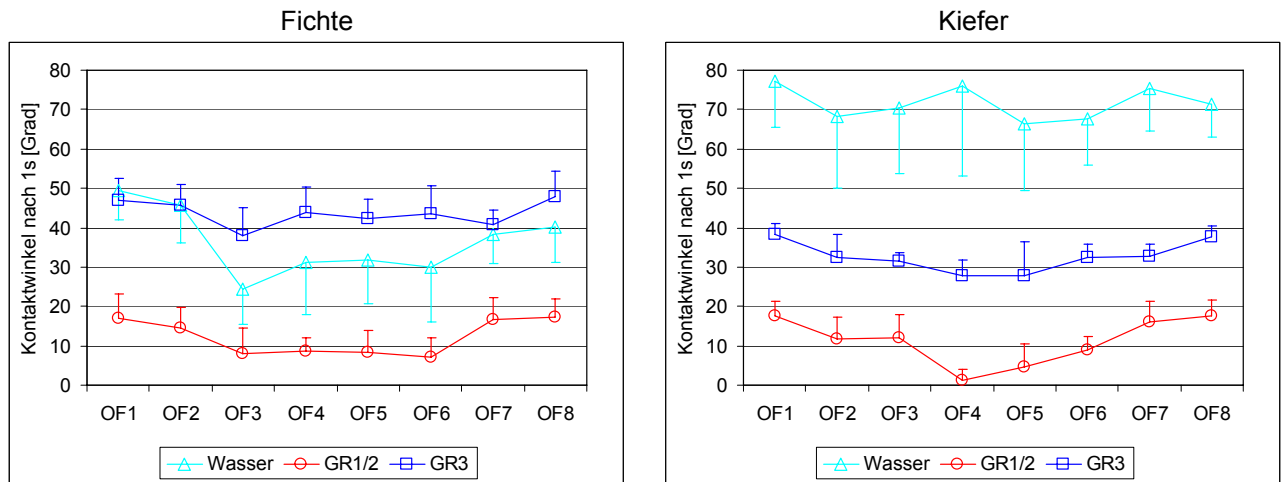


Tabelle 11: Statistische Differenzen zwischen den 8 Bearbeitungsvarianten: Kontaktwinkel

Wasser				GR1/2				GR3							
Fichte															
Alpha		0.05		Alpha		0.05		Alpha		0.05					
Error Degrees of Freedom		207		Error Degrees of Freedom		208		Error Degrees of Freedom		208					
Error Mean Square		105.967		Error Mean Square		28.50498		Error Mean Square		35.06365					
Critical Value of t		1.97149		Critical Value of t		1.97143		Critical Value of t		1.97143					
Least Significant Difference		5.5367		Least Significant Difference		2.8647		Least Significant Difference		3.1772					
Means with the same letter are not significantly different.															
t Grouping		Mean	N	OF	t Grouping		Mean	N	OF	t Grouping		Mean	N	OF	
	A	49.370	27	1		A	17.300	27	8		A	47.874	27	8	
B	A	45.570	27	2		A	16.922	27	1	B	A	46.989	27	1	
B	C	40.119	27	8		A	16.748	27	7	B	A	C	45.644	27	2
	C	38.152	27	7		A	14.537	27	2	B	D	C	43.893	27	4
	D	31.956	27	5		B	8.522	27	4		D	C	43.600	27	6
	D	31.237	27	4		B	8.433	27	5	E	D		42.381	27	5
E	D	29.811	27	6		B	8.059	27	3		D		40.763	27	7
E		24.542	26	3		B	7.056	27	6	E			37.974	27	3
Kiefer															
Alpha		0.05		Alpha		0.05		Alpha		0.05					
Error Degrees of Freedom		64		Error Degrees of Freedom		64		Error Degrees of Freedom		64					
Error Mean Square		236.082		Error Mean Square		21.82347		Error Mean Square		20.88726					
Critical Value of t		1.99773		Critical Value of t		1.99773		Critical Value of t		1.99773					
Least Significant Difference		14.47		Least Significant Difference		4.3994		Least Significant Difference		4.304					
Means with the same letter are not significantly different.															
t Grouping		Mean	N	OF	t Grouping		Mean	N	OF	t Grouping		Mean	N	OF	
	A	77.100	9	1		A	17.722	9	8		A	38.233	9	1	
	A	76.033	9	4		A	17.700	9	1		A	37.689	9	8	
	A	75.244	9	7	B	A	15.933	9	7		B	32.711	9	7	
	A	71.267	9	8	B	C	12.156	9	3		B	32.489	9	2	
	A	70.411	9	3	B	C	11.722	9	2		B	32.400	9	6	
	A	68.222	9	2	D	C	8.811	9	6	C	B	31.356	9	3	
	A	67.578	9	6	D	E	4.500	9	5	C		27.778	9	5	
	A	66.511	9	5		E	1.367	9	4	C		27.733	9	4	

- Trotz den relativ geringen Unterschieden zwischen den verschiedenen Oberflächenvarianten zeigen die statistischen Mittelwertvergleiche (Tabelle 11) ähnlich wie bei der Rauigkeit tendenziell eine Gruppenbildung von lediglich gehobelten (OF1-2, OF7-8) und geschliffenen Oberflächen (OF3-6). Nach einer wertemässigen Sortierung sind die gehobelten Oberflächen in der weniger benetzenden Hälfte zu finden. Als Faustregel kann bei den Grundierungen ab einer Kontaktwinkeldifferenz von rund 5° von einem signifikant unterschiedlichen Benetzungsverhalten ausgegangen werden (least significant difference).

Als zweiter Aspekt der Benetzbarkeit der Holzoberflächen dient die Form von getrockneten Tropfen der Grundierungen, welche fotografisch in Bild 25 sowie grafisch in Bild 26 dokumentiert ist. Die entsprechenden statistischen Mittelwertvergleiche sind in Tabelle 12 festgehalten. Der berechnete Formfaktor (Tropfenlänge/Tropfenbreite) deutet bei einem Wert nahe 1 auf eine runde Tropfenform hin, während ein grösserer Formfaktor eine zunehmend längliche Tropfenform anzeigt. Die Tropfenlänge ist dabei auf die Faserrichtung des Holzes bezogen. Damit ist der Formfaktor wegen der primär in Faserrichtung wirkenden Kapillareffekte immer grösser als 1.

Bild 25: Tropfenform von einzelnen Beschichtungstropfen nach vollständiger Spreitung und Trocknung bei 3 verschiedenen Bearbeitungsvarianten

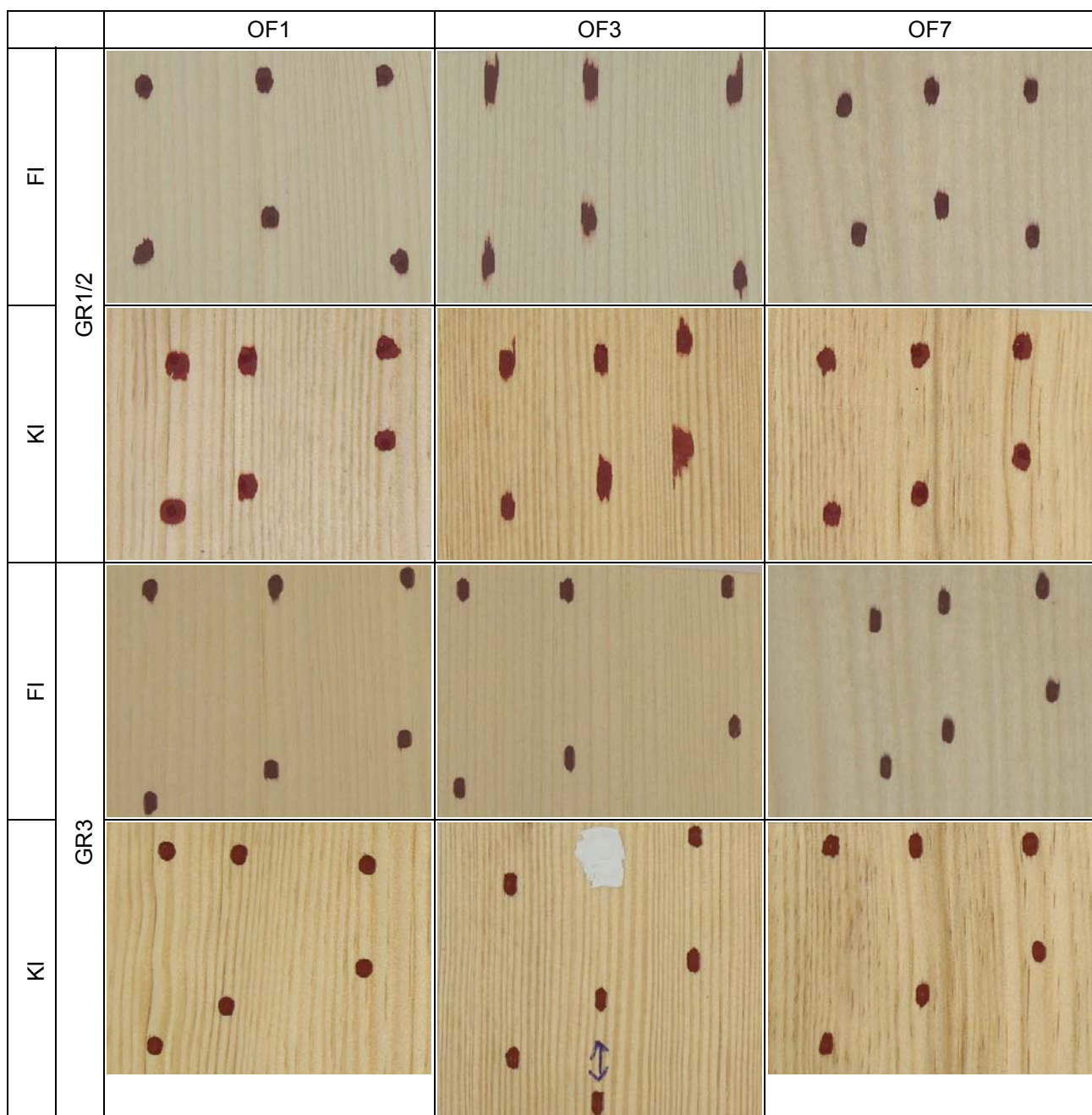


Bild 26: Mittelwert und Streuung der Tropfenform (Formfaktor) an Wasser- respektive Grundierungs-Tropfen bei allen 8 Bearbeitungsvarianten. Der Fehlerbalken zeigt die Standardabweichung zwischen den einzelnen Tropfen pro Variante (FI n=54, KI n=18)

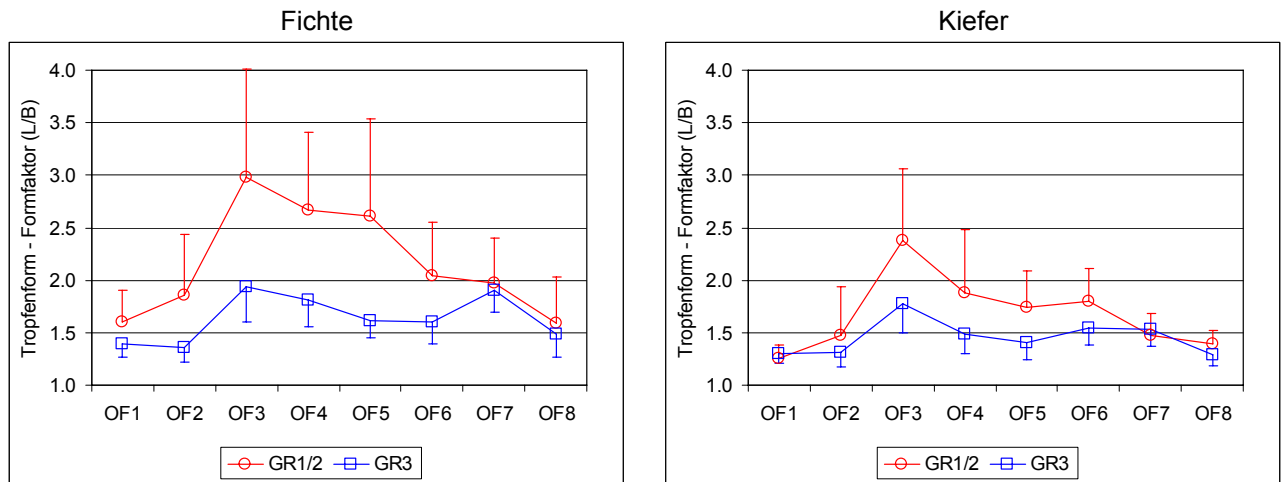


Tabelle 12: Statistische Differenzen zwischen den 8 Bearbeitungsvarianten: Tropfenform/Formfaktor

Wasser	GR1/2	GR3																																																																																																						
Fichte																																																																																																								
(nicht verfügbar)	<table border="1"> <tr><td>Alpha</td><td>0.05</td></tr> <tr><td>Error Degrees of Freedom</td><td>424</td></tr> <tr><td>Error Mean Square</td><td>0.443186</td></tr> <tr><td>Critical Value of t</td><td>1.96557</td></tr> <tr><td>Least Significant Difference</td><td>0.2518</td></tr> <tr><td colspan="2" style="text-align: center;">Means with the same letter are not significantly different.</td></tr> <tr> <th>t Grouping</th> <th>Mean</th> <th>N</th> <th>OF</th> </tr> <tr><td rowspan="5"></td><td>A</td><td>2.9805</td><td>54</td><td>3</td></tr> <tr><td rowspan="2">B</td><td>2.6694</td><td>54</td><td>4</td></tr> <tr><td>2.6118</td><td>54</td><td>5</td></tr> <tr><td>C</td><td>2.0414</td><td>54</td><td>6</td></tr> <tr><td>C</td><td>1.9761</td><td>54</td><td>7</td></tr> <tr><td>D</td><td>C</td><td>1.8554</td><td>54</td><td>2</td></tr> <tr><td rowspan="2">D</td><td>E</td><td>1.6051</td><td>54</td><td>1</td></tr> <tr><td>E</td><td>1.5908</td><td>54</td><td>8</td></tr> </table>	Alpha	0.05	Error Degrees of Freedom	424	Error Mean Square	0.443186	Critical Value of t	1.96557	Least Significant Difference	0.2518	Means with the same letter are not significantly different.		t Grouping	Mean	N	OF		A	2.9805	54	3	B	2.6694	54	4	2.6118	54	5	C	2.0414	54	6	C	1.9761	54	7	D	C	1.8554	54	2	D	E	1.6051	54	1	E	1.5908	54	8	<table border="1"> <tr><td>Alpha</td><td>0.05</td></tr> <tr><td>Error Degrees of Freedom</td><td>424</td></tr> <tr><td>Error Mean Square</td><td>0.046946</td></tr> <tr><td>Critical Value of t</td><td>1.96557</td></tr> <tr><td>Least Significant Difference</td><td>0.082</td></tr> <tr><td colspan="4" style="text-align: center;">Means with the same letter are not significantly different.</td></tr> <tr> <th>t Grouping</th> <th>Mean</th> <th>N</th> <th>OF</th> </tr> <tr><td>A</td><td>1.93635</td><td>54</td><td>3</td></tr> <tr><td rowspan="2">A</td><td>1.90472</td><td>54</td><td>7</td></tr> <tr><td>1.81253</td><td>54</td><td>4</td></tr> <tr><td>C</td><td>1.61380</td><td>54</td><td>5</td></tr> <tr><td>C</td><td>1.60040</td><td>54</td><td>6</td></tr> <tr><td>D</td><td>1.48722</td><td>54</td><td>8</td></tr> <tr><td>E</td><td>1.39400</td><td>54</td><td>1</td></tr> <tr><td>E</td><td>1.35966</td><td>54</td><td>2</td></tr> </table>	Alpha	0.05	Error Degrees of Freedom	424	Error Mean Square	0.046946	Critical Value of t	1.96557	Least Significant Difference	0.082	Means with the same letter are not significantly different.				t Grouping	Mean	N	OF	A	1.93635	54	3	A	1.90472	54	7	1.81253	54	4	C	1.61380	54	5	C	1.60040	54	6	D	1.48722	54	8	E	1.39400	54	1	E	1.35966	54	2			
	Alpha	0.05																																																																																																						
	Error Degrees of Freedom	424																																																																																																						
	Error Mean Square	0.443186																																																																																																						
	Critical Value of t	1.96557																																																																																																						
	Least Significant Difference	0.2518																																																																																																						
	Means with the same letter are not significantly different.																																																																																																							
	t Grouping	Mean	N	OF																																																																																																				
		A	2.9805	54	3																																																																																																			
		B	2.6694	54	4																																																																																																			
2.6118			54	5																																																																																																				
C		2.0414	54	6																																																																																																				
C		1.9761	54	7																																																																																																				
D	C	1.8554	54	2																																																																																																				
D	E	1.6051	54	1																																																																																																				
	E	1.5908	54	8																																																																																																				
Alpha	0.05																																																																																																							
Error Degrees of Freedom	424																																																																																																							
Error Mean Square	0.046946																																																																																																							
Critical Value of t	1.96557																																																																																																							
Least Significant Difference	0.082																																																																																																							
Means with the same letter are not significantly different.																																																																																																								
t Grouping	Mean	N	OF																																																																																																					
A	1.93635	54	3																																																																																																					
A	1.90472	54	7																																																																																																					
	1.81253	54	4																																																																																																					
C	1.61380	54	5																																																																																																					
C	1.60040	54	6																																																																																																					
D	1.48722	54	8																																																																																																					
E	1.39400	54	1																																																																																																					
E	1.35966	54	2																																																																																																					
Kiefer																																																																																																								
(nicht verfügbar)	<table border="1"> <tr><td>Alpha</td><td>0.05</td></tr> <tr><td>Error Degrees of Freedom</td><td>136</td></tr> <tr><td>Error Mean Square</td><td>0.164601</td></tr> <tr><td>Critical Value of t</td><td>1.97756</td></tr> <tr><td>Least Significant Difference</td><td>0.2674</td></tr> <tr><td colspan="4" style="text-align: center;">Means with the same letter are not significantly different.</td></tr> <tr> <th>t Grouping</th> <th>Mean</th> <th>N</th> <th>OF</th> </tr> <tr><td rowspan="3"></td><td>A</td><td>2.3796</td><td>18</td><td>3</td></tr> <tr><td rowspan="2">B</td><td>1.8816</td><td>18</td><td>4</td></tr> <tr><td>1.8000</td><td>18</td><td>6</td></tr> <tr><td>C</td><td>B</td><td>1.7444</td><td>18</td><td>5</td></tr> <tr><td>C</td><td>D</td><td>1.4792</td><td>18</td><td>2</td></tr> <tr><td>C</td><td>D</td><td>1.4781</td><td>18</td><td>7</td></tr> <tr><td rowspan="2">D</td><td>1.3988</td><td>18</td><td>8</td></tr> <tr><td>1.2567</td><td>18</td><td>1</td></tr> </table>	Alpha	0.05	Error Degrees of Freedom	136	Error Mean Square	0.164601	Critical Value of t	1.97756	Least Significant Difference	0.2674	Means with the same letter are not significantly different.				t Grouping	Mean	N	OF		A	2.3796	18	3	B	1.8816	18	4	1.8000	18	6	C	B	1.7444	18	5	C	D	1.4792	18	2	C	D	1.4781	18	7	D	1.3988	18	8	1.2567	18	1	<table border="1"> <tr><td>Alpha</td><td>0.05</td></tr> <tr><td>Error Degrees of Freedom</td><td>136</td></tr> <tr><td>Error Mean Square</td><td>0.029509</td></tr> <tr><td>Critical Value of t</td><td>1.97756</td></tr> <tr><td>Least Significant Difference</td><td>0.1132</td></tr> <tr><td colspan="4" style="text-align: center;">Means with the same letter are not significantly different.</td></tr> <tr> <th>t Grouping</th> <th>Mean</th> <th>N</th> <th>OF</th> </tr> <tr><td rowspan="3"></td><td>A</td><td>1.77866</td><td>18</td><td>3</td></tr> <tr><td rowspan="2">B</td><td>1.54628</td><td>18</td><td>6</td></tr> <tr><td>1.52949</td><td>18</td><td>7</td></tr> <tr><td>C</td><td>B</td><td>1.48779</td><td>18</td><td>4</td></tr> <tr><td>C</td><td>D</td><td>1.40388</td><td>18</td><td>5</td></tr> <tr><td rowspan="3">D</td><td>1.30842</td><td>18</td><td>2</td></tr> <tr><td>1.30204</td><td>18</td><td>1</td></tr> <tr><td>1.29074</td><td>18</td><td>8</td></tr> </table>	Alpha	0.05	Error Degrees of Freedom	136	Error Mean Square	0.029509	Critical Value of t	1.97756	Least Significant Difference	0.1132	Means with the same letter are not significantly different.				t Grouping	Mean	N	OF		A	1.77866	18	3	B	1.54628	18	6	1.52949	18	7	C	B	1.48779	18	4	C	D	1.40388	18	5	D	1.30842	18	2	1.30204	18	1	1.29074	18	8
	Alpha	0.05																																																																																																						
	Error Degrees of Freedom	136																																																																																																						
	Error Mean Square	0.164601																																																																																																						
	Critical Value of t	1.97756																																																																																																						
	Least Significant Difference	0.2674																																																																																																						
	Means with the same letter are not significantly different.																																																																																																							
	t Grouping	Mean	N	OF																																																																																																				
		A	2.3796	18	3																																																																																																			
		B	1.8816	18	4																																																																																																			
1.8000			18	6																																																																																																				
C	B	1.7444	18	5																																																																																																				
C	D	1.4792	18	2																																																																																																				
C	D	1.4781	18	7																																																																																																				
D	1.3988	18	8																																																																																																					
	1.2567	18	1																																																																																																					
Alpha	0.05																																																																																																							
Error Degrees of Freedom	136																																																																																																							
Error Mean Square	0.029509																																																																																																							
Critical Value of t	1.97756																																																																																																							
Least Significant Difference	0.1132																																																																																																							
Means with the same letter are not significantly different.																																																																																																								
t Grouping	Mean	N	OF																																																																																																					
	A	1.77866	18	3																																																																																																				
	B	1.54628	18	6																																																																																																				
		1.52949	18	7																																																																																																				
C	B	1.48779	18	4																																																																																																				
C	D	1.40388	18	5																																																																																																				
D	1.30842	18	2																																																																																																					
	1.30204	18	1																																																																																																					
	1.29074	18	8																																																																																																					

Bewertung:

- Der Formfaktor beschreibt die geometrische Form von einzelnen Beschichtungstropfen nach vollständiger Spreitung und Trocknung. Auf der lediglich herkömmlich gehobelten Oberfläche (OF1) zeigen die Tropfen eine mehr oder weniger runde Form, während sie sich auf der geschliffenen Oberfläche (OF3) verstärkt in Faserrichtung ausbreiten und dadurch länglich werden (Bild 25). Das Verhalten der strukturgehobelten Oberfläche (OF7) liegt zwischen diesen beiden Varianten, wobei eher eine Tendenz zu länglichen Tropfen auszumachen ist. Die lösemittelhaltige Grundierung GR1/2 dringt auf der geschliffenen Oberfläche (OF3) offenbar stark kapillar ein, was zu stark ausgefranzten Tropfenformen führt.
- Die graphische Darstellung des durchschnittlichen Formfaktors pro Oberflächenvariante und Grundierung (Bild 26) veranschaulicht die beobachtete wesentlich stärkere Spreitung der geschliffenen (OF3-6) gegenüber den herkömmlich gehobelten Oberflächen (OF1-2). Dies trifft besonders auf die mit neuen Werkzeugen bearbeitete Oberfläche OF3 zu, wo die Grundierungs-Tropfen nach der Spreitung 2 bis 3 mal länger sind als breit. Mit zunehmender Abnutzung der Werkzeuge nimmt die Spreitung bei den geschliffenen Oberflächen ab.
- Auf den geschliffenen Oberflächen (OF3-6) sind die Tropfen der lösemittelhaltigen Grundierung GR1/2 deutlich länglicher als bei der wässrigen Grundierung GR3. Bei den gehobelten Oberflächen (OF1-2, OF7-8) ist dies weniger ausgeprägt. Die strukturgehobelte Oberfläche OF7 zeigt bei der lösemittelhaltigen Grundierung GR1/2 eine Spreitung wie die herkömmlich gehobelten Oberflächen (OF1-2), bei der wässrigen Grundierung GR3 jedoch eher wie die geschliffenen Oberflächen (OF3-6).
- Die Spreitung der Grundierungs-Tropfen ist bei Fichte etwas grösser als bei Kiefer.
- Die statistischen Mittelwertvergleiche bestätigen weitgehend die anhand der graphischen Darstellungen gemachten Beobachtungen (Tabelle 12). Darüber hinaus ergibt sich jedoch aufgrund der relativ grossen Streuungen keine klare, statistisch signifikante Gruppenbildung.

3.1.3 Beschichtung

Die Applikation der Grundierungen GR1 und GR3 erfolgte nach Standard-Verfahren des Industriepartners (siehe Tabelle 5) und verlief problemlos. Hingegen zeigten sich nach dem manuellen Spritzen der Grundierung GR2 Entmischungserscheinungen (Schlieren) und lokal eine verzögerte Trocknung. Diese Grundierungsvariante ist daher von der Applikation her nicht als optimal zu betrachten. Die Applikation der Deckschicht wiederum erfolgte nach einem Standard-Verfahren und war für alle Beschichtungsvarianten gleich. Der Aufbau der kompletten Beschichtungen ist anhand der Querschnittsaufnahmen in Bild 27 ersichtlich und wird durch die gemessenen Schichtdicken ergänzt (Tabelle 13).

Bewertung:

- Mit den 3 verschiedenen Grundierungs-Varianten werden sehr unterschiedliche Grundierungsschichten erzeugt (Bild 27). Die durch maschinelles Fluten-Walzen-Bürsten aufgebraute lösemittelhaltige Grundierung GR1 ergibt sowohl bei Kiefer als auch bei Fichte keinen geschlossenen Beschichtungsfilm und keine messbare Schichtdicke (Tabelle 13). Die gespritzten Grundierungen GR2 und GR3 weisen hingegen eine durchschnittliche Schichtdicke von rund 10 µm auf. Bei der (schwierig quantifizierbaren) Eindringung der Grundierungen sind keine offensichtlichen Unterschiede erkennbar. Die Grundierungen dringen, wie bei Fichte üblich, höchstens 1-2 Zellreihen tief ein.
- Das unterschiedliche Deckvermögen der Grundierungen wirkt sich auch auf die Schichtdicke der Deckschicht aus. Da auf der nicht filmbildenden Grundierung GR1 ein Teil des Decklackes ins Holz eindringt, ist die Schichtdicke der Deckschicht mit rund 30 µm gegenüber rund 38 µm bei den Grundierungen GR2 und GR3 etwas reduziert.
- Die Gesamtschichtdicke von 30-50 µm ist für deckende Beschichtungen relativ gering (Tabelle 13). Die Beschichtungen dürften damit nur eine beschränkte Feuchteschutzwirkung erreichen.
- Die Oberflächenbearbeitungs-Varianten haben keinen erkennbaren Einfluss auf die durchschnittliche Schichtdicke. Hingegen beeinflusst die Struktur der Holzoberfläche die Gleichmässigkeit des Beschichtungsfilms (Bild 27). Während bei relativ glatten Oberflächen (OF1, OF7) der Beschichtungsfilm sehr gleichmässig und glatt ist, ergeben Unregelmässigkeiten der Holzoberfläche auch eine ungleichmässige Schichtdicke (OF3). Auch die bereits angesprochenen Zellschäden tragen zu einer ungleichmässigen Filmbildung bei.

Bild 27: Querschnitt durch die komplette Beschichtung (Fichte und Kiefer, Halbrift) bei 3 Oberflächenvarianten (Lichtmikroskop)

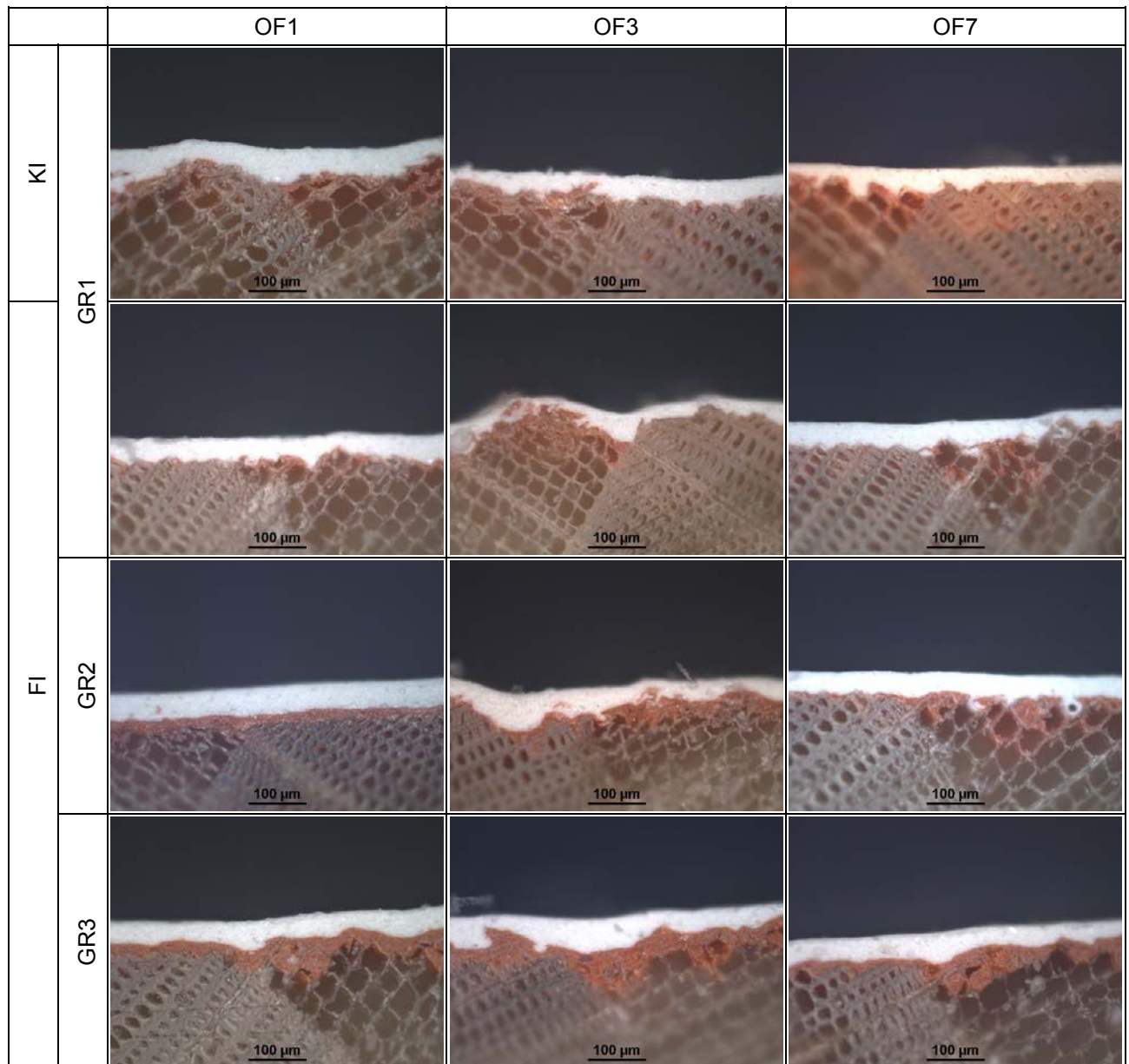


Tabelle 13: Trockenschichtdicke der Beschichtungen

Beschichtung	Holzart	Anzahl Proben (je 10 Messwerte)	Trocken-Schichtdicke [μm] Mittelwert (Standardabweichung zwischen Proben)	
			Grundierung	Deckschicht
GR1	KI	24	nicht messbar	29 (4)
	FI	24	nicht messbar	30 (4)
GR2		24	9 (1)	37 (5)
GR3		24	10 (3)	38 (4)

Das Erscheinungsbild der beschichteten Oberflächen ist in Bild 28 für die gleichen Proben wie in Bild 27 dargestellt. Einige spezielle Aspekte sind in den Bildern 29-31 dokumentiert.

Bewertung:

- Die bereits bei den unbeschichteten Oberflächen gemachten Beobachtungen gelten weitgehend auch für den beschichteten Zustand. Die lediglich gehobelte Oberfläche (OF1) wirkt relativ glatt, aufgrund der ungleichmässigen Quellung/Schwindung zeichnen sich Früh- und Spätholz jedoch deutlich ab. Bei der geschliffenen Oberfläche (OF3) sind die Schleifspuren erkennbar und die aufstehenden Fasern führen zu einer relativ rauhen Oberfläche. Auch die strukturgehobelte Oberfläche (OF7) wirkt insgesamt glatt, wobei sich Früh- und Spätholz kaum abzeichnen. Die 'Riffel' sind auch noch im beschichteten Zustand erkennbar. Das geringere Deckvermögen der Grundierung GR1 lässt die Oberflächenstrukturen generell etwas deutlicher hervortreten als bei den filmbildenden Grundierungen GR2 und GR3.
- Die streifenartige 'Riffel'-Struktur ist aus der Nähe betrachtet bei den leicht glänzenden Beschichtungsflächen relativ auffällig (Bild 29). Inwieweit dies auch bei anderen Farbtönen und Glanzgraden sowie aus grösserer Distanz der Fall ist, bleibt abzuklären.

Bild 28: Beschichtete Oberflächen (Fichte und Kiefer, Halbrift) bei 3 Oberflächenvarianten (Lichtmikroskop)

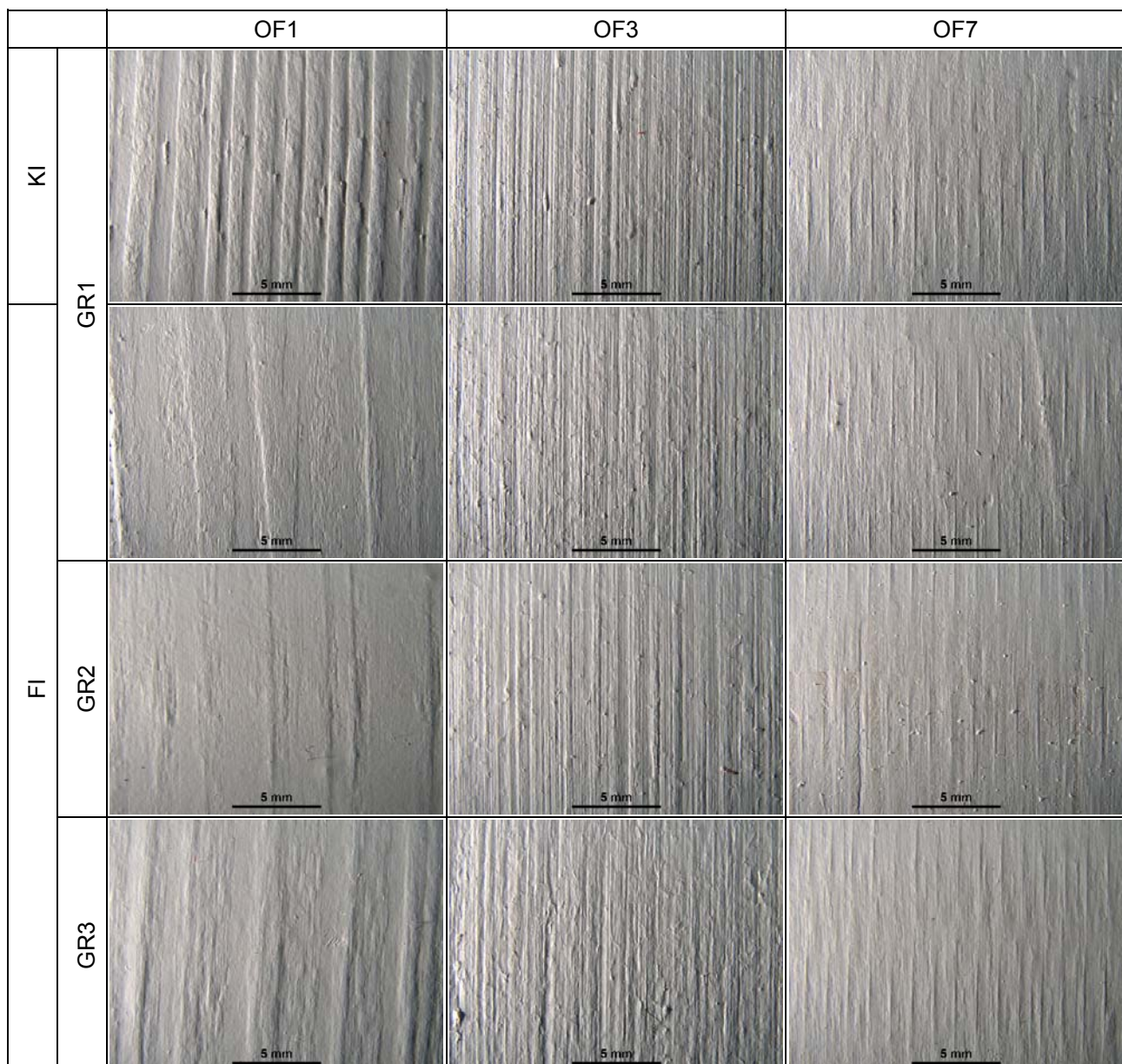


Bild 29: Beschichtete Oberfläche: Streifenartige Riffelstruktur nach Strukturhobeln (OF7)



Bild 30: Beschichtete Oberfläche: Riffel im Querschnitt (Fichte, OF7)

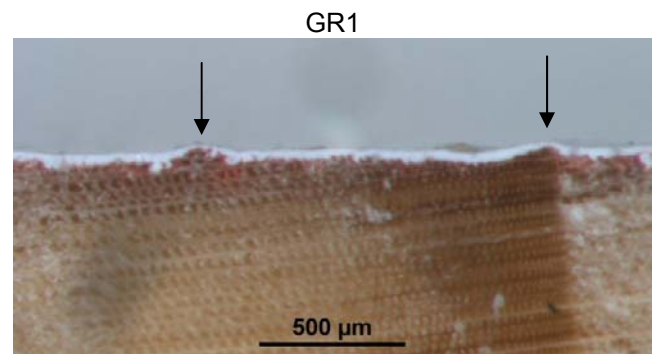
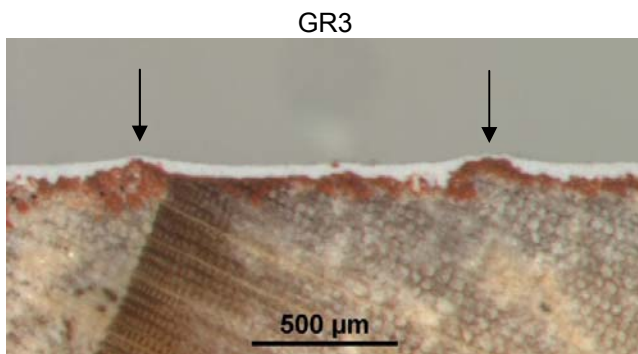
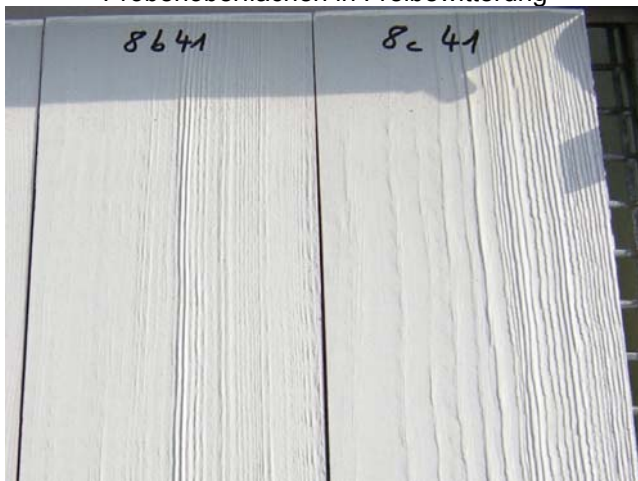
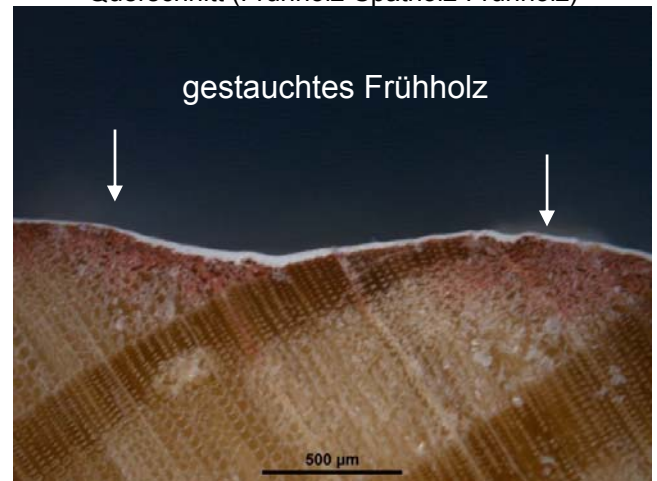


Bild 31: Aufstehende Jahrringstruktur (raised grain) als Folge schlechter Hobelqualität (Kiefer, OF8)

Probenoberflächen in Freibewitterung



Querschnitt (Frühholz-Spätholz-Frühholz)



- Die Schichtdicke der Beschichtung ist auf den Spitzen der Riffel deutlich reduziert (Bild 30). Dies könnte zu Schwachstellen in der Beschichtung führen. Die bisherigen Beobachtungen in den Bewitterungsversuchen haben jedoch keine derartigen Hinweise ergeben (siehe 3.2.1).
- Abgenutzte Hobelmesser führen zu oberflächennahen Zellschäden in der Form von gestauchten oder gequetschten Zellen (siehe 3.1.1). Davon betroffen sind vor allem Frühholzbereiche, welche als Folge der Beschichtungsapplikation oder durch die anschliessende Aufnahme von Feuchtigkeit anquellen und sich stark an der Oberfläche abzeichnen (Bild 31). Dieses Phänomen wird in der englischsprachigen Literatur als 'raised grain' bezeichnet.

3.2 Leistungsmerkmale beschichtetes Holz

Der Fokus des zweiten Untersuchungsblocks liegt auf der Erfassung von möglichen Unterschieden bezüglich der Haftfestigkeit der Beschichtung und der Witterungsbeständigkeit des beschichteten Holzes als Folge des veränderten Zusammenwirkens der drei Systemkomponenten Trägermaterial (Holz), Beschichtungsstoff und Applikation.

3.2.1 Witterungsbeständigkeit

Bewitterungsversuche werden als umfassende Leistungstests für das Gesamtsystems Holz-Beschichtung angesehen. Mit diesen Versuchen ist eine generelle Abklärung der Witterungsbeständigkeit und allfälliger Schwachstellen möglich. Die Beurteilung beruht weitgehend auf einer visuellen Bewertung des Probenzustandes nach einer definierten Bewitterungszeit, welche keine 'präzisen' Messwerte liefert, sondern Skalenwerte von 0 (keine Veränderung) bis 5 (sehr starke Veränderung). Mit derartigen Beurteilungs-Daten können deshalb nur relativ grosse Unterschiede zwischen Versuchsvarianten zuverlässig erkannt werden. Naturgemäss sind visuelle Beurteilungen zudem zu einem gewissen Grad subjektiv geprägt und hängen von der Erfahrung des Beurteilenden ab. Andererseits sind die Beobachtungen im vorliegenden Fall durchaus zuverlässig, da sie sowohl auf künstlichen als auch auf natürlichen Bewitterungen beruhen.

Als wichtigste Kenngrössen für die vorliegende Fragenstellung wurden der Gesamtzustand (Gesamtbeurteilung) und die Anzahl der Risse (Rissmenge) erhoben. Der oberflächliche Pilzbewuchs steht nur bei der natürlichen Bewitterung zur Verfügung. Die Erhebungen zur Haftfestigkeit der Beschichtung sind in einem separaten Kapitel (3.2.2) zusammengefasst.

Um auch die längerfristige Witterungsbeständigkeit der Proben zu beobachten, wird jeweils eine der 3 Wiederholungsproben pro Versuchsvariante über das Projektende hinaus weiterbewittert und nach dem zweiten Bewitterungsjahr erneut beurteilt. Damit die Ergebnisse der fortgesetzten Bewitterung nicht verfälscht werden, erfolgte die Probenbeurteilung im ungewaschenen Zustand.

Der Probenzustand nach 1-jähriger Freibewitterung respektive nach 1000 h künstlicher Bewitterung ist beispielhaft anhand von fotografischen Vergleichen in den Bildern 32-33 dokumentiert. Die Detailgenauigkeit der Fotos ist allerdings wegen der beschränkten Bildauflösung begrenzt. Die graphischen Darstellungen in den Bildern 34-35 zeigen die Ergebnisse der detaillierten visuellen Probenbewertung bezüglich Gesamtzustand und Rissbildung. Die Bewertungen beziehen sich ausschliesslich auf die beobachtete Bewitterungsdauer.

Bewertung:

- Wie für eine deckende Beschichtung erwartet, sind die Verwitterungserscheinungen an den Proben nach 1-jähriger Freibewitterung noch relativ gering (Bild 32). Bei Fichte liegt die durchschnittliche Zustandsbewertung zwischen 0 und 2. Abblätterungen sind nur in ganz wenigen Einzelfällen zu beobachten. Deutlich verbreiteter sind hingegen Risse. Der Zustand der geschliffenen Oberfläche OF3 und der mit abgenutzten Hobelmessern bearbeiteten Oberfläche OF8 ist deutlich schlechter als bei den neuen Hobelmessern bearbeiteten Oberflächen OF1 und OF7. Bei der künstlichen Bewitterung ergeben sich ähnliche Befunde (Bild 33).
- Die Beschichtung auf den Ästen ist nach 1-jähriger Freibewitterung noch weitgehend intakt (Bild 32). Der Grund für beobachtete Probleme bei den Ästen scheint nicht generell die Haftung an sich zu sein, sondern die offenen Ränder bei nicht fest verwachsenen Ästen und ein verstärkter Harzaustritt.

Bild 32: Probenzustand nach 1 Jahr Freibewitterung (Fichte, GR1, Probengrösse 360 x 100 mm²)

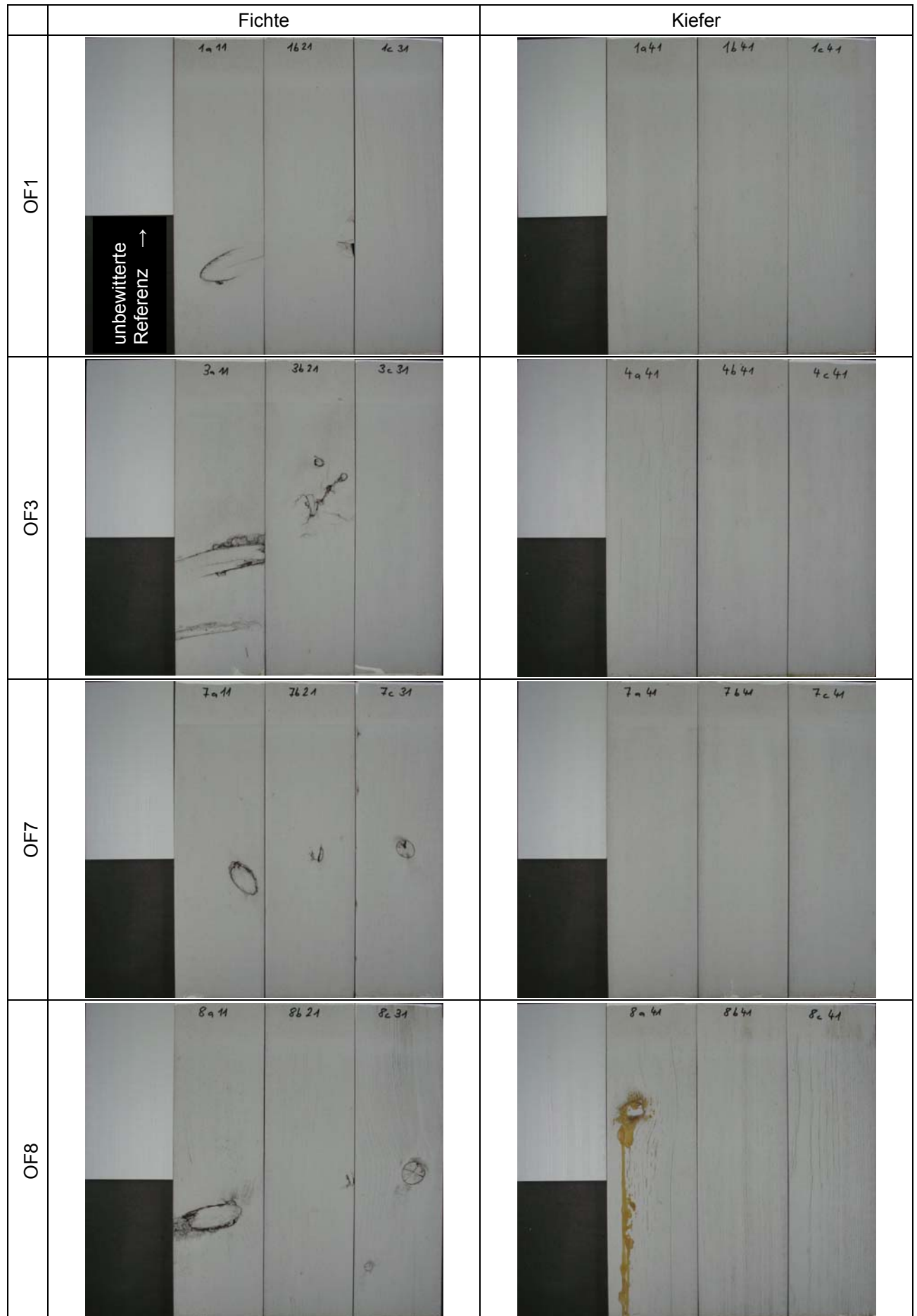


Bild 33: Probenzustand nach 1000 h künstlicher Bewitterung (Fichte, GR1, Probengrösse 150 x 74 mm²)

	Fichte			Kiefer		
OF1	1a 11 †	1b 21 †	1c 31 †	1a 41 †	1b 41 †	1c 41 †
OF3	3a 11 †	3b 21 †	3c 31 †	3a 41 †	3b 41 †	3c 41 †
OF7	7a 11 †	7b 21 †	7c 31 †	7a 41 †	7b 41 †	7c 41 †
OF8	8a 11 †	8b 21 †	8c 31 †	8a 41 †	8b 41 †	8c 41 †

Bild 34: Ergebnisse der detaillierten visuellen Bewertung des Probenzustandes nach Bewitterung: Mittelwert von jeweils 3 Wiederholungsproben pro Versuchsvariante

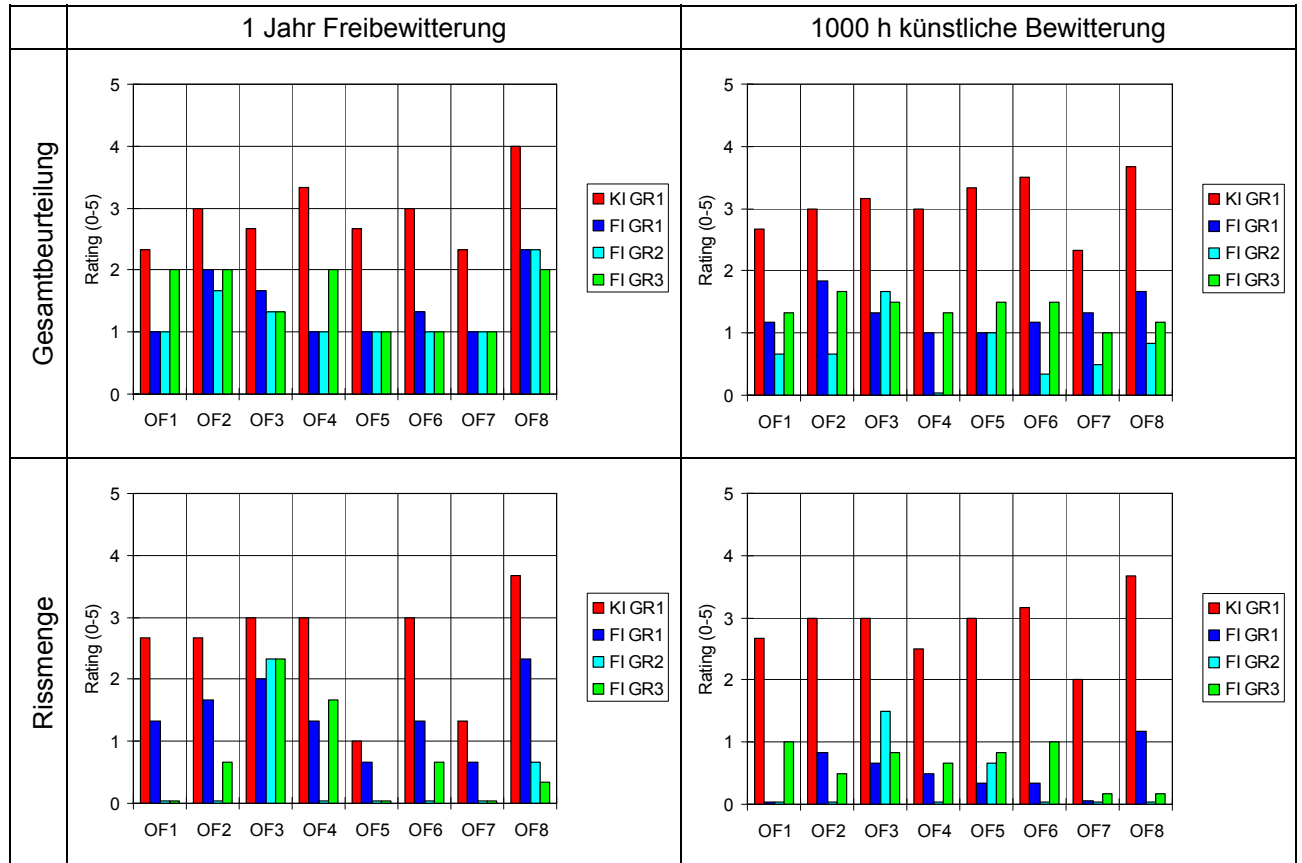
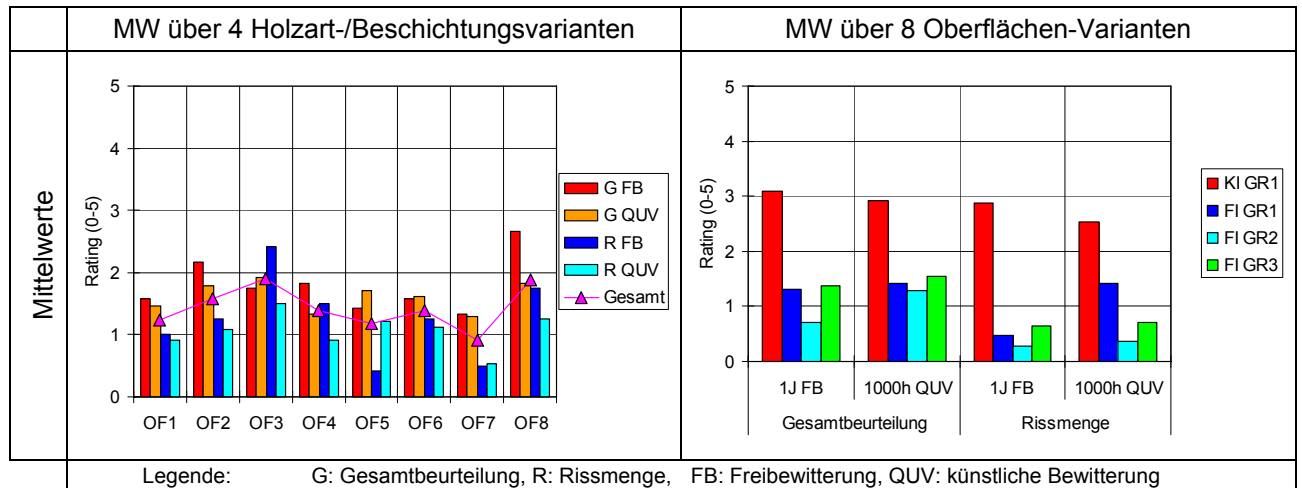


Bild 35: Ergebnisse der detaillierten visuellen Bewertung des Probenzustandes nach Bewitterung: Mittelwert (MW) über Holzart-/Beschichtungs- respektive Oberflächen-Varianten



- Die Auswertung der detaillierten visuellen Probenbewertung (Bild 34) zeigt, dass nach gleicher Bewitterungsdauer Kiefer einen schlechteren Zustand aufweist als Fichte. Bei Kiefer ist neben einer stärker ausgeprägten Rissbildung besonders bei der künstlichen Bewitterung eine deutliche Verfärbung durch ausgewaschene Inhaltsstoffe zu beobachten (Bild 33).
- Gesamtbeurteilung und Rissbildung stimmen nach einer 1-jährigen Freibewitterung und nach 1000 h künstlicher Bewitterung im QUV gut überein (Bild 34). Die Rissbildung scheint bezüglich der verschiedenen Oberflächenvarianten etwas trennschärfer zu sein als die Gesamtbeurteilung, welche definitionsgemäss verschiedene Beurteilungsfaktoren integriert.

- Die mit neuen Messern strukturgehobelte Oberfläche (OF7) zeigt von allen Oberflächen die beste Witterungsbeständigkeit (tiefste Bewertung). Diese Oberfläche schneidet auch leicht besser ab als die entsprechende herkömmlich gehobelte Oberfläche OF1 (Bild 34, Bild 35 links). Demgegenüber werden die Verwitterungserscheinungen der mit neuen Werkzeugen geschliffenen Oberfläche OF3 sowie die mit abgenutzten Struktur-Hobelmessern bearbeitete Oberfläche OF8 häufig am schlechtesten beurteilt (siehe Bild 31).
- Der negative Einfluss von abgenutzten Werkzeugen ist bei den lediglich gehobelten Oberflächen gut zu beobachten (OF2 versus OF1 und OF8 versus OF7). Bei den gehobelt und geschliffenen Oberflächen ist der Einfluss des Schärfezustandes der Werkzeuge weniger eindeutig, wobei interessanterweise die mit neuen Werkzeugen geschliffene Oberfläche OF3 schlechter abschneidet als die mit abgenutzten Werkzeugen bearbeiteten Oberflächen (OF4-6). Ein Grund dafür könnte die bei den geschliffenen Oberflächen festgestellte unregelmässige Schichtdicke und eine dadurch lokal reduzierte Feuchteschutzwirkung sein (siehe 3.1.3).
- Bezüglich oberflächlichem Pilzbewuchs respektive Verschmutzungstendenz (nur Freibewitterung) ist zwischen den verschiedenen Oberflächenbearbeitungs-Varianten kein eindeutiger Unterschied feststellbar.
- Die Grundierung GR2 zeigt trotz Applikationsproblemen (nur auf Fichte geprüft, siehe 3.1.3) insgesamt die besten Ergebnisse (Bild 35 rechts). Bei gleicher Beschichtung (GR1) sind die Verwitterungserscheinungen wie bereits erwähnt bei Kiefer deutlich ausgeprägter als bei Fichte.

3.2.2 Haftfestigkeit

Die Haftung der Beschichtung auf der Holzoberfläche gilt als besonders spezifischer Indikator zur Kompatibilität von Trägermaterial (Holz), Beschichtungsstoff und Applikation und wurde deshalb besonders intensiv untersucht.

Die Ergebnisse der mechanischen Abreissversuche der kompletten Beschichtungen bei zwei Feuchtezuständen des Substrates (trocken, nass) und jeweils vor und nach 1000h künstlicher Bewitterung sind in Bild 36 und in Tabelle 14 dargestellt. Fotografische Beispiele von durchgeführten Abreissversuchen und Gitterschnittprüfungen sind in den Bildern 37 und 38 festgehalten. Und schliesslich ist in den Bildern 39 und 40 ein Vergleich der Haftfestigkeit gemäss Abreissversuch und Gitterschnittprüfung nach künstlicher respektive natürlicher Bewitterung sowie zwischen Ästen und störungsfreiem Holz enthalten.

Bewertung:

- Die mechanische Haftfestigkeit der Beschichtung (Abreissversuch) liegt beim trockenen Substrat zwischen 2.5 und 3.5 N/mm² (Bild 36, linke Spalte). Beim feuchten Substrat ist die Haftfestigkeit auf rund die Hälfte reduziert und beträgt noch zwischen 1 und 2 N/mm². Während beim trockenen Substrat kein Unterschied zwischen dem unbewitterten und dem bewitterten Zustand feststellbar ist, sind die Nass-Haftfestigkeiten bei Fichte nach Bewitterung sogar leicht höher. Ein Grund hierfür könnte in einer besseren Verankerung der Beschichtung durch Nachvernetzungen infolge Wärmeeinwirkung während der Bewitterung liegen. Bei Kiefer ist dieser Effekt nicht vorhanden, jedoch liegen die Haftfestigkeiten bei den unbewitterten Proben generell höher als bei Fichte (Grundierung GR1).
- Die Haftfestigkeiten auf der mit neuen Messern strukturgehobelten Oberfläche OF7 sind dabei im Vergleich zu den anderen Oberflächenbearbeitungs-Varianten vielfach am höchsten (Ausnahme GR2). Besonders ausgeprägt ist dies beim nassen Substrat, was auf eine gute und zumindest beschränkt feuchteresistente Verankerung der Beschichtung im Holzsubstrat hindeutet. Dieser Effekt wird durch den hohen Anteil an Holzbruch bestätigt, wobei die Oberfläche OF7 sogar bei nassem Substrat einen gewissen Holzbruchanteil aufweist.
- Ausser den konstant guten Werten der mit neuen Messern strukturgehobelten Oberfläche OF7 ergeben die statistischen Mittelwertvergleiche keine klare Gruppenbildung bezüglich Oberflächenbearbeitungs-Varianten (Tabelle 14). Tendenziell zeigen die geschliffenen Oberflächen jedoch eher höhere Haftfestigkeiten, während insbesondere die mit abgenutzten Hobelmessern bearbeiteten Oberflächen OF2 und OF8 häufig relativ tiefe Werte ergeben.
- Die verschiedenen Grundierungs-Varianten scheinen keinen relevanten Einfluss auf die Haftfestigkeit zu haben.

Bild 36: *Haftefestigkeit der Beschichtung und des Holzbruchanteils bei den vier Holzart-Grundierungs-Kombinationen in Abhängigkeit vom Feuchtezustand des Substrates (trocken, nass) jeweils vor und nach 1000 h künstlicher Bewitterung. Mittelwert von jeweils 6 Wiederholungsmessungen. Bei der Haftefestigkeit zeigt der grüne Fehlerbalken die mittlere Standardabweichung.*

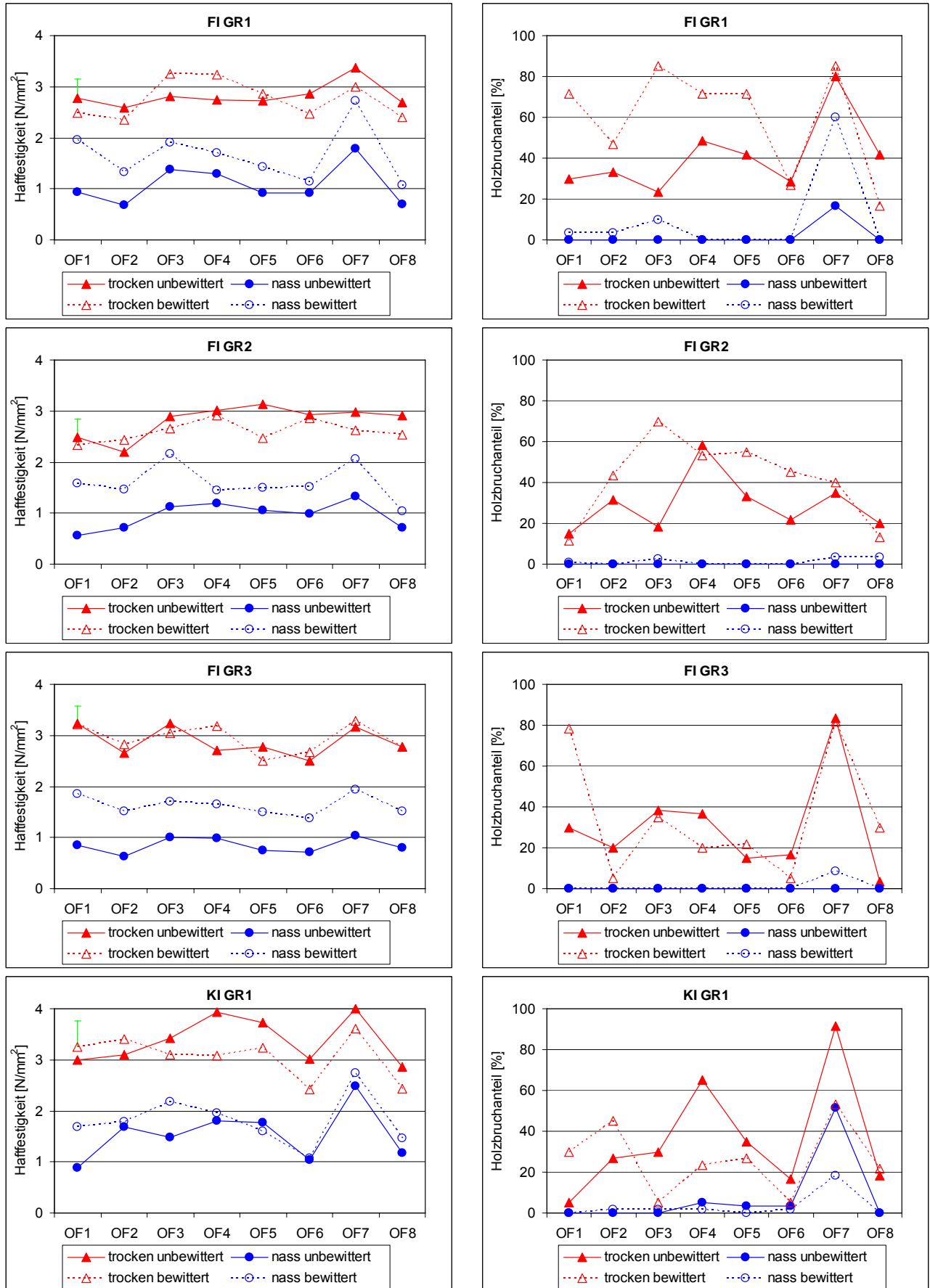
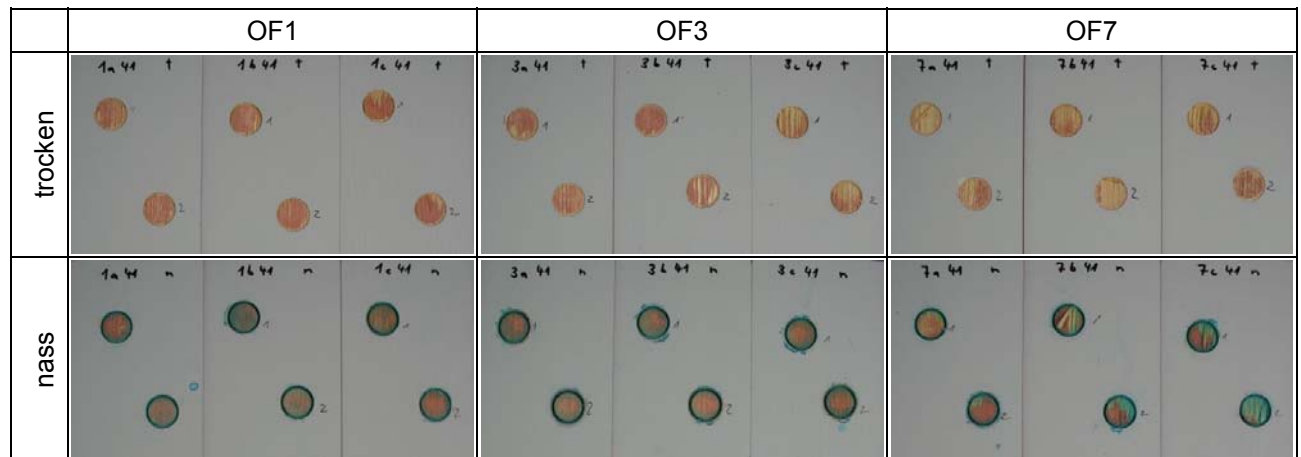


Tabelle 14: Statistische Differenzen zwischen den 8 Bearbeitungsvarianten: Haftfestigkeit

Fichte GR1				Fichte GR2				Fichte GR3										
trocken unbewittert																		
Alpha		0.05		Alpha		0.05		Alpha		0.05								
Error Degrees of Freedom		40		Error Degrees of Freedom		40		Error Degrees of Freedom		40								
Error Mean Square		0.135873		Error Mean Square		0.151848		Error Mean Square		0.161059								
Critical Value of t		2.02108		Critical Value of t		2.02108		Critical Value of t		2.02108								
Least Significant Difference		0.4301		Least Significant Difference		0.4547		Least Significant Difference		0.4683								
Means with the same letter are not significantly different.				Means with the same letter are not significantly different.				Means with the same letter are not significantly different.										
t Grouping		Mean	N	OF	t Grouping		Mean	N	OF	t Grouping		Mean	N	OF				
A		3.3650	6	7	A		3.1333	6	5	A		3.2350	6	3				
B		2.8650	6	6	A		3.0133	6	4	A		3.2267	6	1				
B		2.8100	6	3	A		2.9767	6	7	B		A	3.1633	6	7			
B		2.7717	6	1	B		A	2.9250	6	6	B		A	C	2.7767	6	5	
B		2.7350	6	4	B		A	2.9133	6	8	B		A	C	2.7733	6	8	
B		2.7300	6	5	B		A	2.9000	6	3	B			C	2.7000	6	4	
B		2.6817	6	8	B		C	2.4783	6	1			C	2.6483	6	2		
B		2.5817	6	2	B		C	2.2033	6	2			C	2.5000	6	6		
nass unbewittert																		
Alpha		0.05		Alpha		0.05		Alpha		0.05								
Error Degrees of Freedom		40		Error Degrees of Freedom		40		Error Degrees of Freedom		40								
Error Mean Square		0.054669		Error Mean Square		0.093873		Error Mean Square		0.04658								
Critical Value of t		2.02108		Critical Value of t		2.02108		Critical Value of t		2.02108								
Least Significant Difference		0.2728		Least Significant Difference		0.3575		Least Significant Difference		0.2518								
Means with the same letter are not significantly different.				Means with the same letter are not significantly different.				Means with the same letter are not significantly different.										
t Grouping		Mean	N	OF	t Grouping		Mean	N	OF	t Grouping		Mean	N	OF				
A		1.7883	6	7	A		1.3300	6	7	A		1.0417	6	7				
B		1.3767	6	3	A		1.1933	6	4	A		1.0033	6	3				
B		1.2883	6	4	A		1.1300	6	3	B		A	0.9833	6	4			
C		0.9283	6	1	B		A	1.0517	6	5	B		A	C	0.8567	6	1	
C		0.9167	6	5	B		A	0.9917	6	6	B		A	C	0.7933	6	8	
C		0.9117	6	6	B		C	0.7200	6	2	B			C	0.7450	6	5	
C		0.7050	6	8	B		C	0.7167	6	8			C	0.7150	6	6		
C		0.6800	6	2	B		C	0.5683	6	1			C	0.6317	6	2		
Kiefer GR1																		
trocken unbewittert				nass unbewittert				nass bewittert										
Alpha		0.05		Alpha		0.05		Alpha		0.05								
Error Degrees of Freedom		40		Error Degrees of Freedom		39		Error Degrees of Freedom		40								
Error Mean Square		0.255381		Error Mean Square		0.33632		Error Mean Square		0.332045								
Critical Value of t		2.02108		Critical Value of t		2.02269		Critical Value of t		2.02108								
Least Significant Difference		0.5897		Least Significant Difference		0.6857		Least Significant Difference		0.6724								
Means with the same letter are not significantly different.				Means with the same letter are not significantly different.				Means with the same letter are not significantly different.										
t Grouping		Mean	N	OF	t Grouping		Mean	N	OF	t Grouping		Mean	N	OF				
A		4.0000	6	7	A		2.4850	6	7	A		2.7383	6	7				
A		3.9283	6	4	B		A	1.8000	6	4	B		A	2.1783	6	3		
A		3.7200	6	5	B			1.7667	6	5	B		C	1.9517	6	4		
B		3.4200	6	3	B		C	1.6850	6	2	B		C	1.7850	6	2		
B		3.0983	6	2	B		C	D	1.4733	6	3	B		C	D	1.6933	6	1
B		3.0067	6	6	B		C	D	1.1700	6	8	B		C	D	1.5967	6	5
B		2.9900	6	1	B		C	D	1.0450	6	6			C	D	1.4600	6	8
B		2.8567	6	8			C	D	0.8800	5	1			D	1.0650	6	6	

Bild 37: Bruchbild nach Haftfestigkeitstest bei 3 verschiedenen Bearbeitungsvarianten und trockenem respektive nassem Holzsubstrat (Kiefer, GR1, unbewittert)



- Die Art respektive Lage des Bruches (Bruchmodus) ist ein Indikator für die Verankerung der Beschichtung im Holz respektive der Adhäsion zwischen den einzelnen Schichten der Beschichtung. Die Beurteilung ist allerdings recht schwierig und nicht immer eindeutig. Der Bruchmodus wird zudem stark vom Feuchtezustand des Substrates beeinflusst (Bild 36, rechte Spalte). Beim trockenen Substrat beträgt der Holzbruchanteil zwischen 20 und 60%, der restliche Anteil verteilt sich auf Brüche zwischen Holz und Grundierung sowie innerhalb der Beschichtung. Demgegenüber ist beim nassen Holz praktisch kein Holzbruchanteil festzustellen und der Bruch liegt zumeist im Interface-Bereich zwischen Holz und Grundierung (Bild 37).
- Die Gitterschnittprüfung nach 1-jähriger Freibewitterung bestätigt die Ergebnisse des mechanischen Abreissversuches. Es sind nur geringfügige Ablösungen entlang der Einschnitte zu beobachten (Bild 38) und die entsprechende Beurteilung ergibt Bewertungen im unteren Skalenbereich zwischen 1 und 2 (Bild 39 links). Die geschliffenen Oberflächen OF3 und OF4 zeigen dabei die geringsten Ablösungen. Dieses Ergebnis entspricht qualitativ den Ergebnissen des mechanischen Abreissversuches, wobei dort die mit neuen Messern strukturgehobelte Oberfläche OF7 sogar noch etwas höhere Haftfestigkeiten zeigt als die geschliffenen Oberflächen OF3-4 (Bild 39 rechts). Bei der Gitterschnittprüfung ist zwischen Fichte und Kiefer kein genereller Unterschied vorhanden, während beim mechanischen Abreissversuch wie bereits festgestellt die Werte bei Kiefer leicht höher liegen als bei Fichte. Dies ist vermutlich ein Hinweis auf einen Einfluss der Rohdichte des Substrates (d.h. höhere Rohdichte bei Kiefer) beim mechanischen Abreissversuch.
- Aufgrund der beschränkten Anzahl von Ästen im verfügbaren Probenmaterial konnte die Haftfestigkeit der Beschichtung auf den Ästen nur ansatzweise geprüft werden und für die Auswertung wurden deshalb die Daten aller Grundierungs-Varianten zusammengefasst. Für die Gitterschnittprüfung bei den Freibewitterungsproben standen zudem nur 2 Wiederholungsproben zur Verfügung, da eine Probe noch weiterbewittert wird. Erwartungsgemäss zeigen sich auf den Ästen etwas mehr Ablösungen als beim störungsfreien Holz (Bild 40 links). Der Unterschied ist allerdings gering und es zeigen sich insbesondere keine auf die Oberflächenbearbeitung zurückzuführende Effekte. Vielmehr scheint ein Ast-individueller Einfluss vorzuliegen (z.B. Schnittrichtung, Inhaltsstoffe). Die entsprechenden Daten des mechanischen Abreissversuches bestätigen diese Beobachtungen (Bild 40 rechts). Die Haftfestigkeit der Beschichtung auf den Ästen liegt etwa 40% tiefer als beim störungsfreien Holz und zeigt ebenfalls keine Tendenzen bezüglich Oberflächenbearbeitungs-Varianten.

Bild 38: Beispiel von Gitterschnittprüfungen nach 1 Jahr Freibewitterung bei 3 verschiedenen Bearbeitungsvarianten (Fichte, GR2, je 2x im störungsfreien Holz und 1x auf Ast)



Bild 39: Haftfestigkeit der Beschichtung nach einer Bewitterung (störungsfreies Holz, trocken)

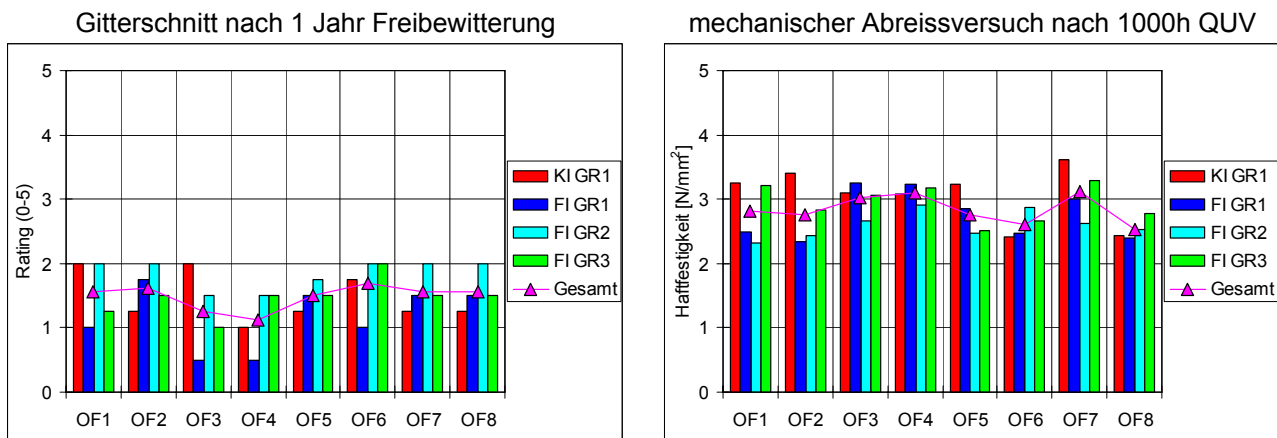
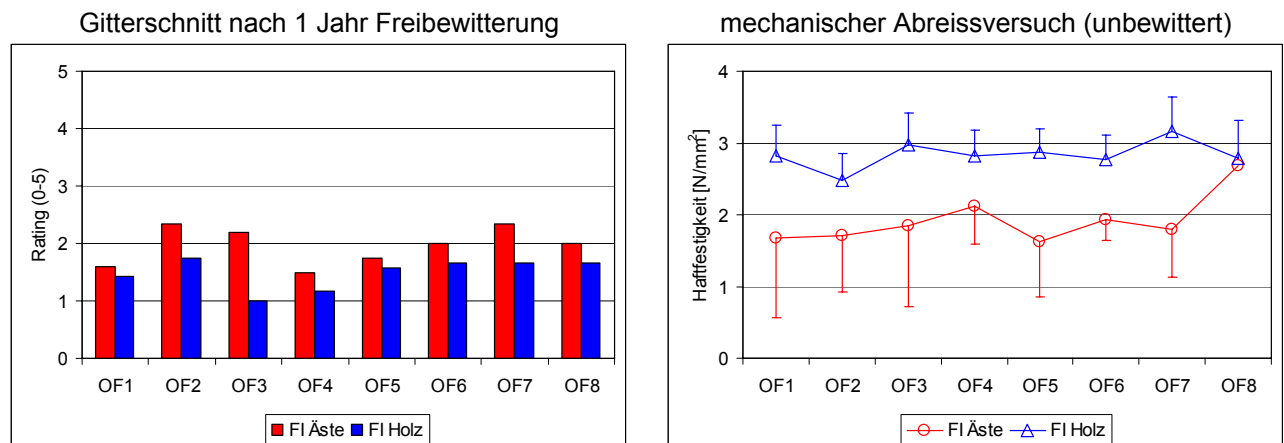


Bild 40: *Haftfestigkeit der Beschichtung auf Ästen im Vergleich zu störungsfreiem Holz (Fichte, alle Grundierungen zusammengefasst, trocken). Die Fehlerbalken zeigen die Standardabweichung zwischen den Wiederholungsmessungen pro Variante (FI Äste=1-7, FI Holz=18).*



3.3 Zusammenhänge und Wechselwirkungen zwischen Kenngrössen

Von besonderem Interesse für die vorliegende Fragestellung ist die Untersuchung der vielfältigen Zusammenhänge und Wechselwirkungen zwischen den verschiedenen Mess- und Beurteilungsgrössen in Abhängigkeit von den Versuchsvarianten (Oberflächenbearbeitung, Beschichtung, Holzart). Dies wird nachfolgend anhand von 2-dimensionalen Darstellungen angestrebt, welche sowohl das Erkennen von grundsätzlichen Zusammenhängen als auch von Ähnlichkeiten/Unterschieden (Gruppenbildung) von einzelnen Versuchsvarianten ermöglichen. Dadurch können vielfach Erkenntnisse aus den vorhergehenden 1-dimensionalen Darstellungen verdeutlicht werden.

In einer ersten Gruppe von Grafiken wird die Zusammenhangskette Rauigkeit → Benetzung → Haftfestigkeit → Witterungsbeständigkeit unterteilt nach Beschichtungsstoff und Holzart beleuchtet (Bilder 41-43). Abschliessend wird die Übereinstimmung von ausgewählten Kennwerten bei Fichte und Kiefer als Indikator für generelle Effekte der Oberflächenbearbeitung untersucht (Bild 44). Um die Anzahl der Vergleiche zu reduzieren, wurden die Kennwerte teilweise als Mittelwerte über verschiedene Prüfzustände (trocken/nass, unbewittert/bewittert) oder Versuchsvarianten (Beschichtungen) verwendet.

Zur Erleichterung der Interpretation dieser Grafiken sind die Oberflächenbearbeitungs-Varianten in den Grafiken nach einem fixen Symbol-Schema gemäss Tabelle 15 gekennzeichnet. Dreiecke deuten dabei auf Oberflächen hin, welche mit neuen (frisch geschärften) Hobelmessern bearbeitet wurden. Kreise bedeuten abgenutzte Hobelmesser. Grün und rosa gefüllte Symbole markieren die mit neuen respektive abgenutzten Schleifbändern bearbeiteten Oberflächen. Und die im Zentrum des Interesses stehenden, strukturgehobelten Oberflächen werden mit rot umrandeten Symbolen dargestellt, wobei die mit neuen Strukturhobel-Messern bearbeitete Oberfläche durch eine gelbe Füllung besonders hervorgehoben wird.

Tabelle 15: *Grafiksymbole für die verschiedenen Varianten der Oberflächenbearbeitung*

Id	Hobeln		Schleifen		Symbol
	Typ	Zustand	Typ	Zustand	
OF1	Hobeln herkömmlich	neu	ohne		△
OF2		abgenutzt			○
OF3	Hobeln herkömmlich + Schleifen	neu	Körnung 80	neu	▲
OF4		abgenutzt			●
OF5		neu		abgenutzt	▲
OF6		abgenutzt			●
OF7	Strukturhobeln	neu	ohne		▲
OF8		abgenutzt			○

Bild 41: Zusammenhang zwischen Rauigkeit und Benetzung (Kontaktwinkel) der Oberflächen

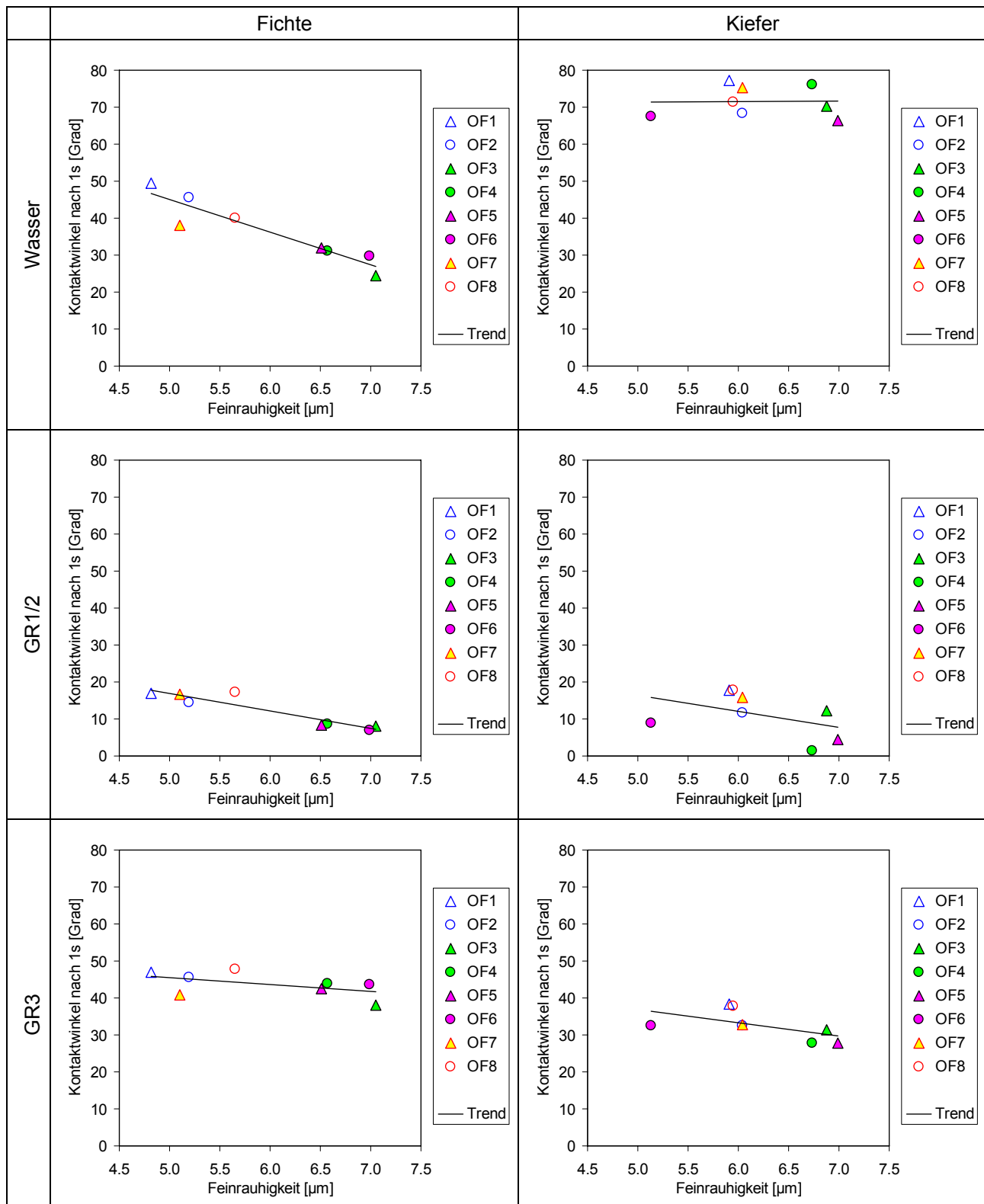


Bild 42: Zusammenhang zwischen Benetzung (Kontaktwinkel) und Haftfestigkeit der Beschichtung

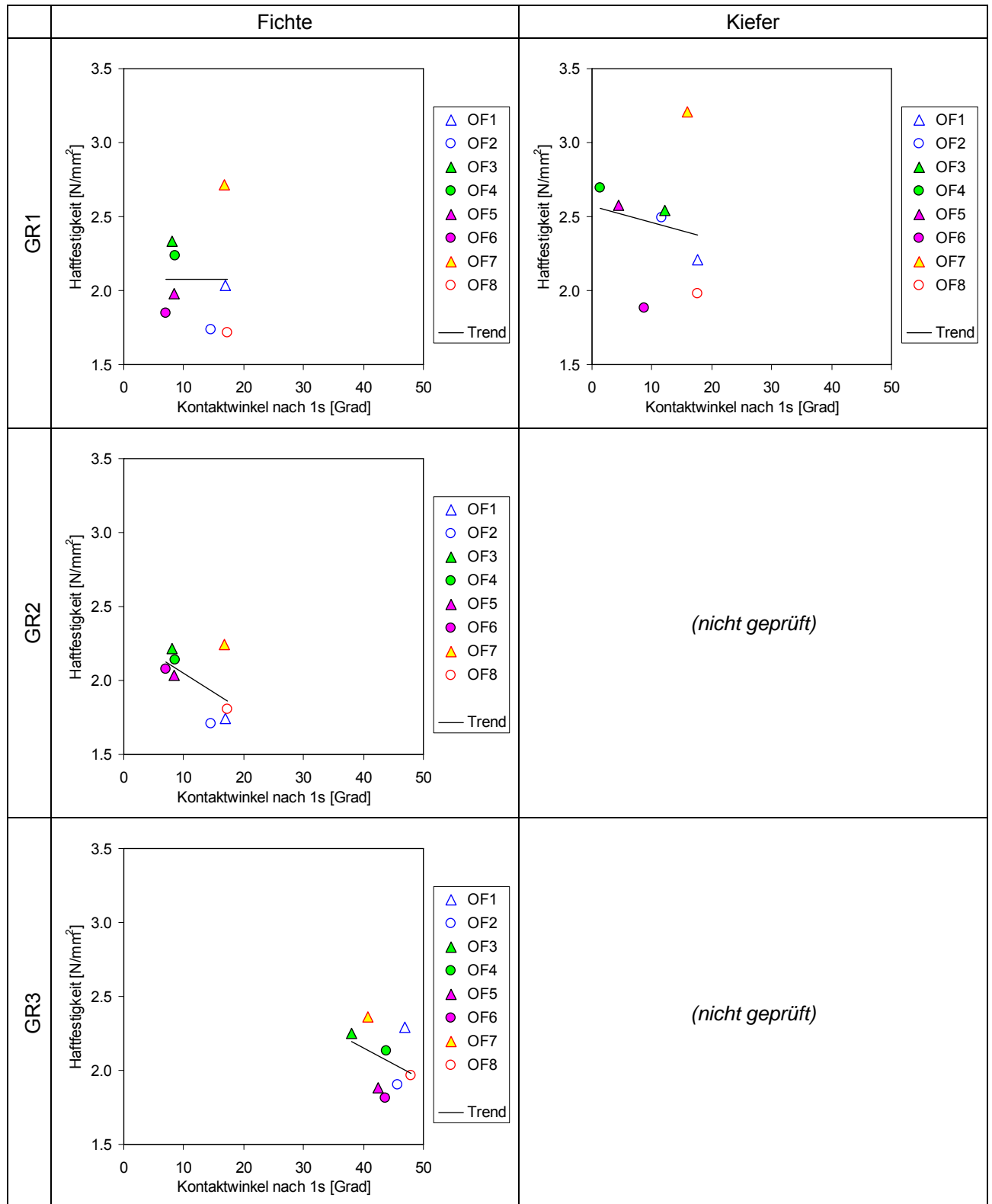


Bild 43: Zusammenhang zwischen Haftfestigkeit und Witterungsbeständigkeit (Rissmenge) der Beschichtung

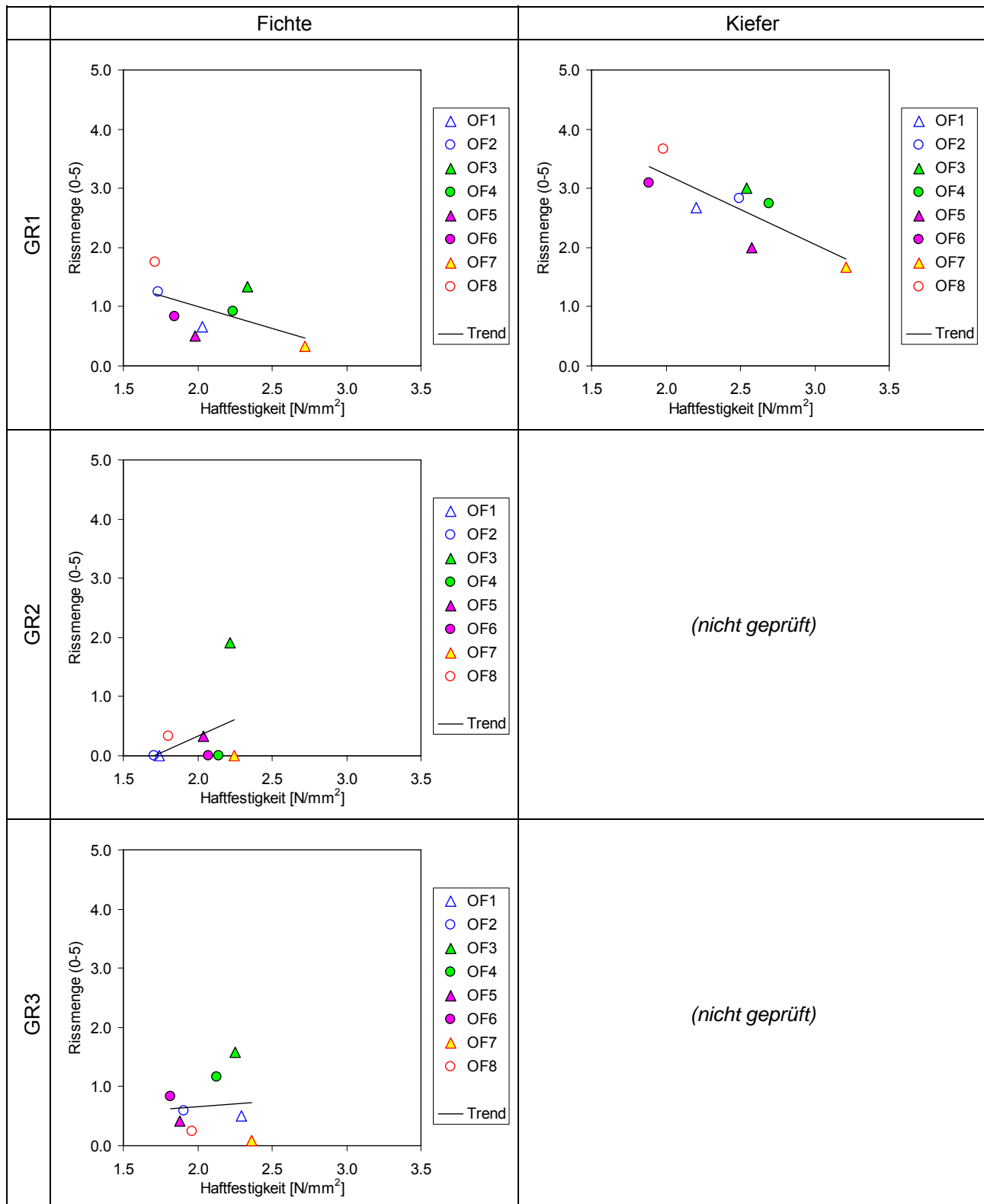
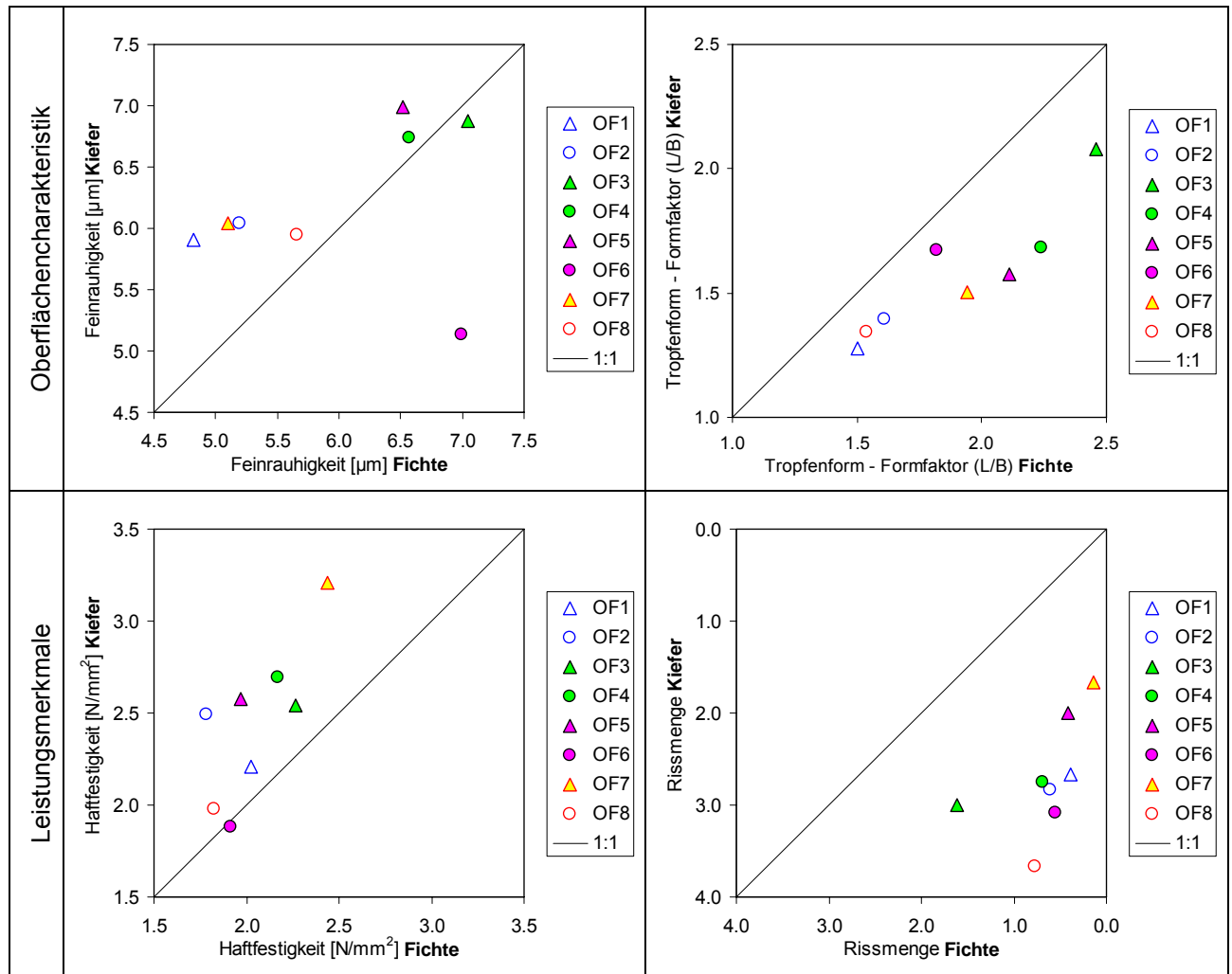


Bild 44: Zusammenhang von ausgewählten Kennwerten bei Fichte und Kiefer



Bewertung:

- Erwartungsgemäss zeigen Rauhigkeit (Feinrauhigkeit) und Benetzung (Kontaktwinkel) der Oberflächen einen tendenziellen Zusammenhang (Bild 41), indem rauhere Oberflächen stärker benetzen (kleinerer Kontaktwinkel). Bei der Interpretation der Daten muss allerdings beachtet werden, dass der Rauigkeits-Kennwert quer zur Faserrichtung, der Kontaktwinkel jedoch bezogen auf die Tropfenausbreitung in Faserrichtung gemessen wird. Zudem wird der Zusammenhang vermutlich nicht nur durch die Rauigkeit im engeren Sinne beeinflusst, sondern ist ebenso Ausdruck verschiedener weiterer 'Struktur'-Faktoren (z.B. Zellschäden) der einzelnen Oberflächenbearbeitungs-Varianten.

Erkennbar ist eine klare Trennung in zwei relativ homogene Gruppen der gehobelten und geschliffenen Oberflächen. Die Trennschärfe ist dabei bezüglich Rauigkeit etwas besser als bezüglich Benetzung. Die strukturgehobelten Oberflächen (OF7-8) verhalten sich grundsätzlich wie die anderen gehobelten Oberflächen (OF1-2). Fichte und Kiefer zeigen qualitativ gleiche Ergebnisse, aber mit Unterschieden in den absoluten Werten der Kontaktwinkel. Die auffallend geringe Rauigkeit der Oberfläche OF6 bei Kiefer wird wie bereits erwähnt als Ausreisser erachtet.

- Auch der Zusammenhang zwischen der Benetzung der Oberflächen (Kontaktwinkel) mit dem flüssigen Beschichtungsstoff und der Haftfestigkeit der trockenen Beschichtung (Mittelwert aller Messungen trocken/nass und unbewittert/bewittert) entspricht zumindest qualitativ den Erwartungen (Bild 42): Je besser die Benetzung (kleinerer Kontaktwinkel), umso grösser ist tendenziell die Haftfestigkeit. Der Zusammenhang ist allerdings nicht sehr ausgeprägt und es ist auch nicht immer eine klare Gruppierung der Oberflächenvarianten vorhanden. Generell ist aber wiederum eine gewisse Trennung zwischen gehobelten und geschliffenen Oberflächen zu erkennen, wobei gehobelte Oberflächen eher schlechter benetzen und eine etwas schlechtere Haftung ergeben als geschliffene Oberflächen. Die mit neuen Messern strukturgehobelte Oberfläche OF7 weist selbst im Vergleich zu den geschliffenen Oberflächen eine hohe Haftfestigkeit auf.
- Obwohl nicht unbedingt ein ursächlicher Zusammenhang zwischen der Haftfestigkeit der trockenen Beschichtung (Mittelwert aller Messungen trocken/nass und unbewittert/bewittert) und der Witterungsbeständigkeit (Mittelwert der Rissbildung aus Freibewitterung und QUV) besteht, ist doch ein gleichläufiger Effekt zu beobachten (Bild 43): Oberflächen mit einer vergleichsweise hohen Haftfestigkeit weisen nach einer Bewitterung eher weniger Risse auf. Besonders deutlich ist dies sowohl bei Fichte als auch bei Kiefer im Falle der Grundierung GR1 zu beobachten. Dabei bilden die mit neuen respektive abgenutzten Messern strukturgehobelten Oberflächen OF7 und OF8 die qualitativen Gegenpole. Klammert man die geschliffene Oberfläche OF3 mit der besonders starken Rissbildung aus, so stimmt der generelle Zusammenhang auch bei den Grundierungen GR2 und GR3.
- Schliesslich lassen sich aus der Übereinstimmung der gleichen Kennwerte (Feinrauhigkeit, Benetzung, Haftfestigkeit und Witterungsbeständigkeit) bei Fichte und Kiefer grundsätzliche Effekte der verschiedenen Oberflächenbearbeitungs-Varianten erkennen (Bild 44). Die Grafiken sind derart gestaltet, dass gewünschte Effekte in der rechten oberen Ecke des Datenraumes liegen, während eher ungünstige Werte in die untere linke Ecke fallen (Ausnahme: Rauigkeit, wo keine diesbezügliche Qualifizierung möglich ist). Bei der Rissmenge wurde dazu die Wertreihenfolge der Achsen umgekehrt.
 - Rauigkeit: Bei den geschliffenen Oberflächen (mit Ausnahme von OF6) stimmt die Rauigkeit bei Fichte und Kiefer sehr gut überein, während sie bei den gehobelten Oberflächen (OF1-2, OF7-8) bei Kiefer höher ist als bei Fichte. Durch die abseits stehende Position der Oberfläche OF6 wird die Vermutung bestätigt, dass bei Kiefer eine ungewöhnliche geringe Rauigkeit gemessen wurde. Sowohl bei Fichte als auch bei Kiefer ist eine klare Unterteilung in gehobelte und geschliffene Oberflächen festzustellen, mit einer deutlich grösseren Rauigkeit bei den geschliffenen Oberflächen. Die strukturgehobelten Oberflächen (OF7-8) haben die gleiche Rauigkeit wie die herkömmlich gehobelten Oberflächen (OF1-2).
 - Benetzung: Die Position der verschiedenen Oberflächen bezüglich Benetzung, ausgedrückt in der Tropfenform, stimmt bei Fichte (Mittelwert über Grundierungen GR1/2 und GR3) und Kiefer (nur Grundierung GR1/2) sehr gut überein. Kiefer benetzt aber generell weniger stark, was sich in der gegenüber Fichte rundlicheren Tropfenform (kleinerer Formfaktor) zeigt. Die geschliffenen Oberflächen OF3-6 werden klar stärker benetzt als die gehobelten, mit der grössten Benetzung bei der mit neuen Werkzeugen gehobelt/geschliffenen Oberfläche OF3. Die mit neuen Messern strukturgehobelte Oberfläche OF7 nimmt bezüglich Benetzung eine Zwischenstellung zwischen den geschliffenen und den lediglich gehobelten Oberflächen ein.
 - Haftfestigkeit: Auch bei der Haftfestigkeit (Mittelwert Messungen trocken/nass und unbewittert/bewittert sowie über alle Grundierungen GR1-3) stimmt die Gruppierung der verschiedenen Oberflächen bei Fichte und Kiefer weitgehend überein. Auf Kiefer ist die Haftfestigkeit jedoch insbesondere bei hohen Haftfestigkeiten grösser als auf Fichte. Die Haftfestigkeit ist auf den geschliffenen Oberflächen generell höher als auf den lediglich gehobelten (Ausnahme OF6). Die mit neuen Messern strukturgehobelte Oberfläche OF7 zeigt mit Abstand die höchste Haftfestigkeit.
 - Witterungsbeständigkeit: Bei der Rissbildung durch eine Bewitterung (Mittelwert der Rissbildung aus Freibewitterung und QUV über Grundierungen GR1-3) stimmt die relative Positionierung bei Fichte und Kiefer ebenfalls gut überein (Achtung: umgekehrte Wertreihenfolge der Achsen). Die Rissbildung ist jedoch bei Fichte deutlich geringer als bei Kiefer. Es ist keine klare Unterteilung in gehobelte und geschliffene Oberflächen festzustellen. Bei beiden Holzarten besonders ungünstig verhalten sich jedoch die mit neuen Werkzeugen gehobelte und geschliffene Oberfläche OF3 sowie die mit abgenutzten Messern strukturgehobelte Oberfläche OF8, während demgegenüber die mit neuen Messern strukturgehobelte Oberfläche OF7 die geringste Rissbildung aufweist.

4 Schlussfolgerungen

Die umfangreichen Ergebnisse der Untersuchungen erlauben einerseits eine gemäss den Projektzielen vergleichende Beurteilung der Charakteristik und der Wirksamkeit des 'Strukturhobelns'. Es ergeben sich aber auch verschiedene grundsätzliche Erkenntnisse zum Zusammenwirken der drei Systemkomponenten Trägermaterial (Holz), Beschichtungsstoff und Applikation.

Die aus den Ergebnissen gezogenen Schlussfolgerungen sind primär für die untersuchten Versuchsvarianten gültig, insbesondere für filmbildende, deckende Beschichtungen. Eine Übertragbarkeit auf dünnsschichtige Systeme (z.B. Lasuren) ist nicht unbedingt gegeben.

4.1 Gesamtbeurteilung

In der Zusammenfassung ergeben sich bezüglich des Einflusses der mechanischen Oberflächenbearbeitung folgende Ergebnisse:

- Visuelles Erscheinungsbild / Oberflächenstruktur: Hobeln und Schleifen führen zu makro- und mikroskopisch gut sichtbaren Unterschieden im Erscheinungsbild der Holzoberflächen. Die mit neuen Messern lediglich gehobelten Oberflächen wirken relativ kompakt und glatt und lassen noch verschiedene holzanatomische Details erkennen. Demgegenüber sind die geschliffenen Oberflächen durch viele lose Holzfasern geprägt, welche die Details der darunterliegenden Holzstruktur verdecken. Die gemessene Rauigkeit ist bei geschliffenen Oberflächen deutlich grösser als bei gehobelten Oberflächen. Abgenutzte Hobelmesser und das Schleifen führen zu vermehrten Faserausrisen und oberflächennahen Zellschäden. Auf den mit neuen Messern strukturgehobelte Oberfläche ist eine deutliche 'Riffel'-Struktur erkennbar, die Oberfläche wirkt jedoch insgesamt ebenfalls sehr glatt.
- Benetzungsverhalten: Das unterschiedliche Benetzungsverhalten der (chemisch identischen) Holzoberflächen deutet auf einen erheblichen Einfluss der durch die Bearbeitungsvarianten erzeugten unterschiedlichen Oberflächenstrukturen hin. Die geschliffenen Oberflächen benetzen tendenziell stärker als die lediglich gehobelten. Die mit neuen Messern strukturgehobelte Oberfläche nimmt eine Zwischenstellung zwischen den geschliffenen und den lediglich gehobelten Oberflächen ein.
- Beschichtungsaufbau: Die untersuchten Oberflächenbearbeitungs-Varianten haben keinen erkennbaren Einfluss auf die Eindringung der Grundierungen und die durchschnittliche Schichtdicke. Hingegen beeinflusst die Struktur der Holzoberfläche die Gleichmässigkeit des Beschichtungsfilms, indem bei relativ glatten Oberflächen der Beschichtungsfilm sehr gleichmässig und glatt wird. Unregelmässigkeiten der Holzoberfläche ergeben hingegen auch eine ungleichmässige Schichtdicke. Auf den strukturgehobelten Oberflächen sind die 'Riffel' auch noch im beschichteten Zustand erkennbar. An deren Spitze ist die Schichtdicke vermindert.
- Haftfestigkeit: Auf geschliffenen Oberflächen haften Beschichtungen generell besser als auf herkömmlich gehobelten. Die mit neuen Messern strukturgehobelte Oberfläche zeigt aber mit Abstand die höchste Haftfestigkeit aller untersuchten Bearbeitungsvarianten. Dies ist besonders deutlich bei der Nasshaftung festzustellen. Die Haftfestigkeit der Beschichtung ist auf Ästen ca. 40% geringer als im störungsfreien Holz. Mit der beschränkten Probenzahl konnte jedoch bei Ästen kein Einfluss der Oberflächenbearbeitung nachgewiesen werden.
- Witterungsbeständigkeit: Bezüglich Rissbildung durch eine Bewitterung ist kein genereller Unterschied zwischen gehobelten und geschliffenen Oberflächen festzustellen. Vielmehr scheint sich in der Witterungsbeständigkeit die Summe verschiedener positiver oder negativer Faktoren auszuwirken. Besonders ungünstig verhalten sich die mit neuen Werkzeugen gehobelt/geschliffene Oberfläche und die mit abgenutzten Messern strukturgehobelte Oberfläche, während die mit neuen Messern strukturgehobelte Oberfläche die geringste Rissbildung aufweist.

Die Ergebnisse des Projektes erlauben folgende Schlussfolgerungen:

- Mit neuen (scharfen) Messern strukturgehobelte Oberflächen zeigen ein spezielles Verhalten, welches je nach betrachteter Eigenschaft eher gehobelten oder eher geschliffenen Oberflächen entspricht oder sich gar von beiden abhebt. Die beobachteten Effekte sind meist relativ klein, aber teilweise statistisch signifikant. Mit den getesteten Beschichtungssystemen wurde insbesondere ein positiver Effekt bezüglich Haftfestigkeit und Witterungsbeständigkeit festgestellt. Zur Oberflächenbearbeitung für eine nachfolgende, filmbildende Beschichtung kann Strukturhobeln damit als effiziente Alternative zum herkömmlichen Hobeln/Schleifen eingesetzt werden.

- Abgenutzte Werkzeuge wirken sich grundsätzlich negativ auf Oberflächenstruktur und Leistungsmerkmale aus. Der rechtzeitige Werkzeugwechsel ist daher entscheidend für die Produktqualität. Einsatz und Einfluss des Jointens müssen in diesem Zusammenhang ebenfalls genauer abgeklärt werden.
- Aufgrund der komplexen Wechselwirkungen zwischen den drei Systemkomponenten Trägermaterial (Holz), Beschichtungstoff und Applikation sowie zwischen Oberflächeneigenschaften und Leistungsmerkmalen ist kein einfacher Kausalzusammenhang Rauigkeit → Benetzung → Haftfestigkeit → Witterungsbeständigkeit gegeben. Trotz den festgestellten generellen Trends sind daher Voraussagen zum Verhalten spezifischer Behandlungs-Kombinationen schwierig und neue Produktionsprozesse müssen zwingend durch Versuche abgesichert werden.

4.2 Umsetzung / Forschungsbedarf

Das durchgeführte Projekt hat den grundsätzlichen Nutzen des Strukturhobelns aufgezeigt. Noch bestehen aber verschiedene offene Fragen und die Notwendigkeit zu Detailoptimierungen. Eine Fortsetzung der Arbeiten (z.B. im Rahmen eines umfassenderen KTI-Projektes) ist daher notwendig für die weitere Entwicklung und Umsetzung der Idee 'Strukturhobeln'.

Folgende Punkte bedürfen z.B. noch einer eingehenderen Untersuchung:

- Verlauf des Schärfezustandes der Hobelmesser → Einfluss auf Oberflächenqualität
- Einsatz des Strukturhobelns bei der Profilierung
- Vertiefte Untersuchung Einfluss Oberflächenstruktur bezüglich Haftung auf Ästen
- Optimierung 'Zahnung' Strukturhobelmesser
- Handhabung / Einfluss Jointen
- Sichtbarkeit der Riffel
- Filmdicke auf Riffeln

Neben der Anwendung für industriell beschichtete Fassadenschalungen im Aussenbereich sind weitere Einsatzgebiete zu untersuchen, insbesondere eine Ausweitung auf die Verklebung von schwierig zu verleimenden Holzarten sowie generell von Laubholz.

Literatur

- Arnold M. (2003). Properties and utilisation of native wood species. A review of activities at the EMPA-Wood laboratory. In: EMPA-symposium on wood research - knowledge and concepts for future demands. A tribute to Prof Dr Jürgen Sell. Dübendorf, Switzerland, January 17, pp. 63-81.
- Arnold M., Feist W.C., Williams R.S. (1992). Effect of weathering of new wood on the subsequent performance of semitransparent stains. *Forest Products Journal* 42: 10-14.
- Arnold M., Künniger T., Fischer A., Bordeanu N., Risi W., Strub E. (2007). Dauerhafter Holzoberflächenschutz auf der Basis von Nanocomposites. Abschlussbericht KTI-Projekt 6948.2 IWS-IW.
- Arnold M., Lemaster R.L., Dost W.A. (1992). Surface characterization of weathered wood using a laser scanning system. *Wood and Fiber Science* 24: 287-293.
- Böttcher P. (1977). Einfluss verschiedenartiger Oberflächenprofilierungen an Holz auf die Veränderung der Wetterbeständigkeit. *Holz als Roh- und Werkstoff* 35: 247-251.
- Carrano A.L., Taylor J.B., Lemaster R.L. (2004). Machining-induced subsurface damage of wood. *Forest Products Journal* 54: 85-91.
- COST Action E13 (2002). Wood adhesion and glued products. State of the art - Report, WG1: Wood adhesives.
- de Meijer M., Thurich K., Militz H. (1998). Comparative study on penetration characteristics of modern wood coatings. *Wood Science and Technology* 32: 347-365.
- de Moura L.F., Hernandez R.E. (2006). Evaluation of varnish coating performance for three surfacing methods on sugar maple wood. *Forest Products Journal* 56: 130-136.
- Feist W.C. (1988). Weathering performance of finished southern pine plywood siding. *Forest Products Journal* 38: 22-28.
- Hernandez R.E., Cool J. (2008). Evaluation of three surfacing methods on paper birch wood in relation to water- and solvent-borne coating performance. *Wood and Fiber Science* 40: 459-469.
- Hernandez R.E., Rojas G. (2002). Effects of knife jointing and wear on the planed surface quality of sugar maple wood. *Wood and Fiber Science* 34: 293-305.
- Kamke F.A., Lee J.N. (2007). Adhesive penetration in wood - a review. *Wood and Fiber Science* 39: 205-220.
- Lohmann U. (2003). Holz-Lexikon.
- Murmanis L., River B.H., Stewart H.A. (1986). Surface and subsurface characteristics related to abrasive-planing conditions. *Wood and Fiber Science* 18: 107-117.
- Pahlitzsch G. (1966). Internationaler Stand der Forschung auf dem Gebiet des Hobelns und FräSENS von Holz und Holzwerkstoffen. *Holz als Roh- und Werkstoff* 24: 579-593.
- Pahlitzsch G. (1970). Internationaler Stand der Forschung auf dem Gebiet des Schleifens von Holz. *Holz als Roh- und Werkstoff* 28: 329-343.
- Richter K. (2005). Neue Materialien und Beschichtungen für den Oberflächenschutz. *Schweizer Holzbau* 7/2005: 13-17.
- Richter K., Feist W.C., Knaebe M.T. (1994). The effect of surface roughness on the performance of finishes. EMPA-Forschungs- und Arbeitsberichte, Bericht 115/31.
- Riegel A. (1997). Gefügeschädigungen durch spanende Bearbeitung - Stand der Erkenntnisse und mögliche Messmethoden. *Holz als Roh- und Werkstoff* 55: 111-117.

- Schirle M.A., Richter K. (2002). Interaction of 1K PUR adhesives and different wood surface parameters. In: Lignovisionen, Band 4. Int. symposium on wood based materials, COST action E13: Wood adhesion and glued products, Vienna, Austria, September 19-20, pp. 137-147.
- Singh A.P., Anderson C.R., Warnes J.M., Matsumura J. (2002). The effect of planing on the microscopic structure of *Pinus radiata* wood cells in relation to penetration of PVA glue. *Holz als Roh- und Werkstoff* 60: 333-341.
- Stehr M., Gardner D.J., Walinder M.E.P. (2001). Dynamic wettability of different machined wood surfaces. *Journal of Adhesion* 76: 185-200.
- Stehr M., Johansson I. (2000). Weak boundary layers on wood surfaces. *Journal of Adhesion Science and Technology* 14: 1211-1224.
- Stewart H.A., Crist J.B. (1982). SEM examination of subsurface damage of wood after abrasive and knife planing. *Wood Science* 14: 106-109.
- Turkulin H., Richter K., Sell J. (2002). Adhesion of water-borne acrylic and hybrid paint on wood treated with primers. *Surface coatings international Part B: Coatings transactions* 85: 273-280.
- Vick C.B. (1999). Adhesive bonding of wood materials. *Wood handbook—Wood as an engineering material*. Gen. Tech. Rep. FPL–GTR–113. U.S. Department of Agriculture, Forest Service, Forest Products Laboratory, Madison, WI.
- Williams R.S., Feist W.C. (1994). Effect of preweathering, surface-roughness, and wood species on the performance of paint and stains. *Journal of Coatings Technology* 66: 109-121.
- Williams R.S., Jourdain C., Daisey G.I., Springate R.E. (2000). Wood properties affecting finish service life. *Journal of Coatings Technology* 72: 35-42.

Normen

- EN 927-1 (1996). Lacke und Anstrichstoffe - Beschichtungsstoffe und Beschichtungssysteme für Holz im Aussenbereich - Teil 1: Einteilung und Auswahl
- EN 927-3 (2006). Lacke und Anstrichstoffe - Beschichtungsstoffe und Beschichtungssysteme für Holz im Aussenbereich - Teil 3: Freibewitterung
- EN 927-6 (2006). Lacke und Anstrichstoffe - Beschichtungsstoffe und Beschichtungssysteme für Holz im Aussenbereich - Teil 6: Künstliche Bewitterung von Holzbeschichtungen mit fluoreszierenden UV-Lampen und Wasser
- EN 971-1 (1996). Lacke und Anstrichstoffe - Fachausdrücke und Definitionen für Beschichtungsstoffe - Teil 1: Allgemeine Begriffe
- ISO 2808 (2007). Beschichtungsstoffe – Bestimmung der Schichtdicke
- ISO 2409 (1992). Lacke und Anstrichstoffe – Gitterschnittprüfung
- ISO 4624 (2002). Beschichtungsstoffe - Abreissversuch zur Bestimmung der Haftfestigkeit
- ISO 4628-1 (2003). Beschichtungsstoffe - Beurteilung von Beschichtungsschäden - Bewertung der Menge und der Grösse von Schäden und der Intensität von gleichmässigen Veränderungen im Aussehen - Teil 1: Allgemeine Einleitung und Bewertungssystem
- ISO 4628-4 (2003). Beschichtungsstoffe - Beurteilung von Beschichtungsschäden - Bewertung der Menge und der Grösse von Schäden und der Intensität von gleichmässigen Veränderungen im Aussehen - Teil 4: Bewertung des Rissgrades
- ISO 4628-5 (2003). Beschichtungsstoffe - Beurteilung von Beschichtungsschäden - Bewertung der Menge und der Grösse von Schäden und der Intensität von gleichmässigen Veränderungen im Aussehen - Teil 5: Bewertung des Abblätterungsgrades