

Machbarkeitsstudie: Aussen- bekleidung mit Buchenschin- deln

Schlussbericht

Berner Fachhochschule
Architektur, Holz und Bau



Bericht Nr.	2724-SB-01
Auftrag Nr.	2724.DHB
Klassifizierung	Öffentlich
Datum	17.10.2010
Auftraggeber	Bundesamt für Umwelt BAFU, 3003 Bern
Adresse der Forschungsstelle	Berner Fachhochschule Architektur, Holz und Bau Abteilung F+E, Werkstoffe und Holztechnologie Solithurnstrasse 102, CH-2504 Biel Tel / Fax +41 (0)32 344 0 341 / 391 www.ahb.bfh.ch
Verfasser	Dr. Thomas Volkmer
Projektverantwortlicher	Andreas Müller
Abteilungsleiter	Rene Graf

INHALTSVERZEICHNIS

1	Abstrakt.....	3
2	Einleitung	4
3	Zielsetzungen	4
4	Projektbeteiligte.....	5
5	Material und Methoden	5
5.1	Versuchsflächen	5
5.1.1	Schindelherstellung.....	5
5.1.2	Schindelschirm	7
5.1.3	Beschichtung der Schindeln	8
5.1.4	Schindelschirm mit Unterkonstruktion	8
5.2	Experimentelle Untersuchungen.....	9
5.2.1	Freilandbewitterung.....	9
5.2.2	Farbentwicklung.....	9
5.2.3	Kontaktwinkel.....	10
5.2.4	Rauigkeit.....	11
6	Ergebnisse und Diskussion.....	13
6.1	Farbliche Entwicklung und optisches Erscheinungsbild.....	13
6.2	Oberflächenspannung/Kontaktwinkel	19
6.3	Oberflächenrauigkeit.....	21
7	Zusammenfassung.....	24
8	Bestimmungen zum vorliegenden Bericht	25
8.1	Umfang des Berichts	25
9	Verzeichnisse	26
9.1	Tabellen und Abbildungsverzeichnis	26
Anhang A:	27
A.1	Oberflächenrauigkeit Ra [μm], Dicke [mm].....	27
A.2	Farbdaten.....	28
A.3	Oberflächenspannung/Kontaktwinkel [$^{\circ}$].....	29
Anhang B:	Finanzbericht	30

1 ABSTRAKT

In der vorliegenden Arbeit wurde das Verhalten von verschiedenen Schindelvarianten im Feldversuch bei reduzierten Flächendimensionen untersucht. Dabei wurde die Eignung der Holzart Buche für die Fassadenverkleidung im Vergleich mit den bewährten Holzarten Lärche und Fichte analysiert. Die Herstellung der 9 Modellschindelschirme (1x0,75m) erfolgte in Zusammenarbeit mit zwei traditionellen Schindelmachern, sodass eine fachgerechte Ausführung der Proben sichergestellt war. Die Grundlage der experimentellen Arbeiten bildete ein zweijähriger Freilandversuch an zwei Standorten mit unterschiedlichen Expositionsrichtungen. In periodischen Abständen wurden die Parameter Farbe, Oberflächenspannung und Rauigkeit an jeweils 10 Schindeln pro Schirm gemessen und ausgewertet.

Es hat sich gezeigt, dass Bucheschindeln unabhängig von der Herstellungsart (geschnitten oder gesägt) die wesentlichen Anforderungen an eine Fassadenverkleidung (Dauerhaftigkeit und Dichtheit) im untersuchten Zeitraum erfüllen. Im Vergleich zu den traditionell verwendeten Holzarten zeigten sich aber deutliche Unterschiede. Die Farbveränderung auf der Schindeloberfläche verlief bei den Buchevarianten deutlich schneller und war aber bereits nach 2 Jahren nahezu abgeschlossen. Die Nadelholzvarianten zeigten die Tendenz einer verzögerten Vergrauung, welche nach 2 Bewitterungsjahren auch noch nicht abgeschlossen war. Ein ähnlicher Verlauf zeigte sich bei der Oberflächenspannung. Bereits nach 6 Bewitterungsmonaten war keinerlei hydrophobes Verhalten auf den Bucheschindeln mehr zu erkennen, was zur Folge hatte, dass das Wasser sehr schnell in das Holz eindringen aber auch wieder entweichen kann. Der Rückgang des Abperlverhaltens war bei den Nadelholzvarianten erst nach 13 bzw. 26 Monaten feststellbar. Auch in Bezug auf die Rauigkeitsentwicklung konnten deutliche Unterschiede festgestellt werden. Prinzipiell erfolgte die quantitative Zunahme der Rauigkeit in einer ähnlichen Grössenordnung für alle Holzarten, mit Ausnahme der beschichteten Varianten. Jedoch bildete sich bei den Nadelholzvarianten die bekannte Riffelstruktur infolge der Dichteunterschiede zwischen Spät- und Frühholz heraus, was bei den Buchevarianten nicht zu beobachten war. Das ästhetische Erscheinungsbild der verschiedenen Schindelschirme war ebenfalls abhängig von der entsprechenden Holzart. Die Fichte- und Lärchevarianten wirken ruhig und gleichmässig, was auf die geringe Verformung der Einzelschindeln zurückzuführen ist. Im Gegensatz dazu ist bei allen unbeschichteten Buchevarianten eine starke Verformung der Schindeln festzustellen, was zu Verwerfungen und Hohlräumen in der Schindelfläche führt. Der Schindelschirm wirkt dadurch eher inhomogen und ungleichmässig. Es bleibt abzuwarten, wie sich diese Entwicklung fortsetzt und wie sich diese Erscheinung auf die Dauerhaftigkeit der betroffenen Schindelvarianten auswirkt.

Eine Beschichtung der Schindeloberflächen führt erwartungsgemäss zu einer hohen Farbstabilität und zu einer nachhaltigen Wasserabweisung. Die Rauigkeit der Oberfläche ist im Vergleich mit den unbehandelten Varianten signifikant niedriger. Bei der Verwendung von deckenden Beschichtungssystemen ist mit Verklebungen der einzelnen Schindeln zu rechnen, was aber dann zum Abreissen der Beschichtung bei Schindelübergängen führen kann. Bei daraus folgenden Wasseransammlungen hinter der Beschichtung ist mit Schäden zu rechnen. Ein Befall durch holzerstörende Pilze wäre dann denkbar.

2 EINLEITUNG

Die Buche ist mit einem Anteil von rund 17 Vol.-% die häufigste Laubbaumart im Schweizer Wald. Vor allem im Jura bestehen grosse Waldbestände grösstenteils aus zu alten Laubbäumen. Gerade bei Bäumen im Alter von 90-140 Jahren kommt es neben den hohen Wachstumsspannungen des Holzes zu einer erhöhten Bildung von Rotkern (auch ‚Farbkern‘). Holzsortimente mit Rotkern werden im Marktwert stark herabgesetzt und stellen ein grosses wirtschaftliches Problem bei der Vermarktung des Buchenstammholzes dar, was erhebliche Einnahmeeinbussen in der Forstwirtschaft zu Folge hat. Im Rahmen des Forschungsprojektes soll die Erkenntnis gefestigt werden, dass Holzsortimente aus Buche mit Rotkern auch an der Aussenfassade eingesetzt werden können.

Der Baumarkt ist der wichtigste Wertträger für die Holzverwendung. Seit der Einführung der neuen Brandschutznormen VKF (Vereinigung Kantonalen Feuersicherungen) anfangs 2005 können Gebäude 5- und 6-geschossig im Holzsystembau realisiert werden. Die modifizierten Brandschutz-Normen eröffnen somit für mehrgeschossige Neubauten die Verwendung von Holz. Bereits 2006 war eine deutliche Zunahme bei den Baubewilligungen von Bürobauten und den Mehrfamilienhäusern ab zwei Geschossen festzustellen.

Der anhaltende Bauboom hat einen Rückgang der Baulandressourcen zur Folge. Als Alternative zu einem Neubau bietet sich oft die Veränderung an bestehenden Gebäuden durch Gebäudeerweiterungen wie Dachaufstockungen oder Anbauten an. Besonders bei modernen Gebäuden setzt der Architekt bewusst Holz in Kombination mit anderen Materialien wie Glas oder Metall ein. Neu- und Erweiterungsbauten bieten somit für Holzfassaden und hiermit auch für die Holzfassade aus Buche ein breites Einsatzfeld, da Holzfassaden behandelt oder naturbelassen eine immer grössere Beliebtheit erlangen.

3 ZIELSETZUNGEN

Das Projekt soll aufzeigen, unter welchen Randbedingungen sich Buchenschindeln eignen:

- für den generellen Einsatz an der Aussenfassade,
- inwieweit sich Unterschiede zu Schindeln aus anderen Holzarten darstellen,
- wie sich eine Oberflächenbeschichtung der Schindeln auf die längerfristige Witterungsbeständigkeit und das Erscheinungsbild auswirkt,
- welchen Einfluss der Herstellungsprozess der Schindeln auf die Dauerhaftigkeit hat, (gesägt / maschinengeschnitten)
- wie das klimaabhängige Langzeitverhalten an verschiedenen Standorten zu bewerten ist.

Für die Qualitätssicherung sollen Kriterien für die Herstellung und Verwendung ermittelt werden, welche sich aus den Ergebnissen der Untersuchungen ableiten lassen und in diesem Bericht entsprechend festgehalten sind. Da ein Laborversuch nicht das ganze Spektrum einer natürlichen Witterungsbeanspruchung abdeckt und eine praxisnahe Bewertung der Schindelflächen so nur unzureichend möglich ist, wird eine Freiland-Bewitterung an verschiedenen Standorten in Zusammenhang mit periodischen Messungen ausgewählter Oberflächeneigenschaften durchgeführt.

Übergeordnetes Ziel des Projektes ist es, die breite Verwendung der Buche in verschiedenen Segmenten zu fördern. Neben Schindeln aus Buche soll die Perspektive eröffnet werden auch andere Gestaltungselemente in grösseren Abmessungen für die Fassade zu entwickeln.

Das Projekt soll neben einer umweltfreundlichen Architektur der Auslöser dafür sein, die Vermarktung der rotkernigen Buche auch auf anderen Plattformen voranzutreiben, z. B. in der Möbelbranche oder im Innenausbau. Die Akzeptanz, die man heute einer vergrauten Holzfassade entgegenbringt, war vor 10 Jahren noch undenkbar. Heute wird diese ästhetische Wirkung aufgrund eines materialgerechten Einsatzes befürwortet. Durch die Förderung des Bekanntheitsgrades und den innovativen Einsatz bei neuen Anwendungsgebieten kann die Akzeptanz von Produkten aus rotkernigem Buchenholz gesteigert werden.

4 PROJEKTBETEILIGTE

- Holzschindeln Limacher + Co., Kägiswil OW (Herstellung der Schindeln und Musterflächen; Bereitstellung von Schindeln)
- Schindelmacher Patrik Stäger, Untervaz GR (Mitarbeit bei der Herstellung der Musterflächen, Konsultation)
- Farbenfabrik Karl Bubenhofer AG, Gossau SG (Bereitstellung von Beschichtungsmaterial)
- Berner Fachhochschule BFH-AHB
 - Dr. Thomas Volkmer (wissenschaftliche Bearbeitung)
 - Stephan Kraus (technische Bearbeitung)

5 MATERIAL UND METHODEN

5.1 Versuchsflächen

Die Herstellung der Versuchsflächen erfolgt in 3 Arbeitsstufen:

- Auswahl und Vorbereitung des Ausgangsmaterials und Herstellung der Schindeln
- Aufnageln der Schindeln auf die Unterlagsflächen
- Herstellung der Unterkonstruktion und Fixierung der Schindelflächen

5.1.1 Schindelherstellung

Für das Projekt werden maschinengeschnittene Schindeln aus Buche, Lärche und Fichte hergestellt. Die nachfolgende Beschreibung der Herstellungsschritte ist für alle Holzarten identisch. Die Auswahl der Bäume für das Schindelholz erfolgt entsprechend den Qualitätskriterien aus Tabelle 1.

Tabelle 1 Qualitätskriterien für die Auswahl der Bäume für die Schindelherstellung

Buche, Fichte, Lärche	Merkmale
Stammholz	feinjährig; kein Buchs; kein Drehwuchs.
Schindeln	astfrei; keine Harzgallen; keine Insektenfrassstellen. kein Splint; keine Risse; radialgeschnitten.

Mit der Kettensäge wird entsprechend der gewählten Schindellänge eine Stammscheibe vom Holzstamm abgeschnitten. Anschliessend erfolgt das Spalten der Stammscheibe mit der Spaltmaschine in konische Holzklötze, sog. Mösel. Von den Mösel werden der Splint und das Mark entfernt. Danach werden die Holzklötze für ungefähr drei Stunden bei ca. 120 Grad Wassertemperatur gedämpft.

Nach dem Dämpfen erfolgt das Schneiden der Schindeln. Für den Schnitvorgang wird ein Holzklötz gegen das Schwungrad der Schindelschneidmaschine gedrückt, in das zwei Messer gegenläufig in Laufrichtung des Schwungrades eingelassen sind, sodass vom Holzklötz keilförmige rechteckige Schindelrohlinge abgeschnitten werden können. Bei ständigem Drehen des Schwungrades wird eine Schindel nach der anderen vom Holzklötz geschnitten. Nach dem Schneiden werden die Schindeln nach der rechten und linken Seite sortiert. Danach werden die rechteckigen Schindeln mit dem Stanzautomaten am Schindelfuss halbrund geformt. Der Herstellungsprozess der Schindeln ist in den folgenden Abbildungen 1-5 bildhaft festgehalten.



Abb. 1 Zuschnitt des Rundholzes auf Schindellänge



Abb. 2 Aufgespaltene Stammscheiben zu konischen Holzklötzen (Mösel)

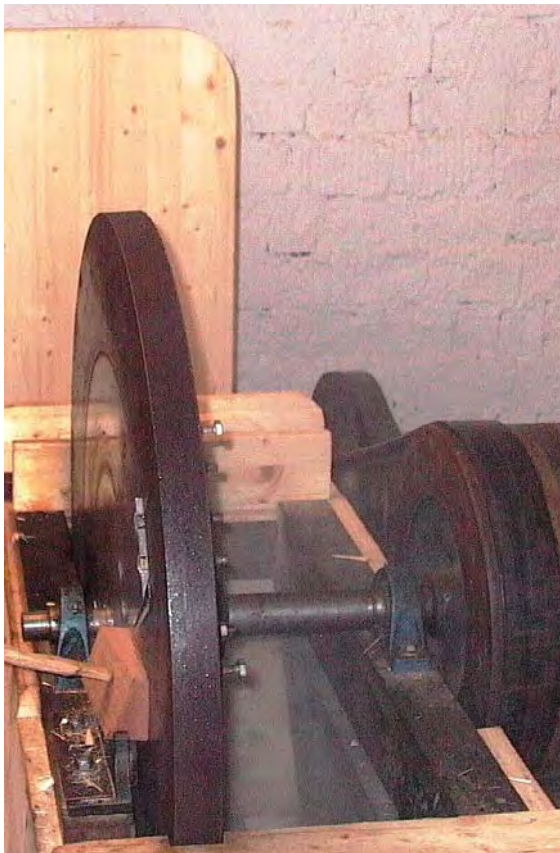


Abb. 3 Schneiden der Schindeln aus den Möseln



Abb. 4 Schindelpakete



Abb. 5 Abrunden der Ecken am Schindelfuss

Die Schindeln sind im Querschnitt keilförmig geschnitten, d. h. der Schindelfuss ist dicker als der Schindelkopf. Der Schindelfuss ist stumpf ausgebildet und hat eine runde Form.

Zu Vergleichszwecken wurde abweichend vom Versuchsplan noch eine zusätzliche Schindelvariante gewählt. Dabei handelt es sich um gesägte Bucheschindeln, welche von einem Schindelmacher aus Hessen (D) bezogen wurden. Diese haben die gleiche geometrische Form, wie die gesägten Schindeln, sind jedoch in ihren Abmassen grösser. Aus holzanatomischer Sicht ist davon auszugehen, dass bei den gesägten Schindeln die Fasern teilweise angeschnitten sind, was bei den maschinengeschnittenen Varianten weniger häufig auftritt.

Tabelle 2 Schindelformate

Flächenformate	Dicke am Schindelfuss/Schindelkopf	Reihenabstand	Schindelanzahl
in mm	in mm	in mm	Stk/Probenfläche (1.00x0.75m)
150x60, maschinengeschnitten	5/1	30	555
225x80, gesägt	10/3	95	99

Die Fachweite (sichtbarer bzw. der Witterung ausgesetzten Teil der Schindel) bei maschinengeschnittenen Schindeln beträgt eine halbe Schindelbreite. Bei einer Schindelbreite von 6 cm beträgt die Fachweite somit 3 cm. Es ergibt sich aufgrund der gewählten Fachweite und der Schindellänge von 15 cm eine 5lagige Deckung des Schindelschirms.

Bei den gesägten Schindeln wurde mit einer Fachweite von 9.5cm gearbeitet woraus sich eine doppelagige Deckung des Schindelschirmes ergibt. Alle Schindelmasse sind in Tabelle 2 zusammengefasst.

5.1.2 Schindelschirm

Die Schindeln werden nicht lösbar auf den Untergrund genagelt (Abb. 6-7). Je nach Schindelbreite, Holzart und Einbaufeuchte der Schindeln müssen zwischen den einzelnen Schindeln Fugen von 1 bis 5 mm eingehalten werden. Diese Bewegungsfugen sind notwendig, da die Schindeln bei feuchter Witterung aufquellen. Bei Zierschindeln wird aufgrund der optischen Gestaltung der Fassadenfläche meist ein Versetzmass von der Hälfte der Schindelbreite gewählt.



Abb. 6 Herstellung der Musterflächen, Überlappung der Schindeln im unteren Bereich



Abb. 7 Herstellung der Musterflächen, Befestigung der Schindeln entsprechend Fachweite und Fugenbreite

Für die Befestigung von Schindeln werden nichtlösbare Verbindungsmittel eingesetzt. Es handelt sich hierbei um Nägel bzw. Drahtstifte mit Flachkopf und rauem, gerautem oder gerilltem Schaft oder Klammern. Die Nägel können traditionell mit dem Hammer von Hand oder mechanisch mit einem Druckluftgerät eingeschlagen werden. Der Einsatz von Klammern hingegen ist nur mit dem Druckluftgerät möglich.

Für die Befestigung der Schindeln an den Musterflächen wurden Klammern verwendet. Jede Schindel ist mit mindestens 2-3 Klammer fixiert.

Das Nageln mit dem Druckluftgerät ist nur zulässig, wenn ein genaues, flächenbündiges Einschlagen möglich ist. Die in der Schindelreihe angelegte lose Schindel sollte an der Nagelstelle mit der Nagelmündung des Gerätes leicht angedrückt werden, bevor der Auslöser betätigt wird. Dies garantiert eine saubere Befestigung und keine Beschädigung der Schindeloberfläche. Der Einschlagtiefenbegrenzer muss so eingestellt sein, dass das Befestigungsmittel exakt flächenbündig eingetrieben wird, selbst wenn die Schindel nicht satt sondern hohl auf der darunterliegenden Schindellage aufliegt.

Als nagelbarer Untergrund für die Schindeln wurde eine 27 mm starke Dreischichtplatte gewählt. Es wurde bewusst keine Voll- oder Sparschalung gewählt, da sich diese bei Bewitterung stärker verzieht als eine Dreischichtplatte. Auf diese Weise soll sichergestellt werden, dass die Schindeln im Verband möglichst spannungsfrei bleiben und das Hauptaugenmerk auf deren Bewitterungsverhalten gelegt werden kann.

5.1.3 Beschichtung der Schindeln

Der Kern der Untersuchungen besteht in der Analyse von unbehandelten Schindeln. Zu Vergleichszwecken wurden zwei Buchevarianten mit einer wässrigen Dispersion deckend beschichtet. Es erfolgte ein zweimaliger Auftrag entsprechend der Herstellerangaben. Es wurde keine Grundierung aufgebracht.

5.1.4 Schindelschirm mit Unterkonstruktion

Die gesamte Musterflächenkonstruktion (Abb. 8 und 9) setzt sich folgendermassen zusammen:

- 27 mm Dreischichtplatte mit Schindeln beschlagen
- 55 mm Luftraum
- 18 mm OSB-Platte
- 2 Aluminiumprofile auf der Rückseite der OSB Platte zur Befestigung der Musterflächen auf dem Bewitterungsgestell
- Abdeckung der oberen und seitlichen Schmalflächen der Konstruktion durch Kunststoffteile (imprägniertes Furniersperrholzplatte Betoplan) als Bewitterungsschutz



Abb. 8 Musterflächen am Bewitterungsstand an der BFH-AHB (links Bucheschindeln maschinengeschnitten und deckend beschichtet, Mitte Bucheschindeln gesägt, rechts Fichteschindeln maschinengeschnitten unbehandelt)



Abb. 9 Seitenansicht einer Musterfläche

Eine Musterfläche hat die Abmessungen 1.00 m * 0.75 m. Die Verbindung der OSB-Platte mit der Dreischichtplatte erfolgt mit Toproc-Distanzschrauben. Auf diese Weise kann eine vollständige Hinterlüftung gewährleistet werden. Bei der Verwendung einer Konterlattung ist eine Hinterlüftung nur teilweise gegeben und eine Stauung der Luft speziell in den Eckbereichen der Musterflächen kann nicht ausgeschlossen werden.

Nach dem oben beschriebenen Ablauf wurden insgesamt 9 Probeflächen vorbereitet:

- 3 Bucheflächen unbehandelt, Herstellungsart der Schindeln: maschinengeschnitten
- 1 Fichtenfläche unbehandelt, Herstellungsart der Schindeln: maschinengeschnitten
- 2 Lärchenflächen unbehandelt, Herstellungsart der Schindeln: maschinengeschnitten
- 2 Buchenflächen behandelt, Herstellungsart der Schindeln: maschinengeschnitten
- 1 Buchenfläche unbehandelt, Herstellungsart der Schindeln: gesägt

5.2 Experimentelle Untersuchungen

5.2.1 Freilandbewitterung

Entsprechend der Zielstellung des Projektes erfolgte eine praxisnahe Freilandbewitterung der Probenflächen an zwei Standorten:

Standort 1: Schulgelände der Berner Fachhochschule Biel, charakterisiert durch relative Nähe zum Bieler See auf ca. 434m über Meer.

Standort 2: Gemeinde Pery/Pre Lapat, charakterisiert durch ein voralpines Klima auf ca. 1070m über Meer

Am Standort in Biel erfolgte eine Exponierung der Probenflächen in südliche als auch in westliche Richtung, in Pery wurde die Probenfläche nur in Richtung Süd exponiert. Alle Probenflächen wurden senkrecht auf einem Metallgestell hängend installiert. Der Bodenabstand betrug dabei 20cm. So wurde sichergestellt, dass annähernd realistische Fassadenverhältnisse (Fassadenfeld ohne Dachüberstand) simuliert werden können, um eine spätere Übertragung der Ergebnisse zu gewährleisten.

Die Freilandbewitterung wurde im April 2008 gestartet und die letzten Messungen an den Versuchsflächen wurden nach 26 Monaten Bewitterung im Juni 2010 durchgeführt.

Die 9 hergestellten Versuchsflächen (Kap. 4.1) wurden folgendermassen bzgl. Bewitterungsstandort und Richtung installiert.

Standort 1 West-exponiert:

- Lärche (LW)
- Buche (BW)
- Buche beschichtet (BBW)

Standort 1 Süd-exponiert:

- Lärche (LS)
- Buche (BS)
- Buche beschichtet (BBS)
- Fichte (FS)
- Buche gesägt (BGS)

Standort 2 Süd-exponiert:

- Buche (BHS)

5.2.2 Farbentwicklung

Die Bewertung der farblichen Veränderung der Probeflächen im Versuchszeitraum erfolgte durch eine Farbmessung an jeweils 10 Einzelschindeln pro Fläche. Die Anordnung und Nummerierung der Einzelschindeln in der Versuchsfläche ist Abb. 10 zu entnehmen und war für alle Probeflächen gleich. Die Messung der Farbe erfolgte

mit einem Spectral-Photometer der Fa. Minolta. Dabei wurden die Farbwerte L (Helligkeit), a (rot-grün), b (blau-gelb) ermittelt. Diese 3 Werte bestimmen die Lage der Farbe im 3-dimensionalen Farbraum Lab (Abb. 11). Mit Hilfe der Formel:

$$\Delta E_{v,n} = \sqrt{(L_n^* - L_v^*)^2 + (a_n^* - a_v^*)^2 + (b_n^* - b_v^*)^2} \quad \text{Gl. 1}$$

v – vorher

n – nachher

lässt sich eine Differenz ΔE zwischen zwei Farbpunkten berechnen. Dadurch ist es möglich die Farbentwicklung während eines Zeitverlaufes zu erfassen und zu bewerten.

Die Bestimmung der Farbwerte erfolgt in intervallmässigen Abständen: zu Beginn der Messung (Referenzwerte), nach 6, 12 und 26 Monaten Bewitterung. Die farbliche Entwicklung wurde immer durch den Vergleich mit den Ausgangswerten beschrieben.

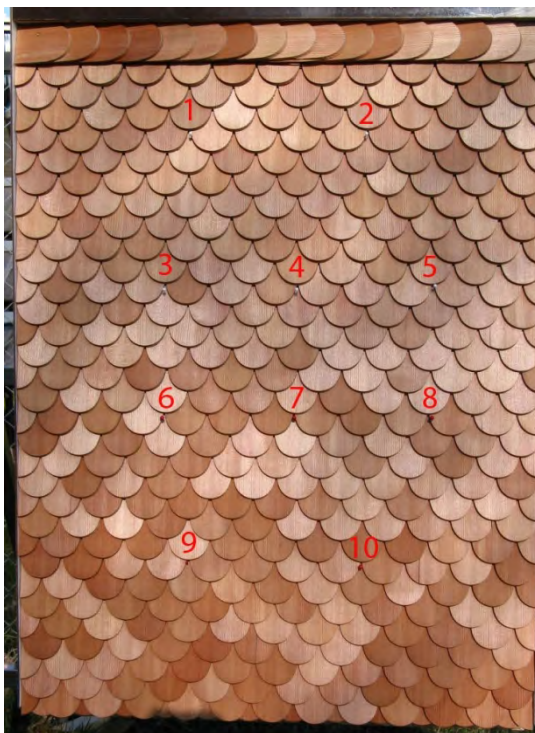


Abb. 10 Platzierung und Nummerierung der Schindeln in der Probenfläche

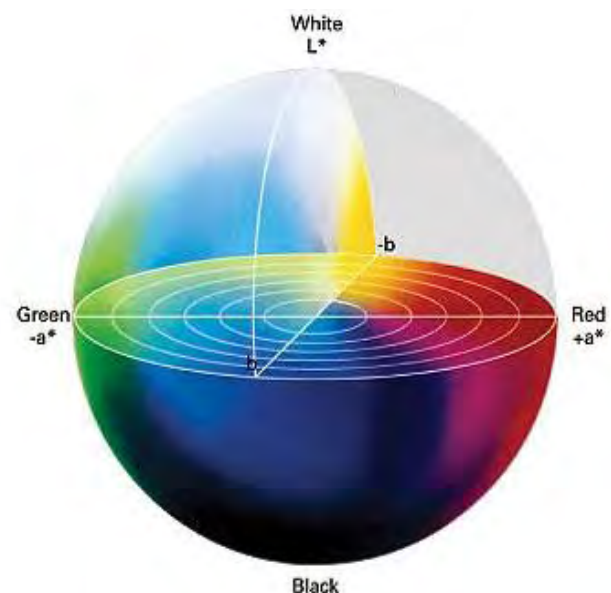


Abb. 11 Drei-Dimensionaler Farbraum des Lab Farbsystems

5.2.3 Kontaktwinkel

Fassadenelemente wie z.B. Schindelkonstruktionen kommen infolge ihrer Funktion und entsprechender klimatischer Einflüsse zwangsläufig mit flüssigem Wasser in Kontakt. Aufgrund dessen bildet sich entsprechend ein 3-Phasensystem im Bereich der Fassadenoberfläche aus. Dieses System ist gekennzeichnet durch die drei Phasen fest (Schindeloberfläche), flüssig (Wasser) und gasförmig (Umgebungsluft). Diese 3 Phasen treten über ihre Oberflächen mit den jeweils anderen Phasen in Kontakt, wodurch Grenzflächen entstehen. Diese Grenzflächen können nach J.W. Gibbs ein bis mehrere Moleküldurchmesser groß sein. Die auftretenden Grenzflächenspannungen sind eine Folge verschiedener molekularer Wechselwirkungen in Abhängigkeit von Druck und Temperatur der

Umgebung. Nach Young ist das oben spezifizierte System, bei dem eine Flüssigkeit mit einem festen Körper in Kontakt tritt, durch folgende Gleichung beschrieben (siehe auch Abb. 12).

$$\sigma_{\text{fest/gas}} = \sigma_{\text{fest/flüssig}} + \sigma_{\text{flüssig/gas}} \cdot \cos \alpha$$

σ – Grenzflächenspannung

α – Winkel zwischen zwei Grenzflächenspannungen

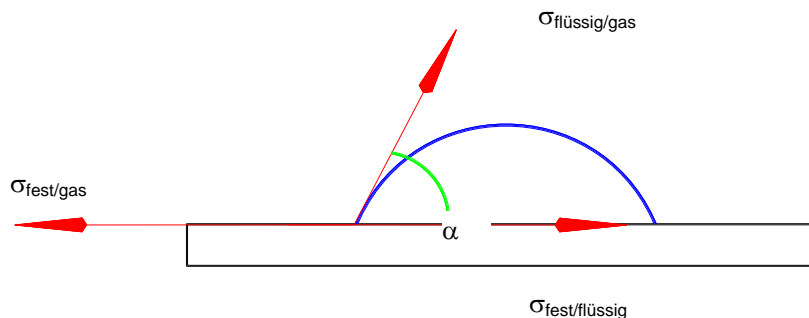


Abb. 12 Kräfteverhältnisse an einem liegenden Tropfen

Anhand dieser Gleichung wird deutlich, dass mit Hilfe des (Kontakt-) winkels α die Oberflächenspannung des festen Materials beschrieben werden kann, wenn mit derselben Flüssigkeit und unter gleichen Umgebungsbedingungen gearbeitet wird.

Im praktischen Gebrauch ist nur die Oberflächenspannung des festen Körpers beeinflussbar. Daher kommt der Substrat- (Holz-)oberfläche, deren chemischer Zusammensetzung und Morphologie eine entscheidende Rolle zu. Die Bewertung der Oberflächenspannung erfolgt mit dem Gerät DSA 10 der Firma Krüss. Über die Konturanalyse eines liegenden Tropfens kann der Kontaktwinkel bestimmt werden.

Die Durchführung der Messung gliedert sich in folgende Punkte:

- Allgemeine Probenvorbereitung
- Klimatisierung der Proben bei 20°C und 65% relativer Luftfeuchte
- Durchführung der Messung:

Zu Beginn wird die Messeinrichtung kalibriert, wobei der Kanüldurchmesser der Dosiereinheit als Massstab dient. Für die Messung wird ein Tropfen destillierten Wassers mit Hilfe einer Spritze auf die Probenoberfläche gebracht und anschliessend fünf Sekunden gewartet. Danach wird mittels der CCD Kamera der liegende Tropfen digital erfasst. Dieses Bild wird nun durch eine Konturanalyse des Tropfens ausgewertet und der Kontaktwinkel bestimmt. Dazu wird die Tropfenform nach der Young-Laplace-Gleichung angepasst. Diese Methode ist geeignet für Kontaktwinkel grösser 30° und ist unter (Krüss 2002) beschrieben.

Für die Bestimmung des Kontaktwinkels wurden die gleichen 10 Schindeln/Probenflächen wie für die Farbmessung verwendet. Pro Schindel wurden 3 Messungen im exponierten Bereich des Schindelkopfes durchgeführt. Daraus ergibt sich ein Mittelwert pro Versuchsfläche aus 30 Einzelwerten. Trotz der vergleichsweise grossen Anzahl an Messwerten ist ein Seiteneffekt infolge der Grösse der Probenfläche von 1.00x0.75m nicht auszuschliessen. Die Bestimmung des Kontaktwinkels erfolgte zu den gleichen Zeiten wie die Bestimmung der Farbwerte.

5.2.4 Rauigkeit

Untersuchungen zur Rauigkeit einer Oberfläche gewinnen erst in letzter Zeit an zunehmender Bedeutung im Bereich der Holzbe- und -verarbeitung (Rehm 2002). Ursprünglich ist diese Thematik im Bereich der Metallverarbeitung beheimatet, weshalb auch alle entsprechenden Messverfahren, Parameter und Auswerteverfahren auf diesem Hintergrund basieren.

Aufgrund verschiedener Vorarbeiten ist bekannt, dass das hygroskopische Verhalten der Oberfläche einen Einfluss auf das Alterungsverhalten dieser Holzoberflächen hat. Weiter existiert ein Zusammenhang zwischen der Oberflächenspannung und der Oberflächenmorphologie (Lotuseffekt). Aus diesem Grunde wurde an dieser Stelle die Bestimmung der Rauigkeit durchgeführt, um eine mögliche Korrelation zwischen den Parametern Rauigkeit – Oberflächenspannung/Abperleffekt – Alterungsverhalten herauszuarbeiten. Weiter war davon auszugehen, dass die Rauigkeit auch die Affinität der Oberfläche gegenüber der Ablagerung von Staubpartikeln beeinflusst und somit auch in dieser Hinsicht eine Relevanz für eine mögliche farbliche Veränderung darstellt.

In Übereinstimmung mit den entsprechenden Normen (DIN 4762) erfolgt die Beschreibung der Rauigkeit von Oberflächen mit Hilfe von Parametern, welche aus einem zweidimensionalen Profil ermittelt werden. R_a ist dabei der älteste aller gebräuchlichen Rauheitskennwerte und wird entsprechend auch in dieser Arbeit herangezogen. Er bezeichnet die mittlere Abweichung des Profils von der mittleren Linie (Abb. 13). Die Ergebnisse sind relativ gut reproduzierbar, da R_a entsprechend der Definition über eine starke Mittelwertbildung bestimmt wird.

Definition nach DIN 4762: Der Mittenrauwert R_a ist der arithmetische Mittelwert der Beträge aller Profilwerte des Rauheitsprofils.

$$R_a = \frac{1}{l} * \int_0^l |y(x)| dx \quad \text{Gl. 2}$$

$y(x)$ = Profilwerte des Rauheitsprofils

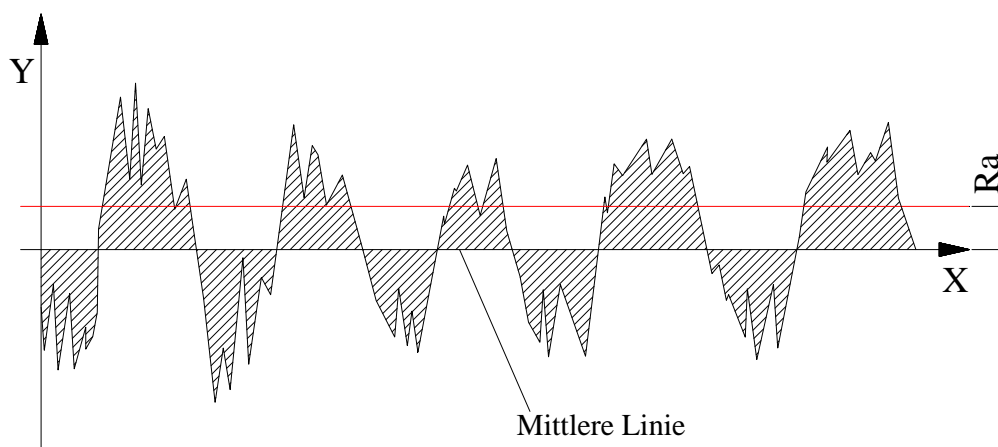


Abb. 13 Darstellung des Rauigkeitsparameters R_a im Rauigkeitsprofil

Die Durchführung der Versuche gliederte sich in folgende Schritte:

- Allgemeine Probenvorbereitung
- Durchführung der Messung
- Die Messung erfolgte auf der SMS Oberflächenprofilmessstation der Fa. Breitmeier mit einem Weisslichtsensor CHR 150-PC der Firma Stil SA. Die Abtastung der Oberfläche erfolgte somit berührungslos rein optisch. Der mögliche Tiefenmessbereich betrug 1mm bei einer Auflösung von 30nm.
- Es wurden 5 Schindeln pro Versuchsfläche gemessen (Nr. 1, 2, 4, 7, 9)
- Auf jeder Schindeloberfläche wurden in Faserquerrichtung 4 Linienmessungen von je 30mm Länge durchgeführt, daraus ergeben sich 20 Messlinien (R_a -Werte) pro Probenfläche
- Die Abtastfrequenz betrug 125Hz bei einer Auflösung von 50 Punkten/mm
- Berechnung/Auswerten der Messung

- Für die Auswertung der Ergebnisse wurden die Rauheitsprofile mit Hilfe eines Polynoms 3. Grades ausgeglichen. Der Wellenlängenfilter wurde bei $80\mu\text{m}$ gesetzt. Das bedeutet, dass alle Profile mit einer Wellenlänge grösser $80\mu\text{m}$ als Welle betrachtet werden und alle Profile mit einer Wellenlänge kleiner $80\mu\text{m}$ als Rauheit der Oberfläche ausgewertet werden. Diese Festlegung hat naturgemäss einen deutlichen Einfluss auf die quantitativen Werte und muss deshalb unbedingt für die gesamte Messreihe beibehalten werden. Die Bestimmung der Rauigkeit erfolgte zu den gleichen Zeitpunkten wie die Bestimmung der Farbwerte.

6 ERGEBNISSE UND DISKUSSION

6.1 Farbliche Entwicklung und optisches Erscheinungsbild

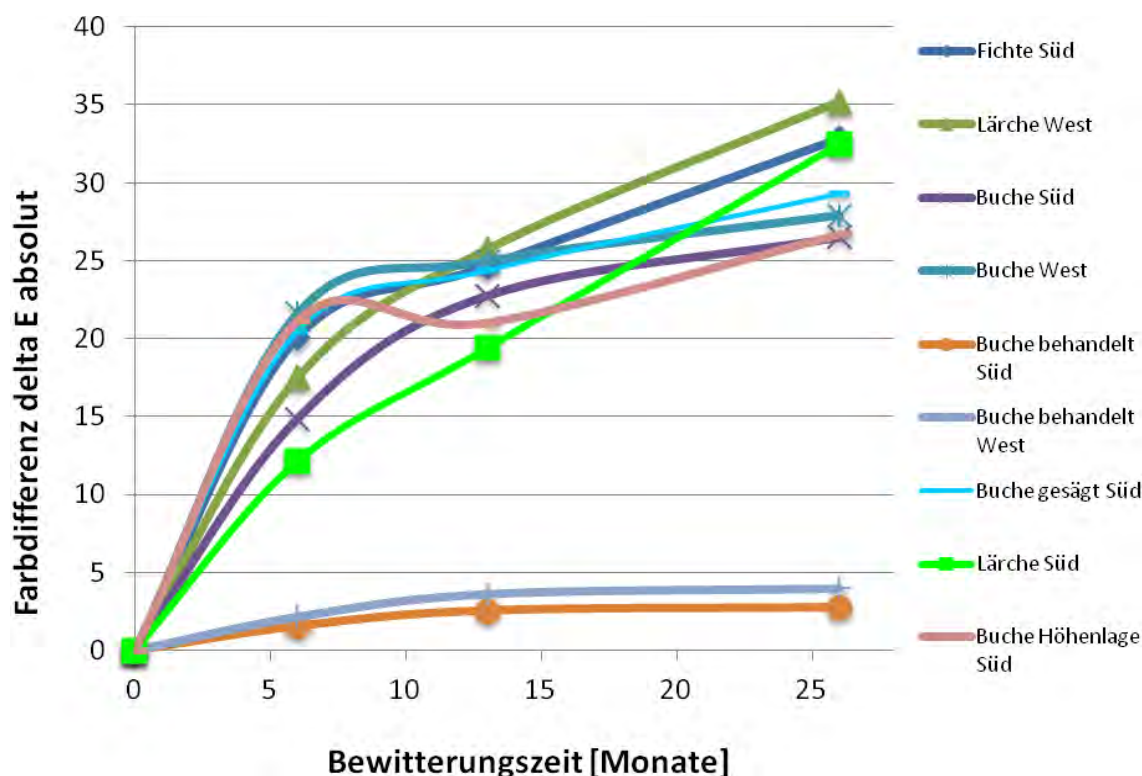


Abb. 14 Farbentwicklung der Schindelschirme im Verlauf von zwei Bewitterungsjahren (2008-2010) bezogen auf den Ausgangszustand in Abhängigkeit der Holzart, Herstellung und Bewitterungsstandort

Die beschichteten Varianten (Abb. 14) zeigen erwartungsgemäss die höchste Farbstabilität im Verlauf der Bewitterung. Anhand des Kurvenverlaufes ist davon auszugehen, dass die Farbänderung bereits nach ca. 13 Monaten abgeschlossen ist, was sich auch beim Verlauf der relativen Farbveränderung (Abb. 15) zeigt. Beide Probenvarianten (Buche behandelt Süd und West) zeigen eine kontinuierlich geringe Farbveränderung bei fortlaufender Bewitterung. Generell ist bei diesen Varianten erst dann wieder mit farblichen Veränderungen zu rechnen, wenn es zu einer deutlichen Degradation der Beschichtung selbst kommt. Aufgrund dessen, dass im vorliegenden Fall mit einem vergleichsweise hellem Farbton gearbeitet wurde, hat sich die Oberfläche während der Sonneneinstrahlung weniger aufgeheizt als das bei einem dunklen Farbton der Fall gewesen wäre. Dadurch war die Schwindung der Holzteile reduziert und eine eventuelle Rissneigung der Schindeln selbst nicht vorhanden bzw. weniger ausgeprägt. Bei beiden Varianten konnte aber ein Verkleben der Schindeln untereinander durch die Beschichtung festgestellt werden, was die farbliche Entwicklung zwar nicht beeinflusst aber bei starken Schwind- oder Quellschwüngen schneller zu Rissen in der Beschichtung führen kann. Ein derartiges Abreissen konnte in verstärktem Masse Ende Sommer 2010 bei der Variante Buche behandelt West festgestellt werden (Abb. 16) und ist generell als sehr kritisch zu betrachten, da somit eine erhöhte Befeuchtung der Schindeln hinter der Beschichtung möglich

wird, jedoch ein schnelles Austrocknen nicht möglich ist. Somit kann es zu Wasseransammlungen zwischen Beschichtung und Schindeloberfläche kommen, was eine wesentliche Grundlage für einen Pilzbefall darstellt und eine rasche Zerstörung der Schindeln zur Folge haben kann. Das Abreißen der Farbschicht konnte auch bei der Variante Buche behandelt Süd registriert werden, jedoch war in diesem Fall die Rissbildung weniger ausgeprägt. Das Erscheinungsbild der beschichteten Varianten ist trotz der oben genannten Problematik noch gut. Eine allgemeine Abschätzung der Lebensdauer ist aber schwierig.

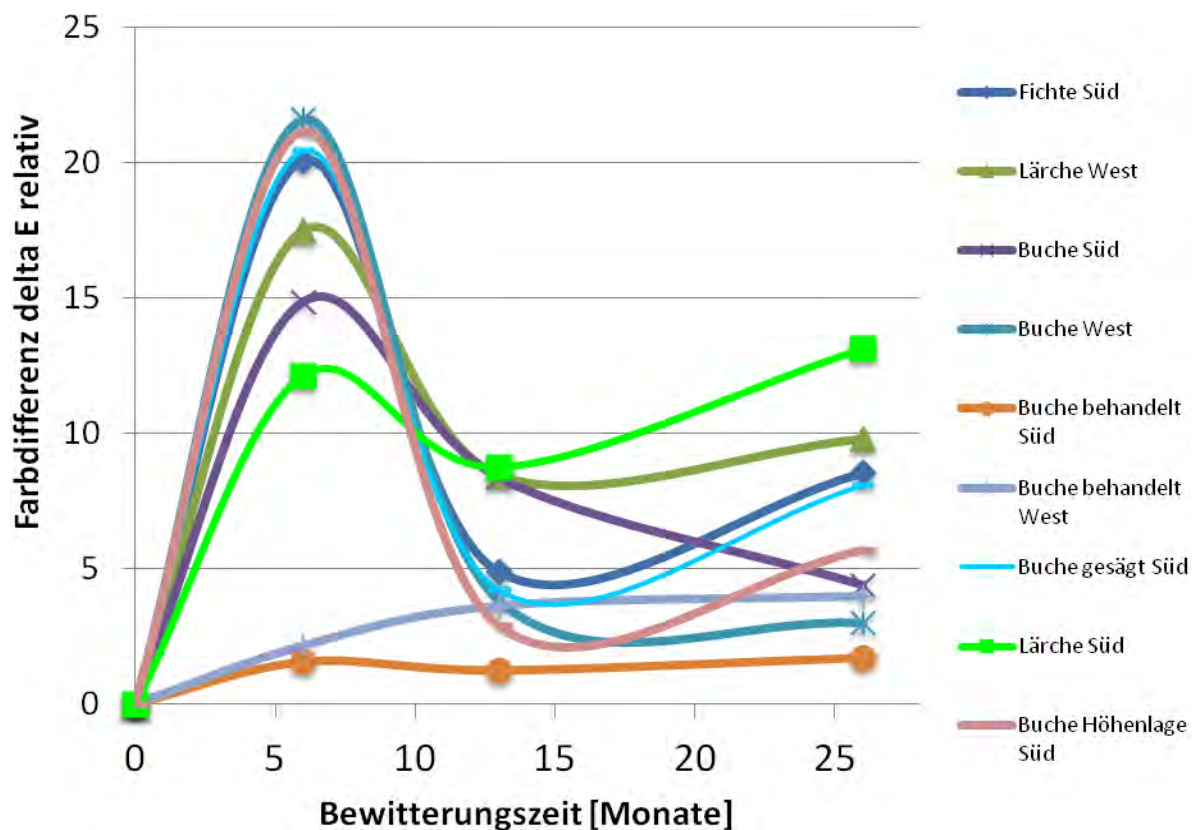


Abb. 15 Relative Farbentwicklung der Schindelschirme im Verlauf von zwei Bewitterungsjahren (2008-2010) bezogen auf den jeweils vorangegangenen Messpunkt

Die unbeschichteten Schindelvarianten (Abb. 14) können hinsichtlich ihrer Farbentwicklung in zwei Gruppen, die Laubholzvarianten und Nadelholzvarianten, eingeteilt werden. Alle 4 unbeschichteten Buchevarianten (mit Ausnahme der Buche Süd Variante) zeigen prinzipiell einen ähnlichen Verlauf der Farbentwicklung. Eine deutliche Farbveränderung ΔE von bis zu 22 im Verlauf der ersten 6 Bewitterungsmonate ist gefolgt von einer sehr moderaten weiteren Farbänderung ($\Delta E=5$) im weiteren Verlauf bis zum Ende der Expositionszeit nach 26 Monaten. Dass die farbliche Veränderung abgeschlossen ist, zeigt sich auch sehr deutlich beim Verlauf der relativen Farbänderung (Abb. 15), was sich besonders auf die Varianten Buche Süd und Buche west bezieht. Bei diesen beiden Varianten deutet die Tendenz sehr stark daraufhin, dass im weiteren Verlauf nur noch mit geringen Farbveränderungen zu rechnen ist, da die relative Farbdifferenz ΔE unter 5 liegt und sogar noch mit einem weiteren Abfall zu rechnen ist. Das zeigt sehr deutlich, dass für diese Varianten das erste Bewitterungshalbjahr entscheidend ist für deren farbiges Erscheinungsbild, was auch aus kundenspezifische Sicht interessant ist, da nur in geringem Umfang noch mit Langzeitänderungen zu rechnen ist. Hinsichtlich der farblichen Entwicklung der Bucheschindeln ist abschliessend ein weiterer Aspekt zu beachten. Die degradierte Oberfläche wird speziell im unteren Bereich der Probenflächen stark von Wespen abgenagt (Abb. 17). Das führt zu streifenförmigen Frassspuren, bei denen die natürliche Holzfarbe wieder sichtbar wird. Teilweise ist diese Phänomen so stark ausgeprägt, dass es zu einer gesamthaften Aufhellung des Schindelschirmes kommt. Eine Reduzierung der Nutzungsdauer ist deshalb jedoch

kaum zu erwarten, da sich die Frasstätigkeit in erster Linie auf den Schindelfuss beschränkte, wo sich entsprechend viel Material befindet.

Bei der zweiten Gruppe der unbeschichteten Schindelvarianten, welche die Nadelhölzer Fichte und Lärche bei den verschiedenen Expositionen umfasst, ist der Bewitterungsverlauf speziell zu Beginn der Bewitterung als eher uneinheitlich zu bezeichnen. Prinzipiell ist auch hier am Anfang der Bewitterung eine starke farbliche Veränderung feststellbar, welche aber z.B. bei der Lärchenvariante mit Südexposition mit $\Delta E=12$ eher gering ist. Im Unterschied zu den Buchevarianten zeigt sich dann im weiteren Bewitterungsverlauf, dass die weitere Farbveränderung auf einem relativ hohen Niveau bestehen bleibt. Das führt dazu, dass die Nadelholzvarianten einerseits die höchste Farbveränderung mit $\Delta E=35$ (Lärche west) nach Ablauf der Bewitterung zeigen und andererseits ist aus dem Verlauf der relativen Farbentwicklung abzuleiten, dass die Farbentwicklung im Gegensatz zu den Buchevarianten auch noch nicht abgeschlossen ist und sich fortsetzen wird. Beide Aspekte sind im Vergleich zu Buche als eher negativ zu bewerten.

Zusammengefasst kann bzgl. der Farbentwicklung gesagt werden, dass die Buchevarianten durch eine schnellere aber letztendlich geringere Farbveränderung als die Nadelholzvarianten gekennzeichnet sind, was für einen Einsatz als Fassadenmaterial als günstig zu bewerten ist.



Abb. 16 abgerissener Farbfilm infolge „verklebter“ Schindeln, Buche West-exponiert



Abb. 17 Wespenfrass auf einer unbehandelten Bucheschindel, Exposition West nach 26 Monaten Bewitterung



Abb. 18 Buchschindeln mit deutlicher Verformung in der Fläche führen zu einem unruhigen Erscheinungsbild, Buche Süd-exponiert nach 26 Monaten Bewitterung

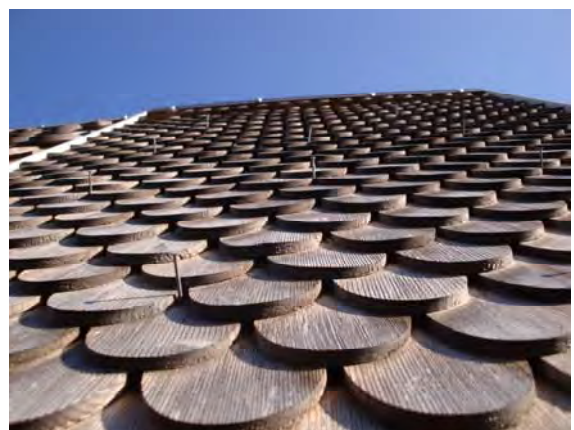


Abb. 19 gleichmässig aufliegende Fichteschindeln ohne Verformung – sehr gleichmässiges Erscheinungsbild, südexponiert nach 26 Monaten Bewitterung

Hinsichtlich der gesamthaften optischen Erscheinung muss ein weiterer Aspekt berücksichtigt werden. Die Verformung, speziell der unbehandelten Buchevarianten (geschnitten und gesägt), ist teilweise extrem stark, sodass sich einzelne Schindeln deutlich vom Schindelschirm abheben (Abb. 18). Es bleibt abzuwarten ob die Fixierung der Schindeln eine derartige Verformung längerfristig erträgt oder ob sich einzelne Schindeln lösen. Durch die

starken Verformungen wirkt der Schindelschirm optisch eher unruhig, was aber nur aus ästhetischer Sicht relevant ist. Im Gegensatz zu den Buchevarianten zeigen die Nadelholzschindeln eine nur sehr geringe bis gar keine Verformung. Der Schindelschirm wirkt gleichmässig und ruhig, was speziell auf die Fichte süd zutrifft (Abb. 19).

Die quantitativen Messergebnisse, welche mit dem Spectralphotometer generiert wurden, können mit den qualitativen Ergebnissen der photographischen Dokumentation des Bewitterungsverlaufes gut verglichen werden. (Tabelle 3).

- Die beschichteten Varianten zeigen praktisch über den gesamten Bewitterungszeitraum keine wahrnehmbaren Veränderungen.
- Die Nadelholzvarianten sind nach zwei Jahren stark nachgedunkelt und vergraut (siehe speziell Lärche West)
- Die unbeschichteten Buchevarianten zeigen im ersten Bewitterungshalbjahr eine deutliche Farbveränderung, nach 2 Jahren Bewitterung wirken diese Probeflächen aber vergleichsweise hell (grau), unabhängig von Frassspuren der Wespen
- Die maschinengeschnittenen Buchevarianten unterscheiden sich hinsichtlich des Farbverlaufes nicht nachweislich von der gesägten Variante
- Die Lärchevarianten (speziell Variante Lärche West) zeigen die meisten oberflächlich gerissenen und komplett gespaltenen Schindeln, was beim Schindelschirm aus Fichte nicht der Fall war
- Die maschinengeschnittenen Bucheschindeln sowie die gesägten Bucheschindeln sind teilweise stark verformt und der gesamte Schindelschirm wirkt etwas unruhiger als die Nadelholzvarianten.

Tabelle 3 Optische Darstellung der Farbveränderungen der Schindelschirme in Abhängigkeit der Holzart, Herstellung und Bewitterungszeit

Ausgangszustand

Nach 6 Monaten Bewitterung

Nach 26 Monaten Bewitterung



Lärche west



Buche west



BBuche behandelt west



Buche süd





Lärche süd



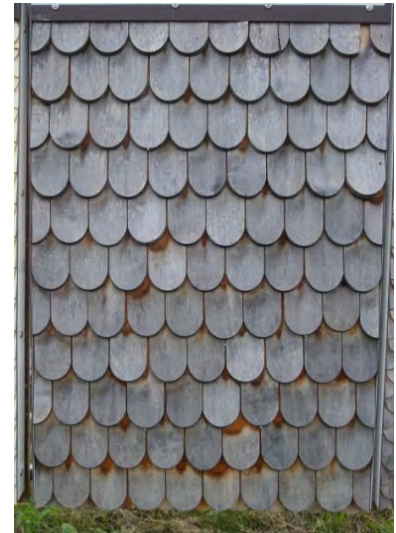
Fichte süd



Buche behandelt süd



Buche gesägt süd



Buche Höhenlage süd



6.2 Oberflächenspannung/Kontaktwinkel

Die Oberflächenspannung als Mass für die Affinität gegenüber flüssigem Wasser eignet sich gut für die Bewertung der chemischen und morphologischen Veränderungen an der Probenoberfläche. Auch hinsichtlich dieses Parameters lässt sich ähnlich wie bei der Farbmessung eine 3 Teilung der Probenvarianten durchführen (Abb. 20):

- Unbeschichtete Buchevarianten
- Unbeschichtete Nadelholzvarianten
- Beschichtete Laubholzvarianten

Die unbeschichteten Buchevarianten zeigen eine sehr schnelle (innerhalb der ersten 6 Bewitterungsmonate) und deutliche Änderung ihrer Oberflächencharakteristik. Nur im Ausgangszustand konnte jeweils ein vergleichsweise hoher Kontaktwinkel (bei breiter Streuung der Messwerte) gemessen werden, nach 6 Monaten Bewitterung war das mit Ausnahme der gesägten Variante bei keiner anderen Buchenprobe mehr möglich. Der Wassertropfen wurde nach dem Aufsetzen auf die Oberfläche direkt vom Holz aufgesogen, ohne einen Tropfen an der Oberfläche auszubilden (Abb. 21). Dieses Verhalten zeigt den ausgeprägten hydrophilen Charakter der Bucheschindeln nach relativ kurzer Bewitterungsdauer. Es ist davon auszugehen, dass es im Verlaufe der Bewitterung zur raschen Umwandlung und Auswaschung des Lignins sowie von Holzinhaltsstoffen gekommen ist, was zu einer Freilegung

von Zellulose in Form von Fasern führt. Zellulose ist durch teilweise leicht zugängliche Hydroxylgruppen charakterisiert, welche dann den hydrophilen Charakter der Oberfläche unterstützen. Dadurch kann das Wasser leicht und schnell in das Holz eindringen aber auch leichter wieder abgeben werden.

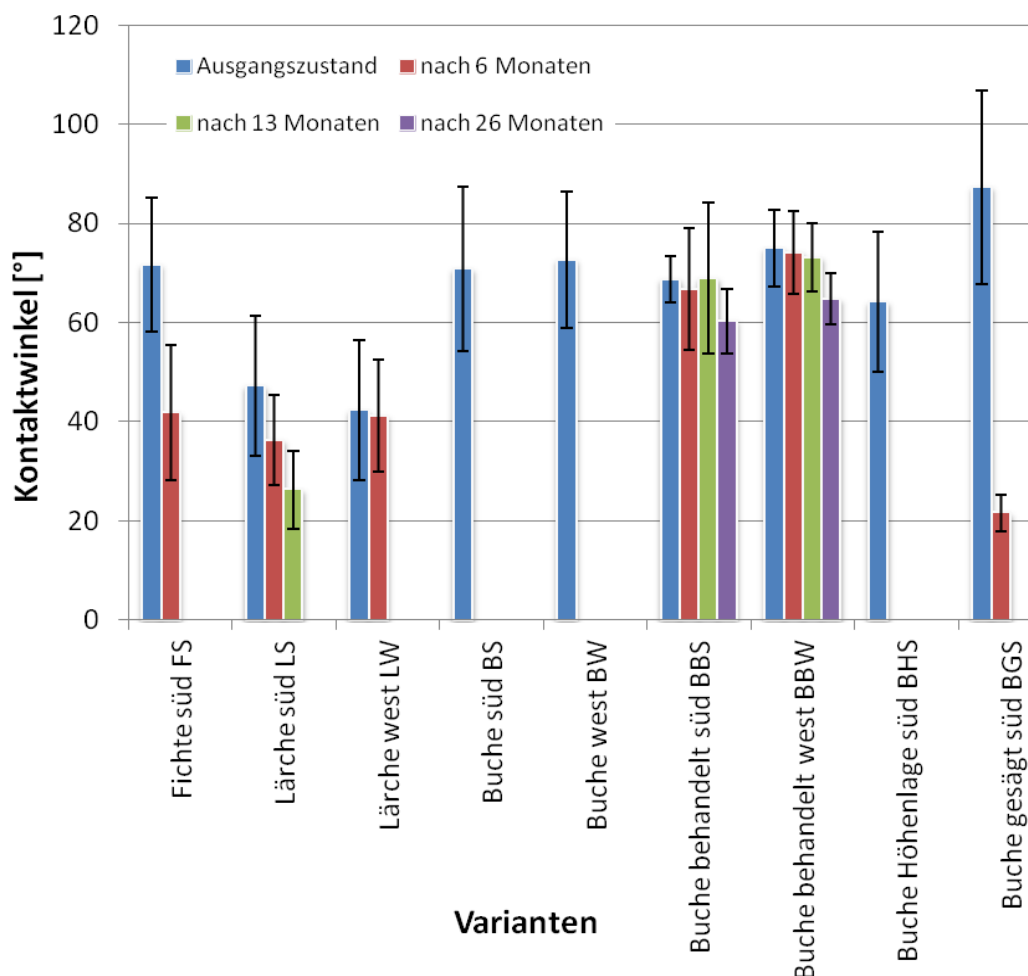


Abb. 20 Entwicklung der Oberflächenspannung auf der Schindeloberfläche bewertet über den Kontaktwinkel (inkl. Standardabweichung) in Abhängigkeit der Holzart, Herstellung und Bewitterungszeit

Im Vergleich zu den Buchevarianten erfolgt die Oberflächenmodifizierung im Verlauf der Bewitterung bei den Nadelholzvarianten verzögert. Bei allen Varianten (Lärche Süd, Lärche West, Fichte Süd) ist zu mindestens nach 6 Monaten Bewitterung noch ein relativ grosser Kontaktwinkel (38-40°) messbar. Im Fall von Lärche Süd kann sogar noch nach 12 Monaten ein, wenn auch kleiner, Kontaktwinkel von ca. 26° bestimmt werden. Anhand dieser Fakten lässt sich ableiten, dass die Umwandlung und Auswaschung des hydrophoben Lignins bei den Nadelholzvarianten langsamer verläuft und die Wassereindringung über einen längeren Zeitraum gebremst wird als im Vergleich zu den Buchevarianten. Es ist aber nicht auszuschliessen, dass durch die beschriebenen Aspekte auch das Austrocknungsverhalten der Nadelholzschindeln behindert ist.

Die beschichteten Varianten grenzen sich deutlich von allen anderen Schindelmustern ab. Der Kontaktwinkel liegt über den gesamten Bewitterungszeitraum in einem Bereich zwischen 60°-70°. Wenn man dabei noch die relativ hohen Standardabweichungen heranzieht, wird deutlich, dass die Schwanken gering und statistisch nicht signifikant sind. Die Oberflächencharakteristik wird in diesen Fällen klar durch das Beschichtungsmittel bestimmt und da bis jetzt noch keine visuellen Schäden auf der Fläche sichtbar sind, kann davon ausgegangen werden, dass die leicht wasserabweisende Eigenschaft noch mehrere Jahre erhalten bleibt.



Abb. 21 Aufgesaugte Wassertropfen auf einer gesägten Bucheschindel kurz nach der Aufbringung zeigen den ausgeprägten hydrophilen Charakter dieser Oberfläche

6.3 Oberflächenrauigkeit

Hinsichtlich der Oberflächenrauigkeit lassen sich die Proben in 2 Gruppen unterteilen: die unbeschichteten und die beschichteten (Abb. 22). Eine Abgrenzung bzgl. Nadelholz und Laubholzvarianten erscheint weniger sinnvoll.

Die beschichteten Bucheschindeln zeigen ein sehr homogenes einheitliches Bild, gekennzeichnet durch einen sehr niedrigen Ra Wert im Bereich von 5-6µm. Bei diesen Proben zeigt sich auch, dass es zu keinen Abwitterungen auf der Oberfläche gekommen ist, da die Morphologie der Oberfläche über den Bewitterungszeitraum praktisch gleich geblieben ist. Erstaunlich ist, dass der Variationskoeffizient für diese Varianten teilweise über 30% liegt, was bei einer filmbildenden Beschichtung so nicht zu erwarten wäre. Es ist davon auszugehen, dass dabei die Beschaffenheit des Untergrundes einen erheblichen Einfluss auf die Oberflächenrauigkeit nimmt als auch die Applikation per Pinsel die Morphologie mitbestimmt. Dass eine Beschichtung aber trotzdem die Rauigkeit von Holzoberflächen deutlich reduziert zeigt sich beim Vergleich der Anfangsrauigkeiten der beschichteten Varianten mit denen der unbeschichteten. Daraus kann abgeleitet werden, dass die Beschichtung die Rauigkeit der Oberfläche um ca. 60-70% senken kann.

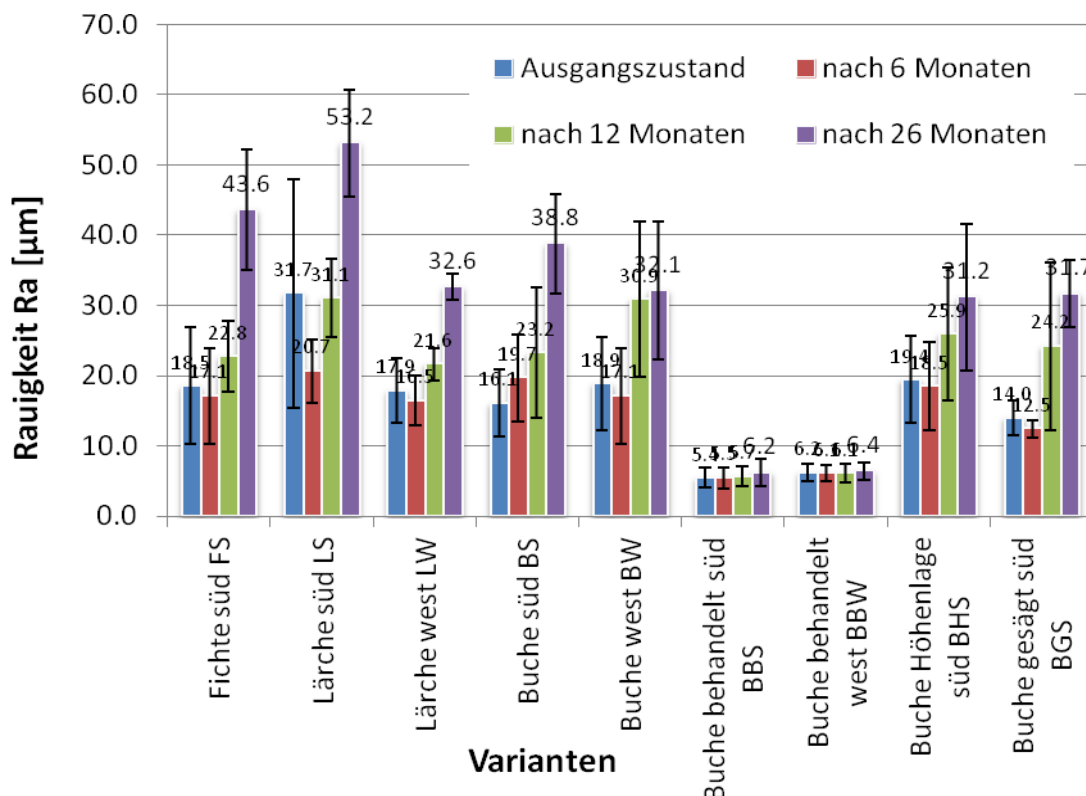


Abb. 22 Entwicklung der Oberflächenrauigkeit (inkl. der Standardabweichung) der Probeschindeln in Abhängigkeit der Holzart, Herstellung und Bewitterungszeit

Die Rauigkeitsentwicklung der unbeschichteten Proben verläuft für alle Varianten sehr ähnlich. Nach einem Abfall der Rauigkeit im Verlauf der ersten 6 Monate kommt es bei allen Proben zu einer Zunahme der Rauigkeit im weiteren Bewitterungsverlauf. Im zweiten Bewitterungsjahr ist diese Zunahme besonders stark bei den Nadelholzvarianten Lärche und Fichte mit Südexposition ausgeprägt, was auch zu den höchsten absoluten Rauigkeiten von $43.6\mu\text{m}$ bzw. $53.2\mu\text{m}$ führt. Die Streuung der Messwerte ist für alle Proben gross, was durch die Variationskoeffizienten von teilweise über 50% deutlich wird.

Das Abwitterungsmuster lässt sich klar in zwei Gruppen unterteilen. Ausgehend von der maschinengeschnittenen Schindeloberfläche in radiale Richtung kommt es im Verlauf der Bewitterung bei den Nadelhölzern zu einer verstärkten Abwitterung der Frühholzbereiche (Abb. 23), wodurch sich die bekannte Riffelstruktur ausbildet. Diese Struktur ist im Linienprofil von R_a der Schindeln quer zur Faser gut zu erkennen (Tabelle 4), ist nach 2 Jahren deutlich sichtbar. Diese Abwitterung ist dabei beeinflusst durch die markanten Dichteunterschiede zwischen Früh- und Spätholz, welche die Festigkeit des Faserverbundes und somit auch die Dauerhaftigkeit im Verlauf der Bewitterung bestimmen. Auffällig war weiter beim Schindelschirm aus Lärche in Westexposition, dass bei dieser Probenfläche sehr viele Schindeln gerissen und teilweise komplett gespalten waren (Abb. 24), was nach dieser relativ kurzen Bewitterungsdauer schwer erklärbar ist.



Abb. 23 abgewitterte Oberfläche einer Fichtenschindel mit deutlicher Ausbildung der Riffelstruktur, süd-exponiert nach 26 Monaten Bewitterung



Abb. 24 Schindelschirm Lärche mit relativ viel gerissenen und gespaltenen Schindeln, westexponiert nach 14 Monaten Bewitterung

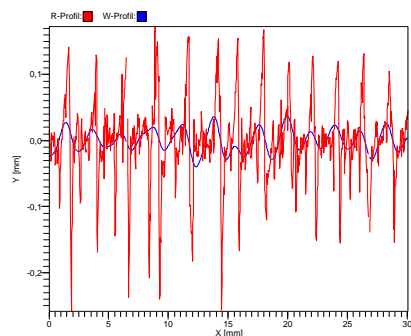
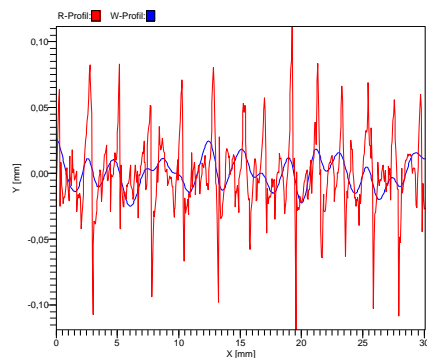
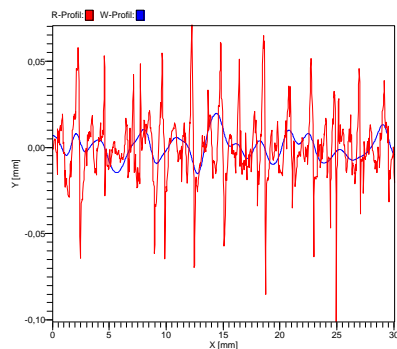
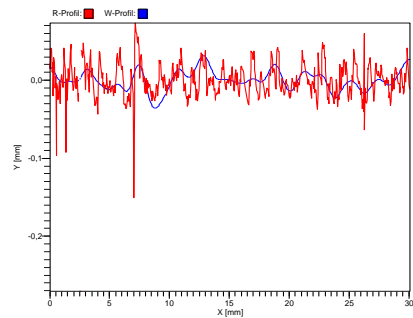


Abb. 25 Bucheschindeln mit aufgerissener Oberfläche im Bereich der Holzstrahlen, Buche Süd-exponiert nach 26 Monaten Bewitterung

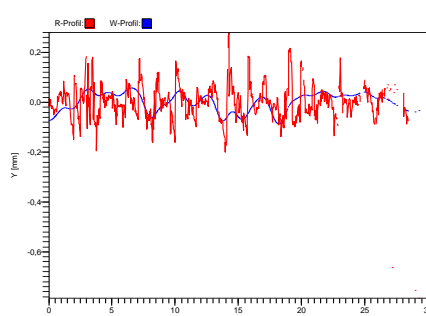
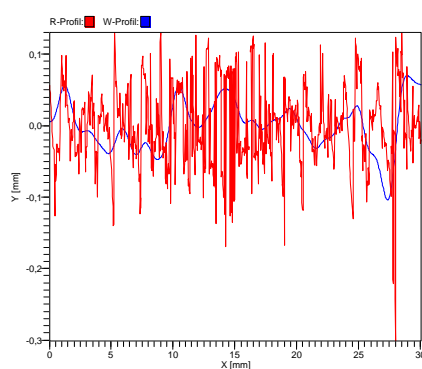
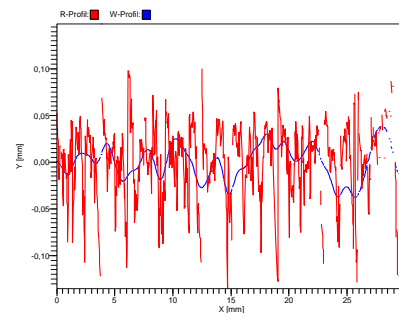
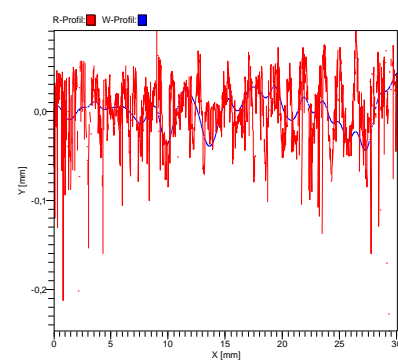
Bei den Buchevarianten ist die oben genannte Riffelstruktur deutlich weniger ausgeprägt. Nach 2 Jahren Bewitterung ist die Oberfläche mehr durch Risse im Bereich der Holzstrahlen (Abb. 25) gekennzeichnet als durch eine Erosion des Frühholzes (Tabelle 4). Dieses Verwitterungsverhalten ist wiederum gut über die Mikrostruktur des Buchenholzes zu erklären. Da es sich bei Buche um ein zerstreutporiges Holz handelt, ist die Jahrringstruktur

Tabelle 4 Rauigkeitsentwicklung in Abhängigkeit der Holzart und Bewitterungszeit für 2 ausgewählte Probeschindeln (Fichte-Süd und Buche-West)

Fichte Süd (nach 0, 6, 12, 26 Monaten)



Buche West (nach 0, 6, 12, 26 Monaten)



weniger offensichtlich und die Dichteunterschiede innerhalb eines Jahrringes sind weniger gross als bei Nadelhölzern. Demzufolge ist die Abwitterung auf der Schindeloberfläche gleichmässiger und es kommt nicht zur Ausbildung einer Riffelstruktur. Die Buchenmikrostruktur ist weiter durch zwei Arten von Holzstrahlen gekennzeichnet, wobei die grösseren Strahlen bis zu 4mm hoch werden können. Diese Strukturelemente, welche senkrecht zu den Fasern und Gefässen verlaufen, bilden aufgrund ihrer Grösse im Bereich des Kreuzungsfeldes naturgemäss eine

Schwachstelle aus, welche dann während der Bewitterung aufreisst (Abb. 24). Somit erhöht sich die Rauigkeit der Oberfläche und die Zugänglichkeit für Wasser wird ebenfalls erhöht.

7 ZUSAMMENFASSUNG

In der vorliegenden Untersuchung wurden 9 Schindelschirme hinsichtlich ihres Bewitterungsverhaltens untersucht. Die Probeflächen variierten dabei bei folgenden Parametern: Holzart, Schindelherstellung, Bewitterungsort und Exposition. Die Bewertung des zeitabhängigen Bewitterungsverhaltens erfolgte über die Analyse folgender Eigenschaften: Farbe, Oberflächenspannung/Kontaktwinkel, Rauigkeit und visuelle Begutachtung.

Die farbliche Entwicklung war zwischen den Nadelholz- und Laubholzvarianten unterschiedlich. Speziell die Buchevarianten zeigen eine sehr schnelle Veränderung in Richtung Grau. Jedoch ist bei diesen Varianten die Farbveränderung bereits nach 2 Jahren nahezu abgeschlossen und nach diesem Zeitraum geringer als bei den Nadelholzvarianten. Die Buchenschindeln zeigen Risse im Bereich der Holzstrahlen, was aber bis zum jetzigen Zeitpunkt noch keinen nachweisbaren Effekt auf die Dauerhaftigkeit dieser Varianten hat. Die Affinität der Holzarten gegenüber Wasser entwickelt sich unterschiedlich. Die Oberflächenspannung der unbeschichteten Buchevarianten nimmt im Bewitterungsverlauf sehr schnell ab, wodurch das Wasser sehr schnell aufgenommen und auch wieder abgegeben werden kann. Bei der Variante Lärche Süd verläuft der Abbau des hydrophoben Lignins langsamer, wodurch ein gewisser Abperleffekt gegenüber Wasser länger erhalten bleibt. Dieses Verhalten ist in erster Linie auf den unterschiedlichen chemischen Aufbau der Holzarten und dem damit verbundenen Abbau der Holzkomponenten zurückzuführen.

Die Schindelherstellung hat aufgrund der vorliegenden Ergebnisse keinen wesentlichen Einfluss auf das Erscheinungsbild und die Dauerhaftigkeit der Schindeln. Die gesägten, grossformatigen Schindeln verhalten sich ähnlich wie die geschnittenen Schindeln. Dieser Umstand ist bemerkenswert, da bei den gesägten Varianten mit einem grösseren Anteil an zerstörten Fasern gerechnet werden muss, was sich in diesem Fall aber offensichtlich nicht negativ auf das Bewitterungsverhalten auswirkt. Die Verformung der geschnittenen Buchevarianten ist grösser als die der gesägten Schindeln. Die geschnittenen Lärcheschindeln zeigen die grösste Tendenz zu reißen.

Die in dieser Studie untersuchten Bewitterungsorte mit einem entsprechend unterschiedlichen Höhengniveau wirken sich nicht nachweislich auf das Verwitterungsverhalten der Schindelschirme aus.

Bei der untersuchten Exposition und senkrechten Ausrichtung der Probeflächen konnte bis jetzt nur ein geringer Einfluss der Expositionsrichtung festgestellt werden. Die Unterschiede waren am deutlichsten bei der Nadelholzvariante. Die Lärche West Variante dunkelt im Vergleich stärker nach und zeigt deutlich mehr Risse als die südexponierte Variante. Bei den Buchvarianten waren die Unterschiede bzgl. der Exposition weniger ausgeprägt. Es ist nicht auszuschliessen, dass es im weiteren Bewitterungsverlauf zu einem deutlich unterschiedlichen Verhalten in Westrichtung im Vergleich zur Südrichtung kommen kann, was speziell auf die Lärchevarianten zutreffen wird.

Abschliessend kann gesagt werden, dass die unbehandelten Bucheschindeln die allgemeinen Anforderungen eines Schindelschirmes in eingeschränktem Mass erfüllen. Besonders ist dabei das Verformungsverhaltens zu erwähnen, welches bei den verschiedenen Buchevarianten sehr stark ausgeprägt war. Diese Tatsache kann unter Umständen zu einer beschleunigten Beschädigung des Schindelschirms führen, was sich in den folgenden Bewitterungsjahren zeigen wird.

Weiter ist davon auszugehen, dass eine fachgerechte Ausführung der Beschichtung auf Schindelschirmen aus Buche die Farbstabilität und Dauerhaftigkeit deutlich verbessern kann, wobei hier lasierende Dünnschichtsysteme zu bevorzugen sind, da es sonst zu Verklebungen kommt. Anhand der Ergebnisse während der Bewitterung lässt sich allgemein ableiten, dass bei Schindelverkleidungen aus Buchenholz in entsprechenden Varianten mit einer etwas niedrigeren bis ähnlichen Lebensdauer wie beim Einsatz von Fichte und Lärche gerechnet werden kann, wobei diese Aussage noch durch weitere Untersuchungen über einen längeren Bewitterungszeitraum (8-10 Jahre) belegt werden muss.

8 BESTIMMUNGEN ZUM VORLIEGENDEN BERICHT

Dieser Bericht darf nicht ohne Genehmigung der Berner Fachhochschule, Architektur, Holz und Bau auszugsweise vervielfältigt werden. Jegliche Veröffentlichung des Berichts oder von Teilen davon bedarf der schriftlichen Zustimmung der Fachhochschule. Ein Original dieses Berichts wird für 5 Jahre aufbewahrt. Dieser Bericht ist nur mit den Unterschriften des Abteilungsleiters F+E und des Projektverantwortlichen gültig.

8.1 Umfang des Berichts

Dieser Bericht besteht aus 30 Seiten inkl. Anhang.

9 VERZEICHNISSE

9.1 Tabellen und Abbildungsverzeichnis

Tabelle 1 Qualitätskriterien für die Auswahl der Bäume für die Schindelherstellung	5
Tabelle 2 Schindelformate.....	7
Tabelle 3 Optische Darstellung der Farbveränderungen der Schindelschirme in Abhängigkeit der Holzart, Herstellung und Bewitterungszeit	16
Tabelle 4 Rauigkeitsentwicklung in Abhängigkeit der Holzart und Bewitterungszeit für 2 ausgewählte Probeschindeln (Fichte-Süd und Buche-West)	23
Abb. 1 Zuschnitt des Rundholzes auf Schindellänge.....	6
Abb. 2 Aufgespaltene Stammscheiben zu konischen Holzklötzen (Mösel)	6
Abb. 3 Schneiden der Schindeln aus den Möseln	6
Abb. 4 Schindelpakete	6
Abb. 5 Abrunden der Ecken am Schindelfuss.....	6
Abb. 6 Herstellung der Musterflächen, Überlappung der Schindeln im unteren Bereich	7
Abb. 7 Herstellung der Musterflächen, Befestigung der Schindeln entsprechend Fachweite und Fugenbreite	7
Abb. 8 Musterflächen am Bewitterungsstand an der BFH-AHB (links Bucheschindeln maschinengeschnitten und deckend beschichtet, Mitte Bucheschindeln gesägt, rechts Fichteschindeln maschinengeschnitten unbehandelt)	8
Abb. 9 Seitenansicht einer Musterfläche.....	8
Abb. 10 Platzierung und Nummerierung der Schindeln in der Probenfläche	10
Abb. 11 Drei-Dimensionaler Farbraum des Lab Farbsystems.....	10
Abb. 12 Kräfteverhältnisse an einem liegenden Tropfen	11
Abb. 13 Darstellung des Rauigkeitsparameters Ra im Rauigkeitsprofil	12
Abb. 14 Farbentwicklung der Schindelschirme im Verlauf von zwei Bewitterungsjahren (2008-2010) bezogen auf den Ausgangszustand in Abhängigkeit der Holzart, Herstellung und Bewitterungsstandort.....	13
Abb. 15 Relative Farbentwicklung der Schindelschirme im Verlauf von zwei Bewitterungsjahren (2008-2010) bezogen auf den jeweils vorangegangenen Messpunkt.....	14
Abb. 16 abgerissener Farbfilm infolge „verklebter“ Schindeln, Buche West-exponiert	15
Abb. 17 Wespenfrass auf einer unbehandelten Bucheschindel, Exposition West nach 26 Monaten Bewitterung.....	15
Abb. 18 Buchschindeln mit deutlicher Verformung in der Fläche führen zu einem unruhigen Erscheinungsbild, Buche Süd-exponiert nach 26 Monaten Bewitterung	15
Abb. 19 gleichmässig aufliegende Fichteschindeln ohne Verformung – sehr gleichmässiges Erscheinungsbild, südexponiert nach 26 Monaten Bewitterung	15
Abb. 20 Entwicklung der Oberflächenspannung auf der Schindeloberfläche bewertet über den Kontaktwinkel (inkl. Standardabweichung) in Abhängigkeit der Holzart, Herstellung und Bewitterungszeit	20
Abb. 21 Aufgesaugte Wassertropfen auf einer gesägten Bucheschindel kurz nach der Aufbringung zeigen den ausgeprägten hydrophilen Charakter dieser Oberfläche.....	21
Abb. 22 Entwicklung der Oberflächenrauigkeit (inkl. der Standardabweichung) der Probeschindeln in Abhängigkeit der Holzart, Herstellung und Bewitterungszeit	21
Abb. 23 abgewitterte Oberfläche einer Fichtenschindel mit deutlicher Ausbildung der Riffelstruktur, süd-exponiert nach 26 Monaten Bewitterung.....	22
Abb. 24 Schindelschirm Lärche mit relativ viel gerissenen und gespaltenen Schindeln, westexponiert nach 14 Monaten Bewitterung.....	22
Abb. 25 Bucheschindeln mit aufgerissener Oberfläche im Bereich der Holzstrahlen , Buche Süd-exponiert nach 26 Monaten Bewitterung.....	22

Anhang A:

A.1 Oberflächenrauigkeit Ra [µm], Dicke [mm]

Probenfläche	Nr	Ausgangszustand 07.03.2008					20.10.2008 nach 6 Monaten .2008					20.05.2009 nach13 Monaten					02.06.2010 nach26 Monaten				
		1	2	3	4	Dicke	1	2	3	4	Dicke	1	2	3	4	Dicke	1	2	3	4	Dicke
Fichte süd FS	1	15,3	11,3	12,5	20,9	6,0	12,8	10,4	12,9	10,6	5,9	16,8	17,9	18,3	18,6	5,9	29,2	28,4	32,1	34,1	5,95
	2	43,9	20,1	13,7	14,3	5,6	24,1	30,8	28,2	28,8	5,5	25,0	26,0	31,2	30,2	5,4	50,9	47,9	60,8	56,4	5,43
	3					5,4					5,3					5,2					5,28
	4	16,5	17,1	22,5	24,3	5,5	22,5	21,9	21,0	19,7	5,3	20,0	19,5	20,2	18,3	5,3	40,8	42,2	43,4	40,1	5,36
	5					5,3					5,3					5,2					5,28
	6					5,7					5,3					5,2					5,35
	7					5,6	11,2	11,2	10,6	10,8	5,5	25,4	29,3	28,8	30,4	5,4	36,7	43,2	51,0	48,9	5,53
	8					5,3					5,1					5,1					5,11
	9	14,1	26,9	10,8	12,3	4,9	14,7	14,0	13,7	13,3	4,8	17,2	19,6	19,8	23,2	4,7	42,2	46,1	49,5	48,4	4,78
	10					5,3					5,1					5,2					5,19
Mittelwert					18,5	5,5				17,1	5,3				22,8	5,3				43,6	5,3
Standardabweichung					8,3	0,3				6,8	0,3				5,0	0,3				8,6	0,3
Variationskoeffizient					44,8	5,7				39,8	5,3				21,9	5,8				19,8	5,6
Lärche süd LS	1	74,0	58,9	39,0	6,1	6,1	18,0	21,6	23,5	25,4	6,0	28,6	33,9	39,4	37,2	5,9	52,0	55,1	64,4	62,0	6,1
	2	26,2	15,6	19,8	31,1	5,8	15,0	17,7	19,0	21,2	5,7	24,5	30,6	28,9	31,5	5,7	46,7	48,7	46,3	54,1	5,79
	3					5,9					5,9					5,9					6,03
	4	28,5	45,8	50,4	22,1	5,9	20,4	23,0	29,2	30,5	5,9	37,6	37,2	40,7		5,8	57,6	59,4	62,2	67,4	5,91
	5					6,1					6,0					6,0					6,21
	6					5,9					5,9					5,9					5,95
	7	15,3	27,6	42,4	31,4	6,1	18,3	20,4	21,9	25,4	6,1	26,3	29,5	32,3	34,1	6,2	46,2	49,7	55,5	54,6	6,25
	8					5,7					5,5					5,6					5,75
	9	14,6	20,4	16,6	23,3	5,5	15,1	14,2	16,5	17,9	5,4	20,9	24,5	27,4	25,3	5,4	38,3	41,3	51,1	50,7	5,51
	10					5,5					5,5					5,4					5,52
Mittelwert					31,7	5,8				20,7	5,8				31,1	5,8				53,2	5,9
Standardabweichung					16,3	0,2				4,5	0,2				5,6	0,3				7,6	0,3
Variationskoeffizient					51,4	3,7				21,7	4,2				18,1	4,4				14,3	4,4
Lärche west LW	1	28,1	16,6	18,9	16,1	6,0	17,3	16,1	16,5	18,0	6,0	18,9	22,4	23,7	24,1	5,9	32,7	33,6	35,1	35,7	6,15
	2	13,0	14,1	14,8	17,1	5,5	12,9	15,0	15,5	15,8	5,5		21,3	20,2	20,6	5,5	31,1	34,1	31,6	29,8	5,7
	3					5,5					5,4					5,4					5,48
	4	25,4	20,8	20,1	25,4	5,8	25,6	20,4	21,9	22,0	5,7	25,6	21,8	25,7	23,8	5,6	33,1	30,6	34,2	30,4	5,82
	5					5,9					5,8					5,7					5,9
	6					5,4					5,2					5,3					5,29
	7	21,7	16,4	16,7	18,2	5,5	14,3	14,5	15,4	15,6	5,5	19,2	21,0		21,8	5,5	29,8	31,2	31,9	33,0	5,53
	8					6,1					6,0					5,9					6,04
	9	15,7	16,8	12,7	9,0	5,7	11,6	13,1	13,6	14,6	5,7	17,8	19,8	20,0	21,9	5,6	31,4	32,7	34,8	35,8	5,74
	10					6,0					5,9					5,8					6,03
Mittelwert					17,9	5,7				16,5	5,7				21,6	5,6				32,6	5,8
Standardabweichung					4,7	0,3				3,5	0,3				2,2	0,2				1,9	0,3
Variationskoeffizient					26,1	4,4				21,4	4,5				10,4	4,0				5,8	4,8
Buche süd BS	1	12,8	11,2	13,8	14,6	5,9	17,5	17,3	17,6	18,3	5,6	17,8	16,7	18,6	20,1	5,6	29,9	33,8	35,7	42,5	5,87
	2	11,6	10,7	9,5	13,3	4,8	12,0	13,7	14,4	12,6	4,9	23,5	26,1	26,8	26,7	4,9	34,1	37,6	35,8	30,8	4,87
	3					4,4					4,3					4,3					4,47
	4	14,3	14,2	20,1	11,4	5,4	15,1	16,3	15,2	16,1	5,3	31,8	45,7	31,6	19,7	5,3					
	5					5,2					5,1					5,0					5,13
	6					5,4					5,3					5,4					5,36
	7	22,3	20,3	17,5	16,4	5,7	20,8	24,2	21,7	20,4	5,7	14,8	15,7	10,5	12,6	5,7	33,8	39,6	39,0	34,8	5,77
	8					5,4					5,3					5,4					5,46
	9	17,8	20,7	27,7	21,9	6,0	31,8	28,4	31,2	29,6	6,0	33,7	17,3	16,3	39,0	6,0	47,3	57,4	45,5	43,0	6,08
	10					6,1					6,1					6,0					6,07
Mittelwert					16,1	5,4				19,7	5,3				23,2	5,4				38,8	5,5
Standardabweichung					4,8	0,5				6,2	0,5				9,3	0,5				7,1	0,6
Variationskoeffizient					29,9	10,0				31,6	9,6				39,9	9,6				18,2	10,2
Buche west BW	1	11,7	12,0	17,0	21,4	4,5	12,8	10,4	12,9	10,6	4,4	25,5	32,9	59,0	34,2	4,4					4,55
	2	20,5	28,9	39,7	17,7	6,1	24,1	30,8	28,2	28,8	6,0	42,2	44,5	40,1	39,8	6,0	39,2	50,7	48,5	37,7	6
	3					4,7					4,6					4,6					4,71
	4	24,3	18,3	21,3	24,5	5,5	22,5	21,9	21,0	19,7	5,4	22,3		28,3	34,0	5,4	32,8	33,0	40,3	37,4	5,51
	5					5,2					5,1					5,1					5,17
	6					5,9					5,9					6,0					6,07
	7	14,8	15,9	13,3	14,8	4,9	11,2	11,2	10,6	10,8	4,8	20,6	18,6	23,6	23,5	4,8	22,4	33,2	32,0	21,7	4,93
	8					5,7					5,3					5,6					5,76
	9	14,6	14,9	14,9	16,7	5,5	14,7	14,0	13,7	13,3	5,2	15,5	18,1	27,3	36,7	5,4	19,7	22,1	21,7	21,6	5,49
	10					5,4					4,9					5,2					5,3
Mittelwert					18,9	5,3				17,1	5,2				30,9	5,2				32,1	5,3
Standardabweichung					6,7	0,5				6,8	0,5				11,1	0,5				9,9	0,5
Variationskoeffizient					35,2	9,6				39,8	10,1				35,9	10,1				30,8	9,7
Buche behandelt süd BBS	1	7,7	8,8	6,6	6,7	6,6	7,9	9,2	7,3	7,0	6,2	7,8	9,1	7,6	7,6	6,2	7,9	10,2	8,1	8,8	6,46
	2	6,9	5,7	4,5	4,7	5,7	6,3	5,8	4,2	4,8	5,7	6,4	5,2	5,0	4,8	5,3	6,6	5,5	4,5	10,9	5,7
	3					6,0					5,9					6,2					6,5
	4	5,8	5,1	5,4	6,3	5,9	5,9	4,5	5,8	5,1	6,0	6,2	5,1	6,4	5,8	6,1	5,4	5,5	6,3	5,8	5,95
	5					5,6					5,5					5,7					5,8
	6					4,9					4,9					4,8					5,02
	7	4,5	4,6	4,5	5,9	4,5	4,9	4,6	4,7	6,0	4,5	4,7	4,5	5,1	5,8	4,5	5,4	4,9	5,0	6,4	4,68
	8					5,2					5,1					5,3					5,5
	9	4,0	3,4	3,9	4,1	5,3	4,0	3,2	4,0	4,1	5,1	4,1	4,4	3,8	4,3	5,2	4,1	3,8	4,5	4,5	5,37
	10					5,3					5,2										

A.2 Farbdaten

Bewitterungszeit		0				6				13				26			
Probenfläche	Probennummer	Ausgangszustand				nach 6 Monaten (Oktober 2008)				nach 13 Monaten (Mai 2009)				nach 24 Monaten (Juni 2010)			
		delta e	L	a	b	delta e	L	a	b	delta e	L	a	b	delta e	L	a	b
Fichte süd FS	1	82.68	4.03	21.03		66.77	2.05	8.57		61.34	0.93	4.45		55.15	0.46	1.86	
	2	84.11	3.50	21.90		65.62	2.89	8.77		61.29	1.38	5.43		52.94	0.76	2.86	
	3	84.58	3.33	21.82		65.78	2.37	7.56		63.76	1.28	4.23		56.12	0.54	2.28	
	4	84.47	3.72	21.71		72.53	3.85	10.62		68.87	2.36	6.45		59.74	1.18	4.16	
	5	84.94	3.37	21.44		65.03	1.67	6.42		63.09	0.91	3.52		55.09	0.46	2.17	
	6	84.70	3.28	21.88		64.75	2.97	8.78		63.48	1.68	5.62		56.46	0.86	3.82	
	7	84.62	3.33	21.68		68.08	4.90	12.90		65.39	3.20	8.19		56.15	1.67	4.9	
	8	84.86	3.43	21.17		73.35	5.14	13.70		70.92	3.37	8.86		60.59	1.50	5.25	
	9	84.19	3.57	21.85		69.80	5.60	14.20		67.09	4.15	10.35		57.71	1.72	5.08	
	10	82.04	3.81	21.26		65.11	2.46	8.86		62.64	1.45	6.23		58.17	0.54	2.63	
je Messung	Mittelwert	84.12	3.54	21.57		67.68	3.39	10.04		64.79	2.07	6.33		56.81	0.97	3.50	
	ΔE^*_{ab}	0.00				20.08				4.88				8.53			
	absolut ΔE^*_{ab}	0.00				20.08				24.66				32.85			
Lärche süd LS	1	67.67	13.11	27.27		59.18	11.33	21.88		56.61	6.44	13.99		46.69	2.70	6.84	
	2	67.10	13.34	27.51		55.53	11.66	20.12		53.72	7.34	13.78		41.96	3.81	7.10	
	3	66.25	12.82	28.58		54.77	11.14	19.26		52.52	7.13	13.17		40.89	3.22	6.57	
	4	70.40	12.74	27.15		61.10	10.47	20.35		56.52	6.73	13.44		44.61	2.72	6.91	
	5	69.76	13.17	28.46		56.99	11.80	21.66		52.90	7.85	14.18		42.25	3.80	7.39	
	6	67.99	13.35	28.23		57.65	11.52	21.84		55.88	6.96	14.56		45.98	3.27	7.41	
	7	65.45	14.60	27.50		56.85	12.56	23.72		55.57	8.21	17.13		44.72	3.33	7.79	
	8	70.42	12.49	27.17		60.14	11.95	23.54		55.44	7.87	15.07		48.12	3.99	9.32	
	9	63.88	13.75	24.58		50.43	14.28	24.05		48.50	8.53	16.18		40.09	3.83	7.58	
	10	67.61	14.31	28.06		56.97	12.55	22.69		53.14	9.23	17.02		43.97	4.63	9.14	
je Messung	Mittelwert	67.65	13.37	27.45		56.96	11.93	21.91		54.08	7.63	14.85		43.93	3.53	7.61	
	ΔE^*_{ab}	0.00				12.13				8.75				13.13			
	absolut ΔE^*_{ab}	0.00				12.13				19.39				32.46			
Lärche west LW	1	67.60	12.87	27.17		55.42	6.56	12.93		52.08	3.23	6.89		45.74	1.18	3.28	
	2	68.69	13.34	26.53		59.63	7.98	15.21		56.41	3.69	8.40		46.40	0.90	2.61	
	3	67.08	14.33	27.20		54.53	7.57	14.34		51.23	4.44	8.86		42.39	1.28	2.97	
	4	64.42	15.55	28.92		51.88	8.41	15.14		47.30	4.10	8.05		40.42	1.25	2.90	
	5	66.54	14.76	27.78		56.02	8.80	15.58		53.43	3.97	8.50		45.50	1.37	3.68	
	6	67.92	14.61	28.40		54.01	7.44	14.04		49.57	4.49	8.14		43.27	1.28	3.02	
	7	68.41	12.65	27.66		58.90	8.95	15.75		53.85	4.76	8.15		46.04	1.70	3.49	
	8	64.87	14.85	27.32		54.10	9.41	16.13		52.24	5.39	9.95		43.47	1.75	4.18	
	9	68.42	13.14	27.46		57.01	9.47	16.79		54.31	5.79	10.64		45.46	1.05	4.80	
	10	67.22	12.73	26.87		57.25	9.72	17.04		53.07	5.22	9.31		47.22	1.87	4.43	
je Messung	Mittelwert	67.12	13.88	27.53		55.88	8.43	15.30		52.35	4.51	8.69		44.59	1.46	3.54	
	ΔE^*_{ab}	0.00				17.49				8.45				9.80			
	absolut ΔE^*_{ab}	0.00				17.49				25.71				35.18			
Buche süd BS	1	72.52	10.28	25.38		62.62	1.62	8.05		59.06	1.01	4.14		58.30	0.43	2.30	
	2	79.38	6.77	22.17		68.57	2.03	8.79		62.91	1.06	4.36		60.84	0.63	3.33	
	3	80.40	6.25	20.56		71.05	2.90	12.15		63.22	0.97	5.11		63.22	0.97	5.11	
	4	73.42	8.77	21.66		69.59	2.63	10.17		63.22	0.94	4.49					
	5	77.08	7.72	21.75		60.43	1.53	6.70		57.88	1.03	3.43		55.61	0.52	2.25	
	6	77.58	7.28	20.51		75.86	3.92	13.07		68.48	1.42	6.50		62.26	0.65	3.53	
	7	76.59	7.84	22.39		61.72	1.44	7.22		56.78	0.81	3.42		54.89	0.54	2.34	
	8	79.17	6.94	20.71		76.90	1.37	7.65		68.25	0.21	2.31		64.06	0.36	2.44	
	9	77.71	7.64	21.80		79.90	2.27	9.57		71.65	0.46	3.76		63.62	0.53	3.14	
	10	77.37	7.23	21.47		80.08	3.68	12.23		71.68	0.81	5.56		62.24	0.29	2.43	
je Messung	Mittelwert	77.12	7.67	21.84		70.67	2.34	9.56		64.31	0.87	4.31		60.23	0.49	2.72	
	ΔE^*_{ab}	0.00				14.86				8.38				4.40			
	absolut ΔE^*_{ab}	0.00				14.86				22.75				26.51			
Buche west BW	1	78.83	7.24	20.61		57.45	3.27	10.84		58.54	1.29	5.20		58.38	0.43	2.12	
	2	75.20	8.27	22.63		59.45	2.57	10.46		61.25	1.62	6.55		54.68	0.83	3.18	
	3	76.60	7.89	21.69		60.83	2.39	8.43		57.92	1.63	5.54		58.60	1.18	5.80	
	4	78.24	7.09	21.24		58.95	2.11	8.86		58.25	0.99	4.37		56.72	0.63	2.77	
	5	77.76	7.73	21.64		60.27	2.29	8.45		60.72	4.15	5.41		55.76	1.02	4.37	
	6	77.74	7.66	21.55		62.42	1.69	7.61		60.25	0.97	4.52		55.82	0.67	2.76	
	7	77.45	7.69	22.30		63.63	2.10	9.17		61.11	1.17	4.88		57.24	0.82	2.92	
	8	77.80	7.07	21.48		58.76	1.93	7.66		56.93	1.19	4.94					
	9	77.97	7.34	22.00		59.22	2.80	9.73		60.84	1.64	6.26					
	10	77.53	7.36	21.38		66.13	2.39	9.86		58.09	1.37	8.31		59.93	0.76	3.41	
je Messung	Mittelwert	77.51	7.53	21.65		60.71	2.35	9.11		59.39	1.60	5.60		57.52	0.79	3.42	
	ΔE^*_{ab}	0.00				21.60				3.82				2.99			
	absolut ΔE^*_{ab}	0.00				21.60				24.93				27.89			
Buche behandelt süd BBS	1	83.92	2.62	16.12		82.05	2.68	16.49		80.91	2.68	16.01		80.90	1.09	16.21	
	2	84.09	2.61	16.09		82.66	2.56	16.09		81.61	2.63	15.67		81.88	1.00	15.91	
	3	84.09	2.64	16.11		82.46	2.69	16.13		81.60	2.73	15.71		81.66	1.07	16.09	
	4	84.19	2.61	16.06		82.59	2.76	16.19		81.42	2.76	15.86		81.91	1.10	16.24	
	5	84.18	2.61	16.11		82.89	2.74	16.16		81.55	2.74	15.89		81.96	1.09	16.25	
	6	84.22	2.61	16.08		83.11	2.72	16.17		81.68	2.75	15.88		81.97	1.05	16.11	
	7	84.22	2.60	16.08		82.92	2.71	16.14		81.97	2.70	15.89		82.18	1.05	16.23	
	8	84.17	2.60	16.07		82.66	2.76	16.18		81.62	2.76	15.93		81.90	1.06	16.06	
	9	84.24	2.60	16.04		82.83	2.71	16.29		81.52	2.69	15.99		81.85	1.05	16.22	
	10	84.26	2.59	16.06		83.15	2.71	16.26		82.47	2.76	16.07		82.86	1.02	16.17	
je Messung	Mittelwert	84.16	2.61	16.08		82.73	2.70	16.21		81.64	2.72	15.89		81.91	1.06	16.15	
	ΔE^*_{ab}	0.00				1.55				1.24				1.70			
	absolut ΔE^*_{ab}	0.00				1.55				2.53				2.73			
Buche behandelt west BBW	1	84.20	2.59	16.05		81.59	2.64	16.21		80.17	2.71						

A.3 Oberflächenspannung/Kontaktwinkel [°]

Probenfläche	Probennummer	Ausgangszustand					nach 6 Monaten (Oktober 2008)					nach 13 Monaten (Mai 2009)					nach 24 Monaten (Juni 2010)				
		1	2	3	MW	SA	1	2	3	MW	SA	1	2	3	MW	SA	1	2	3	MW	SA
Fichte süd FS	1	60.4	51.2	63.7			63.9	48.4	41.1			n.m.	n.m.	n.m.			n.m.	n.m.	n.m.		
	2	79.3	69.8	63.5			38.6	48.4	31.5			n.m.	n.m.	n.m.			n.m.	n.m.	n.m.		
	3	76.6	71.1	80.9			52.3	48.2	n.m.			n.m.	n.m.	n.m.			n.m.	n.m.	n.m.		
	4	78.3	75.1	68.3			41.4	61.9	54.7			n.m.	n.m.	n.m.			n.m.	n.m.	n.m.		
	5	74.6	87.8	69.3			40.5	46.4	27.7			n.m.	n.m.	n.m.			n.m.	n.m.	n.m.		
	6	64.9	70.6	84.9			48.9	51.6	54.6			n.m.	n.m.	n.m.			n.m.	n.m.	n.m.		
	7	52.4	52.4	71.3			37.9	20.2	n.m.			n.m.	n.m.	n.m.			n.m.	n.m.	n.m.		
	8	92.4	71.2	68.9			n.m.	16.1	n.m.			n.m.	n.m.	n.m.			n.m.	n.m.	n.m.		
	9	74	69.1	52.5			20	n.m.	n.m.			n.m.	n.m.	n.m.			n.m.	n.m.	n.m.		
	10	50.6	101	102.8	71.63	13.45	23.8	n.m.	n.m.	41.73	13.61	n.m.	n.m.	n.m.			n.m.	n.m.	n.m.		
Lärche süd LS	1	54.7	61	52.6			40.2	46.8	18.8			n.m.	n.m.	n.m.			n.m.	n.m.	n.m.		
	2	30.8	26.3	35.9			51	37.1	45.6			n.m.	n.m.	n.m.			n.m.	n.m.	n.m.		
	3	37.2	31.1	35			15	n.m.	n.m.			n.m.	n.m.	n.m.			n.m.	n.m.	n.m.		
	4	34.6	72.9	59.8			25.6	32.3	28.2			n.m.	n.m.	n.m.			n.m.	n.m.	n.m.		
	5	40.4	72.5	61.8			32.1	28.3	32.9			n.m.	n.m.	n.m.			n.m.	n.m.	n.m.		
	6	40.6	33	34.3			34.7	29	47.3			20.5	35.2	n.m.			n.m.	n.m.	n.m.		
	7	41	72.4	62			33.4	35	35.2			28.4	26.9	17.7			n.m.	n.m.	n.m.		
	8	56.9	63.7	59.9			33.8	30	32.2			23.8	n.m.	n.m.			n.m.	n.m.	n.m.		
	9	39.5	41.4	35.6			49.7	48.3	43.5			35.3	n.m.	n.m.			n.m.	n.m.	n.m.		
	10	34.4	42.7	52.8	47.23	14.1	42	39.9	46	36.21	9.116	14.2	34.5	n.m.	26.28	7.846	n.m.	n.m.	n.m.		
Lärche west LW	1	59.5	61.5	43			34.4	48.4	57.6			n.m.	n.m.	n.m.			n.m.	n.m.	n.m.		
	2	21.5	30	26.7			26.1	39	40.4			n.m.	n.m.	n.m.			n.m.	n.m.	n.m.		
	3	36.9	30.3	21.4			46.3	n.m.	n.m.			n.m.	n.m.	n.m.			n.m.	n.m.	n.m.		
	4	40.9	50.1	54.3			38	n.m.	50.1			n.m.	n.m.	n.m.			n.m.	n.m.	n.m.		
	5	42.6	49.2	44.7			34	46.8	41.7			n.m.	n.m.	n.m.			n.m.	n.m.	n.m.		
	6	34.5	23.8	79.8			36.1	23	18			n.m.	n.m.	n.m.			n.m.	n.m.	n.m.		
	7	33	27.3	43.1			44.9	53.4	49.1			n.m.	n.m.	n.m.			n.m.	n.m.	n.m.		
	8	62.1	48.2	47.4			29.3	29.8	64			n.m.	n.m.	n.m.			n.m.	n.m.	n.m.		
	9	43.8	39.5	65.3			36.1	37	62.1			n.m.	n.m.	n.m.			n.m.	n.m.	n.m.		
	10	44.9	30.8	31.8	42.26	14.05	35.3	43.7	47	41.17	11.21	n.m.	n.m.	n.m.			n.m.	n.m.	n.m.		
Buche süd BS	1	63.2	61.3	62.1			n.m.	n.m.	n.m.			n.m.	n.m.	n.m.			n.m.	n.m.	n.m.		
	2	88.1	81.9	76.6			n.m.	n.m.	n.m.			n.m.	n.m.	n.m.			n.m.	n.m.	n.m.		
	3	43.3	36.9	41.5			n.m.	n.m.	n.m.			n.m.	n.m.	n.m.			n.m.	n.m.	n.m.		
	4	71	61.2	56			n.m.	n.m.	n.m.			n.m.	n.m.	n.m.			n.m.	n.m.	n.m.		
	5	102.7	65.6	70.1			n.m.	n.m.	n.m.			n.m.	n.m.	n.m.			n.m.	n.m.	n.m.		
	6	88	70.5	90.3			n.m.	n.m.	n.m.			n.m.	n.m.	n.m.			n.m.	n.m.	n.m.		
	7	103	61.3	76.7			n.m.	n.m.	n.m.			n.m.	n.m.	n.m.			n.m.	n.m.	n.m.		
	8	55.9	64.4	64.3			n.m.	n.m.	n.m.			n.m.	n.m.	n.m.			n.m.	n.m.	n.m.		
	9	63.1	88	86			n.m.	n.m.	n.m.			n.m.	n.m.	n.m.			n.m.	n.m.	n.m.		
	10	92.1	66	72.6	70.79	16.62	n.m.	n.m.	n.m.			n.m.	n.m.	n.m.			n.m.	n.m.	n.m.		
Buche west BW	1	57.1	67.1	72.1			n.m.	n.m.	n.m.			n.m.	n.m.	n.m.			n.m.	n.m.	n.m.		
	2	67.4	102.9	103.5			n.m.	n.m.	n.m.			n.m.	n.m.	n.m.			n.m.	n.m.	n.m.		
	3	72.1	65.4	56.7			n.m.	n.m.	n.m.			n.m.	n.m.	n.m.			n.m.	n.m.	n.m.		
	4	101.8	84.9	82.5			n.m.	n.m.	n.m.			n.m.	n.m.	n.m.			n.m.	n.m.	n.m.		
	5	81.7	71	81.2			n.m.	n.m.	n.m.			n.m.	n.m.	n.m.			n.m.	n.m.	n.m.		
	6	66.6	71	65.9			n.m.	n.m.	n.m.			n.m.	n.m.	n.m.			n.m.	n.m.	n.m.		
	7	62	60.6	68.7			n.m.	n.m.	n.m.			n.m.	n.m.	n.m.			n.m.	n.m.	n.m.		
	8	84.7	48.6	69			n.m.	n.m.	n.m.			n.m.	n.m.	n.m.			n.m.	n.m.	n.m.		
	9	68.8	76.9	86.8			n.m.	n.m.	n.m.			n.m.	n.m.	n.m.			n.m.	n.m.	n.m.		
	10	56.8	66.1	58.4	72.61	13.84	n.m.	n.m.	n.m.			n.m.	n.m.	n.m.			n.m.	n.m.	n.m.		
Buche behandelt süd BBS	1	72	71	52.8			56.9	53	74.9			79	79	66.3			54.5	46.6	63.3		
	2	73.5	74	71.4			93.8	80.6	61.6			67.2	61.9	95.3			62.8	55.4	53.2		
	3	74.9	68.7	66.1			37.3	48.3	41.7			68.6	61.1	71.7			65.9	66.4	71.4		
	4	68.5	70.1	72			64.9	72	63.7			69.2	54.1	53			58.2	61.9	57.5		
	5	70.9	75	63.2			63.9	65.5	65.1			63.5	62.6	58.4			66.5	60.8	59.1		
	6	60.6	66.2	69.5			66.6	87.8	64.1			72.6	85.5	91.4			63	64.9	61.1		
	7	71.1	70.9	59.7			70.9	61.9	71.2			89.1	87.8	92.4			67.5	64.6	67.2		
	8	68.4	66	68			67.1	73.8	67.9			61.5	60.7	65.8			56.4	57.8	54.5		
	9	67.5	69.9	67.9			80.1	83.9	75.9			75.2	79.5	75.1			64.8	68.1	66		
	10	68.8	72.5	70.4	68.72	4.746	66.1	60.1	62.1	66.76	12.28	33.2	39.3	46.3	68.88	15.29	52.7	52.8	44.8	60.3233	6.506
Buche behandelt west BBW	1	76.4	72.2	74.6			75.2	74.8	70.6			65.4	67	67			62.1	61.3	74.5		
	2	83.8	78.2	80.5			68.3	69.4	74.3			70.9	89.3	64.9			66.5	60.6	62.5		
	3	76.6	85.2	103.7			89.7	82.4	89.5			80	77	77.5			59.1	70.8	70.6		
	4	82.7	74.8	68.9			72.4	68.8	62.1			66.7	73	67.2			61.7	56.2	64.2		
	5	73.3	69.3	78.2			72.6	72.9	82.3			70.5	57.8	68.3			68.9	60.4	56.8		
	6	72.2	67.4	69.8			82.7	84.2	80.2			81.9	79.5	84.7			78.2	63.6	66.3		
	7	74.1	74.6	63.6			63.2	65.7	74.3			73.7	67.8	68.6			57.9	67.6	63.5		
	8	72.8	67	63.4			68.8	69.6	56.1			73.2	73.4	68.5			61.2	64	66.5		
	9	72.8	74.1	73.7			73.6	79.7	89.1			76.5	79.5	76.7			68.8	68.3	69.9		
	10	71	70.8	83.5	74.97	7.747	65.9	65.9	79.3	74.12	8.424	80.7	73.8	72.3	73.11	6.791	65.1	64.2	59.5	64.6933	5.136
Buche Höhenlage süd BHS	1	83.4	70.2	71.8			n.m.	n.m.	n.m.			n.m.	n.m.	n.m.							
	2	70.1	56.3	55.1			n.m.	n.m.	n.m.			n.m.	n.m.	n.m.							
	3	68.7	67.6	65.6			n.m.	n.m.	n.m.			n.m.	n.m.	n.m.							
	4	75.8	50.8	48.4			n.m.	n.m.	n.m.			n.m.	n.m.	n.m.							
	5	87.7	56.1	49			n.m.	n.m.	n.m.			n.m.	n.m.	n.m.							
	6	80.2	48.9	48.1			n.m.	n.m.	n.m.			n.m.	n.m.	n.m.							
	7	97.2	81.4	78.3			n.m.	n.m.	n.m.			n.m.	n.m.	n.m.							
	8	63.1	58	68.8			n.m.	n.m.	n.m.			n.m.	n.m.	n.m.							
	9	69.4	62.4	78.4			n.m.	n.m.	n.m.			n.m.	n.m.	n.m.							
	10	51.5	55.1	38.7	65.2	13.87	n.m.	n.m.	n.m.			n.m.	n.m.	n.m.							
Buche gesägt BGS	1	64.5	51																		

Anhang B: FINANZBERICHT

-