

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 Oberflächenschutz und Nanotechnologie.....	7
1.1.2 Holzmodifikation mit Siliziumverbindungen.....	8
1.1.3 Terminologie.....	8
1.2 Beschichtungskonzept.....	9
1.3 Fragestellungen / Ziele.....	10
1.4 Projektorganisation.....	10
2 Untersuchungsprogramm.....	11
2.1 Probenmaterial.....	12
2.2 Versuchsvarianten / Versuchsserien.....	17
2.3 Untersuchungsmethoden.....	20
2.3.1 Charakterisierung Beschichtungssystem (AP3).....	21
2.3.1.1 Schichtdicke / Beschichtungsaufbau / Farbmessung (AP1).....	21
2.3.1.2 Eindringung und chemische Anbindung der Hydrophobierung.....	22
2.3.1.3 Benetzungsverhalten gegenüber Wasser.....	22
2.3.2 Feuchteschutzwirkung (AP4).....	23
2.3.2.1 Wasser- und Wasserdampfdurchlässigkeit (Laborversuch).....	23
2.3.2.2 Verlauf der Holzfeuchte in der Freibewitterung.....	25
2.3.3 Kompatibilität Schichten (AP5).....	25
2.3.3.1 Benetzungsverhalten der Beschichtungsstoffe.....	25
2.3.3.2 Haftfestigkeit.....	25
2.3.4 Bewitterung / Dauerhaftigkeit (AP2).....	26
3 Ergebnisse zu Hauptfragestellungen.....	31
3.1 Charakterisierung Beschichtungssystem.....	31
3.1.1 Hydrophobierung.....	31
3.1.1.1 Holzverfärbung.....	31
3.1.1.2 Eindringung und chemische Anbindung.....	32
3.1.1.3 Benetzungsverhalten.....	36
3.1.2 Beschichtung.....	38
3.1.2.1 Beschichtungsaufbau.....	38
3.1.2.2 Trockenschichtdicke.....	42
3.1.2.3 Benetzungsverhalten.....	44
3.2 Feuchteschutzwirkung.....	46
3.2.1 Wasser- und Wasserdampfdurchlässigkeit.....	46
3.2.2 Verlauf der Holzfeuchte in der Freibewitterung.....	60
3.3 Kompatibilität Schichten.....	66
3.3.1.1 Kontaktwinkel mit Beschichtungsstoffen.....	67
3.3.1.2 Haftfestigkeit.....	69
3.4 Witterungsbeständigkeit / Dauerhaftigkeit.....	72

4	Zusatzauswertungen.....	87
4.1	Leistungsbeurteilung gemäss EN 927-2	87
4.2	Kontaktwinkel und Feuchteschutzwirkung	89
4.3	Wechselwirkungen zwischen Systemkomponenten	90
4.4	Einflüsse Substrat (Holz)	91
4.5	Tanninblocker in Hydrophobierung	93
4.6	Nano-Silber in Hydrophobierung und Deckschicht	93
4.7	Modifizierte Grundierungen.....	94
4.8	Hydrophobierung der Deckschicht.....	95
5	Folgerungen.....	97
5.1	Gesamtbeurteilung.....	97
5.2	Offene Fragen / Forschungsbedarf.....	101
5.3	Umsetzung / Optimierungen	102
	Literatur	103
	Normen.....	104
	Anhang	105
	A1. KTI-Projektantrag (Auszug)	
	A2. Berichte zur industriellen Beschichtungsapplikation (Wirtschaftspartner)	
	A3. Bericht zur chemischen Analytik der Hydrophobierungsmittel (Empa)	
	A4. Abkürzungen und Probenidentifikation (loses Einzelblatt)	

Vorwort

Der vorliegende Bericht dokumentiert die wichtigsten Ergebnisse der umfangreichen Untersuchungen, welche von der Abteilung Holz der Empa zusammen mit den beteiligten Wirtschaftspartnern im Rahmen des KTI-Projektes 'Dauerhafter Holzoberflächenschutz auf der Basis von Nanocomposites' durchgeführt wurden. Dieser wissenschaftliche Schlussbericht ist ein integraler Bestandteil der Berichterstattung an die KTI.

Gegenstand des vorliegenden Projektes ist die Untersuchung und Optimierung eines Beschichtungskonzeptes für die industrielle Beschichtung von Fassadentäfer aus Holz, basierend auf der sich ergänzenden Wirkung der drei Teilkomponenten Hydrophobierung, Grundierung und Deckschicht. Insbesondere bezüglich Hydrophobierung wurden dabei auch neuartige nanotechnologische Ansätze verfolgt.

'Nanotechnologie' ist ein hochaktuelles Schlagwort, welches zunehmend auch im Bereich des Holzschutzes und der Holzbeschichtungen auftaucht. Tatsächlich sind aus Laborversuchen mit nanotechnologischen Beschichtungskomponenten ganz erstaunliche Ergebnisse bekannt. Die entsprechenden Produkte sind aber meist relativ neu und Praxisanwendungen dementsprechend rar. Deshalb fehlen zur Zeit noch weitgehend verlässliche Informationen zur Wirksamkeit und Dauerhaftigkeit solcher Behandlungen in der Praxis. Somit ist noch unklar, welche Leistungsverbesserungen durch 'nanotechnologische Beschichtungen' realistischerweise zu erwarten sind. Das vorliegende Projekt will insbesondere dazu einen Beitrag leisten.

Das Untersuchungsprogramm war sowohl im Umfang als auch in seiner Breite sehr ambitioniert. Im Gegensatz zu vielen aktuellen Grundlagenuntersuchungen war dieses Projekt primär anwendungsorientiert ausgerichtet, indem das Schwergewicht der Arbeiten auf praxisrelevanten Untersuchungen und der Optimierung der Leistungsmerkmale von industriell beschichtetem Probenmaterial gelegt wurde. Die Auswahl der Beschichtungskomponenten blieb dabei auf die von den beteiligten Wirtschaftspartnern verwendeten Produkte beschränkt. Der von den Wirtschaftspartnern gewünschte Einbezug von möglichst vielen Beschichtungsvarianten führte zu einem grossen experimentellen Aufwand, welcher schlussendlich etwas zu Lasten der ebenfalls notwendigen Grundlagenuntersuchungen ging. Trotzdem wurden auch verschiedene grundlegende Aspekte für das bessere Verständnis des Funktionsprinzips der eingesetzten Beschichtungskomponenten untersucht. Insgesamt konnte somit trotz der beschränkten Ressourcen und der kurzen Projektlaufzeit eine breite Palette sowohl von grundlagenspezifischen als auch von anwendungsorientierten Fragestellungen angegangen werden.

Der Hauptteil des Berichtes ist in fünf Kapitel gegliedert. In Kapitel 1 werden die Fragestellungen und Ziele des Projektes näher erläutert. Kapitel 2 gibt einen Überblick über das Untersuchungsprogramm und die angewendeten Methoden. Die Darstellung der Ergebnisse ist in zwei Kapitel aufgeteilt, wobei Kapitel 3 die Ergebnisse zu den Hauptfragestellungen themenspezifisch gemäss der Arbeitsgliederung des Projektes und Kapitel 4 ausgewählte Detailauswertungen zu zusätzlichen oder kombinatorischen Fragestellungen beinhaltet. Den Abschluss bildet Kapitel 5 mit generellen Schlussfolgerungen. Im Anhang sind ergänzende Informationen und Berichte zur Vervollständigung der Dokumentation des Projektes enthalten.

Als Folge der Vielfalt an Versuchvarianten und Kenngrössen ist der Bericht keine einfache Lektüre. Besonderes Gewicht wurde deshalb auf die graphische Darstellung der Ergebnisse gelegt. Wo es sinnvoll und möglich war, wurden ergänzend auch statistische Methoden zur Quantifizierung von Effekten eingesetzt. Für eine vertiefte Auseinandersetzung mit den Ergebnissen ist ein Farbausdruck des Berichtes notwendig, da in vielen Darstellungen intensiv Gebrauch von Farbunterschieden gemacht wird.

Die erfolgreiche Durchführung des Projektes war nur möglich durch die engagierte Mitarbeit und Hilfestellung einer Vielzahl von Personen. Namentlich zu erwähnen sind:

- KTI/CTI Förderagentur für Innovation: Paul E. Gygax
- Kälin & Co. AG, Hobelwerk, Winterthur: Robert Ammann, Hans-Ulrich Kipfer
- NanoSys GmbH, fluids + consulting, Wolfhalden: Walter Koch
- Otto Weibel AG, Lacke und Farben für Holz, Urdorf: Otto Weibel, Hugh Laver
- Empa, Abt. Holz, Dübendorf: Martin Arnold, Nico Bordeanu, Anja Fischer, Daniel Heer, Tina Künniger, Klaus Richter, Walter Risi, Esther Strub, Kurt Weiss

Zusammenfassung

Gegenstand des vorliegenden Projektes ist die Entwicklung und Optimierung eines Beschichtungskonzeptes für die industrielle Beschichtung von Fassadentäfer aus Holz, basierend auf der sich ergänzenden Wirkung der drei Teilkomponenten Hydrophobierung (Flüssigwasserschutz), Grundierung (Sperrschicht, Dampfdiffusionsschutz) und Deckschicht (UV-Schutz, Farbgebung). Besonderes Augenmerk lag dabei auf der möglichen Verbesserung des Feuchteschutzes durch eine vorgängige Hydrophobierung der Holzoberfläche mit nanoskaligen Siliziumverbindungen (Silane, Polysiloxane) und auf der Anwendung von neuartigen nanotechnologischen Ansätzen bei Holzbeschichtungen. Um dieses Beschichtungskonzept mit den erforderlichen anwendungstechnischen Eigenschaften verwirklichen und verbessern zu können, wurden umfangreiche wissenschaftliche Untersuchungen zum Verständnis der Systemkomponenten und ihrer Kompatibilität miteinander durchgeführt. Das Ziel der Entwicklungen ist eine deutliche Erhöhung der Witterungsbeständigkeit von wetterexponierten Holzoberflächen.

Problemstellung / Ziele

Das Projekt verfolgt die folgenden generellen Ziele:

- Untersuchung der grundsätzlichen Wirksamkeit und der Eigenschaften des Beschichtungssystems
- Quantifizierung des Beitrages der einzelnen Komponenten (v.a. Hydrophobierung und Grundierung) im Gesamtsystem
- Identifikation von vorteilhaften Beschichtungsaufbauten
- Optimierung und Feinabstimmung der Komponenten

Untersuchungsprogramm / Vorgehensweise

Die Untersuchungen beinhalten die Charakterisierung der Eigenschaften und der Leistungsfähigkeit von 101 Beschichtungskombinationen aus verschiedenen Hydrophobierungen, Grundierungen und Deckschichten. Sie erfolgten weitgehend an Probenmaterial aus industriell beschichtetem Fassadentäfer aus Fichte und Weisstanne (rund 3800 Einzelproben). Teilweise wurde zusätzlich auch Birken-sperrholz als Beispiel für einen Holzwerkstoff einbezogen. Neben einer eingehenden Beschichtungscharakterisierung wurden auch detaillierte Messungen zur Feuchteschutzwirkung und zur Kompatibilität der einzelnen Beschichtungskomponenten durchgeführt. Die gesamthafte Leistungsfähigkeit der Beschichtungssysteme wurde schliesslich in natürlichen und künstlichen Bewitterungstests beurteilt. Als Vergleichsbasis diente ein herkömmlicher Beschichtungsaufbau.

Ergebnisse

Moderne Holzbeschichtungen sind komplexe Systeme mit vielfältigen Wechselwirkungen zwischen den einzelnen Komponenten resp. Schichten. Die durchgeführten Projektarbeiten ermöglichen eine breit abgestützte Beurteilung der Bedeutung der einzelnen Komponenten in einem Beschichtungssystem sowie der Leistungsfähigkeit spezifischer Beschichtungsaufbauten. Und nicht zuletzt ergeben sich auch viele Ansätze für weitere Optimierungen. Realistischerweise können mit diesem lediglich 2-jährigen Projekt aber nicht alle offenen Fragen bezüglich Funktionsweise und Wirksamkeit des eingesetzten Beschichtungskonzeptes abschliessend beantwortet werden.

Die wichtigsten Erkenntnisse sind:

- Dem Projektziel entsprechend konnte im Projektverlauf der Feuchteschutz der Beschichtungen erheblich verbessert werden. Die optimierten Beschichtungssysteme zeigen eine hervorragende Feuchteschutzwirkung und damit verbunden eine hohe Witterungsbeständigkeit. Eine gute Leistungsfähigkeit der Beschichtungen ist aber nur bei einer gegenseitigen Ergänzung und Kompatibilität aller Teilkomponenten im Gesamtsystem gegeben. Eine dominierende Rolle spielen dabei die Grundierungen als eigentliche Sperr- und zugleich Verbindungsschicht zwischen Substrat und Deckschicht. Besonders gute Leistungsmerkmale (inkl. Witterungsbeständigkeit) zeigen die Beschichtungsvarianten basierend auf der wässrigen UV-Grundierung (Grundierung 2).

- Mit nanoskaligen Hydrophobierungsmitteln lassen sich auf Holzoberflächen verblüffende wasserabweisende Effekte erzielen (Abperlen von Wassertropfen). Die Tiefenwirkung der durch Sprühen, Tauchen oder Pinselauftrag applizierten Hydrophobierungen beschränkt sich jedoch auf ein paar wenige Zehntelmillimeter. Die Behandlung ist damit nur gegen Flüssigwasser wirksam und beeinflusst die Wasserdampfsorption (d.h. Schwinden und Quellen) kaum. Wegen der nur schwachen chemischen Anbindung an die Holzkomponenten ist die Witterungsbeständigkeit der Hydrophobierungen ohne zusätzlichen UV-Schutz teilweise gering. Zwei der untersuchten Hydrophobierungsmittel (NP 118FAG und 310523) sind aber auch nach 12 Monaten Freibewitterung noch wirksam. Die Wirksamkeit und Dauerhaftigkeit der Hydrophobierungen könnte vermutlich durch eine grössere Eindring- resp. Wirtktiefe sowie eine stärkere chemische Anbindung ans Holz noch deutlich verbessert werden.
- Hydrophobierte Holzoberflächen sind grundsätzlich bei geeigneter Beschichtungsformulierung und Applikationstechnik beschichtbar. Die Beschichtungshaftung ist dabei zwar meist vermindert, bei den Bewitterungsversuchen wurden aber nicht vermehrt 'spontane' Adhäsionsprobleme beobachtet. Somit scheint der gezielte Einbau von 'Feuchtesperren' im Beschichtungssystem möglich, wobei derzeit noch unklar ist, wo (d.h. in welcher Schicht) damit die grösste Wirkung erzielt werden kann. Die verminderte Beschichtungshaftung führt allerdings zu einer relativ schlechten Leistungseinstufung gemäss EN 927-2.
- Der Einfluss einer vorgängigen Hydrophobierung der Holzoberfläche auf die Feuchteschutzwirkung im Verbund mit einem kompletten Beschichtungssystem ist nicht zuletzt wegen der Beschränkung auf den Flüssigwasserschutz insgesamt gering und kann aufgrund von speziellen Wechselwirkungen teilweise sogar negativ ausfallen. Aus den bisherigen Versuchen ist kein relevanter, positiver Einfluss auf die Witterungsbeständigkeit der darauf applizierten Beschichtungssysteme zu erkennen. Allenfalls 'neutralisieren' die darüber liegenden, bereits sehr feuchtigkeitsdichten Beschichtungen den zusätzlichen Flüssigwasserschutz der Hydrophobierungen, und die potentiell positiven Effekte werden durch eine Verschlechterung der Beschichtungshaftung sowie durch ungünstige Wechselwirkungen zwischen den Systemkomponenten weitgehend aufgehoben. Möglicherweise kommt die Schutzwirkung gegen Flüssigwasser aber auch erst bei stärkerer Verwitterung und grösseren Beschichtungsschäden (Risse) zum Tragen, was einen positiven Effekt auf die langfristige Dauerhaftigkeit hätte. Dies werden die fortgesetzten Bewitterungsversuche und allenfalls Erfahrungen aus der Praxis zeigen. Als zusätzliche oder alternative Massnahme ist eine Hydrophobierung der Deckschicht zu erwägen.
- Insgesamt hat sich bei den Untersuchungen gezeigt, dass die Wirksamkeit der getesteten nanotechnologischen Ansätze bei Holzbeschichtungen systemabhängig unterschiedlich gross ist. Sie können aber einen Beitrag zur gezielten Eigenschaftsverbesserung leisten und sind somit eine wertvolle Ergänzung zu konventionellen Beschichtungen. Für die erfolgreiche Umsetzung von theoretischen Grundlagen sind weiterhin intensive Forschungs- und Entwicklungsarbeiten nötig. Zu beachten und eingehender zu untersuchen sind insbesondere die vielfältigen und komplexen Wechselwirkungen zwischen den einzelnen Komponenten.

1 Einleitung

1.1 Ausgangslage

Ein wirksamer Oberflächenschutz ist ein ganz entscheidender Faktor für die Verwendung von Holz im Aussenbereich. Von diesem hängt ab, inwieweit die vielfältigen Ansprüche der Architekten und Bauherren bezüglich Ästhetik und Dauerhaftigkeit erfüllt werden können. Obwohl Holz seit Jahrhunderten erfolgreich als Material im Aussenbereich eingesetzt wird, ist der Schutz der Oberfläche vor einer Schädigung durch Umwelteinflüsse noch immer nicht befriedigend gelöst. Verbesserungen erhofft man sich in jüngster Zeit vor allem durch eine industrielle Beschichtungsapplikation und neuartige Beschichtungen, in denen vermehrt auch nanotechnologische Komponenten zum Einsatz kommen.

Eine detailliertere Beschreibung der Ausgangslage des Projektes ist im Projektantrag enthalten (siehe Anhang A1).

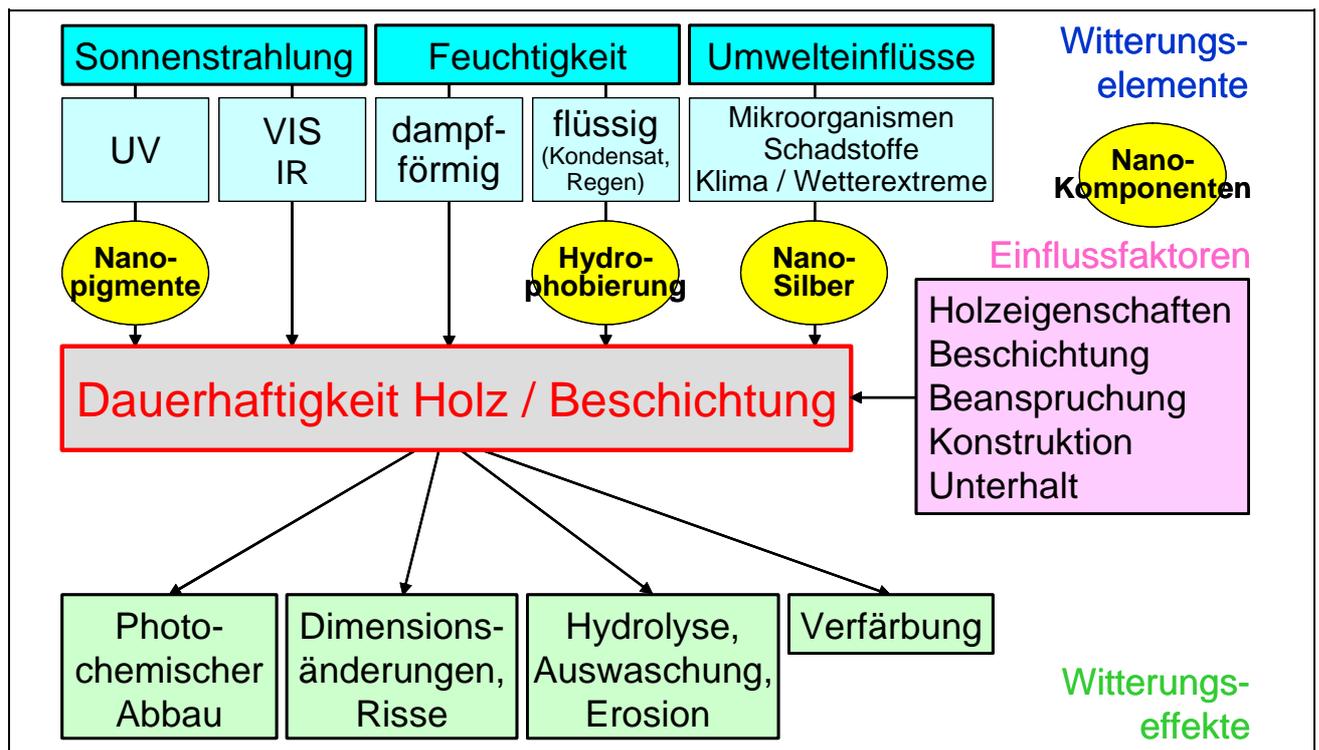
1.1.1 Oberflächenschutz und Nanotechnologie

Beim Oberflächenschutz von Holz sind die folgenden zwei Punkte zu beachten:

- Holz ist ein sehr anspruchvolles Trägermaterial (Substrat) für eine Beschichtung. Dessen spezifische Eigenschaften müssen immer für einen erfolgreichen Einsatz mitberücksichtigt werden.
- Freibewitterung führt zu einer äusserst komplexen und extremen Material-Beanspruchung. Das Ziel 'Witterungsbeständigkeit' ist daher nicht einfach zu erreichen.

In Bild 1 sind die verschiedenen Witterungselemente und deren Effekte schematisch dargestellt. Für einen wirksamen und dauerhaften Oberflächenschutz muss für alle Witterungselemente ein entsprechender Schutzmechanismus vorhanden sein. Bezüglich UV-Strahlung, Schutz vor Flüssigwasser und Befall von Mikroorganismen gibt es bereits auch erste 'nanotechnologische' Ansätze. Nanoskalige Komponenten werden dabei eingesetzt, um Beschichtungen zu 'funktionalisieren', d.h. ihnen gezielt neue oder zusätzliche Eigenschaften zu verleihen, respektive bestehende Eigenschaften zu verbessern. Eigentliche 'Nano'-Schichten werden bei der Beschichtung von Holz aufgrund dessen Oberflächenstruktur keine erwartet.

Bild 1: Witterungsbeanspruchung von Holz und Beschichtung



Erfolgreiche Anwendungen von funktionalen Beschichtungen sind bereits bei Textilien und auf metallischen, keramischen oder mineralischen Untergründen bekannt. Eine direkte Umsetzung dieser Erfahrungen auf die Beschichtung von Holz ist aber aufgrund des wesentlich komplexeren Chemismus einer Holzoberfläche nicht ohne weiteres gegeben.

Im Bereich der Holzbeschichtungen stehen zur Zeit folgende Funktionalisierungen im Vordergrund:

- Feuchteschutz (Hydrophobierung, ABERLEFFEKT)
- 'anti-graffiti', 'self-cleaning'
- Haftvermittlung
- Lichtschutz (transparente Beschichtungen)
- biozide Wirkung (Nano-Silber)
- Abrieb-/Kratzfestigkeit (Innenanwendung)
- Feuerwiderstand

Das vorliegende Projekt beschäftigt sich primär mit dem verbesserten Feuchteschutz des Holzes durch eine vorgängige oberflächliche Hydrophobierung mit Siliziumverbindungen (Silane, Polysiloxane).

1.1.2 Holzmodifikation mit Siliziumverbindungen

Das Feld der Anwendungen und Technologien im Bereich der Oberflächenmodifikation von Materialien mit Siliziumverbindungen ist äusserst breit. Dies gilt auch für den Bereich der Holzmodifikation (Mai 2004a und 2004b). Das Umfeld und der bisherige Stand der Technik zum Thema Hydrophobierung von Holz und Holzbeschichtungen wurde schon ausführlich unter Punkt 3 im Projektantrag beschrieben (siehe Anhang A1).

Wie bereits im Vorwort erwähnt, sind aus Laborversuchen verschiedene positive Ergebnisse der Holzmodifikation mit Siliziumverbindungen basierend auf einer Vielzahl von chemischen Verbindungen und Prozessen bekannt. Allerdings sind viele dieser Versuche wenig praxisgerecht, da sie oft mit gut zu 'imprägnierenden' Holzarten wie Kiefer-Splint und Buche, mit kleinformatischen Proben und nach vorgängiger Extraktion der Holzinhaltstoffe durchgeführt wurden. Insbesondere für die wenig permeable Fichte liegen kaum Erfahrungen vor. Ebenfalls fehlen auch weitgehend Umsetzungsergebnisse und Langzeiterfahrungen zur Wirksamkeit und Dauerhaftigkeit solcher Behandlungen aus Anwendungen in der Praxis.

Insgesamt hat sich bisher gezeigt, dass die für eine wirksame und dauerhafte Modifikation notwendige Einbringung und Reaktion der Modifizierungsmittel (z.B. Hydrophobierungen) auch in die Zellwände nur mit relativ aufwendigen Verfahren erreichbar ist. Die Mechanismen und das Ausmass der chemischen Anbindung an die Holzsubstanz sind bisher noch nicht befriedigend geklärt.

Die im vorliegenden Projekt als Hydrophobierungsmittel eingesetzten Produkte gehören zur Gruppe der Silane resp. Polysiloxane. Erfahrungen mit vergleichbaren Produkten wurden im Rahmen des europäischen Projektes 'HYDROPHOB' gesammelt, wobei dort primär der 'klassische' Holzschutz im Vordergrund steht (De Vetter 2006, Sèbe 2004, Tingaut 2005, Tingaut 2006). Besonders aktiv in diesem Gebiet forscht das Institut für Holzbiologie und Holztechnologie der Universität Göttingen (Donath 2004 und 2006). Zwischenzeitlich liegen auch erste Ergebnisse zum Witterungsverhalten von Silan-behandeltem Holz vor (Tshabalala 2003, Schulte 2004).

1.1.3 Terminologie

Falls vorhanden, werden bevorzugt die in den europäischen Normen EN 927-1 und EN 971-1 festgelegten Begriffe verwendet. In Tabelle 1 sind einige besonders häufig verwendete Begriffe definiert.

Da die eingesetzten Hydrophobierungsmittel im makroskopischen Sinne nicht film- resp. schichtbildend sind, werden sie im Projekt nicht als 'Beschichtung' bezeichnet, sondern als Vorbehandlung der Holzoberfläche betrachtet. Sie sind aber ein integraler Bestandteil des Beschichtungssystems.

Tabelle 1: Wichtige Begriffe

Begriff	Synonyme	Bedeutung / Definition
Substrat	Untergrund	Trägermaterial für die Beschichtung (= Holz)
Fassadentäfer	Täferbrett, Schalungsbrett	gehobeltes und evtl. geschliffenes (profiliertes) Massivholz-Brett für eine Fassadenschalung
Hydrophobierung	Nanoprägnierung	wasserabweisende Behandlung einer Oberfläche
Beschichtungsstoff	Anstrichstoff, Lack	Oberbegriff für filmbildende Produkte in flüssiger, pasten- oder pulverförmiger Form
Beschichtung	Beschichtungssystem	Gesamtheit der 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

1.2 Beschichtungskonzept

Den Kern des Projektes bildet ein von den Wirtschaftspartnern entwickeltes Beschichtungskonzept, basierend auf der sich ergänzenden Wirkung von Hydrophobierung (Flüssigwasserschutz), Grundierung (Sperrschicht, Dampfdiffusionsschutz) und Deckschicht (UV-Schutz, Farbgebung). Das Aufbauprinzip der Beschichtung und die Funktion der Einzelschichten sind in Tabelle 2 schematisch dargestellt.

Der Aufbau mit Grundierung und Deckschicht entspricht dabei dem heutigen Stand der Technik. Neu hingegen sind der 'Einbau' einer hydrophobierten Holzoberfläche und deren nachfolgende Beschichtung. Die Idee einer durch eine Deckschicht mechanisch geschützten Hydrophobierungsschicht wurde dabei dem Gore-Tex-Prinzip im Textilbereich entliehen. Die Herausforderung an diesem Beschichtungskonzept liegt darin, dass eine hydrophobierte Holzoberfläche zum einen schwierig zu beschichten ist und dass zum anderen die nachfolgenden Schichten eine genügende Haftung erreichen. Ebenfalls relativ neu für Anwendungen im Aussenbereich ist die Verwendung von UV-härtenden Grundierungen. Im weiteren sollten auch die Möglichkeiten von neuartigen nanotechnologischen Ansätzen bei Holzbeschichtungen einbezogen werden.

Tabelle 2: Beschichtungsaufbau und Funktion Schichten

Nr.	Schicht	Kürzel	Funktion
4	Deckschicht	DS	UV-Schutz, Ästhetik/Farbgebung, (Feuchteschutz)
3	Grundierung	GR	Feuchteschutz (Wasser flüssig + dampfförmig), Sperrschicht gegen Migration von Holzinhaltstoffen, Träger für Decklack
2	Hydrophobierung	NP	Feuchteschutz (Wasser flüssig), v.a. auch bei Rissen und Beschichtungsschäden
1	Substrat	HA	Trägermaterial (Holzart)

1.3 Fragestellungen / Ziele

Hauptaufgabe des Projektes ist die Untersuchung und Optimierung der Eigenschaften des in Kapitel 1.2 beschriebenen Beschichtungskonzeptes, insbesondere dessen nanoskaliger Komponenten.

Das Projekt verfolgt die folgenden generellen Ziele:

- Untersuchung der grundsätzlichen Wirksamkeit und der Eigenschaften des Beschichtungssystems
- Quantifizierung des Beitrages der einzelnen Komponenten (v.a. Hydrophobierung und Grundierung) zum Gesamtsystem
- Identifikation von vorteilhaften Beschichtungsaufbauten
- Optimierung und Feinabstimmung der Komponenten

Die spezifischen Ziele des Projektes sind in Kapitel 2 des Projektantrages aufgeführt (siehe Anhang A1). Die konkreten Fragestellungen in den einzelnen Arbeitspaketen sind nachfolgend in Kapitel 2 erläutert.

1.4 Projektorganisation

Das eingereichte Projektgesuch (siehe Anhang A1) wurde im April 2004 durch die Förderagentur für Innovation (KTI/CTI) im Bundesamt für Berufsbildung und Technologie (BBT) bewilligt. Das Projekt wurde im Rahmen des Netzwerkes Holz durchgeführt und hatte eine Projektlaufzeit von 2 Jahren (01.05.2004 – 30.04.2006).

Die Finanzierung des Projektes erfolgte je zur Hälfte durch die KTI und die Projektpartner (inkl. Eigenleistungen). Der zeitliche Aufwand der Empa betrug rund 3 Personenjahre, wobei 2 Personenjahre durch die externe Finanzierung durch die KTI und die Wirtschaftspartner abgegolten wurde. 1 Personenjahr wurde als Eigenleistung der Empa eingebracht.

Das Projektkonsortium bestand aus 4 Partnern, deren Funktion und Aufgaben in Tabelle 3 zusammengestellt sind.

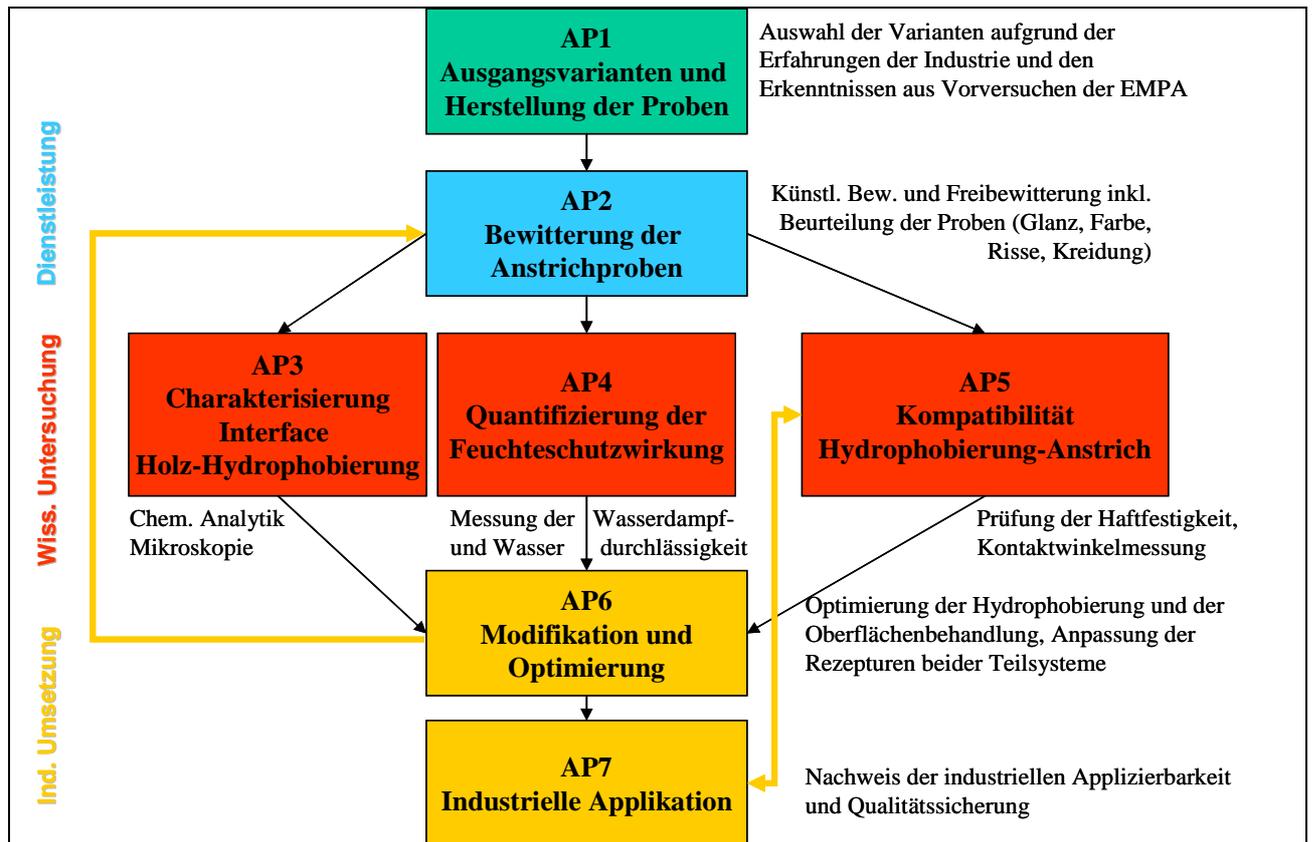
Tabelle 3: Aufgaben Projektpartner

Partner	Funktion	Aufgaben
Kälin & Co. AG, Hobelwerk, Winterthur	- Gesamtprojektleitung - Haupt-Wirtschaftspartner	- Bereitstellung Rohmaterial (Holz) - Industrielle Beschichtungsapplikation
NanoSys GmbH, fluids + consulting, Wolfhalden	- Wirtschaftspartner	- Entwicklung/Auswahl und Bereitstellung Hydrophobierungsmittel - Planung und Überwachung Hydrophobierungen
Otto Weibel AG, Lacke und Farben für Holz, Urdorf	- Wirtschaftspartner	- Entwicklung und Bereitstellung Beschichtungsstoffe - Laborversuche Beschichtungsapplikation - Begleitung industrielle Beschichtungsapplikation
Empa, Abt. Holz, Dübendorf	- Wissenschaftliche Projektleitung - Hauptgesuchsteller	- Planung und Durchführung der wissenschaftlichen Untersuchungen - Wissenschaftliche und finanzielle Berichterstattung

2 Untersuchungsprogramm

Die Projektarbeiten wurden in 7 thematischen Arbeitspaketen (AP) durchgeführt (Bild 2). Das Kernstück der wissenschaftlichen Untersuchungen bildeten die AP 3 bis 5 mit den Themen 'Charakterisierung des Beschichtungssystems', 'Quantifizierung der Feuchteschutzwirkung' und 'Kompatibilität der Einzelschichten'. Als Klammern im Entwicklungsprozess dienten dabei das AP 2 mit mehreren zeitlich gestaffelten Bewitterungsversuchen und die AP 6 und 7 mit der Modifikation und der Optimierung der Beschichtungs-komponenten sowie der industriellen Applikation.

Bild 2: Struktur der thematischen Arbeitspakete



Die Fragestellungen und die angewendeten Methoden in den Arbeitspaketen sind in Kurzform in Tabelle 4 dargestellt. Eine ausführliche Beschreibung des Forschungs- und Projektplanes ist in Kapitel 5 des Projektantrages enthalten (siehe Anhang A1).

Die durchgeführten Untersuchungen zeichnen sich durch eine grosse Zahl von Versuchsvarianten und eine breite Palette von Untersuchungsmethoden aus (siehe Kapitel 2.2 und 2.3). Die von den Wirtschaftspartnern gewünschte Einbezug von vielen Versuchsvarianten führte zu einem sehr grossen experimentellen Aufwand, welcher schlussendlich die Ressourcen für die ebenfalls notwendigen Detail- und Grundlagenuntersuchungen einschränkte.

Bereits vor dem offiziellen Beginn des Projektes wurde ein orientierender Vorversuch (VV) gestartet, um erste Erfahrungen mit dem Beschichtungskonzept zu sammeln und die Untersuchungsmethodik zu entwickeln. Die Hauptversuche (HV) wurden in 3 Serien durchgeführt, mit einem Optimierungsschritt nach den ersten beiden Serien.

Tabelle 4: Fragestellungen und Methoden in den Arbeitspaketen

AP	Fragestellungen / Inhalt	Methoden
1	Spezifikation Versuchsvarianten / Probenherstellung	
	Versuchsplanung	Ideen Industriepartner, Systematik
	Probenherstellung mit Dokumentation Beschichtungsaufbau	Angaben Industriepartner, Erkennung Applikationsprobleme, Schichtdickenmessung, Farbmessung
2	Bewitterungstests	
	Verhalten / Dauerhaftigkeit unter natürlicher und künstlicher Bewitterung	EN 927-3 und prEN 927-6 (visuelle Beurteilung, Farbmessung)
3	Charakterisierung Beschichtungssystem (insbesondere Interface Holz-Hydrophobierung)	
	Anbindungsmechanismen, Wirktiefe und -dauer Hydrophobierung	chemische Analytik, Mikroskopie, Kontaktwinkel mit H ₂ O
	Untersuchung Problemzonen (Äste, Reaktionsholz)	empirische Beobachtungen
4	Quantifizierung der Feuchteschutzwirkung	
	Feuchteschutzwirkung Einzelschichten und Gesamtssystem (Ausgangszustand / bewittert)	Feuchteschutzprüfungen EN 927-4/5, periodische Wägungen Freibewitterung, Kontaktwinkel mit H ₂ O
5	Kompatibilität Hydrophobierung-Anstrich	
	Kompatibilität Schichten	Kontaktwinkel Grundierung auf Hydro- phobierung + Decklack auf Grundierung
	Anstrichhaftung (Ausgangszustand / bewittert, trocken / nass)	Gitterschnitt und mechanische Adhäsionstests
6	Modifikation und Optimierung	
	Optimierung Beschichtungskomponenten	Umsetzung Ergebnisse
7	Industrielle Applikation	
	Nachweis industrieller Einsatz / Qualitätssicherung	Testproduktionen (Probenmaterial)

2.1 Probenmaterial

Der Grossteil der Versuche wurde mit Probenmaterial durchgeführt, welches auf den Anlagen der Firma Kälin unter industriellen Bedingungen produziert wurde. Die Proben für den Vorversuch wurden von der Firma Weibel 'prüfbereit' an die Empa geliefert. Für einzelne Laborversuche und chemische Analysen wurden durch die Empa noch zusätzliche Proben hergestellt.

In die Probenherstellung der Hauptversuche waren alle Projektpartner gemäss ihrer spezifischen Kompetenzen eingebunden (siehe Tabelle 3). Ausgehend von den vorgesehenen Versuchsvarianten erarbeitete die Empa jeweils einen detaillierten Produktionsplan mit den benötigten Probenmengen inkl. Beschriftungskonzept (siehe Kapitel 2.2). Die Firma Kälin stellte das benötigte Rohmaterial in der Form von profiliertem oder vollkantigem Rohtäfer bereit. Je nach geplantem Untersuchungsumfang wurden pro Versuchsvariante 3-10 Täferbretter benötigt. Die rohen Täferbretter wurden danach gemäss Vorgaben und mit Produkten der Firma NanoSys hydrophobiert (Sprühen, Flut-Walz-Bürst-Verfahren FWB, Pinsel) und mit Beschichtungsstoffen der Firma Kälin resp. Weibel auf den Beschichtungsanlagen der Firma Kälin beschichtet (Flut-Walz-Bürst-Verfahren, Spritzen). Die beschichteten Täferbretter wurden danach an die Empa geliefert (Bild 3). Von allen Hydrophobierungsmitteln und Beschichtungsstoffen standen zusätzlich auch Flüssigmuster zur Verfügung. Aus einem separaten Zusatzversuch der Firma Nanosys wurde auch eine geringe Anzahl von mit Hydrophobierungsmitteln druckimprägnierten Proben untersucht.

Wie aus Tabelle 5 hervorgeht, wurde für das umfangreiche Untersuchungsprogramm eine sehr grosse Probenmenge verarbeitet. Insgesamt wurden über 3800 Einzelproben vorbereitet, an denen z.T. mehrere Messungen durchgeführt wurden.

Bild 3: Stapel von beschichteten Täferbrettern. Links: profilierte Bretter aus Versuchserie 3, rechts: vollkantige Bretter aus Versuchserie 2



Tabelle 5: Umfang des Probenmaterials

		Vorversuch	Hauptversuch1	Hauptversuch2	Hauptversuch3	Total
Varianten						
Beschichtungen	[Anzahl]	8	40	17	36	101
Besch.+Holzart	[Anzahl]	8	80	36	72	196
Probenmaterial						
Laufmeter	[m]	27	750	500	900	2177
Fläche	[m ²]	2.6	104.8	73.5	126.0	306.9
Volumen	[m ³]	0.04	1.89	1.53	2.39	5.85
Anzahl Einzelproben¹⁾		[Anzahl]				
AP2 Bewitterung	Freibewitt. (inkl. Referenzen)	32	336	120	144	632
	QUV	32	144	84	216	476
AP3 Interface ²⁾	chem. Analytik / Eindringung		45	24		150
AP4 Feuchteschutz	Ausgangszustand	62	515	324	432	1333
	bewittert (QUV, Freibewitt.)		72	30		102
AP5 Kompatibilität	Adhäsion ³⁾	32	288	180	594	1094
	Kontaktwinkel ⁴⁾					15
Total		158	1400	762	1386	3802
Anmerkungen:						
¹⁾ in der Regel 3 Wiederholungsproben pro Versuchsvariante						
²⁾ Probenzahl nicht detailliert bestimmt						
³⁾ ohne bewitterte Proben aus AP2						
⁴⁾ nur zusätzliche Proben (ohne Proben aus AP2)						

Als **Substrat** wurden primär die beiden wichtigsten einheimischen Bauhölzer Fichte (*Picea abies*) und Weisstanne (Tanne, *Abies alba*) verwendet. Beim Hauptversuch 2 wurde zusätzlich teilweise auch Birkenperrholz als Beispiel für einen Holzwerkstoff einbezogen (Tabelle 6).

Fichte und Tanne wurden gezielt als getrennte Sortimente verwendet, um allfällige verwendungstechnische Unterschiede zwischen den beiden Holzarten zu erfassen. Weisstanne unterscheidet sich von der Fichte durch fehlende Harzgallen und eine in der Regel grössere Permeabilität. Entsprechend wurden deshalb die meisten Versuche jeweils parallel mit beiden Holzarten durchgeführt. Im Vorversuch wurde nur Fichte eingesetzt.

Tabelle 6: Verwendete Substrate (Holzarten) und deren Abmessungen

Beschreibung	Holzart	Fichte (Picea abies)	Weisstanne (Abies alba)	Birke (Betula spp.)
	Kürzel	FI	TA	BiSp
	Produktart	Massivholz	Massivholz	Sperrholz, 11-lagig
	Querschnitt	profiliert	vollkantig	profiliert
Länge [mm]	Vorversuch	-	-	-
	Hauptversuch 1	2000	1800	-
	Hauptversuch 2	2500	2500	1800
	Hauptversuch 3	2000	2000	-
Breite [mm]	Vorversuch	-	-	-
	Hauptversuch 1	145	135	-
	Hauptversuch 2	149	143	150
	Hauptversuch 3	142	132	-
Dicke [mm]	Vorversuch	15	-	-
	Hauptversuch 1	18-20	18-20	-
	Hauptversuch 2	22	22	15
	Hauptversuch 3	19	19	-

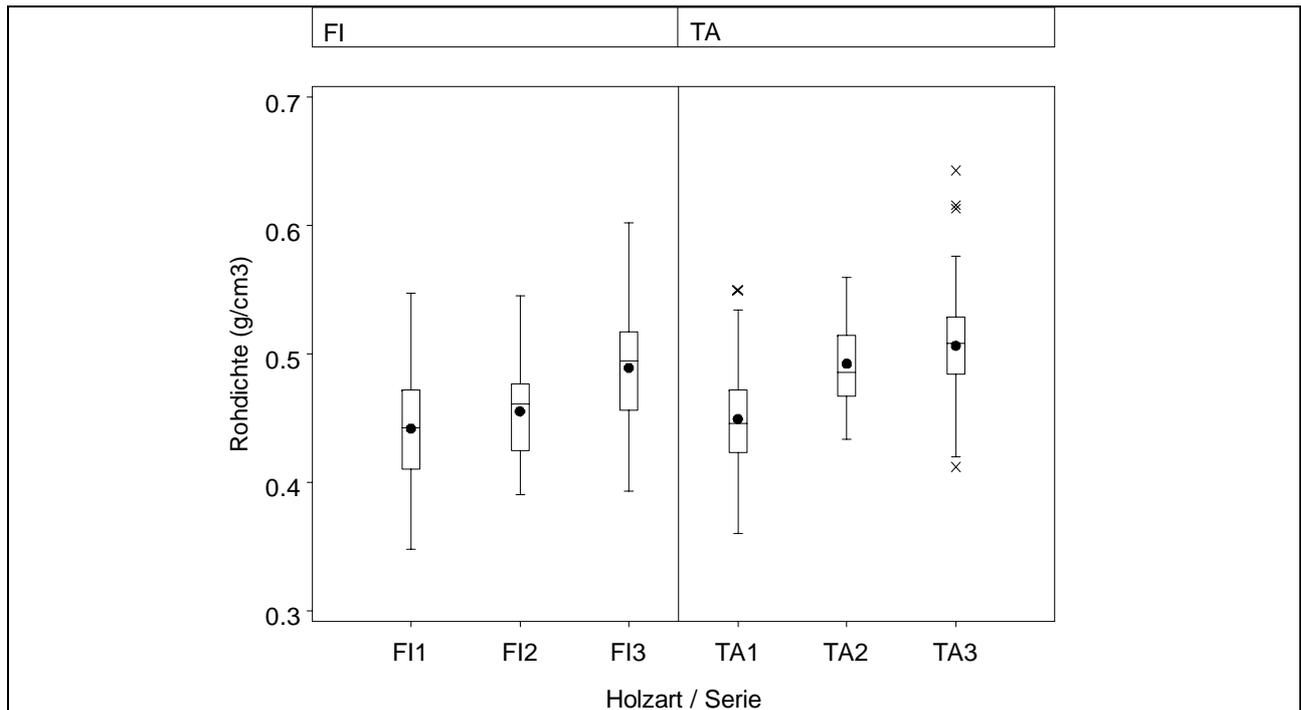
Die Holzqualität der verwendeten Täferbretter entsprach der üblichen Sortierung der Firma Kälin resp. den Sortierkriterien für Hobelwaren des Verbandes Schweizerischer Hobelwerke (VSH). Die Täferbretter wiesen eine gewisse Astigkeit auf (Bild 4, links). Aufgrund der Einschnittechnik des Rundholzes ergaben sich unterschiedliche, jedoch praxisübliche Jahrringbilder mit überwiegend liegenden bis 'halbrift' stehenden Jahrringen (Bild 4, rechts).

Bild 4: Beispiele von Astbild (links) und Jahrringstellung (rechts) bei den verwendeten Täferbrettern



Bei der Beurteilung der Holzqualität ist auch eine Überprüfung der Rohdichte als wichtige Kenngrösse des Holzes sinnvoll, da sie viele Verwendungseigenschaften resp. Versuchsergebnisse beeinflusst. Für Vergleiche sollten die verschiedenen Probenkollektive idealerweise eine ähnliche Rohdichte aufweisen. Das für die Versuche verwendete Fichten- und Tannenholz hat recht homogene Rohdichten, welche mehrheitlich im üblichen Bereich zwischen 0.4 und 0.5 g/cm³ (bei 20°C/65% r.F.) liegen (Bild 5). Zwischen Fichte und Tanne sind keine Unterschiede ersichtlich, hingegen zeigt sich eine leichte Erhöhung der Rohdichte im Verlauf der Versuchsserien.

Bild 5: Rohdichte der Täferbretter in den 3 Serien der Hauptversuche



Als **Hydrophobierungsmittel** wurden verschiedene 'Nanoperl'-Produkte (NP) des Wirtschaftspartners NanoSys eingesetzt (Tabelle 7). Die Art der Produkte ist in Tabelle 7 grob charakterisiert. Weitere Angaben zur Zusammensetzung und zu den Wirkungsmodellen der Hydrophobierungsmittel stellte die Firma NanoSys den Projektpartnern für den projekt-internen Gebrauch zur Verfügung. Aus Gründen der Vertraulichkeit wurden diese aber bewusst nicht in den Bericht aufgenommen.

Tabelle 7: Hydrophobierungsmittel ('Nanoperl'-Produkte der Firma NanoSys)

Code	Bezeichnung	Beschreibung
1	118	aminofunktionelles Polydimethylsiloxan (PDMS), Si-Gehalt ca. 30%
2	119	H-funktionelles PDMS, Si-Gehalt ca. 38%
4	118F	aminofunktionelles Fluorsilan, oleophob, Si-Gehalt ca. 10%
5	118FAG	wie 118F, enthält zusätzlich nanoskaliges Silber und einen Tanninblocker auf Zirkonbasis
6	310523	H- und aminofunktionelles PDMS-Gemisch (118 + 119), Si-Gehalt ca. 20%, enthält zusätzlich nanoskaliges Silber

Die in den Hauptversuchen verwendeten **Grundierungen** sind in Tabelle 8, die Beschichtungsstoffe für die **Deckschichten** in Tabelle 9 näher beschrieben. Weitere Angaben zu den Beschichtungsstoffen und der Beschichtungsapplikation sind in den entsprechenden Berichten der Wirtschaftspartner enthalten (siehe Anhang A2).

Tabelle 8: Grundierungen (nur Hauptversuche)

Code	Bezeichnung	Beschreibung	Produkt (Hersteller)
1	100% UV	transparent, UV härtend, Festkörperg. >95%	Testprodukt (Weibel)
2	wässrig UV	transparent, UV härtend, FK ca. 45%	Testprodukt (Weibel)
3	UV-oxidativ "dual-cure"	transparent, UV+oxidativ härtend, FK >90%	Testprodukt (Weibel)
4	Alkyd (oxid. Härtung)	pigmentiert, Lösemittelsystem, FK ca. 50%	Samicolor (Kälin, Weibel)
5	Nanocoat	pigmentiert, 2-K Beschichtung, FK ca. 35%	Testprodukt (Weibel)

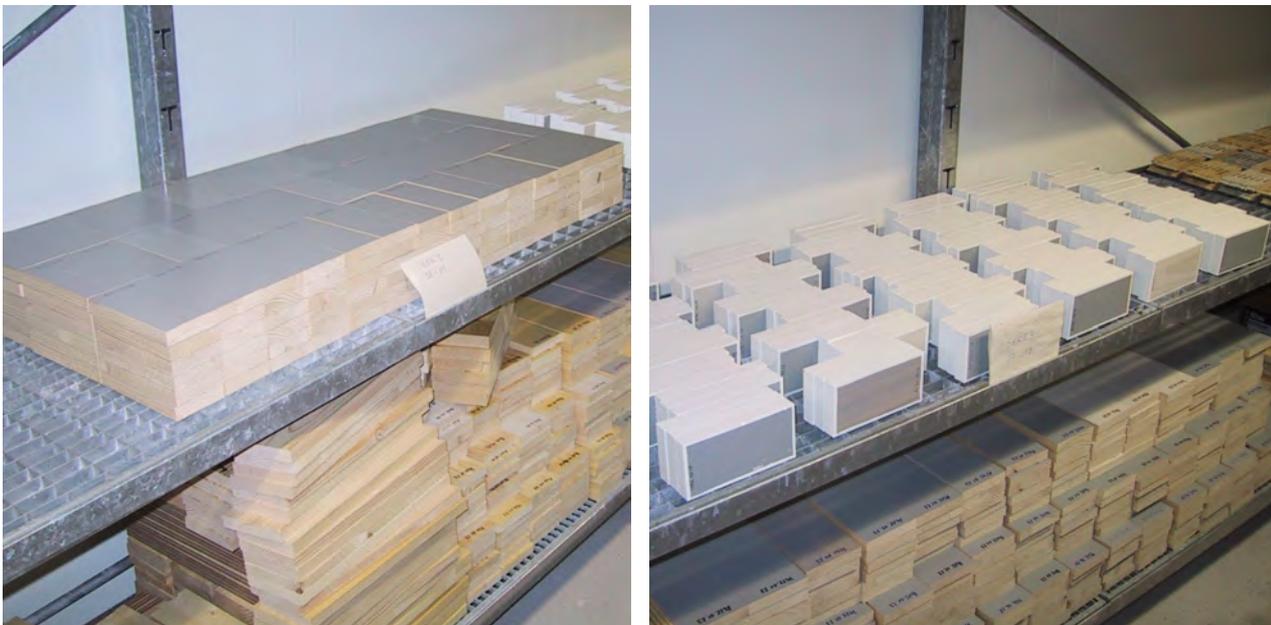
Tabelle 9: Deckschichten

Code	Bezeichnung	Beschreibung	Produkt (Hersteller)
1, 2	Eterno weiss / grau	deckend pigmentiertes, wasserverdünnbares Acrylharz, Farbton weiss oder grau	Eterno 36 (Weibel)
3, 4	Eterno weiss / grau + Nanoperl 118F	wie Code 1+2, jedoch nachträglich mit Nanoperl 118F besprüht (Spraydose 'Nanoprofi')	
5	Eterno grau + Hydrophobierung + Ag	wie Code 1+2, jedoch modifiziert mit einer perfluorierten, brushtype Acrylatdispersion, enthält zusätzlich nanoskaliges Silber	Testprodukt (Weibel+NanoSys)
6	Nanocoat	deckend pigmentierte 2-K Beschichtung, ausgeprägt hydropob und oleophob	Testprodukt (Weibel)

Aus den beschichteten Täferbrettern wurden die für die Versuche benötigten plattenförmigen Proben (vollkantig) in 2 verschiedenen Standardabmessungen von 360x100 mm² resp. 150x74 mm² (Länge x Breite) geschnitten (Bild 6, links). Für jeden Versuch wurden jeweils 3 Wiederholungsproben bereitgestellt, wobei diese aus verschiedenen Brettern geschnitten wurden, um die inhärente Streuung der Holzqualität einzubeziehen. Für die verschiedenen Prüfungen wurden Folgeproben aus den gleichen Brettern entnommen.

Um bei den relativ kleinformatigen Proben den Einfluss der Schnittkanten auf die Versuchsergebnisse zu vermindern, wurden die Schmalseiten (Längs- und Stirnseiten) aller Proben mit einer weitgehend feuchteundurchlässigen 2K-PUR-Lackfarbe versiegelt (Bild 6, rechts). Für die Feuchteschutzprüfungen wurden zusätzlich auch die Proben-Rückseiten versiegelt, sodass nur durch die mit der Testbeschichtung versehene Vorderseite (Sichtseite) Feuchtigkeit in die Proben eindringen konnte.

Bild 6: Zugeschchnittene (links) und versiegelte Proben (rechts) für die Versuche



2.2 Versuchsvarianten / Versuchsserien

Insgesamt wurden 101 Beschichtungsvarianten getestet, welche sich durch den Einbezug von meist 2 Holzarten zu 196 Versuchsvarianten aufsummierten (Tabelle 10). Die hauptsächlich variierten Faktoren in den Versuchen sind Substrat (Holzart), Hydrophobierung, Grundierung und Deckschicht.

Tabelle 10: Probenvarianten

Serie	Holzart	Grundierung	Hydrophobierung					Deckschicht	Anzahl Varianten	
			ohne	118	119	118F	118FAG			310523
Vorversuch										
0	FI	Grundierung 936		X					Eterno (weiss)	8
		Imprägniergrund 958		X						
		(ohne)		X						
		Samicolor S-33		X						
		Samicolor S-22		X						
		Imprägniergrund Eterno	X							
		AC-UV-Grund stand.		X						
		AC-UV-Grund 960	X							
Hauptversuch										
1	FI / TA	ohne	X	X	X				ohne Eterno (weiss +grau)	80
		100% UV	X	X	(X)					
		wässrig UV	X	X	X					
		UV / oxydativ "dual-cure"	X	X	(X)					
		Alkyd (oxyd. Härt.)	X	X	X					
2	FI / TA	ohne	X			X		ohne Eterno (weiss +grau)	36	
		100% UV	(X)			X				
	BiSp	(X)			X					
	FI / TA	wässrig UV				X				
		UV / oxydativ "dual-cure"				X				
		Alkyd (oxyd. Härt.)				X				
3	FI / TA	ohne	X				X	X	ohne Eterno (g) + Eterno (g) mit H+Ag Nanocoat (g)	72
		100% UV ³⁾	X				X	X		
		wässrig UV	X				X	X		
		Alkyd ³⁾ (oxyd. Härt.)	X				X	X		
		Nanocoat	X				X	X		
Legende: ¹⁾ Holzart: - FI: Fichte (Picea abies) - TA: Weisstanne (Abies alba) ²⁾ einbezogene Varianten: - X: vollständiges Versuchsprogramm - (X): nur für ausgewählte Varianten / Versuche ³⁾ geänderte Formulierung									196	

Die Untersuchungen erfolgten im Rahmen von insgesamt 4 zeitlich gestaffelten Versuchsserien mit separater Probenherstellung (1 Vorversuch, 3 Hauptversuche). Im orientierenden Vorversuch wurden primär verschiedene Grundierungen getestet. Die Hauptversuche hingegen basieren auf einer systematischen Variation verschiedener Kombinationen von Hydrophobierungen und Grundierungen. Der Hauptversuch 2 war als Ergänzung des Hauptversuches 1 mit einem zusätzlichen Hydrophobierungsmittel konzipiert. Bei dieser Serie wurde daher auf Referenzproben ohne Hydrophobierung verzichtet und stattdessen die entsprechenden Proben aus dem Hauptversuch 1 als Referenzen verwendet. Aufgrund der Ergebnisse aus den vorhergehenden Versuchen wurde in einem Optimierungsschritt beim Hauptversuch 3 auf eine Grundierung (UV / oxydativ "dual-cure") ganz verzichtet, bei 2 Grundierungen die Formulierung geändert (100% UV, Alkyd (oxyd. Härt.)) und zwei neue Hydrophobierungsmittel eingesetzt. Zusätzlich wurde ein ganz neues Beschichtungssystem einbezogen (Nanocoat).

Für die Deckschicht wurde bei allen Versuchsserien der gleiche Beschichtungsstoff (Eterno 36) eingesetzt. Um den Einfluss der Oberflächentemperatur bei der natürlichen Bewitterung einzubeziehen, wurden teilweise 2 Farbtonvarianten (weiss und grau) verwendet. Im Hauptversuch 3 wurde als zusätzliche Variante die Standard-Deckschicht auch hydrophob/oleophob und mit nanoskaligen Silber ausgerüstet. Als dritte Deckschicht -Variante wurde zudem das 'Nanocoat'-System eingesetzt.

Die Kombination der lösemittelhaltigen Alkyd-Grundierung mit einer Eterno-Deckschicht entspricht der heutigen Standardbeschichtung der Firma Kälin für Täferbretter für Fassaden und wurde deshalb als Referenzbeschichtung ins Untersuchungsprogramm aufgenommen.

Um den Einfluss respektive den Beitrag der Einzelschichten im Gesamtsystem untersuchen und quantifizieren zu können, wurden die Versuche mit verschiedenen Beschichtungsaufbauten durchgeführt (Tabelle 11). Vereinfachend vorausgesetzt wird dabei eine additive Wirkung der Schichten. Der Fokus der Untersuchungen lag auf dem Effekt der Hydrophobierung. Deshalb wurden alle Kombinationen von Grundierung und Deckschicht systematisch jeweils mit und ohne vorgängige Hydrophobierung durchgeführt (nur bei Hauptversuch 1 und 3). Als Referenz einbezogen wurde auch unbehandeltes sowie nur hydrophobiertes Holz, um die Leistungsmerkmale von lediglich hydrophobierten Holzoberflächen zu erfassen. Die Brett-Rückseiten wurden mit Ausnahme der Deckschicht jeweils gleich behandelt wie die Sichtseiten, d.h. inklusive Hydrophobierung und Grundierung.

Tabelle 11: Varianten von Beschichtungsaufbauten zur Bestimmung des Einfluss der Einzelschichten

Hydrophobierung	Beschichtung			beobachteter Effekt
	ohne	nur Grundierung	Gesamtsystem	
ohne				Vergleichsbasis (ohne Hydrophobierung)
mit				Wirkung Hydrophobierung
beobachteter Effekt	Wirkung Hydrophobierung	Wirkung Grundierung	Gesamtwirkung (Differenz zu Variante nur GR = Wirkung DS)	

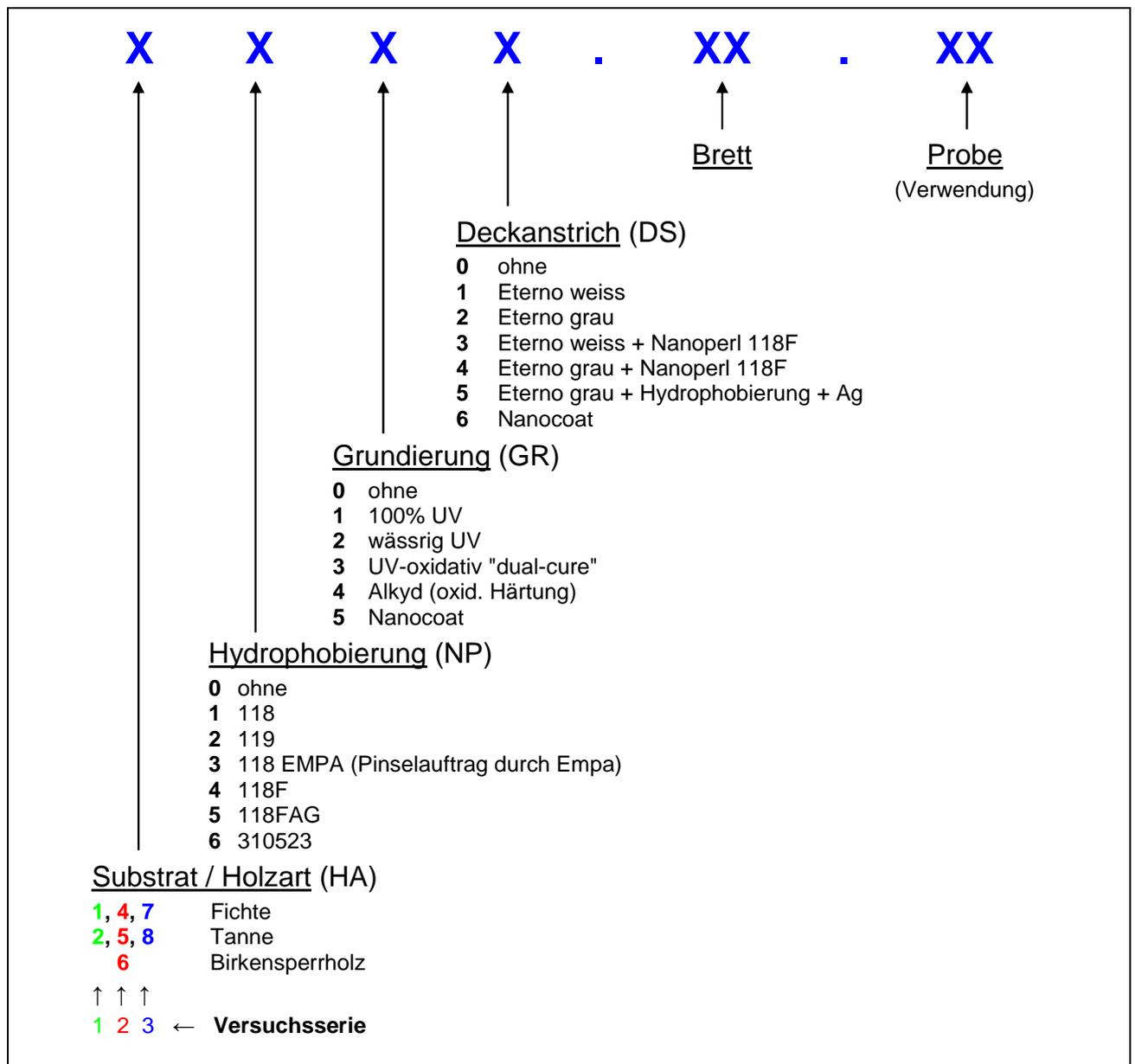
Alle Proben wurden mit einer Probenidentifikation versehen, aus welcher die genaue Versuchsvariante hervorgeht. Beim Vorversuch bestand diese Probenidentifikation aus einer von den Wirtschaftspartnern vergebenen Variantenummer (Tabelle 12) plus einer Bezeichnung der Wiederholungsprobe. Die Proben der Hauptversuche wurden beim Zuschnitt aus den beschichteten Täferbrettern mit einer detaillierten codierten Probenidentifikation gemäss Bild 7 versehen, aus welcher die Versuchsserie, die Holzart, die Beschichtungsvariante (resp. Beschichtungsaufbau), die Herkunft sowie die Probenverwendung hervorgehen.

Diese Probencodierung wird oft bei der Präsentation der Ergebnisse verwendet, um unhandliche Volltext-Bezeichnungen zu vermeiden. Als 'Lesehilfe' ist dazu ein separates Loseblatt mit dem Schema der Probencodierungen als Anhang A4 beigelegt.

Tabelle 12: Variantenbezeichnung Vorversuch

Variante	Hydrophobierung	Grundierung	Deckschicht
1	Nanoperl 118	Grundierung 936	Eterno 36
2.1	Nanoperl 118	Imprägniergrund 958	
3	Nanoperl 118	entfällt	
4	Nanoperl 118	Samicolor S-33	
5	Nanoperl 118	Samicolor S-22	
6	entfällt	Eterno Imprägniergrund	
7	Nanoperl 118	AC-UV-Grund standard	
10	entfällt	AC-UV-Grund 960	

Bild 7: Schema Probenbezeichnung Hauptversuche



Erfahrungsgemäss ergeben sich bei der Probenherstellung unter Industriebedingungen trotz sorgfältiger Planung gewisse Unzulänglichkeiten. Dementsprechende Bemerkungen zu den einzelnen Versuchsserien sind in Tabelle 13 zusammengestellt. Diese sind bei der Interpretation der Versuchsergebnisse zu berücksichtigen. Insbesondere die Vergleichbarkeit zwischen den einzelnen Versuchsserien ist dadurch eingeschränkt. Nähere Erläuterungen zu einigen Aspekten sind im Ergebnisteil enthalten.

Tabelle 13: Bemerkungen zum Probenmaterial in den verschiedenen Versuchsserien

Versuchsserie	Bemerkung
Vorversuch	- Beschichtungsvarianten nicht systematisch (fehlende Kontrollvarianten)
Hauptversuch 1	- Refusierscheinungen bei Beschichtung von Nanoperl 119 - irrtümliche Verwendung von Nanoperl 118 anstelle von 118F - z.T. unvollständige Grundierung auf Täferbrett-Rückseiten - z.T. ungenügende Holzqualität (Risse, grobastig, markhaltig) - durch Oberflächenbearbeitung gequetschte Holzzellen - ungenügende Probenmenge / kein Birkenesperrholz
Hauptversuch 2	- nicht profilierte Bretter, Brettdicke 22 mm (dicker als Hauptversuch 1 und 3) - Zwischenschliff der Grundierungen zu stark (v.a. Grundierungen 1+3 z.T. durchgeschliffen), Varianten 'nur Grundierung' hingegen ohne Zwischenschliff - Grundierung 1+3: nicht vollständig ausgehärtete Grundierung in Astrissen -> Abriss Deckschicht - starke Blasenbildung in Grundierungen (Grundierungen 3, 1, 2) - unvollständige Grundierung auf Rückseite (2+3: ungenügend / fehlend, 4: ungleich) - geringe Streuung Holzeigenschaften durch Halbierung von 5 m-Brettern + bessere Holzqualität als Hauptversuch 1, aber vereinzelt immer noch grobe Fehler (Risse, Bläue/Rotstreif) + bessere Oberflächenqualität als im Hauptversuch 1
Hauptversuch 3	- ungenügende Grundierung auf Rückseite bei Grundierung 2 - Anschliff der Grundierung undefiniert - z.T. 'grobkörniges' Perlglanzpigment in Nanocoat - teilweise Probleme mit Blockfestigkeit der Deckschicht + vollständiger, systematischer Versuchsplan (optimierte Varianten)

2.3 Untersuchungsmethoden

Um Vergleiche zwischen den verschiedenen Serien zu ermöglichen, wurde in allen Versuchsserien ein ähnliches Basis-Untersuchungsprogramm durchgeführt (Tabelle 14). Ein Teil der Untersuchungen konnten wegen der limitierten Ressourcen allerdings nur an einem Teil des Probenmaterials durchgeführt werden. Daneben wurden mit ausgewählten Probenkollektiven verschiedene ergänzende Untersuchungen durchgeführt.

Tabelle 14: Basis-Untersuchungsprogramm

Versuchsserie	AP2		AP3	AP4			AP5	
	Bewitterung		chemische Analytik	Feuchteschutzwirkung			Haftfestigkeit	
	natürlich (45°, S)	künstlich (QUV)		unbewittert		bewitt. flüssig	unbewitt.	bewittert (Gitterschnitt)
				flüssig	dampff.			
Vorversuch	X	X		X	X			
Hauptversuch 1	X	X	(X)	X	X	(X)	X	(X)
Hauptversuch 2	X	X	(X)	X	X	(X)	X	
Hauptversuch 3	X	X	(X)	X			X	(X)

Legende: - X: vollständiges Versuchsprogramm
- (X): nur für ausgewählte Varianten / Proben

Eine Übersicht über die angewendeten Untersuchungsmethoden ist in Tabelle 15 zusammengestellt. Details zu den einzelnen Methoden werden in den nachfolgenden Abschnitten erläutert.

Die Untersuchungsmethoden stützen sich so weit wie 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. Besondere Bedeutung bei der Definition des Untersuchungsprogrammes und der Prüfmethoden hatte die spezifisch für Holzbeschichtungen im Aussenbereich entwickelte Normenreihe EN 927. Damit ist insbesondere auch eine Einreihung der getesteten Beschichtungssysteme analog zu den in EN 927-2 definierten Leistungsanforderungen möglich.

Tabelle 15: Angewendete Untersuchungsmethoden

Test	Getestete Eigenschaften	Details
Charakterisierung Beschichtungssystem	- Hydrophobierung: - Holzverfärbung (ISO 7724-2) - Eindringung - chemische Anbindung	- Farbmessung - Elementanalytik (WDX) - FTIR/Raman-Spektroskopie
	- Schichtaufbau - Trockenschichtdicke (ISO 2808, Methode 5A)	mikroskopische Untersuchung
	- Benetzungsverhalten (Kontaktwinkel)	an Wassertropfen, auf Hydrophobierung und Beschichtung, Ausgangszustand und nach Bewitterung
Feuchteschutzwirkung	- Wasserdurchlässigkeit (EN 937-5) - Wasserdampfdurchlässigkeit (EN 937-4)	Ausgangszustand und nach Bewitterung
Kompatibilität Schichten	- Benetzungsverhalten (Kontaktwinkel)	mit Wasser und Beschichtungsstoffen
	- Haftfestigkeit (ISO 4624)	Abreissfestigkeit und Bruchart, trocken und nass
Natürliche und künstliche Bewitterung (EN 937-3 resp. prEN 937-6)	- Gesamteindruck (ISO 4628-1) - Blasenbildung (ISO 4628-2) - Rissbildung (ISO 4628-4) - Abblättern (ISO 4628-5) - Kreidung (ISO 4628-6) - Farbe (Holz resp. Beschichtung, ISO 7724-2) - Astverfärbung - Haftfestigkeit (Gitterschnitt, ISO 2409) - Schimmelbildung (nur natürliche Bewitterung)	Nat. Bew.: 45°, Südexposition, Bewitterungsgelände Empa, Dübendorf, min. 1 Jahr Künstl. Bew.: QUV (UVA-340), 2000h

In der Regel wurden bei jedem Versuch 3 Wiederholungsproben verwendet, welche aus verschiedenen Brettern geschnitten wurden (siehe Kapitel 2.1). Zum Teil wurden auf den einzelnen Proben mehrere Messungen durchgeführt und deren Mittelwert als Kennwert verwendet.

2.3.1 Charakterisierung Beschichtungssystem (AP3)

2.3.1.1 Schichtdicke / Beschichtungsaufbau / Farbmessung (AP1)

Die Messung der Trockenschichtdicke erfolgte mikroskopisch in Anlehnung an ISO 2808 (Verfahren 5A) an geschliffenen Querschnitten der Probenbretter (10 Messungen über die gesamte Brettbreite, 4 bis 6 Bretter pro Grundierung-Decklack-Kombination). Die Schichtdicke von Grundierung und Deckschicht wurden (wo erkennbar) separat erfasst.

Gleichzeitig mit der Messung der Trockenschichtdicke wurden der Beschichtungsaufbau beurteilt und Auffälligkeiten (z.B. ungleiche Schichtdicken, Blasen) photographisch festgehalten.

Die Farbmessungen erfolgten mit einem Spektrophotometer (Minolta CM-2500d) nach dem CIELab System (D65, d/8, 10° Beobachter, sce). Die Farbdifferenzen wurden gemäss Formeln 1 bis 4 bezogen auf den unbewitterten Ausgangszustand berechnet (ISO/DIS 7724-3).

$$\Delta L = L_T - L_R \quad (\text{Formel 1})$$

$$\Delta a = a_T - a_R \quad (\text{Formel 2})$$

$$\Delta b = b_T - b_R \quad (\text{Formel 3})$$

$$\Delta E = \sqrt{(\Delta L)^2 + (\Delta a)^2 + (\Delta b)^2} \quad (\text{Formel 4})$$

mit: L: Helligkeitswert
 a, b: Farbwerte
 T: Testwert
 R: Referenzwert (=unbewitterter Ausgangszustand)

Auf jeder Probe wurden 4 Messpunkte gemessen. Bei Proben mit Ästen erfolgten jeweils 2 Messungen auf einem astfreien Bereich und 2 Messungen auf Ästen.

2.3.1.2 Eindringung und chemische Anbindung der Hydrophobierung

Das Eindringverhalten der Hydrophobierungsmittel ins Holzgewebe wurde durch Detektion ihrer anorganischen Bestandteile Silizium und Fluor mittels wellenlängendispersiver Röntgenanalyse (WDX) an einer Elektronenstrahlmikrosonde des Typs Jeol JXA 8800 untersucht.

Dazu wurden aus den beschichteten Brettern kleine (oberflächennahe) Querschnittsproben (5x5 mm²) entnommen und davon Dünnschnitte mit ca. 30-50 µm Dicke angefertigt. Diese wurden nach der Trocknung mit doppelseitig klebendem Kohlenstoffband auf den Probenträgern befestigt und für mindestens 12 h im Vakuumschrank gelagert. Anschliessend wurden die Proben mit Kohlenstoff bedampft. Für qualitative Übersichtsbilder (Eindringtiefe) wurden Flächen mit der Grösse von 0.4 µm² (Schrittweite 2 µm) und für Detailbilder (Eindringung in Holzzellwände) Flächen der Grösse 0.09 µm² (Schrittweite von 0.2 µm) abgerastert. Die Untersuchungen erfolgten mit einer Beschleunigungsspannung von 15 kV und einem Probenstrom von 1*10⁻⁷ A. Der fokussierte Elektronenstrahl detektiert mit einer Messbirne von 1 µm in gleicher Grössenordnung in die Tiefe und mit einer Messgenauigkeit von 0.001 ppm. Alle Mappings wurden mit den gleichen Einstellungen durchgeführt, was einen halbquantitativen Vergleich der Elementverteilung in den unterschiedlichen Proben erlaubt.

Als alternative Methode zur Erfassung der Eindringtiefe wurden auch Versuche mit vorgängig mit einem Fluoreszenzfarbstoff eingefärbten Hydrophobierungsmitteln durchgeführt. Dazu wurden durch die Empa zusätzliche Proben hergestellt, an denen sowohl mittels Elementanalytik (siehe oben) als auch unter dem Fluoreszenzmikroskop die Eindringung der Hydrophobierungsmittel untersucht und somit die Übereinstimmung der beiden Methoden überprüft werden konnte. Zur Anfärbung der wässrigen Hydrophobierungsmittel (118F, 118FAG) wurde Rhodamin B eingesetzt, bei den lösemittelhaltigen Hydrophobierungsmitteln (118, 119) Fluorol Gelb 088.

Die Analyse der chemischen Anbindung der Hydrophobierungsmittel an die Holzsubstanz erfolgte mittels FTIR- und Raman-Spektroskopie. Nähere Angaben dazu sind im detaillierten Bericht im Anhang A3 enthalten.

2.3.1.3 Benetzungsverhalten gegenüber Wasser

Als Indikator für die Schutzwirkung einer Hydrophobierung gegen das Eindringen von flüssigem Wasser ins Holz wird der augenfällige Abperleffekt verwendet (Bild 8). Dieser zeigt das Benetzungsverhalten einer Oberfläche und wird messtechnisch über Kontaktwinkelmessungen an kleinen Wassertropfen erfasst, welche via eine Dosierspritze auf die Prüfoberfläche aufgebracht werden. Die Messungen (Bild 9) erfolgten nach der statischen Sessile-Drop-Methode an 11 µl grossen Wassertropfen (dataphysics SCA 20). An jeweils 3 Wiederholungsproben pro Variante wurden je 4 Einzelmessungen durchgeführt. Für die weitere Auswertung wurde der gemessene Kontaktwinkel 60 s nach der Tropfen-Beaufschlagung verwendet.

Bei einer Messung an Wassertropfen bezeichnet man bei geringen Kontaktwinkeln (<90°) die Oberfläche als hydrophil, bei Winkeln >90° als hydrophob und bei noch größeren Winkeln als superhydrophob. Letzteres wird bei sehr hohen Kontaktwinkeln (bis 170°) auch als Lotuseffekt bezeichnet und ist Ausdruck einer extrem geringen Benetzbarkeit der Oberfläche mit Wasser. Dieser Effekt ist aber nur bei einer Kombination von starker Hydrophobie und spezieller Oberflächenstruktur möglich.

Bild 8: Abperleffekt von Wasser auf hydrophobierten Holzoberflächen (ganz links: nicht-hydrophobierter Bereich)

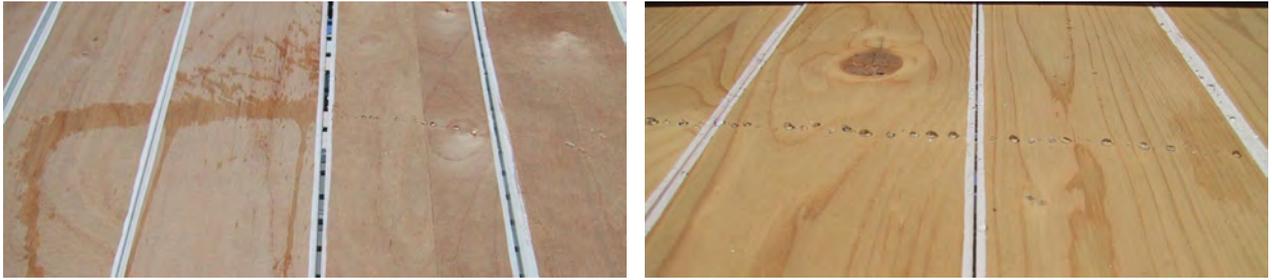
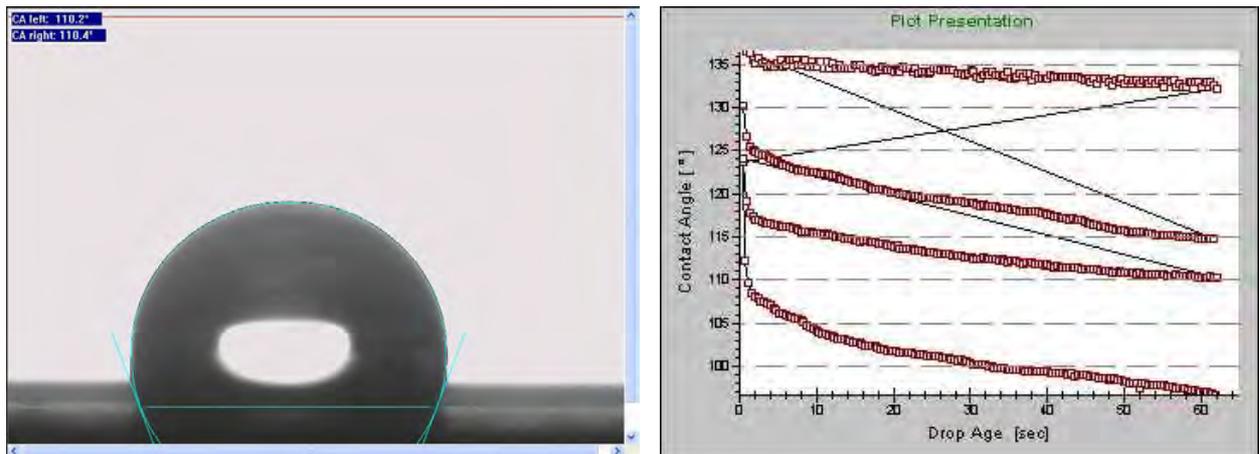


Bild 9: Kontaktwinkelmessung an einem Wassertropfen (links) und Verlauf des Kontaktwinkels bei 4 Messungen auf einer stark hydrophoben Oberfläche (rechts)



2.3.2 Feuchteschutzwirkung (AP4)

Für die Dauerhaftigkeit einer Beschichtung ist nicht primär ein möglichst 'schöner' Abperleffekt (flüssiges Wasser) ausschlaggebend, sondern die generelle Verminderung der Feuchteaufnahme (flüssiges und dampfförmiges Wasser) des Substrates. Primäres Ziel ist es, die Dimensionsstabilität des Substrates zu gewährleisten und damit die Rissbildung im Holz zu verringern.

Die Feuchteschutzwirkung der Beschichtungen wurde unter 'kontrollierten' Bedingungen im Labor (Kapitel 2.3.2.1) wie auch 'praxisnah' durch die Erfassung der Holzfeuchteschwankungen im Freibewitterungsversuch (Kapitel 2.3.2.2) untersucht. Die Quantifizierung der Feuchteschutzwirkung erfolgte dabei mittels Erfassung der Wasseraufnahme resp. -abgabe von beschichteten Probenplatten.

2.3.2.1 Wasser- und Wasserdampfdurchlässigkeit (Laborversuch)

Die Wasser- und Wasserdampfdurchlässigkeit der verschiedenen Beschichtungsvarianten wurde mit Normversuchen gemäss EN 927-5 resp. EN 927-4 bestimmt (Bild 10 und 11). Dabei wird die während einer bestimmten Zeit durch die Beschichtung hindurch aufgenommene Wassermenge durch Wägung gemessen. Im Falle der Wasserdampfdurchlässigkeit nach EN 927-4 wird nur die dampfförmige Feuchteaufnahme (Diffusion), im Versuch gemäss EN 927-5 sowohl die kapillar als auch die durch Diffusion aufgenommene Wassermenge erfasst.

Die Proben wiesen dazu nur auf der 'Vorderseite' die jeweilige Testbeschichtung auf, während alle übrigen Flächen feuchteundurchlässig versiegelt waren (siehe Kapitel 2.1).

Als Kennwerte der Feuchteschutzwirkung wurde die flächenbezogene Wasseraufnahme in g/m^2 nach einer bestimmten Versuchsdauer (für EN 927-2: 72 h) sowie der Wasseraufnahmekoeffizient in $\text{g}/(\text{m}^2 \cdot \sqrt{\text{h}})$ berechnet, welcher als lineare Funktion aus der flächenbezogenen Wasseraufnahme und der Quadratwurzel der Versuchsdauer die Dynamik der Feuchteaufnahme bezieht (Bild 12).

Bild 10: Feuchteschutzprüfung: Bestimmung der Wasserdurchlässigkeit nach EN 927-5

Norm / Prüfvorschrift
EN 927-5

Methode
Wasseraufnahme von beschichteten Holzproben im Wasserbad

Proben / Prüfung

- Grösse: 150 x 74 x (Dicke) mm
- Schmalseiten und Rückseite versiegelt

Prüfung

- Testfläche 5 mm tief in Wasserbad, Gefäss offen
- 168 h mit Wägungen nach 24, 72 und 168 h
- Testdauer insgesamt ca. 6 Wochen (mit Vorbehandlung und Rückkonditionierung)



Bild 11: Feuchteschutzprüfung: Bestimmung der Wasserdampfdurchlässigkeit nach EN 927-4

Norm / Prüfvorschrift
EN 927-4

Methode
Wasseraufnahme von beschichteten Holzproben über Wasserbad (in gesättigter Luft, ca. 98% r.F.)

Proben / Prüfung

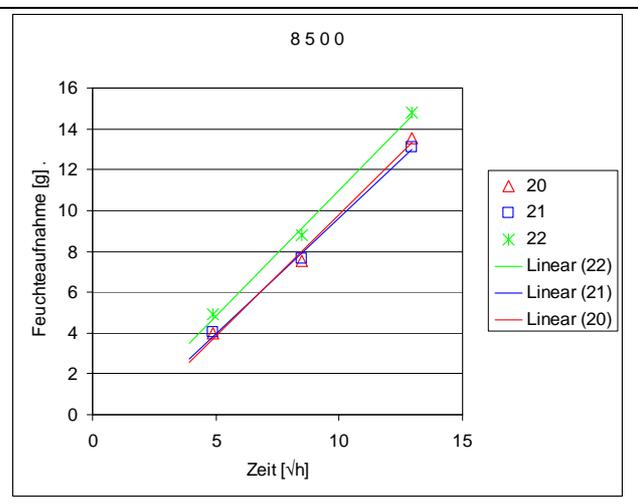
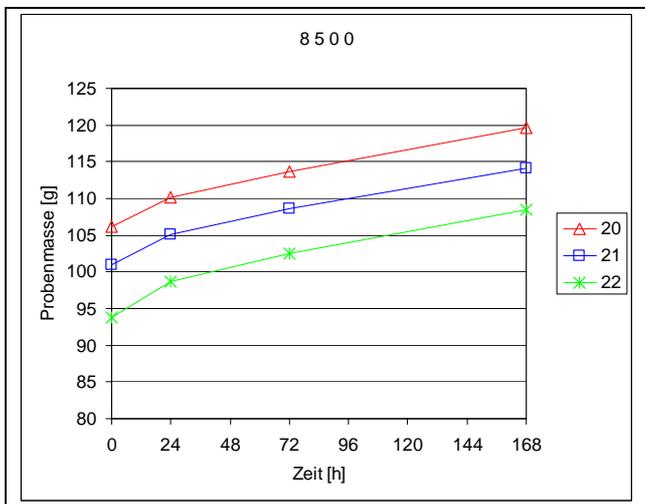
- Grösse: 150 x 74 x (Dicke) mm
- Schmalseiten und Rückseite versiegelt

Prüfung

- Testfläche über Wasserbad, Gefäss geschlossen
- 336 h mit Wägungen nach 48, 168 und 336 h
- Testdauer insgesamt ca. 7 Wochen (mit Vorbehandlung und Rückkonditionierung)



Bild 12: Beispiel: Feuchteaufnahme von 3 Wiederholungsproben im Normversuch gemäss EN 927-5. Links: Zunahme der Probenmasse mit der Versuchsdauer, rechts: 'linearer' Wasseraufnahmekoeffizient über der Quadratwurzel der Versuchsdauer



Zur Sichtbarmachung der Wassereindringung resp. der Unterfeuchtung der Beschichtung wurde der Versuch zur Wasserdurchlässigkeit mit ausgewählten Proben, welche lediglich hydrophobiert waren oder eine transparente Grundierung (ohne Deckschicht) aufweisen, zusätzlich auch mit angefärbtem Wasser (Neolan Glaucin E-A acid-blue 9) durchgeführt. Um eine lokale Schädigung zu simulieren, wurde die Beschichtung auf einer Probenhälfte mit einem Skalpell durch 4 Längsschnitte (Abstand 5 mm) bis aufs Holz durchgeschnitten. Die Beurteilung der Wassereindringung erfolgte sowohl auf der Prüffläche (d.h. unter der transparenten Grundierung) als auch am Probenquerschnitt (zerschnittene Proben). Wo möglich erfolgte zudem ein Vergleich der Unterfeuchtung der Beschichtung mit der mit gleichermassen eingefärbtem Wasser durchgeführten Prüfung der Nasshaftung der Beschichtungen (siehe Kapitel 2.3.3.2).

2.3.2.2 Verlauf der Holzfeuchte in der Freibewitterung

Das Niveau und die Schwankungen der Holzfeuchte der Proben im Freibewitterungsversuch wurden durch periodische Wägungen (ca. monatlich) erfasst. Die Holzfeuchte u_t in % zum Zeitpunkt t wurde gemäss Formel 5 berechnet. Dabei wird davon ausgegangen, dass die Proben bei Prüfbeginn eine Holzfeuchte von 12% aufwiesen.

$$u_t = \frac{m_t - (m_o/1.12)}{(m_o/1.12)} \cdot 100 \quad (\text{Formel 5})$$

Mit: m_t : Masse der Proben zum Zeitpunkt t [g]

m_o : Masse der bei 20°C/65% r.F. ausklimatisierten Proben bei Bewitterungsbeginn [g].

Nebst dem graphischen Vergleich des Verlaufes der Holzfeuchte wurden als Kennwerte die mittlere Holzfeuchte (arithmetisches Mittel) und die Holzfeuchteschwankungen (Standardabweichung der Einzelmessungen) über den betrachteten Zeitraum (erstes Jahr der Bewitterung) berechnet.

2.3.3 Kompatibilität Schichten (AP5)

Wie bereits in der Einleitung erwähnt (siehe Kapitel 1.2), ist zu erwarten, dass hydrophobierte Holzoberflächen schwierig zu beschichten sind und dass nachfolgenden Schichten allenfalls eine verminderte Haftung aufweisen. Aufgrund bereits früher beobachteter Migrationsphänomene bei Silanen (Hinder 2005, Horgnies 2006) ist es sogar möglich, dass nicht nur die unmittelbar auf die hydrophobierten Holzoberflächen applizierten Schichten betroffen sind, sondern auch weiter darüberliegende.

Messtechnisch wurde wiederum die Kontaktwinkelmessung als allgemeiner Indikator für die Benetzbarkeit der Oberflächen eingesetzt. Aus diesen Messungen ergeben sich auch Hinweise auf eine mögliche Silan-Migration im Beschichtungssystem. Als direktes Mass für die Kompatibilität der verschiedenen Schichten erfolgte eine Prüfung der Haftfestigkeit der Beschichtung in trockenem und im feuchten Zustand.

2.3.3.1 Benetzungsverhalten der Beschichtungsstoffe

Das Benetzungsverhalten der Beschichtungsstoffe wurde analog zu dem im Kapitel 2.3.1.3 beschriebenen Verfahren mit Kontaktwinkelmessungen erfasst. Die Messungen erfolgten jedoch nicht nur an Wassertropfen, sondern auch an den Beschichtungsstoffen selbst, d.h. an Tropfen der Grundierung auf der Hydrophobierung resp. an Tropfen des Decklacks auf der Grundierung.

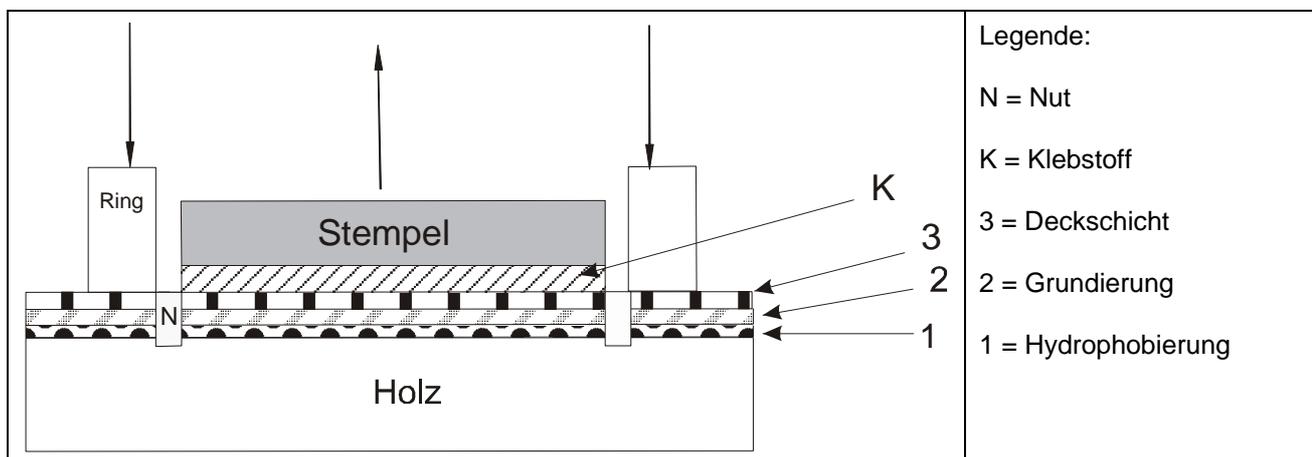
2.3.3.2 Haftfestigkeit

Die Prüfung der Haftfestigkeit der Beschichtungen erfolgte mit zwei verschiedenen Methoden. 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 (siehe Kapitel 2.3.4). Die Prüfung erfolgte mit einem ZCC 2080 Zehntner Gitterschnitt-Prüfer im trockenen Zustand (20°C/65% r.F.). Mit einer scharfen Klinge wurde dazu ein bis zum Untergrund reichendes Gittermuster in die Beschichtung geschnitten. Der Abstand der 6 parallelen Schnitte voneinander betrug 2 mm. Anschließend wurde ein Klebeband mit einer Haftfestigkeit von 10 ± 1 N / 25 mm Breite mit leichtem Druck auf der Oberfläche angedrückt und gleichmässig 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.

Ein quantitatives Mass für die Haftfestigkeit ergibt sich aus dem mechanischen Abreissversuch gemäss ISO 4624. Dabei werden auf die Beschichtung aufgeklebte metallische Prüfstempel mit einem Zugprüfgerät abgezogen und sowohl die Abhebefestigkeit als auch die Art und Lage des Bruches erfasst. In Ergänzung der Normvorschrift wurde die Prüfung nicht nur im trockenen Zustand durchgeführt, sondern auch nach einer vorgängigen Befeuchtung des Interface-Bereiches Holz-Beschichtung, um allfällige Probleme bei der Nasshaftung der Beschichtung zu erfassen.

Die Prüfung erfolgte an 55 mm breiten (axiale Richtung) Probenabschnitten mit je 2 Prüfstempeln (Ø20 mm) pro Probe. Vor dem Aufkleben der Prüfstempel mit einem Spezialklebstoff wurde teilweise die Beschichtung leicht angeschliffen, um die Haftfestigkeit zwischen Klebstoff und Beschichtung zu verbessern. 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 dabei 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, siehe auch Kapitel 2.3.2.1). Die Prüfstempel wurden danach auf einer Universalprüfmaschine (Zwick) unter einer gleichmässigen Krafteinleitung senkrecht zur Probenoberfläche abgezogen. Um das Auftreten eines Biegemoments in der Prüffläche zu verhindern, wurde der Prüfstempel gegen einen Ring gezogen und die Krafteinleitung erfolgte über ein Kugelgelenk (Bild 13).

Bild 13: Schematische Darstellung (Querschnitt) des mechanischen Abreissversuches gemäss ISO 4624



2.3.4 Bewitterung / Dauerhaftigkeit (AP2)

Bewitterungsversuche sind unabdingbar, um die Leistungsfähigkeit eines Beschichtungssystems in seiner Gesamtheit zu bewerten. Gemessen an der erwarteten Lebensdauer ist der im Projekt mögliche Beobachtungszeitraum jedoch sehr kurz und erlaubt keine abschliessende Aussage. Mit den durchgeführten Bewitterungsversuchen ist jedoch eine relative Abschätzung der Dauerhaftigkeit, respektive ein Vergleich der verschiedenen zur gleichen Zeit bewitterten Beschichtungssysteme möglich. Vergleiche zwischen verschiedenen Bewitterungsserien sind wegen der natürlichen Schwankung der Witterungsbeanspruchung nur beschränkt möglich. Langfristige Erfahrungen aus Praxisobjekten sind daher eine absolut notwendige Ergänzung zu diesen Versuchen.

Die natürliche Bewitterung (Freibewitterung) erfolgte in Anlehnung an EN 927-3 auf einer gegen Süden ausgerichteten 45°-Ebene auf dem Freibewitterungsstand der Empa in Dübendorf (Bild 14). In Abweichung zu dieser Norm waren die Längsseiten der Proben auf den Bewitterungsgestellen aber nicht horizontal, sondern vertikal ausgerichtet. Der zeitliche Ablauf der 4 gestaffelten Bewitterungsserien ist in Bild 15 aufgezeigt. Die gestarteten Freibewitterungen werden über das Projektende hinaus weitergeführt und periodisch bewertet.

Die künstliche Bewitterung erfolgte gemäss prEN 927-6 durch eine alternierende Beanspruchung mit Fluoreszenz-UV-Licht und Wasser (Kondensation und Spray) nach einem speziell für Holzbeschichtungen entwickelten Bewitterungszyklus (Bild 16, Tabelle 16).

Bild 15: Zeitplan Freibewitterungen

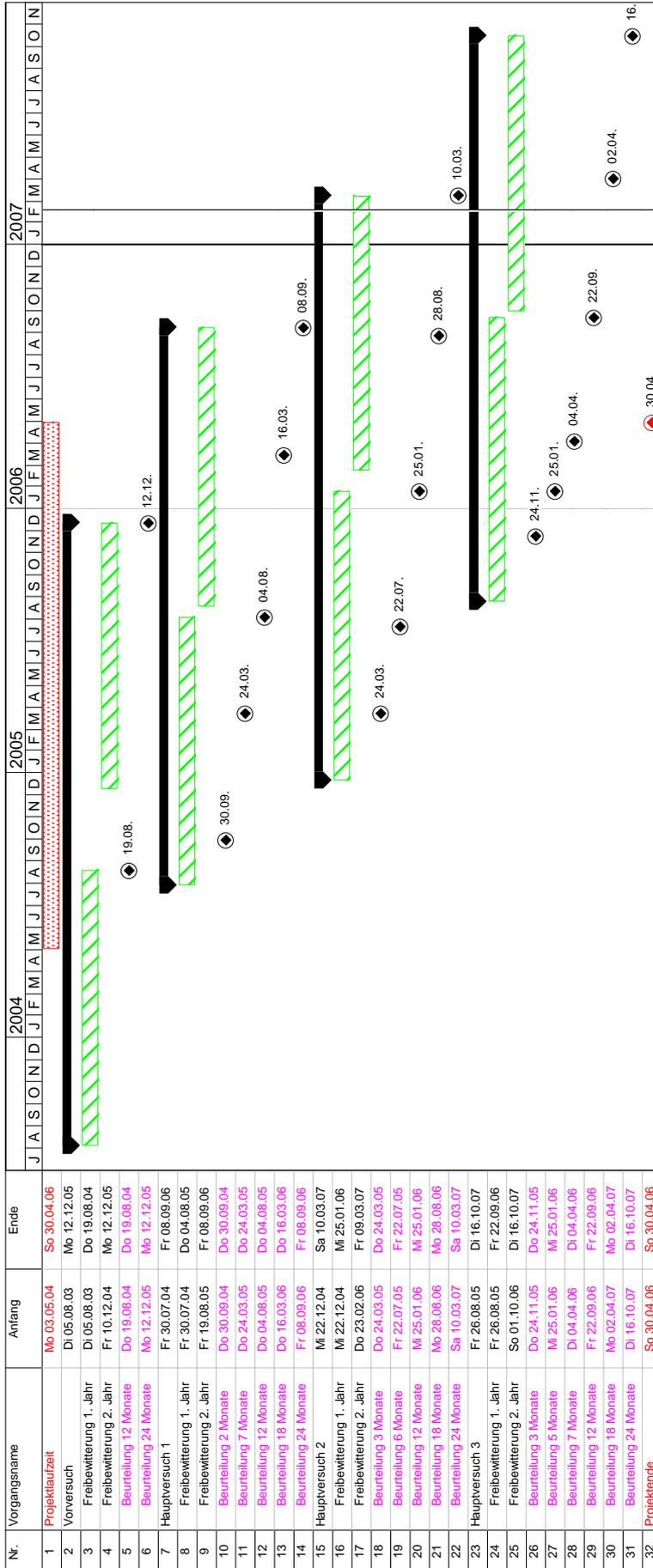


Bild 14: Natürlicher Bewitterungsversuch (Freibewitterung)

Norm / Prüfvorschrift
EN 927-3

Methode
45°, Südexposition

Proben

- Grösse: 360 x 100 x (Dicke) mm
- Schmalseiten versiegelt
- Rückseite behandelt bis und mit Grundierung wie Vorderseite
- Kapazität 1 Gestell:
72 Proben (2x3 Reihen à 12 Proben)

Testdauer
min. 12 Monate



Bild 16: Künstlicher Bewitterungsversuch mit QUV

Norm / Prüfvorschrift
prEN 927-6

Methode
Fluoreszenz-UV-Lampen (UVA 340) und Wasser (Kondensation und Spray)

Gerätetyp:
QUV/se/spray (Q-Panel, Cleveland, OH, USA)

Proben

- Grösse: 150 x 74 x (Dicke) mm
- Schmalseiten versiegelt
- Aluminium Probenhalter mit Bewitterungsfenster 95 x 64 mm
- Kapazität 1 Gerät:
48 Proben (2x2 Reihen à 12 Proben)

Testdauer
min. 2000h



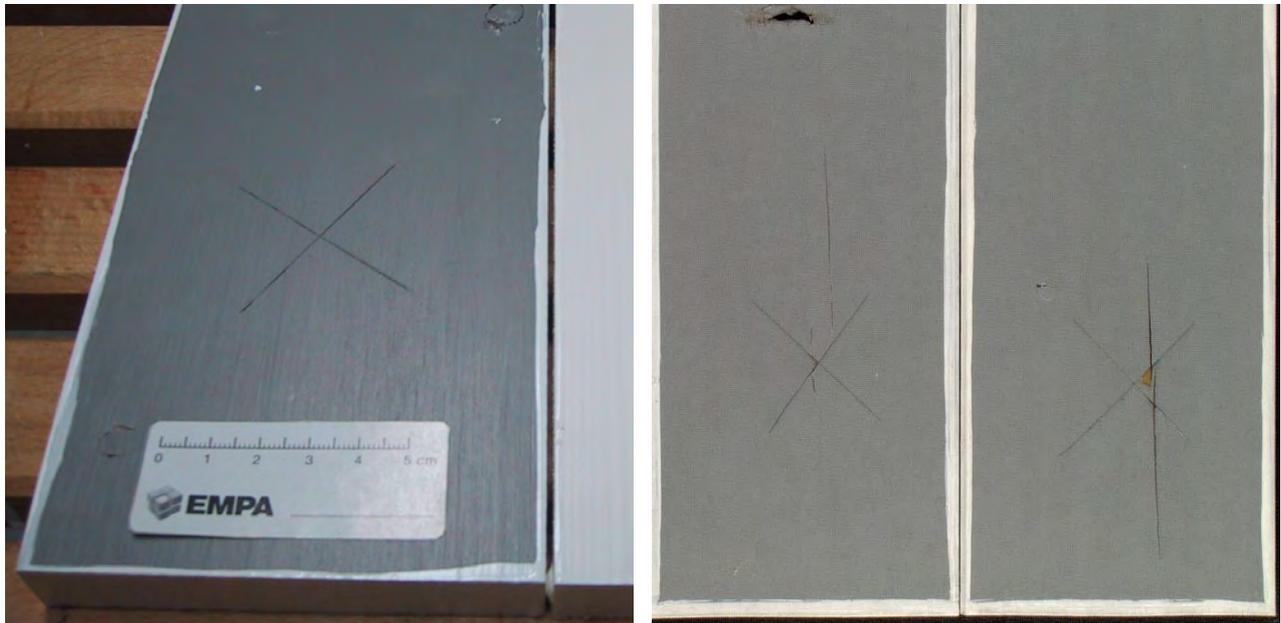
Tabelle 16: QUV-Bewitterungszyklus für Holzbeschichtungen (prEN 927-6)

Step	Function	Temperature	Duration	Remark
1	COND	45°	24:00	
2	Subcycle Step 3+4		48x	
3	UV	60°	02:30	UVA-340 (QUV/se: lamp output: 0.77)
4	SPRAY		00:30	6-7 lpm, UV light off
5	Go to step 1			
Total (1 cycle)			168h	
Repetition of cycle:		12x (12 weeks)		
Total duration of exposure:		2016 h		

28.11.2005 Martin Arnold, EMPA

Für den natürlichen und künstlichen Bewitterungstest wurde an jeweils einer der 3 Wiederholungsproben mit einem Gitterschnitt-Messer die Beschichtung mit zwei 6 cm langen Schnitten X-förmig durchgeschnitten (Bild 17, links). Mit dieser 'Vorschädigung' sollte eine lokale Erhöhung der Feuchtebeanspruchung der Proben und damit eine Verschärfung der Bewitterung erreicht werden (Bild 17, rechts).

Bild 17: Vorschädigung zur Verschärfung der Witterungsbeanspruchung: Links: unbewitterter Ausgangszustand, rechts: lokale Schäden nach 7 Monaten Freibewitterung



Während (und am Schluss) der Bewitterungsversuche wurden die Proben periodisch nach einem umfangreichen Kriterienkatalog beurteilt, wobei je nach Beschichtungssystem nicht allen Parametern die gleiche Bedeutung zukommt (Tabelle 17). Der Grossteil der Beurteilungen basiert auf einer visuellen Einschätzung der Veränderungen durch die Bewitterung, bei welcher den einzelnen Kriterien basierend auf einer qualitativen Beschreibung des Ausmasses der Veränderung ein Wert auf einer Skala von 0 (keine Veränderung) bis 5 (sehr starke Veränderung) zugeordnet wird (Tabelle 18). Naturgemäss sind diese Zuweisungen zu einem gewissen Grad subjektiv geprägt und hängen von der Erfahrung des Beurteilenden ab. In teilweiser Abweichung zu den Normvorschriften erfolgten alle Beurteilungen und Messungen an den ungewaschenen Proben, um die Ergebnisse der fortgesetzten Bewitterung nicht zu verfälschen.

Tabelle 17: Kriterien für die Beurteilung von Witterungseffekten

Kriterium	Norm	Messwerte	Details / Bemerkungen
Gesamteindruck	ISO 4628-1	visuelle Beurteilung auf Skala 0 – 5 (gemäss Anweisungen in EN 927-3/-6)	Vergleich mit unbewitterter Referenzprobe
Blasenbildung	ISO 4628-2		ohne Bedeutung
Rissbildung	ISO 4628-4		
Abblättern	ISO 4628-5		
Kreidung	ISO 4628-6		
Schimmelbildung	EN 927-3		nur bei natürlicher Bewitterung
Haftfestigkeit	ISO 2409		Gitterschnitt
Farbe	ISO 7724-2	CIELab-Werte	siehe Kapitel 2.3.1.1
Astverfärbung			auch mit visueller Beurteilung
Glanz			keine Glanzmessungen, da matter Decklack
Kontaktwinkel			siehe Kapitel 2.3.1.3

Tabelle 18: Schema für die visuelle Beurteilung des Probenzustandes während/nach der Bewitterung (in Anlehnung an ISO 4628)

Probenbeurteilung nach EN 927-3/-6 bzw. ISO 4628 1-6															
gesamte Prüffläche															
Rating	Gesamtzustand (Vergleich zu unbewitterter Referenzprobe)		Vorschädigung												
	Proben- zustand	Äste (Verfä- rbungen)	Risse		Abblättern		Unter- feuchtung	Kreidung Tapefläche 25*10 mm	Schim- mel	Abblättern	Unterfeuchtung	Risse		Rich- tung	
	Häufigkeit	Grösse	Häufigkeit	Grösse	Flächen anteil %	Grösster Defekt	Tiefe	Unter- feuchtung	Kreidung	Schim- mel	Abblättern	Unterfeuchtung	Häufigkeit	Grösse	Rich- tung
0	unverändert, keine wahr- nehmbare Veränderung	unverändert, keine wahr- nehmbare Veränderung	keine, nicht sichtbar	nicht sichtbar unter 10x Vergrös- serung	0	nicht sichtbar unter 10x Vergrös- serung	a) top	keine	keine	kein	kein Abschälen oder Abblättern	keine	keine, nicht sichtbar	nicht sichtbar unter 10x Vergrös- serung	–
1	sehr leichte Veränderung, kaum sichtbar	sehr leichte Veränderung, kaum sichtbar	sehr wenig, kaum bedeutend	nur sichtbar unter 10x Vergrös- serung	0.1	bis 1mm	b) total	vereinzelt weniger als 5%, entlang der vereinzelter Risse	sehr wenig	kaum sichtbar	Spuren von Abschälen entlang der Schnitte oder ihrem Schnittpunkt	nur im Kreuzbereich	sehr wenig, kaum bedeutend	nur sichtbar unter 10x Vergrös- serung	gerich- tet
2	leicht, klar sichtbare Veränderung	leicht, klar sichtbare Veränderung	einige, kleine, aber bedeutende Menge	mit blosser Augen sichtbar	0.3	bis 3 mm		vereinzelt grössere Stellen, entlang der Risse und darüber hinaus	leicht	gering- fügig	Gezacktes Abblättern entlang der Schnitte bis zu 1,5 mm auf jeder Seite	entlang der Schnitte über gesamte Länge	einige, kleine, aber bedeutende Menge	mit blosser Augen sichtbar	ungeri- chtet
3	mässige Veränderung	mässige Veränderung	mässig, mittlere Menge an Defekten	Klar sichtbar	1	bis 10 mm		flächige Unterfeuchtung bis 50%, Ausbreitung mässig	mässig	mässig	Gezacktes Abblättern entlang der nahezu gesamten Schnitt- länge bis zu 3 mm auf jeder Seite	entlang der Schnitte mit leichten Ausbreitungen	mässig, mittlere Menge an Defekten	Klar sichtbar	–
4	erhebliche Veränderung	erhebliche Veränderung	erheblich, beträchtliche Menge	grosse Risse bis 1mm Breite	3	bis 30 mm		mehr als 50 % der Fläche, Ausbreitung erheblich	starke Kreidung	fast vollflächig	Abblättern an nahezu gesamter Fläche am X	entlang der Schnitte mit Ausbreitung über den Kreuzungs- bereich	erheblich, beträchtliche Menge	grosse Risse bis 1mm Breite	–
5	schwer- wiegende Veränderung	schwer- wiegende Veränderung	schwer- wiegend, dichtes Schadbild	Risse über 1mm Breite	15	mehr als 30 mm		mehr als 80% der Fläche, Ausbreitung nahezu vollständig	sehr starke Kreidung	vollflächig	Abblättern über die Fläche des X hinaus	vollflächig	schwer- wiegend, dichtes Schadbild	Risse über 1mm Breite	–

3 Ergebnisse zu Hauptfragestellungen

In diesem Kapitel werden die Ergebnisse zu den Hauptfragestellungen themenspezifisch gemäss der Arbeitsgliederung des Projektes präsentiert und stichwortartig bewertet. Die Darstellungen sollen den Leser insbesondere auch zu eigenen Vergleichen und Interpretationen anregen. Die Präsentation der Ergebnisse erfolgt analog zur Struktur des Projektes nach den 4 Hauptthemen Charakterisierung des Beschichtungssystems, Feuchteschutz, Kompatibilität Hydrophobierung – Beschichtung und Dauerhaftigkeit.

Vergleiche zwischen Versuchsvarianten sollten bevorzugt innerhalb der Versuchsserien erfolgen, da die Versuchsbedingungen in den einzelnen Serien nicht identisch waren. Vergleiche zwischen den Serien sind nur bedingt möglich, wobei folgende Unterschiede bei der Interpretation berücksichtigt werden müssen:

- Probenmaterial: - Holz: unterschiedliche Sortimente, Dicke, Holzschliff
- Beschichtungsstoffe: geänderte Formulierungen, Auftragsmenge
- Applikation: Auftragstechnik, Zwischenschliff Grundierungen
- Im Hauptversuch 2 sind keine Referenzvarianten ohne Hydrophobierung vorhanden. Die Ergebnisse werden daher teilweise zusammen mit dem Hauptversuch 1 und mit dessen Referenzproben präsentiert.
- Die Freibewitterungen erfolgten gestaffelt in verschiedenen Perioden mit allenfalls unterschiedlich starker Wetterbeanspruchung (siehe Bild 15). Zudem lagen für die verschiedenen Versuchsserien bei Projektende Daten für unterschiedlich lange Bewitterungszeiträume vor. Vergleiche zwischen den Versuchsserien müssen daher zumindest auf gleich lange Zeiträume bezogen werden.

3.1 Charakterisierung Beschichtungssystem

In diesem Kapitel werden die Untersuchungsergebnisse bezüglich der physikalischen und chemischen Charakterisierung der hydrophobierten Holzoberfläche und der nachfolgenden Beschichtung dargestellt.

3.1.1 Hydrophobierung

Hydrophobierte Holzoberflächen sind anhand des Abperleffekts von Wasser (siehe Kapitel 3.1.1.3) und allenfalls durch leichte Verfärbungen des Holzes erkennbar (siehe Kapitel 3.1.1.1). Die Hydrophobierungsschicht ist rein optisch mit den üblichen mikroskopischen Methoden nicht sichtbar, sondern muss durch spezielle Detektionsmethoden sichtbar gemacht werden. Ein Nachweis von allfälligen Nanostrukturen an der Oberfläche wäre allenfalls mit modernen, höchst-auflösenden Analysemethoden möglich. Ein solcher Nachweis dürfte angesichts der im Mikro- und Zehntelmillimeter-Bereich stark strukturierten Holzoberfläche aber nicht einfach sein und wurde auch nicht angestrebt. Aufgrund der teilweise beobachteten sehr hohen Kontaktwinkel kann aber davon ausgegangen werden, dass durch die Hydrophobierung spezielle Nanostrukturen ausgebildet werden.

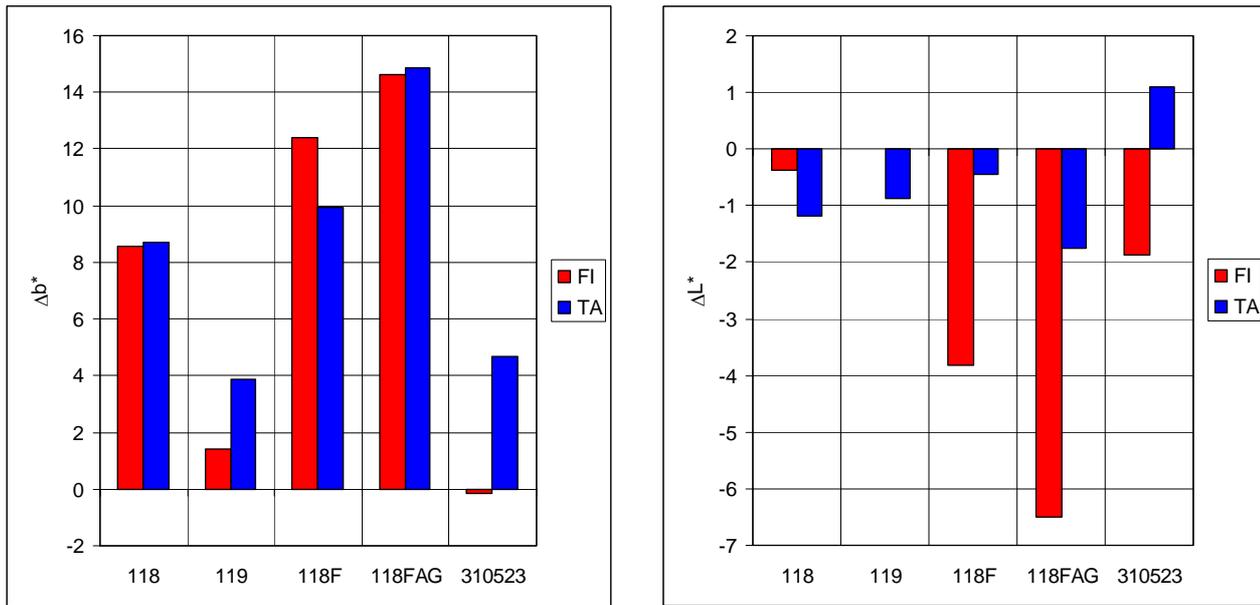
3.1.1.1 Holzverfärbung

Aus Bild 18 sind die durch die Behandlung mit Hydrophobierungsmitteln (ohne Bewitterung) hervorgerufenen Holzverfärbungen ersichtlich.

Bewertung:

- Einzelne Hydrophobierungsmittel führen nach der Applikation zu gelblich-bräunlichen Holzverfärbungen. Die Verfärbungen (im Vergleich zu unbehandelten Referenzproben) sind am ausgeprägtesten bei NP 118FAG mit dem zusätzlichen Tanninblocker auf Zirkonbasis, aber nur wenig geringer bei NP 118F. Auch bei NP 118 ist eine klare Vergilbung messbar, jedoch ohne relevante Veränderung der Helligkeit.
- Interessant sind gewisse Unterschiede zwischen den beiden Holzarten Fichte und Tanne: NP 118F und 118FAG führen bei Fichte zu einer deutlich grösseren Nachdunkelung des Holzes als bei Tanne. Demgegenüber scheint bei NP 119 und 310523 die Vergilbungstendenz bei Tanne ausgeprägter zu sein als bei Fichte.
- Die Ursachen für diese Verfärbungen wurden im Rahmen dieses Projektes nicht genauer untersucht. In Frage kommen sowohl Chromophore als auch Reaktionen der Hydrophobierungsmittel mit Holzinhaltstoffen. Eher unwahrscheinlich ist eine Beteiligung der eingesetzten Lösemittel.

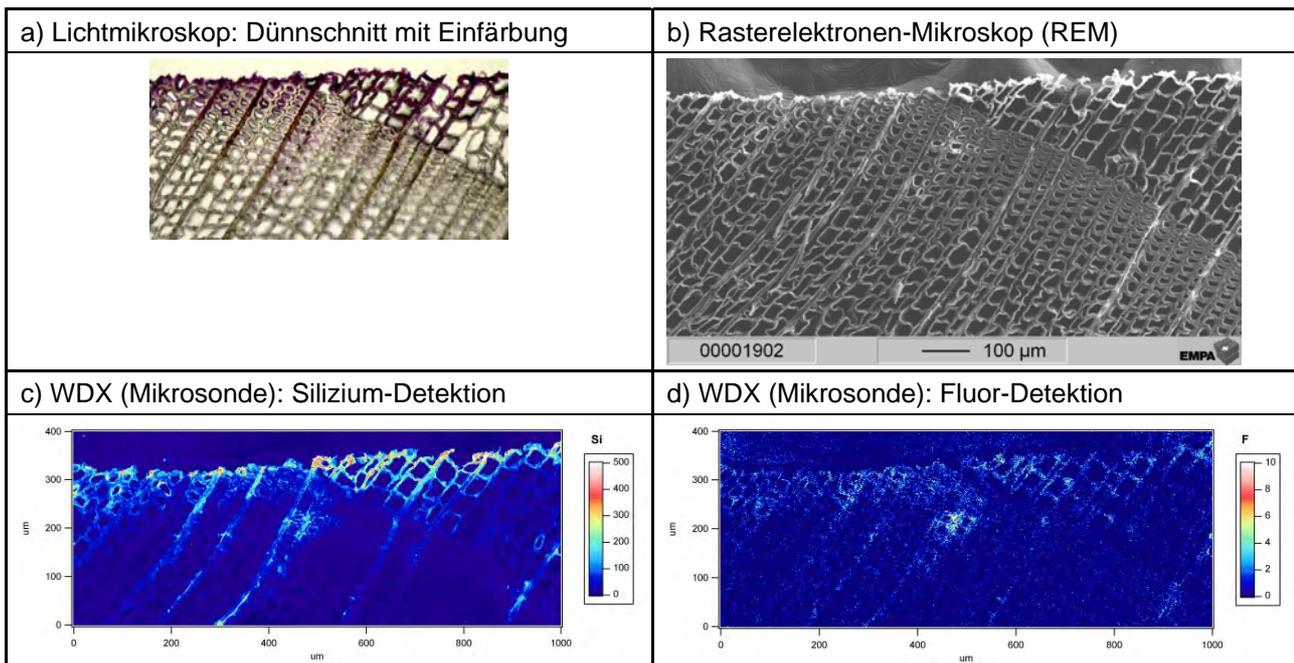
Bild 18: Holzverfärbungen verursacht durch Hydrophobierungsmittel: Verschiebung Δb^* auf der blau-gelb-Achse (links) und Veränderungen der Helligkeit ΔL^* (rechts) bezogen auf die Farbe der unbehandelten Referenzproben



3.1.1.2 Eindringung und chemische Anbindung

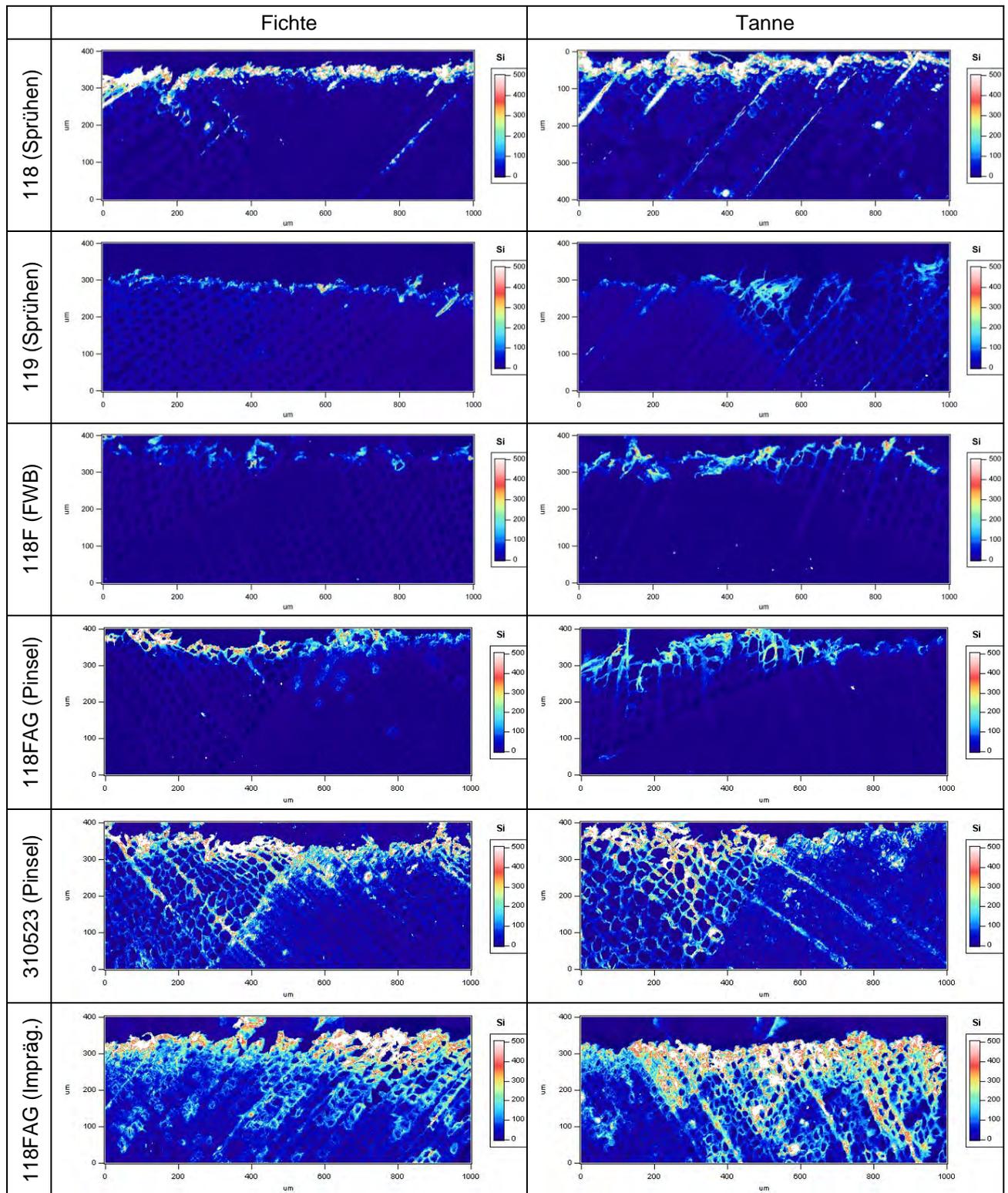
Eine dauerhafte Wirksamkeit der Hydrophobierung ist nur bei einer genügenden Wirktiefe, einer Eindringung in die Zellwand sowie einer chemischen Anbindung ans Holz zu erwarten. Für ein umfassendes Verständnis der Wirkungsweise der Hydrophobierungsmittel sind demnach Kenntnisse der Eindringungswege und der chemischen Anbindungsmechanismen notwendig. Bisher bestehen dazu erst Modellvorstellungen. Da Holz ein komplexes natürliches Polymer mit vielfältigen Möglichkeiten für chemische Reaktionen ist, ist deren Nachweis entsprechend schwierig und aufwendig.

Bild 19: Oberflächennaher Querschnitt aus einer hydrophobierten Probe (Tanne mit NP 118F) abgebildet mit verschiedenen Methoden. Bei Lichtmikroskop deutet eine rötliche Anfärbung auf die Anwesenheit des Hydrophobierungsmittels. Bei der Mikrosonde weist ein höherer Wert in der (künstlichen) Farbskala auf eine höhere Element-Konzentration hin.



Die parallele Untersuchung einer Probe mit Lichtmikroskop und Elementanalyse (siehe Kapitel 2.3.1.2) zeigt eine gute Übereinstimmung beider Methoden bei der Abschätzung der makroskopischen Eindring- resp. Wirtiefe des Hydrophobierungsmittels (Bild 19). Mit beiden Methoden scheint sogar eine Erfassung von Konzentrationsgradienten möglich. Für eine umfangreiche Untersuchung der Eindringtiefen wäre demnach die Verwendung von eingefärbten Hydrophobierungsmitteln eine einfachere Alternative, welche anstelle der relativ aufwendigen Untersuchungen mit der Mikrosonde eingesetzt werden könnte.

Bild 20: Eindringung verschiedener Hydrophobierungsmittel in Fichte und Tanne (Si-Detektion mit Mikrosonde)



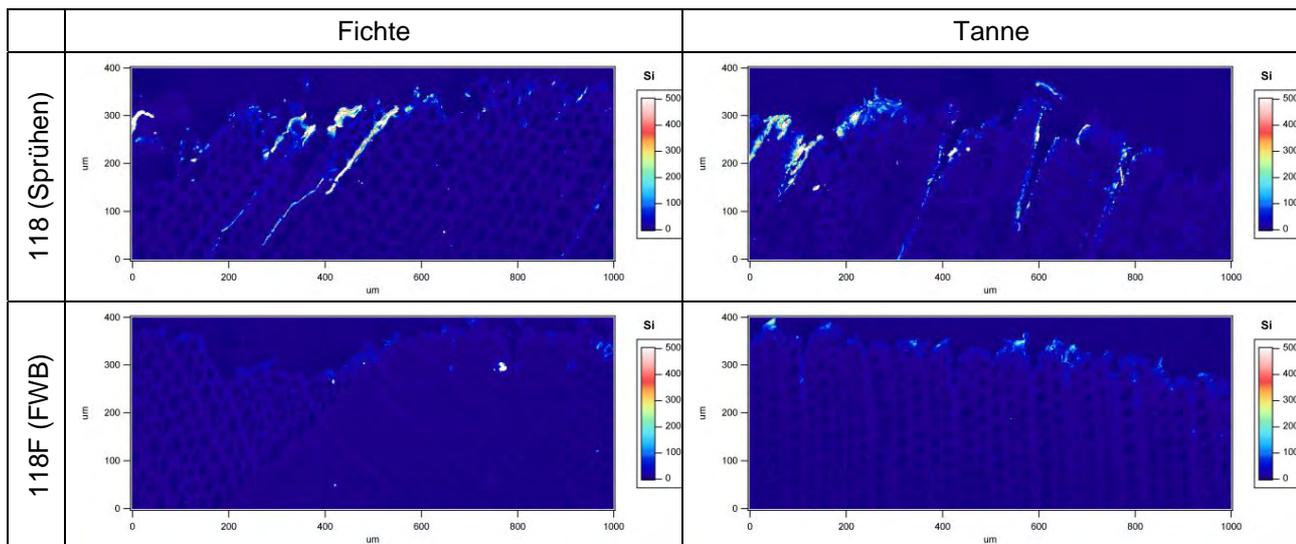
Ein Vergleich des Eindringverhaltens der verschiedenen Hydrophobierungsmittel bei Fichte und Tanne ist anhand Bild 20 möglich. Wegen der nur geringen Anzahl untersuchter Proben und der unterschiedlichen Applikationsmethoden sind allerdings nur tendenzielle Aussagen über das Eindringverhalten der Hydrophobierungen möglich.

Bewertung:

- Aufgrund der Bilder scheint es angebracht, anstelle von einer Hydrophobierungs-'Schicht' von einer funktionalisierten Oberflächen-'Zone' zu sprechen. Die Eindringtiefe der Hydrophobierungsmittel liegt im Bereich von wenigen Zehntel-Millimetern.
- Die verschiedenen Hydrophobierungsmittel zeigen recht deutliche Unterschiede im Eindringverhalten. Die beste Eindringung erfolgt bei NP 310523 und 118, die schlechteste bei NP 119.
- Die Eindringung scheint bei Tanne tendenziell besser zu sein als bei Fichte.
- Die Eindringung scheint im Frühholz besser zu sein als im Spätholz.
- Die Holzstrahlen sind offenbar wichtige Eindringwege.
- Über Unterschiede bei den Standard-Auftragsverfahren (Sprühen, Flut-Walz-Bürst-Verfahren FWB, Pinsel) sind aufgrund des diesbezüglich nicht systematischen Versuchsplanes keine Aussagen möglich. Mit einer Druckimprägnierung wird eine grössere Eindringtiefe erreicht, jedoch ebenfalls keine Durchimprägnierung des gesamten Querschnittes (Bild 20, unten).

Um die Dauerhaftigkeit der Hydrophobierungen in der Bewitterung abzuschätzen, wurden auch bewitterte Proben untersucht (Bild 21, im Vergleich mit Bild 20).

Bild 21: Beispiele von hydrophobierten Oberflächen von Fichte und Tanne nach 12 Wochen künstlicher Bewitterung (Si-Detektion mit Mikrosonde)

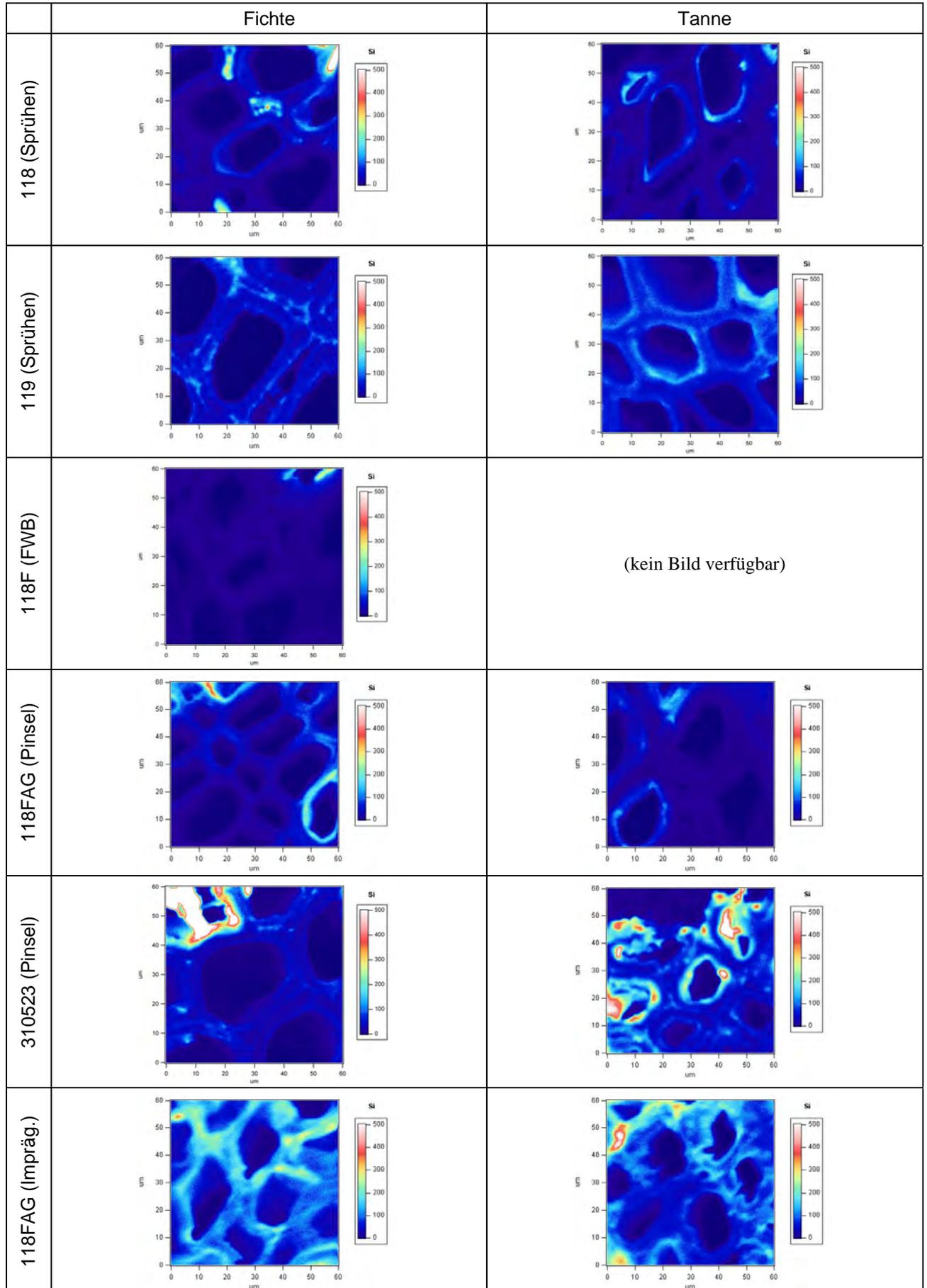


Bewertung:

- Nach 12 Wochen künstlicher Bewitterung im QUV ist die hydrophobierte Oberflächenzone weitgehend abgewittert. Bei NP 118 sind noch gewisse Reste des Hydrophobierungsmittels erkennbar, bei NP 118F hingegen nicht mehr. Zur Interpretation: Der Materialabtrag (Erosion) im Frühholz beträgt im QUV bei unbehandeltem Holz nach 2000 h Bewitterung ca. 200 µm. Dies entspricht in etwa gerade der beobachteten Eindringtiefe dieser Hydrophobierungsmittel.

Für die Wirksamkeit der Hydrophobierung von Bedeutung ist nicht nur die generelle Eindringtiefe, sondern ebenso auch das Ausmass der Durchdringung der Zellwände. An einigen Proben aus der Untersuchung der Eindringtiefe (siehe Bild 20) wurden deshalb erste orientierende Versuche an der Mikrosonde bezüglich Eindringung der Hydrophobierungsmittel in die Holz Zellwand durchgeführt (Bild 22). Aufgrund der nur geringen Anzahl von untersuchten Proben und der unterschiedlichen Applikationsmethoden sind auch hier nur tendenzielle Aussagen über das Verhalten der verschiedenen Hydrophobierungsmittel möglich. Für weiterführende Untersuchungen müsste auch die Transmissions-Elektronenmikroskopie (TEM) mit Elementanalytik eingesetzt werden.

Bild 22: Eindringung verschiedener Hydrophobierungsmittel in die Zellwände von Fichte und Tanne (Si-Detektion mit Mikrosonde)



Bewertung:

- Die relativ schwache Si-Detektion weist auf eine insgesamt nur beschränkte Eindringung der Hydrophobierungsmittel in die Holzzellwand hin.
- Wie bei der makroskopischen Eindringtiefe zeigen die verschiedenen Hydrophobierungsmittel auch deutliche Unterschiede im Eindringverhalten in die Holzzellwand. Die grösste Si-Konzentration ist meistens an den Innenwänden der Zellhohlräume (S3 der Tracheiden-Zellwände) zu beobachten, was auf eine 'Auskleidung' der Zellhohlräume durch axial eindringende Hydrophobierungsmittel hindeutet. Bei NP 119 und 310523 kontrastieren offenbar aufgrund ihrer unterschiedlichen Affinität zu den Zellwandkomponenten zusätzlich auch einzelne Zellwandschichten (insbesondere die Mittellamelle). Bei einer Druckimprägnierung mit NP 118FAG ist zwar eine bessere, aber immer noch keine vollständige Imprägnierung der Zellwand erkennbar.
- Wegen der geringen Zahl von Proben lassen sich keine Aussagen über Unterschiede im Eindringverhalten in die Holzzellwand zwischen Fichte und Tanne sowie zwischen Früh- und Spätholz machen.

Im Rahmen dieses Projektes wurden auch einige orientierende Untersuchungen zur chemischen Zusammensetzung von NP 118, 119 und 118F sowie bezüglich der Modellvorstellungen über mögliche Bindungsmechanismen mit den Holzkomponenten durchgeführt. Ein detaillierter Bericht dazu ist als Anhang A3 beigelegt. Generell scheinen die mittels FTIR- und Raman-Spektroskopie untersuchten chemischen Bindungen der Nanoperl-Hydrophobierungen am Holz nicht sehr ausgeprägt zu sein und deren beobachtete Wirkung (z.B. Abperleffekt) zumindest teilweise auf einer eher 'physikalischen' Anbindung (funktionelle Schicht) zu beruhen. Nur gerade bei NP 119 konnte eine kovalente Bindung mit Lignin festgestellt werden (Tabelle 19). Diese Ergebnisse müssen aber als vorläufig betrachtet und noch durch komplementäre Methoden (z.B. NMR) ergänzt und bestätigt werden. Ebenso wünschbar wäre auch eine Ausweitung der Untersuchungen auf die chemisch sehr komplexen und besonders reaktiven Hemicellulosen.

Analoge Erkenntnisse sind auch aus dem bereits in Kapitel 1.1.2 erwähnten europäischen Projekt 'HYDROPHOB' bekannt, wo relevante chemische Bindungen erst bei relativ aufwendigen mehrstufigen Prozessen (zusätzliche Vorbehandlungen oder Einsatz von Katalysatoren) beobachtet wurden (Sèbe 2004, Tingaut 2005, Tingaut 2006).

Tabelle 19: Nachweis von chemische Bindungen zwischen Hydrophobierungsmitteln und Holzsubstanz (gemäss FTIR-/Raman-Spektroskopie)

Nanoperl	Cellulose	Lignin	Hemicellulose	Inhaltsstoffe
118	-	-	?	?
119	-	+	?	?
118F	?	?	?	?

Legende: - +: chemische Bindung bestätigt
 - -: keine chemische Bindung feststellbar
 - ?: nicht untersucht

3.1.1.3 Benetzungsverhalten

Die Kontaktwinkel an Wassertropfen auf den hydrophobierten, unbewitterten Holzoberflächen sind in Bild 23 dargestellt.

Bewertung:

- Bei den einzelnen Hydrophobierungsmitteln ergeben sich deutlich unterschiedliche Kontaktwinkel. Sehr hohe Kontaktwinkel von ca. 140° zeigen sich bei NP 118F und 118FAG, eher geringe von ca. 90° bei NP 310523.
- Die Streuung der Kontaktwinkel innerhalb und zwischen den Proben liegt in etwa in der gleichen Grössenordnung (Standardabweichung ca. 5 Grad).
- Die Holzart beeinflusst den Kontaktwinkel offenbar nur geringfügig.

Von ganz besonderem Interesse ist die Veränderung des Kontaktwinkels durch eine Bewitterung der Oberfläche, da damit die Dauerhaftigkeit der Hydrophobierungswirkung (Abperleffekt) aufgezeigt werden kann (Bild 24).

Bild 23: Kontaktwinkel auf verschiedenen hydrophobierten, unbewitterten Holzoberflächen. Die Fehlerbalken zeigen die Streuung (Standardabweichung) zwischen den Mittelwerten von je 6 Wiederholungsproben (je 4 Einzelmessungen pro Probe).

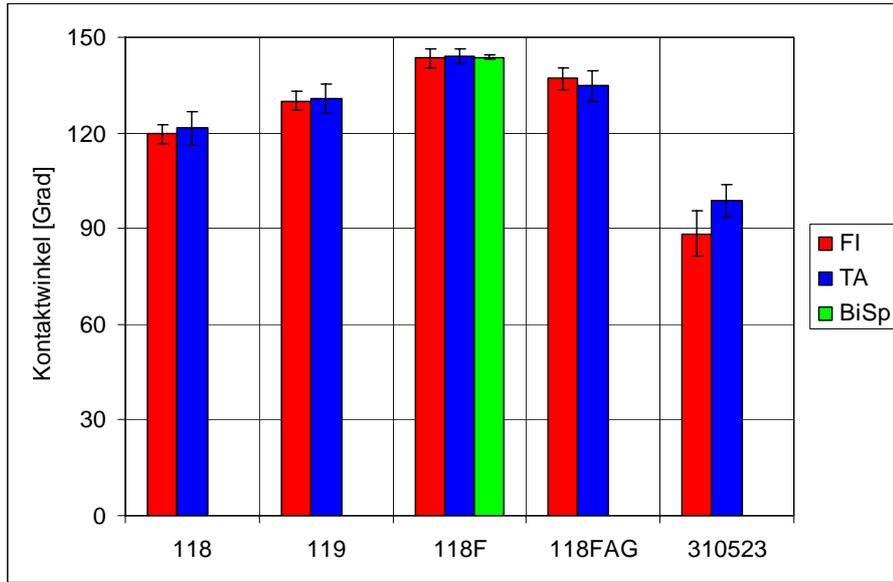
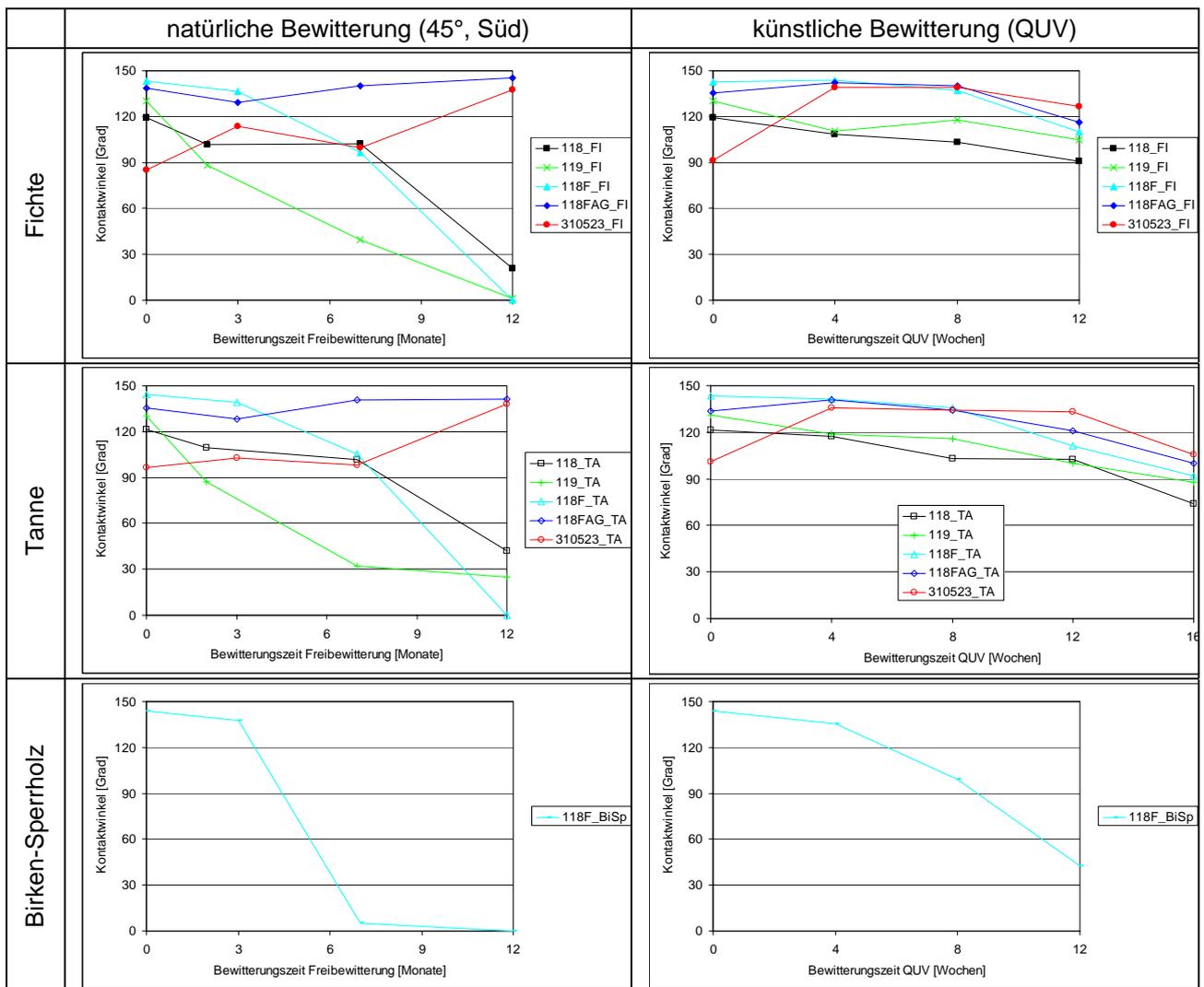


Bild 24: Veränderung des Kontaktwinkels auf verschiedenen hydrophobierten Holzoberflächen während natürlicher und künstlicher Bewitterung



Bewertung (unter Annahme vergleichbarer Wetterbeanspruchung in den unterschiedlichen Bewitterungsperioden bei der natürlichen Bewitterung):

- Der Kontaktwinkel nimmt bei den meisten Hydrophobierungsmitteln während der Bewitterung mehr oder weniger rasch ab, wobei er in einer Anfangsphase zuerst relativ konstant bleibt und erst bei fortgesetzter Bewitterung stärker abfällt (Bild 24). Die Abnahme der Kontaktwinkel ist zumindest teilweise auf einen bewitterungsbedingten, oberflächlichen Materialabtrag in der hydrophobierten Oberflächenzone zurückzuführen (siehe auch Befund Mikrosondenuntersuchungen, Bild 21). Die Differenzierung zwischen den verschiedenen Hydrophobierungsmitteln und die Abnahme der Kontaktwinkel sind vermutlich als Folge von Unterschieden beim Befall durch Schimmel- und Bläuepilze sowie bei der Kontamination der Oberfläche durch Schmutzpartikel bei der natürlichen Bewitterung deutlich ausgeprägter als bei der künstlichen.
- Die einzelnen Hydrophobierungsmittel zeigen vor allem in der Freibewitterung ein recht charakteristisches Verhalten. Während die Wirkung von NP 119 von Beginn an rasch abnimmt, bleibt sie bei NP 118 und 118F für eine beschränkte Zeit erhalten. Demgegenüber sind bei NP 118FAG und 310523 selbst nach 12 Monaten Freibewitterung noch hohe Kontaktwinkel vorhanden, welche insbesondere bei NP 310523 sogar leicht höher liegen als die Anfangswerte (Aktivierung von zusätzlichen Bindungen durch UV-Strahlung?). Bei einer länger dauernden künstlichen Bewitterung zeigt sich bei allen Hydrophobierungsmitteln ein zunehmender Verlust des Kontaktwinkels (Bild 24, Mitte rechts).
- Das Verhalten der Hydrophobierungsmittel auf Fichte und Tanne ist sehr ähnlich. Auf Birkensperrholz ist NP 118F deutlich weniger dauerhaft.
- Die Dauerhaftigkeit einer derartigen Hydrophobierung an einer vertikalen, evtl. z.T. wettergeschützten Fassade wurde nicht untersucht. Die Wirksamkeit dürfte jedoch deutlich länger andauern.

3.1.2 Beschichtung

Tabelle 20 enthält die in EN 927-1 definierte Einteilung der Beschichtungssysteme nach dem Aussehen (Fülle, Deckvermögen und Glanz). Zur (gesamten) Schichtdicke tragen sowohl die Grundierungen wie auch die Deckschicht bei. Deckvermögen und Glanz werden weitgehend durch die Deckschicht allein bestimmt.

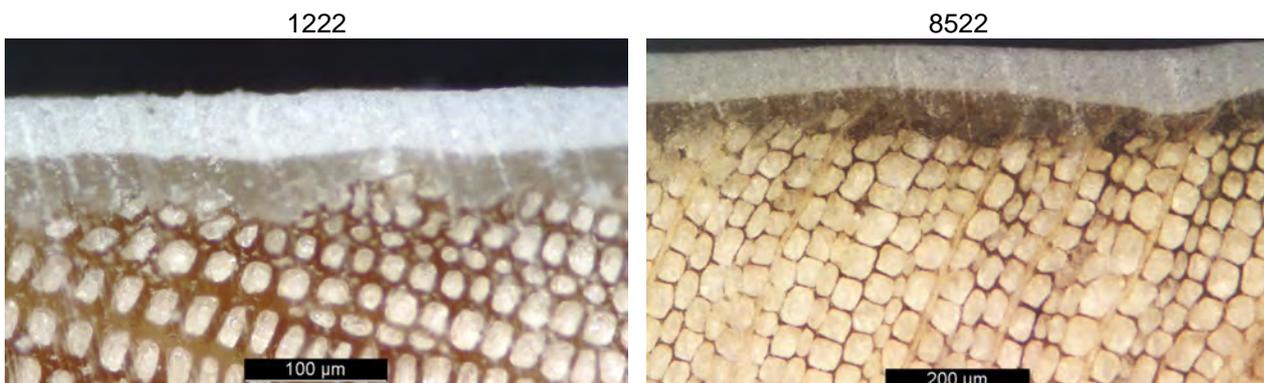
Tabelle 20: Einteilung der Beschichtungssysteme nach dem Aussehen gemäss EN 927-1

Eigenschaft	Deckschicht 1-5 'Eterno 36'	Deckschicht 6 'Nanocoat'
Fülle (Schichtdicke)	hoch	hoch
Deckvermögen	deckend	deckend
Glanz	halbmatt (Glanz 60°: 15)	halbmatt (Glanz 60°: 25)

3.1.2.1 Beschichtungsaufbau

Bei der visuellen Beurteilung der Beschichtungsaufbauten anlässlich der Bestimmung der Trockenschichtdicke unter dem Lichtmikroskop zeigten sich verschiedene Unzulänglichkeiten. In Bild 25 sind zwei Beispiele eines 'idealen' Beschichtungsaufbaus dargestellt. Die Grundierung ist in der Holzoberfläche verankert und weist eine gleichmässige, nicht zu geringe Schichtdicke auf.

Bild 25: 'Idealer' Beschichtungsaufbau mit relativ dicker, gleichmässiger Grundierungsschicht



Bei den untersuchten Beschichtungsvarianten wurden folgende (verbreitete) Unzulänglichkeiten beobachtet:

- gequetschte Holzzellen durch mechanische Oberflächenbearbeitung (Hobeln, Schleifen) (Bild 26, links).
- mit Decklack gefüllte Risse in der Grundierung (Bild 26, rechts).
- Dünne, verschliffene oder fehlende Grundierung (Bilder 27 und 28).
- Applikationsbedingte (?) Blasen in Grundierung (Bild 29).
- Störendes Perlglanzpigment in Nanocoat-System (Bild 30).

Bild 26: Unregelmässigkeiten im Beschichtungsaufbau: Gequetschte Holzzellen (links) und mit Decklack gefüllte Risse in Grundierung (rechts)

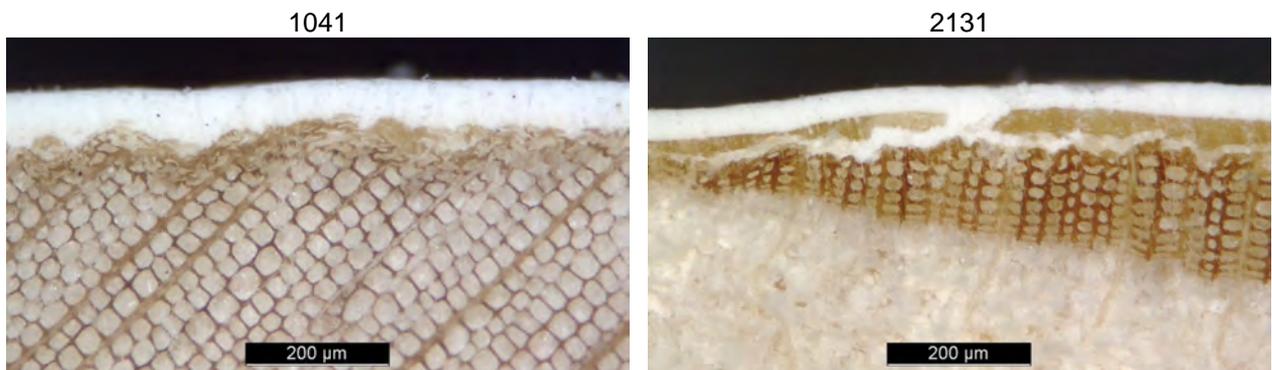


Bild 27: Unregelmässigkeiten im Beschichtungsaufbau: Dünne (links) und verschliffene Grundierung (rechts)

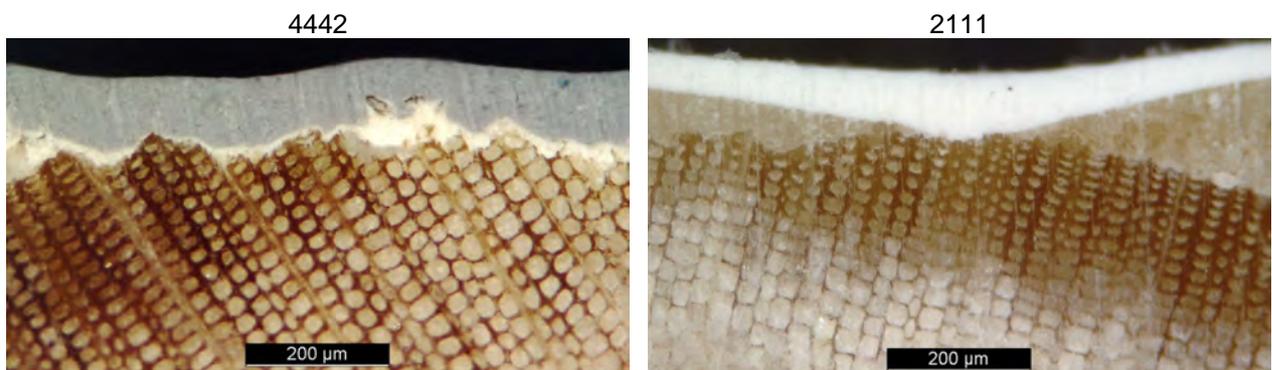


Bild 28: Unregelmässigkeiten im Beschichtungsaufbau: Links: Fehlende oder weggeschliffene Grundierung, rechts: Ausschnitt aus gleicher Proben mit vorhandener Grundierungsschicht

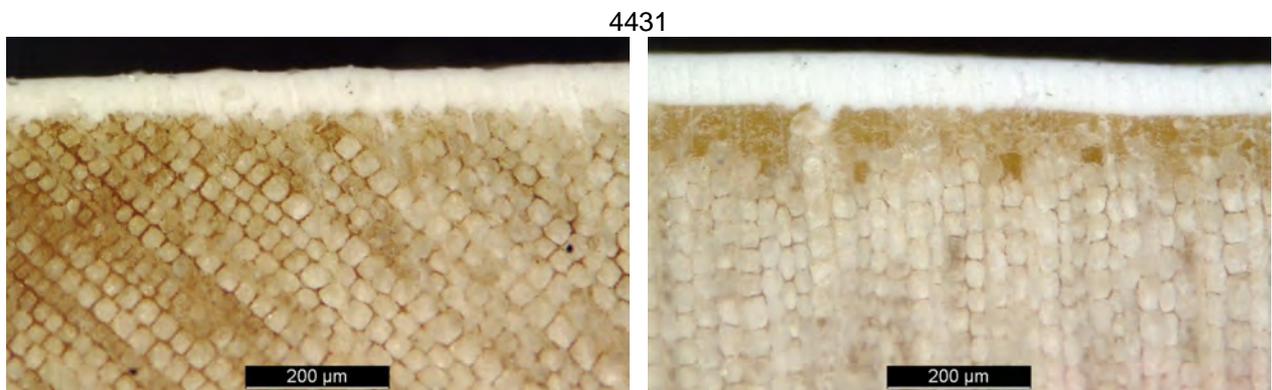


Bild 29: Unregelmässigkeiten im Beschichtungsaufbau: Blasen in Grundierung

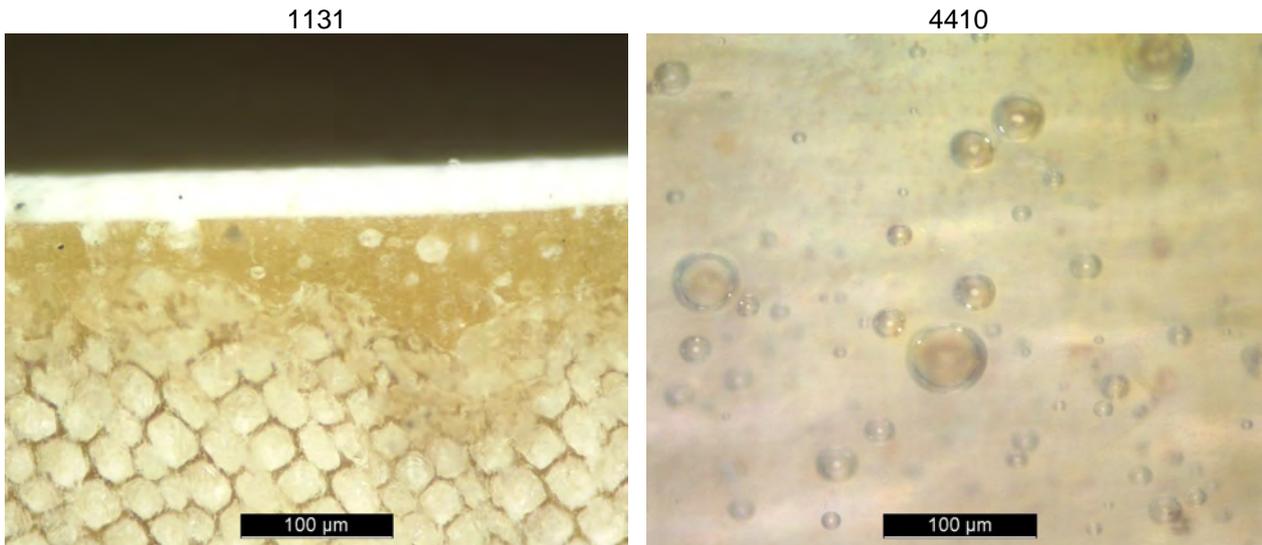
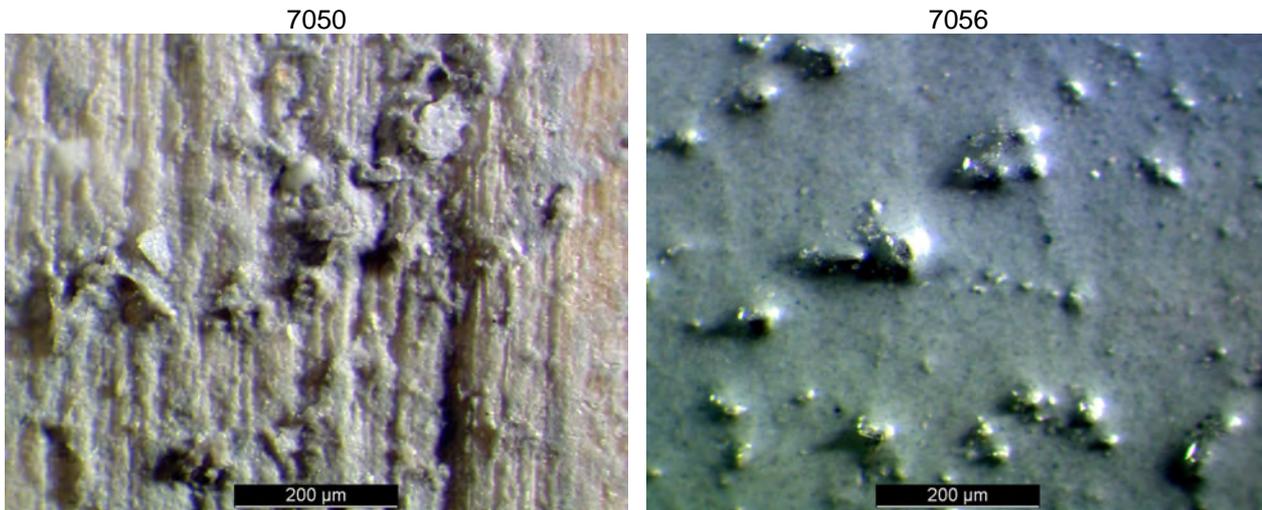


Bild 30: Unregelmässigkeiten im Beschichtungsaufbau: Aufgerichtete, schichtdurchbrechende Perlglanzpigment-Partikel in Nanocoat-Grundierung (links) und Nanocoat-Deckschicht (rechts)



Bewertung:

- Bei der deckenden Beschichtung von Holz können sich verschiedene system- oder applikationsbedingte Unzulänglichkeiten im Beschichtungsaufbau ergeben, welche schlussendlich die Dauerhaftigkeit der Beschichtung beeinträchtigen. Für die Optimierung eines Beschichtungssystems ist es wichtig, diese Unzulänglichkeiten zu erkennen und zu beheben.

Interessante Beobachtungen zum Beschichtungsaufbau ermöglichen auch Mikrosonden-Aufnahmen von komplett beschichteten Holzproben (Bilder 31 bis 33). Einander gegenübergestellt sind jeweils Bilder aus dem Rasterelektronenmikroskop (REM) und die Silizium- (Si) oder Fluor (F)-Detektionsbilder von zwei gleichen Beschichtungsaufbauten, jedoch jeweils ohne oder mit einer vorgängigen Hydrophobierung der Holzoberfläche.

Bewertung:

- Die hydrophobierte Holzoberfläche unter der Beschichtung ist gut zu erkennen (z.B. Bild 31, rechts unten) und entspricht den Beobachtungen an nur hydrophobierten Holzoberflächen (siehe Bild 20).
- In den Grundierungen wie auch in den Deckschichten ist relativ viel Si vorhanden, dessen Herkunft nicht ganz geklärt ist. Teilweise ist eine deutliche Abgrenzung zwischen Grundierung und Decklack vorhanden (Bild 33, Mitte links).

- Mittels Fluor-Detektion gut erkennbar ist auch die mit einer perfluorierten, brushtype Acrylatdispersion modifizierte Deckschicht 5 (Bilder 32 und 33), welche sich auch nach einer 12-wöchigen künstlichen Bewitterung unverändert zeigt (Bild 33, rechts unten).
- Bei den hydrophobierten Holzoberflächen war häufig eine Ablösung des Beschichtungsfilms während der Probenpräparation zu beobachten (z.B. Bild 33). Gut erkennbar sind wiederum auch Blasen in der Grundierung (Bild 33).

Bild 31: Beschichtungsaufbau mit Grundierung 1: Ohne (links) und mit (rechts) Hydrophobierung der Holzoberfläche (unbewittert)

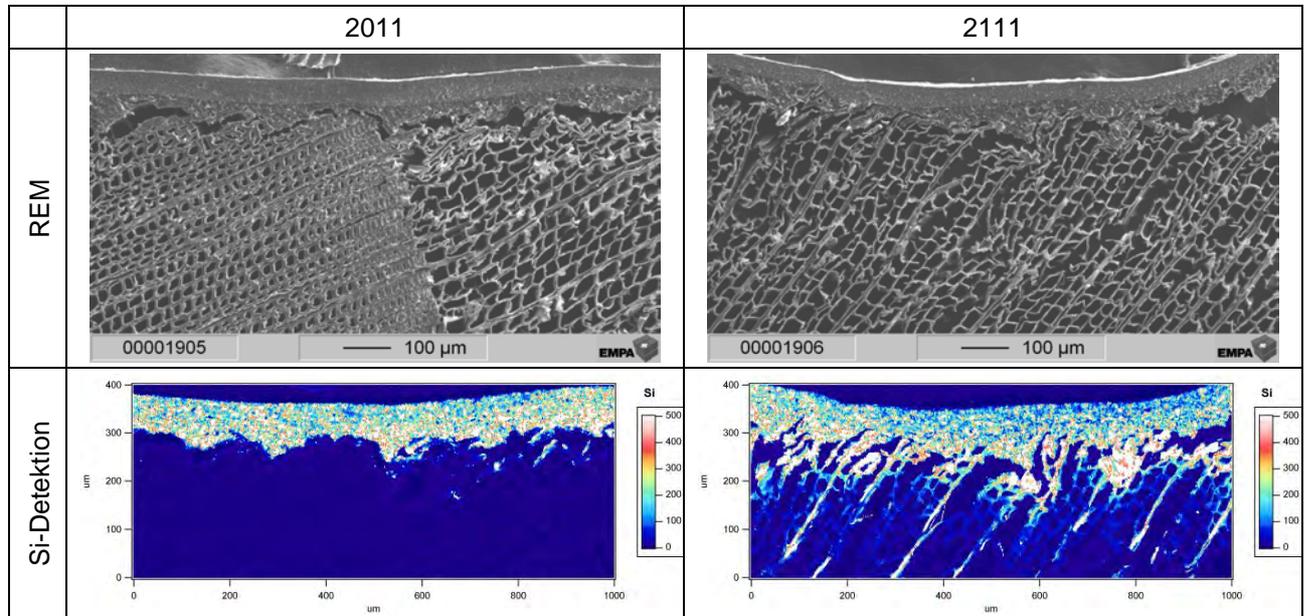


Bild 32: Beschichtungsaufbau mit Grundierung 4: Hydrophobierte Deckschicht (unbewittert)

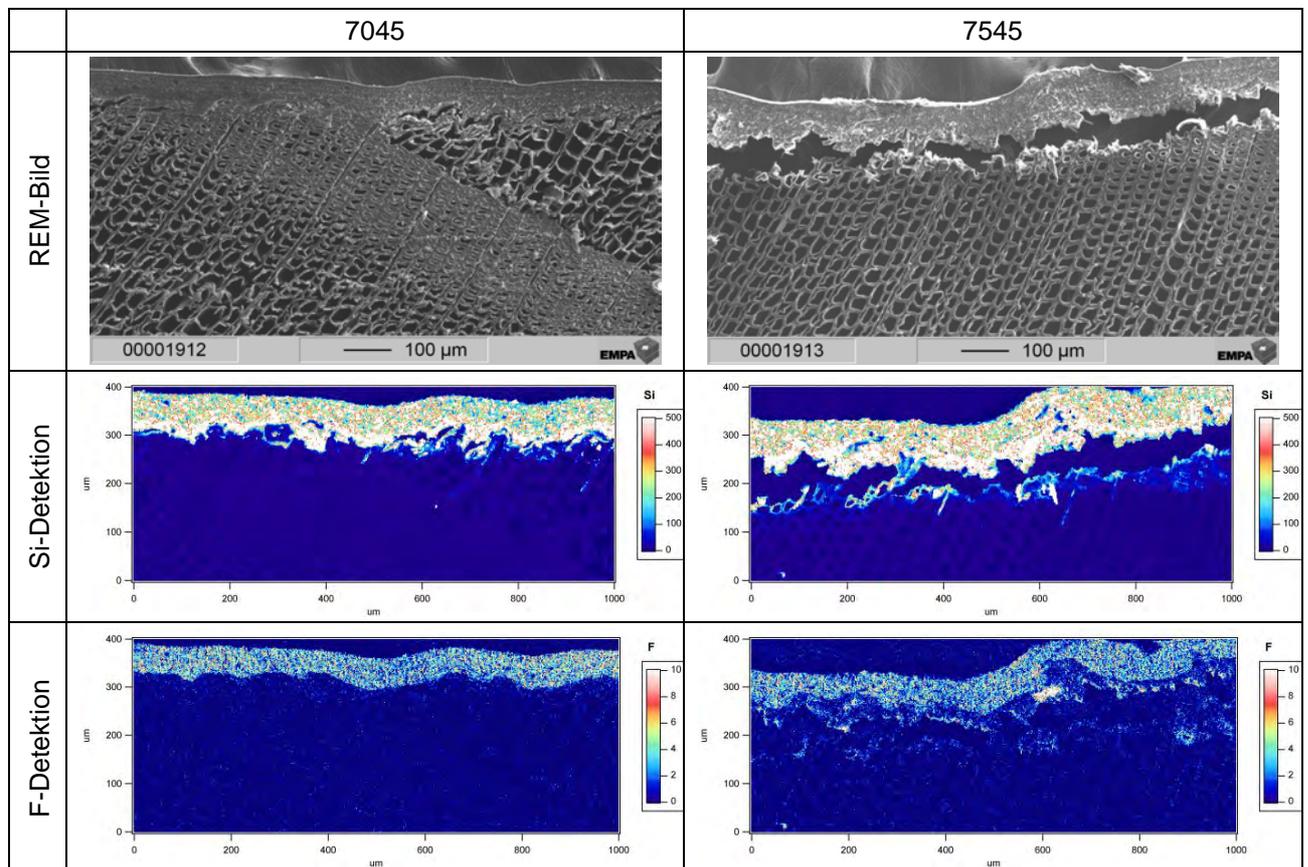
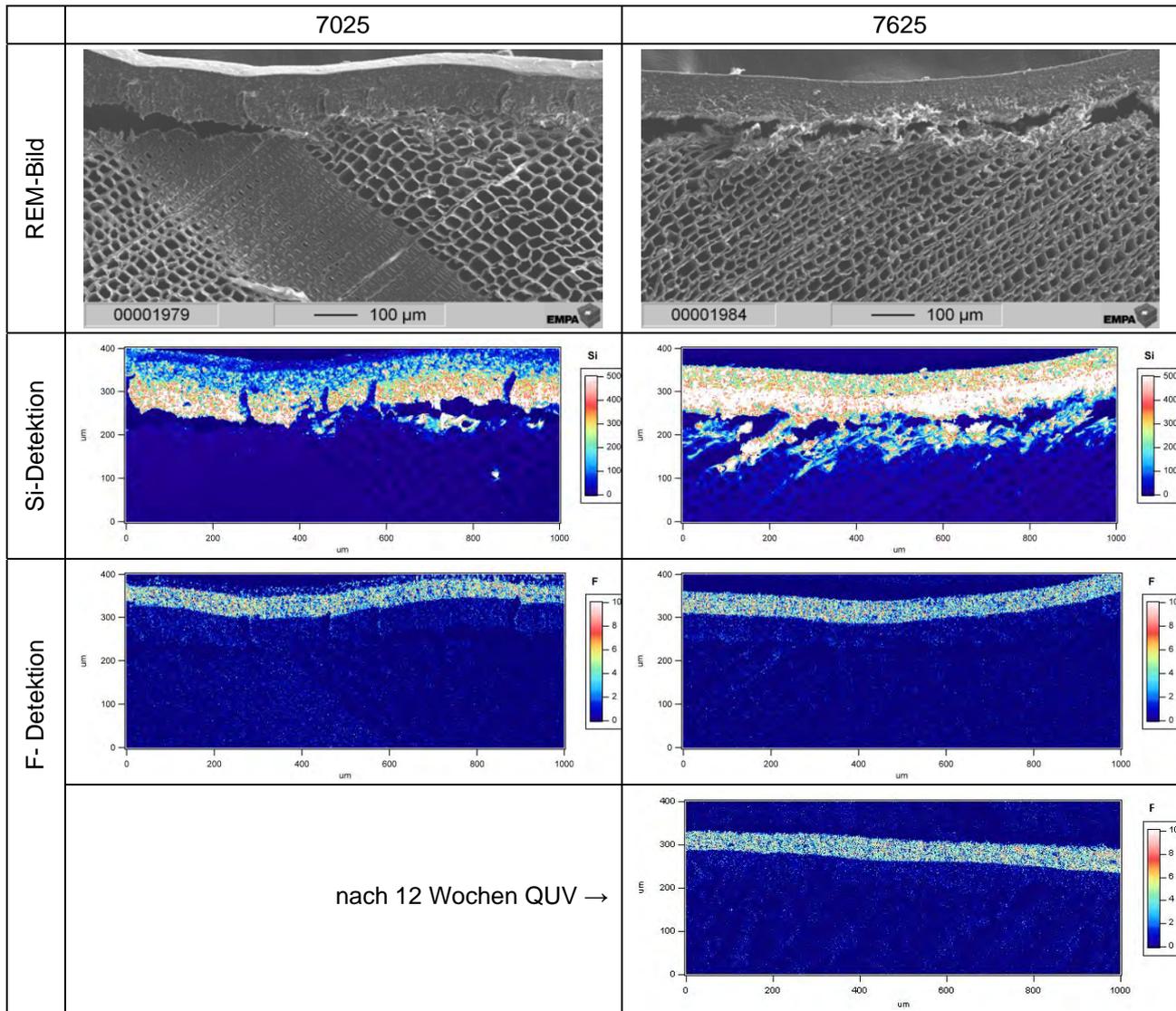


Bild 33: Beschichtungsaufbau mit Grundierung 2: Hydrophobierte Deckschicht (unbewittert und bewittert)



3.1.2.2 Trockenschichtdicke

In den Bildern 34 bis 36 sind die Messungen der Trockenschichtdicken dokumentiert. Details zu den Auftragsmengen sind in den Applikationsberichten der Wirtschaftspartner enthalten (siehe Anhang A2).

Bewertung:

- Die Gesamtschichtdicken betragen im Vorversuch 50 bis 70 µm und in den Hauptversuchen 65 bis 130 µm. Die relativ grosse Streubreite bei den Hauptversuchen beruht vorwiegend auf unterschiedlich dicken Grundierungsschichten (10 bis 70 µm). Die Deckschichten waren relativ konstant zwischen 40 und 60 µm dick.
- Aufgrund der geringen Schichtdicke der lösemittelbasierten Alkyd-Grundierung (siehe Bild 27, links) weisen in den Hauptversuchen die Beschichtungsvarianten mit der Grundierung 4 die geringsten Gesamtschichtdicken auf. Demgegenüber zeigen die Varianten mit der wässrigen UV Grundierung (GR 2) die grössten Schichtdicken.
- Im Hauptversuch 2 wurden die nachfolgend mit einer Deckschicht versehenen Grundierungen zu stark, die nur grundierten Täferbretter (irrtümlich) überhaupt nicht zwischen geschliffen. An den Unterschieden der entsprechenden Schichtdicken zeigt sich, dass durch den zu starken Zwischenschliff ein beträchtlicher Teil der aufgetragenen Schichtdicke weggeschliffen wurde (Bild 36). Lokal waren die Grundierungen sogar ganz durchgeschliffen (siehe Bild 27, rechts).
- Für viele Leistungsparameter (z.B. Feuchteschutz) ist die Schichtdicke ein bestimmender Faktor und muss daher bei der Interpretation der Ergebnisse unbedingt berücksichtigt werden.

Bild 34: Trockenschichtdicke: Vorversuch (GR und DS waren teilweise nicht unterscheidbar)

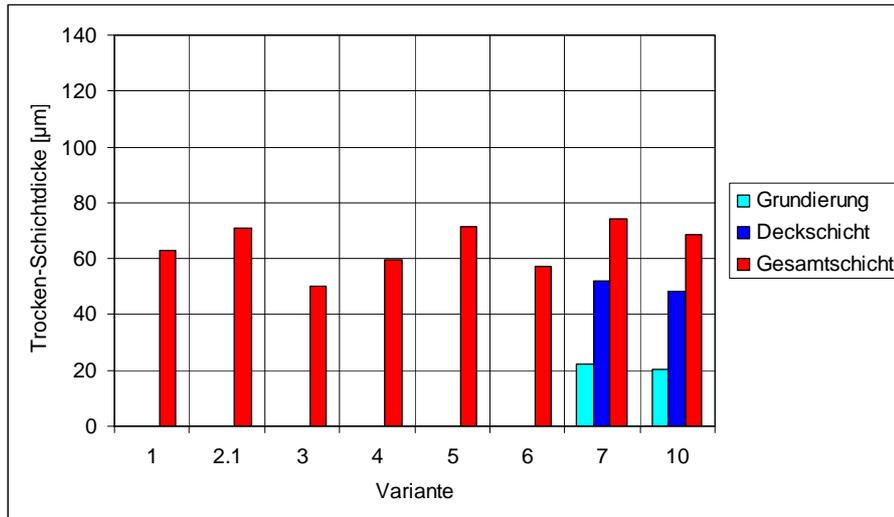


Bild 35: Trockenschichtdicke: Hauptversuche 1-3

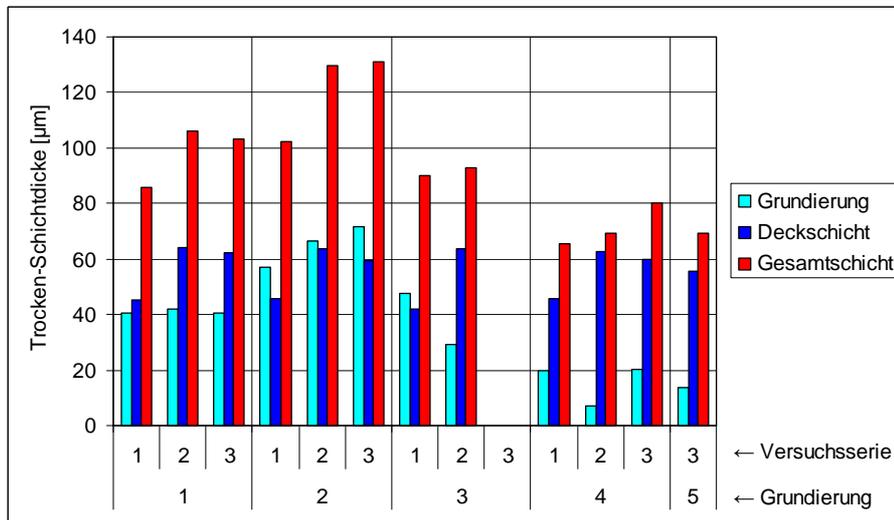
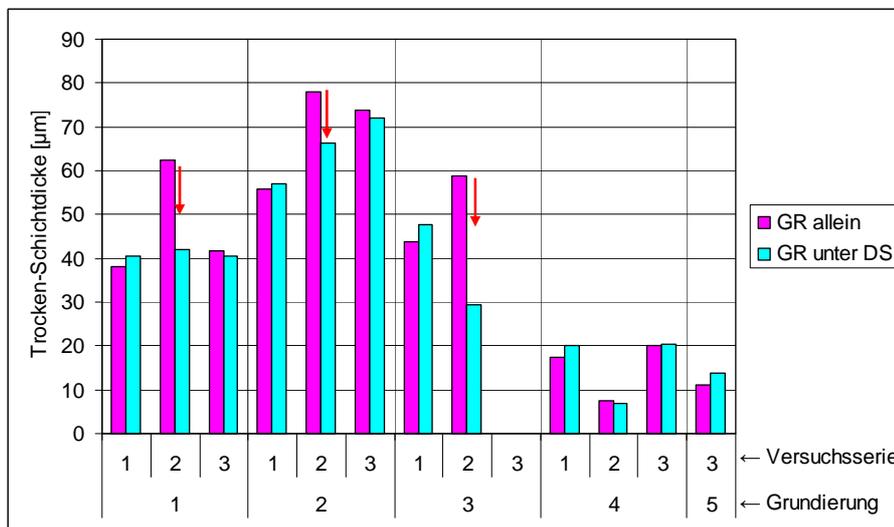


Bild 36: Trockenschichtdicke: Vergleich der Schichtdicke der Grundierung bei 'nur Grundierung' und im Gesamtsystem ('unter Deckschicht'). Die roten Pfeile zeigen die Auswirkung eines zu starken Zwischenschliffes im Hauptversuch 2 an.



3.1.2.3 Benetzungsverhalten

Analog zu den Messungen auf den hydrophobierten Holzoberflächen (siehe Kapitel 3.1.1.3) wurden auch die Kontaktwinkel an Wassertropfen auf den Deckschichten gemessen. Die Kontaktwinkel bei den unbewitterten Proben sind in den Bildern 37 bis 39 dargestellt. Die Fehlerbalken zeigen die Streuung (Standardabweichung) zwischen den Mittelwerten von jeweils 3 bis 6 Wiederholungsproben.

Bild 37: Kontaktwinkel auf den unbewitterten Deckschichten des Vorversuches

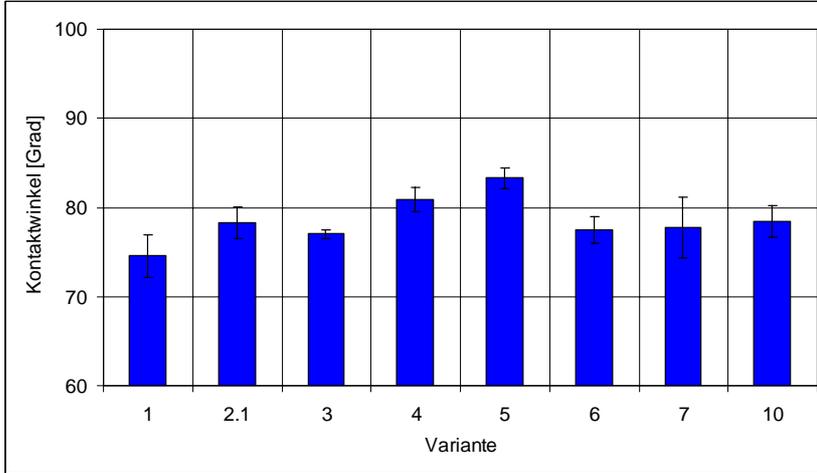


Bild 38: Kontaktwinkel auf den unbewitterten Deckschichten der Hauptversuche 1 und 3: Einfluss von Holzart, Deckschicht und Grundierung (Beschichtungsvarianten ohne Hydrophobierung)

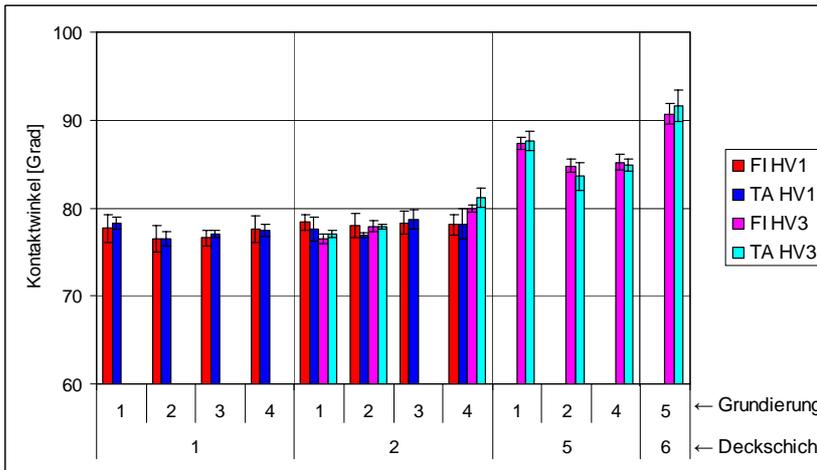
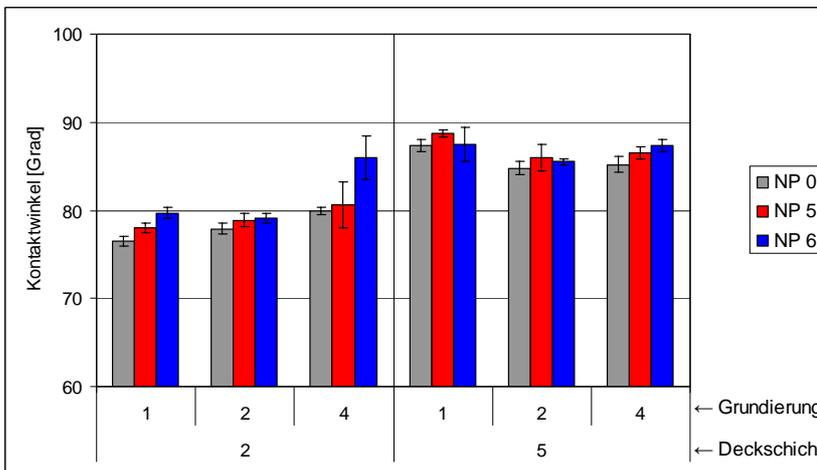


Bild 39: Kontaktwinkel auf den unbewitterten Deckschichten des Hauptversuches 3: Einfluss von Deckschicht, Grundierung und Hydrophobierungsmittel (Holzart: FI)

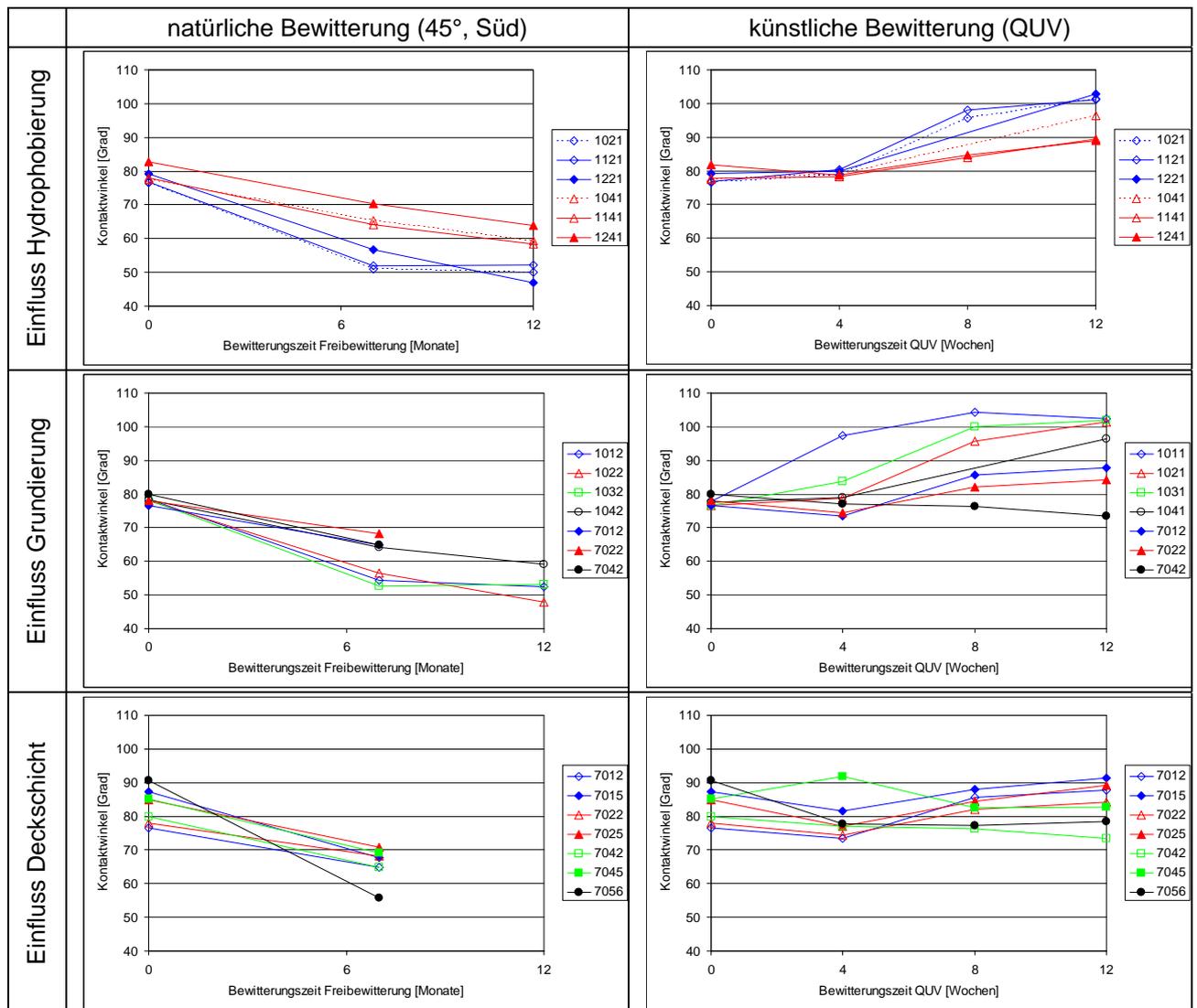


Bewertung:

- Die Kontaktwinkel auf den unbewitterten 'Standard'-Deckschichten 1 und 2 (Eterno 36) liegen im Bereich zwischen 75 und 85°. Mit 85° resp. 90° sind die Kontaktwinkel bei den hydrophob eingestellten Deckschichten 5 (Eterno 36) und 6 (Nanocoat) zwar leicht höher (Bilder 38 und 39), erreichen aber nicht die Werte der hydrophobierten Holzoberflächen (siehe Bild 23).
- Unterschiedliche Kontaktwinkel bei identischer Deckschicht sind auf Unterschiede im Substrat (Holzart, Oberflächenqualität, Hydrophobierung) und die Art der Grundierung zurückzuführen. Bei den relativ geringen Streuungen der gemessenen Kontaktwinkel können schon kleine Differenzen von wenigen Grad statistisch signifikant sein.
- Insbesondere der Einfluss einer vorgängigen Hydrophobierung der Holzoberflächen ist selbst auf der Deckschicht noch feststellbar (Bild 39). Siehe dazu auch Kapitel 4.3.

Die Veränderung des Kontaktwinkels durch die Bewitterung der Oberfläche ergibt Hinweise auf den Zustand der Deckschicht und die Dauerhaftigkeit der entsprechenden Beschichtung (Bild 40).

Bild 40: Veränderung des Kontaktwinkels auf der Deckschicht während natürlicher (linke Spalte) und künstlicher Bewitterung (rechte Spalte). Beispiele des Einflusses der Hydrophobierung der Holzoberfläche (oben), der Grundierung (Mitte) und der hydrophobierten Deckschichten (unten) bei den jeweils gleichen Beschichtungsvarianten während natürlicher und künstlicher Bewitterung.



Bewertung:

- Die Kontaktwinkel auf der Deckschicht verändern sich je nach Bewitterungsart unterschiedlich. Vermutlich infolge der oberflächlichen Verschmutzung (siehe auch Kontaktwinkel auf hydrophobierten Holzoberflächen, Kapitel 3.1.1.3) nimmt bei der natürlichen Bewitterung der Kontaktwinkel kontinuierlich ab, während er bei der künstlichen Bewitterung im beobachteten Zeitraum konstant bleibt oder sogar etwas ansteigt. Dieser Anstieg hängt vermutlich mit dem vor allem bei Acrylaten bekannten Effekt der Auswaschung von hydrophilen Hilfsstoffen im Anfangsstadium der Bewitterung zusammen.
- Der Einfluss einer vorgängigen Hydrophobierung der Holzoberfläche auf den Verlauf des Kontaktwinkel bei der Bewitterung ist gering (Bild 40, oben). Wie schon bei den anfänglichen Kontaktwinkeln, ist aber ein gewisser Einfluss der darunter liegenden Grundierung erkennbar (Bild 40, Mitte).
- Beim modifizierten Decklack 5 lässt sich die erwartete Verstärkung der Hydrophobie während der Bewitterung nicht beobachten (Bild 40, unten). Siehe dazu auch Kapitel 4.8.
- Beim Decklack 6 (Nanocoat) sinkt der anfänglich relativ hohe Kontaktwinkel stärker als bei den Acrylat-Deckschichten 2 und 5 (Bild 40, unten).

3.2 Feuchteschutzwirkung

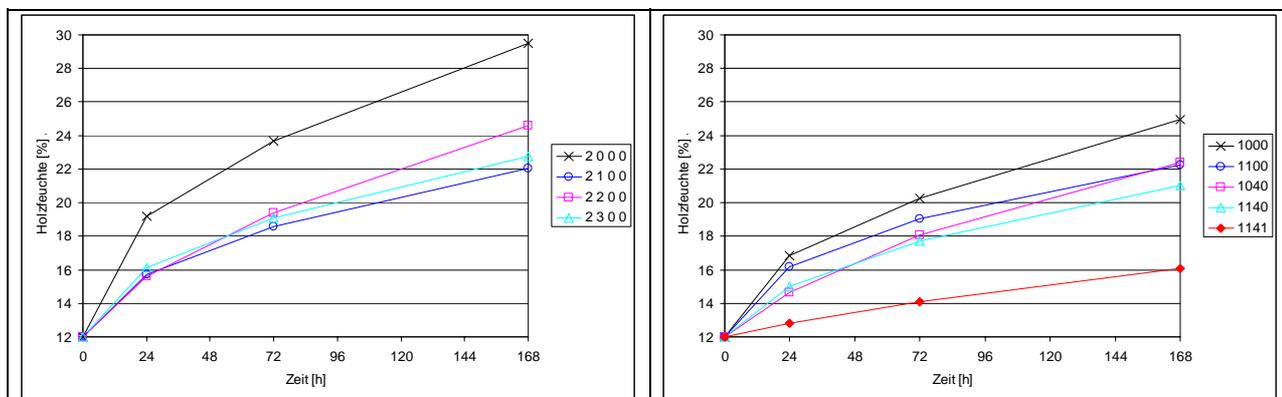
Die Untersuchung der Feuchteschutzwirkung der Beschichtungssysteme ist in diesem Projekt von ganz besonderer Bedeutung, da mit der zusätzlichen Hydrophobierung genau dieser Aspekt gezielt verbessert werden soll. Das primäre Ziel einer Feuchteschutzbehandlung von Fassadentäfer ist es, die Feuchtwchsel im Substrat zu minimieren und damit die Dimensionsstabilität des Substrates zu erhöhen respektive die Rissbildung im Holz zu verringern.

Bezüglich Wirkmechanismen ist eine klare Unterscheidung der Feuchteaufnahmen in flüssiger (kapillare Wasseraufnahme) oder dampfförmiger Form (Dampfdiffusion) notwendig (siehe Bild 1). Die durchgeführten Normversuche im Labor streben zwar eine Trennung der beiden Arten der Feuchteaufnahme an, beim Wasserdurchlässigkeits-Test erfolgt ein Teil der Feuchteaufnahme jedoch ebenfalls durch Diffusion. In der Freibewitterung kann zwischen den beiden Arten der Feuchteaufnahme nicht unterschieden werden.

3.2.1 Wasser- und Wasserdampfdurchlässigkeit

Ein detailliertes Bild zur Feuchteschutzwirkung einer Behandlung erhält man aus dem Verlauf der Feuchteaufnahme im Normversuch gemäss EN 927-5 (Bild 41). Bereits aus diesen Beispielen geht klar hervor, dass ein substantieller Feuchteschutz erst bei einem kompletten Systemaufbau erreicht wird und dass die Zwischenschichten nur einen partiellen Feuchteschutz bieten.

Bild 41: Beispiele von Feuchteaufnahmen im Normversuch zur Wasserdurchlässigkeit gemäss EN 927-5. Links: Wirkung verschiedener Hydrophobierungen, rechts: Wirkung verschiedener Schichten eines Beschichtungssystems



Ein Vergleich der Feuchteschutzwirkung der vielen Versuchsvarianten ist anhand der Feuchteaufnahme-Kurven kaum möglich, sondern erfolgt unter Verwendung der abgeleiteten Kenngrössen (siehe Kapitel 2.3.2.1) in den Bildern 42 bis 52.

Als Kennwerte für die Feuchteschutzwirkung einer Behandlung werden sowohl die flächenbezogene Wasseraufnahme in g/m^2 nach 72 h als auch der Wasseraufnahmekoeffizient in $\text{g}/(\text{m}^2 \cdot \sqrt{\text{h}})$ verwendet. Mit dem ersten Kennwert wird vor allem die absolute Wasseraufnahme bewertet, während der Wasseraufnahmekoeffizient die Dynamik der Feuchteaufnahme ausdrückt. Für die umfassende Bewertung der Feuchteschutzwirkung sind beide Aspekte zu berücksichtigen.

Die EN-Norm EN 927-2 sieht je nach vorgesehener Anwendung resp. erforderlicher Masshaltigkeit einen Grenzwert für die Feuchteschutzwirkung einer Beschichtung vor. Für masshaltige Bauteile darf die Wasserdurchlässigkeit (flächenbezogene Wasseraufnahme nach 72 h) nicht grösser als $175 \text{ g}/\text{m}^2$, für beschränkt masshaltige nicht grösser als $250 \text{ g}/\text{m}^2$ sein.

Im Vorversuch und in den Hauptversuchen 1 und 2 wurde sowohl die Wasser- als auch die Wasserdampfdurchlässigkeit gemessen. Im Hauptversuch 3 wurde aufgrund der nur geringen Zusatzinformation resp. der guten Korrelation (bei beschichteten Proben) auf die Erfassung der Wasserdampfdurchlässigkeit verzichtet.

Das Ausmass der Feuchteschutzwirkung (vor der Bewitterung) bei den lediglich hydrophobierten Proben (ohne Beschichtung) ist in den Bildern 42 und 43 dokumentiert. Deren Dauerhaftigkeit bei einer natürlichen Bewitterung geht aus Bild 44 hervor.

Bild 42: *Aufnahmekoeffizient für Wasser- und Wasserdampf der unbehandelten und der lediglich hydrophobierten Proben (ohne Beschichtung) aus den Hauptversuchen 1 bis 3 (Die Wasserdampfdurchlässigkeit wurde nur im HV1 und 2 gemessen)*

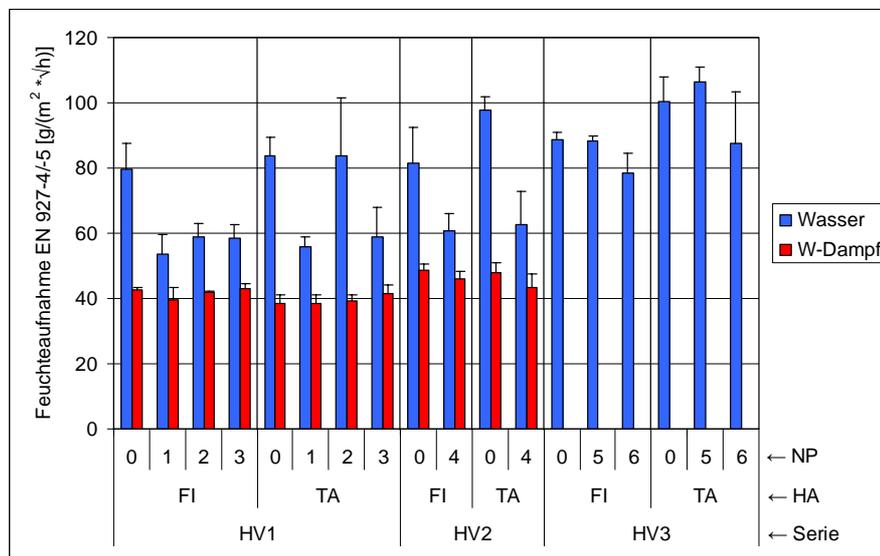


Bild 43: *Flächenbezogene Wasseraufnahme nach 72 h der unbehandelten und der lediglich hydrophobierten Proben (ohne Beschichtung) aus den Hauptversuchen 1 bis 3*

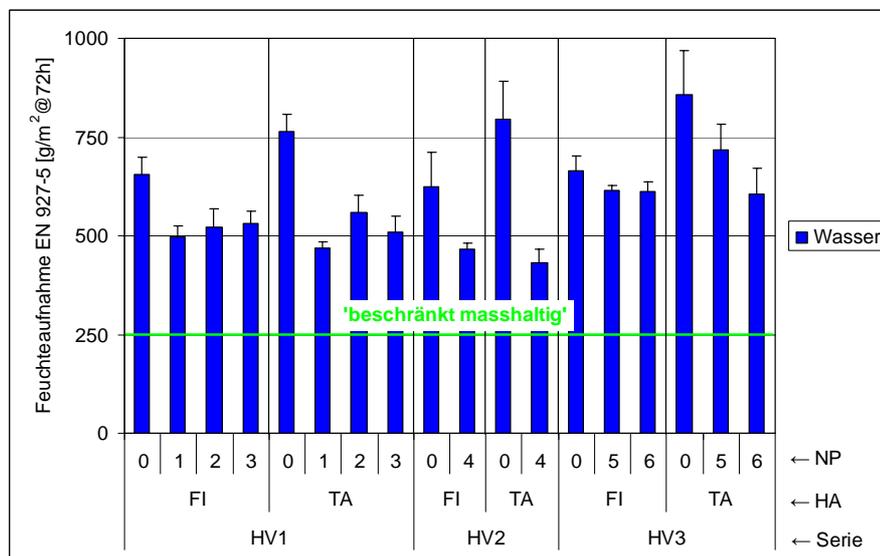
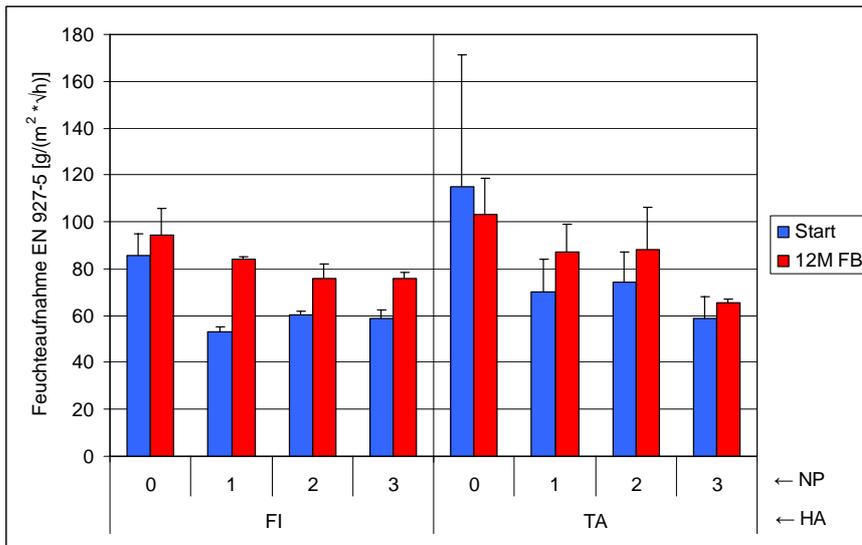


Bild 44: Wasseraufnahmekoeffizienten der unbehandelten und der lediglich hydrophobierten Proben (ohne Beschichtung) vor und nach 12 monatiger Freibewitterung im Hauptversuch 1 (Probengrösse 360x100 mm)



Bewertung (lediglich hydrophobierte Proben):

- Die Feuchteaufnahme der Proben im Flüssigwasser ist deutlich intensiver als im Wasserdampf (Bild 42). Die Hydrophobierung bewirkt eine Verminderung der Wasserdurchlässigkeit, zeigt jedoch erwartungsgemäss keine Wirkung bei der Feuchteaufnahme durch Wasserdampf. Die Unterschiede zwischen den verschiedenen Hydrophobierungsmitteln sind wenig ausgeprägt. Deren Wirkung im HV3 ist eher gering.
- Die zwei verwendeten Kennwerte (flächenbezogene Wasseraufnahme oder den Wasseraufnahmekoeffizienten) ergeben teilweise leicht unterschiedliche Aussagen zur Wirkung der Hydrophobierung (z.B. bezüglich NP 5 im HV3, Bilder 42 und 43).
- Bei Tanne ist wegen der gegenüber Fichte höheren Permeabilität bei einzelnen Proben eine stark erhöhte Wasseraufnahme zu beobachten, welche auch durch eine Hydrophobierung nur teilweise kompensiert wird (z.B. TA mit NP 2 im HV1).
- Nach einer 12 monatigen Freibewitterung lässt die Wirkung des Schutzes gegen eine Flüssigwasseraufnahme deutlich nach, ist aber im Vergleich zu unbehandeltem Holz noch immer erkennbar (Bild 44).

Die Feuchteschutzwirkung der kompletten Beschichtungssysteme im Ausgangszustand (vor der Bewitterung) ist in den Bildern 45 bis 51 dargestellt. Die Veränderung der Feuchteaufnahme durch eine künstliche Bewitterung geht aus Bild 52 hervor.

Bild 45: Aufnahmekoeffizient für Wasser- und Wasserdampf der kompletten Beschichtungssysteme im Vorversuch

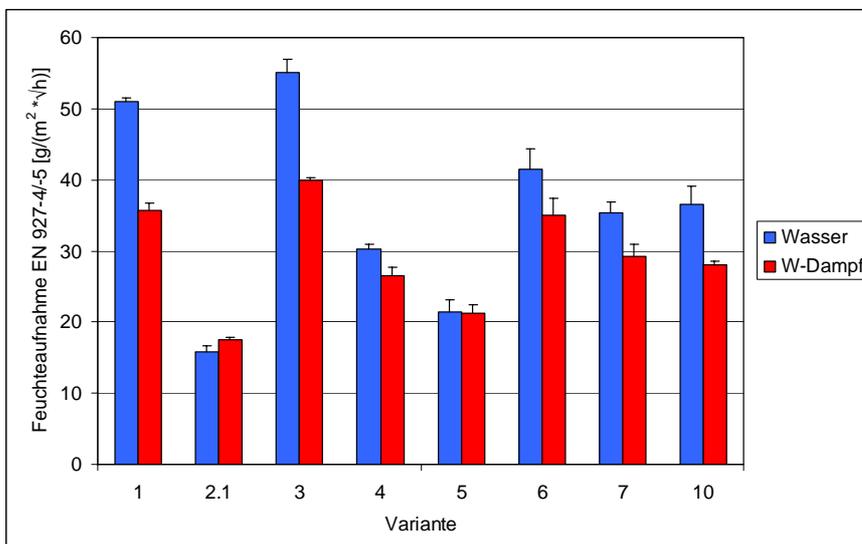


Bild 46: Einteilung der kompletten Beschichtungssysteme im Vorversuch nach den Grenzwerten für die flächenbezogene Wasseraufnahme gemäss EN 927-2

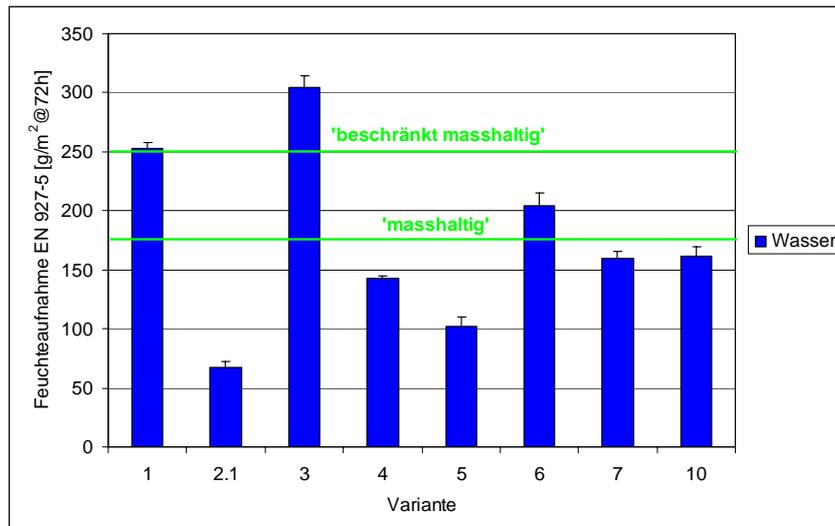


Bild 47: Aufnahmekoeffizient für Wasser- und Wasserdampf der kompletten Beschichtungssysteme in den Hauptversuchen 1+2 (DS 1)

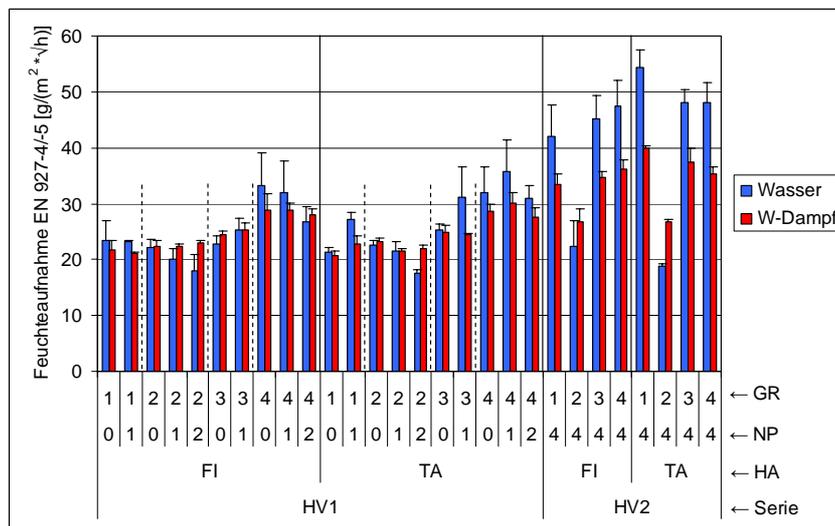


Bild 48: Wasseraufnahmekoeffizienten der lediglich grundierten Proben und der kompletten Beschichtungssysteme in den Hauptversuchen 1+2 (DS 1)

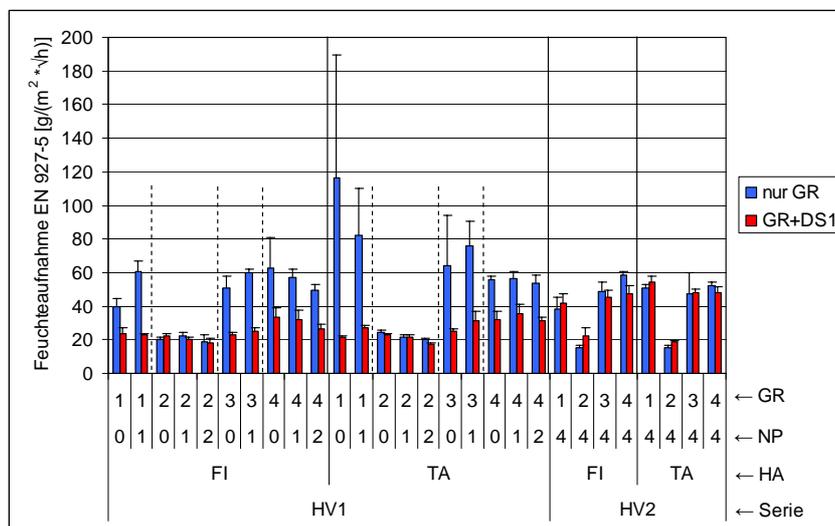


Bild 49: Wasseraufnahmekoeffizienten der lediglich grundierten Proben und der kompletten Beschichtungssysteme im Hauptversuch 3

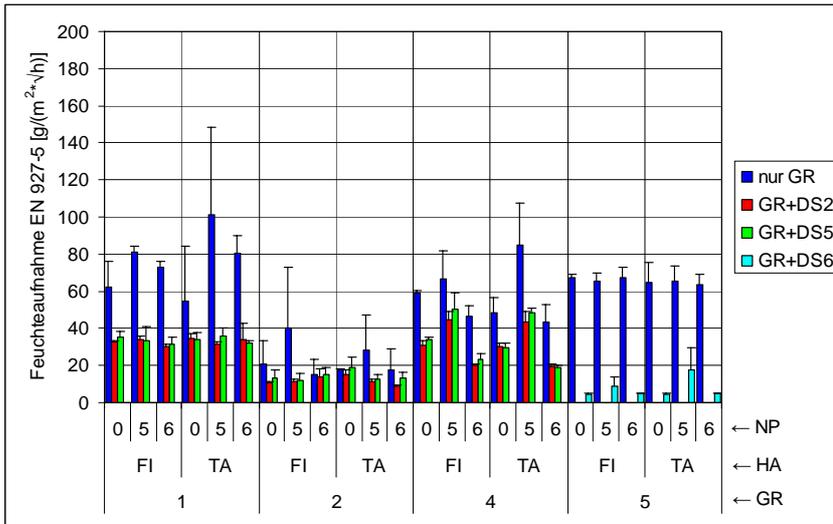


Bild 50: Einteilung der kompletten Beschichtungssysteme in den Hauptversuchen 1+2 nach den Grenzwerten für die flächenbezogene Wasseraufnahme gemäss EN 927-2

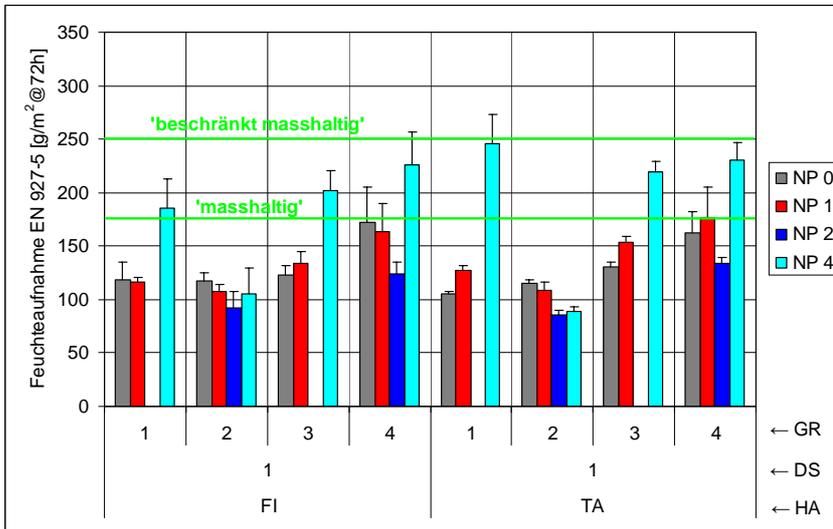


Bild 51: Einteilung der kompletten Beschichtungssysteme im Hauptversuch 3 nach den Grenzwerten für die flächenbezogene Wasseraufnahme gemäss EN 927-2

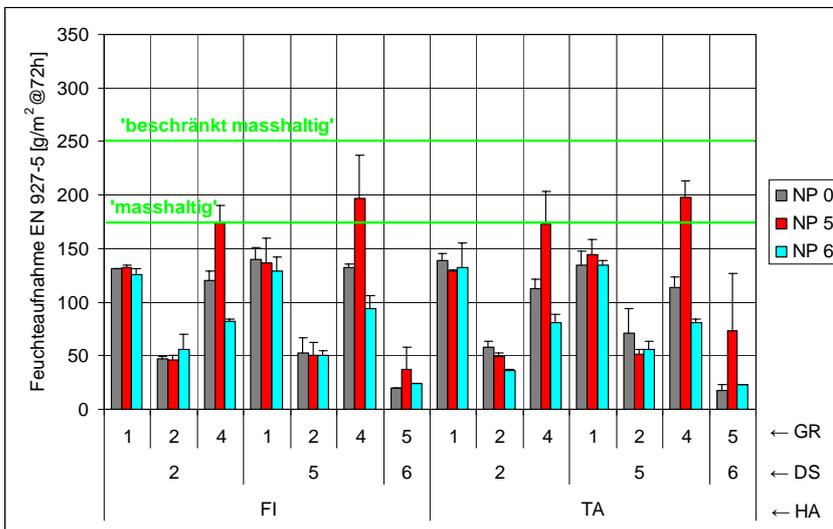
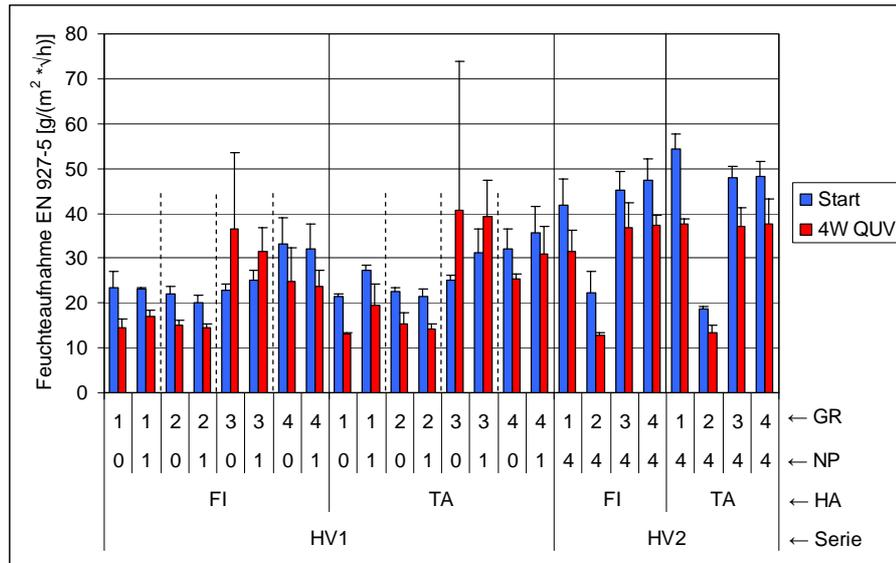


Bild 52: Wasseraufnahmekoeffizienten der kompletten Beschichtungssysteme vor und nach 4 Wochen künstlicher Bewitterung in den Hauptversuchen 1+2 (DS 1)



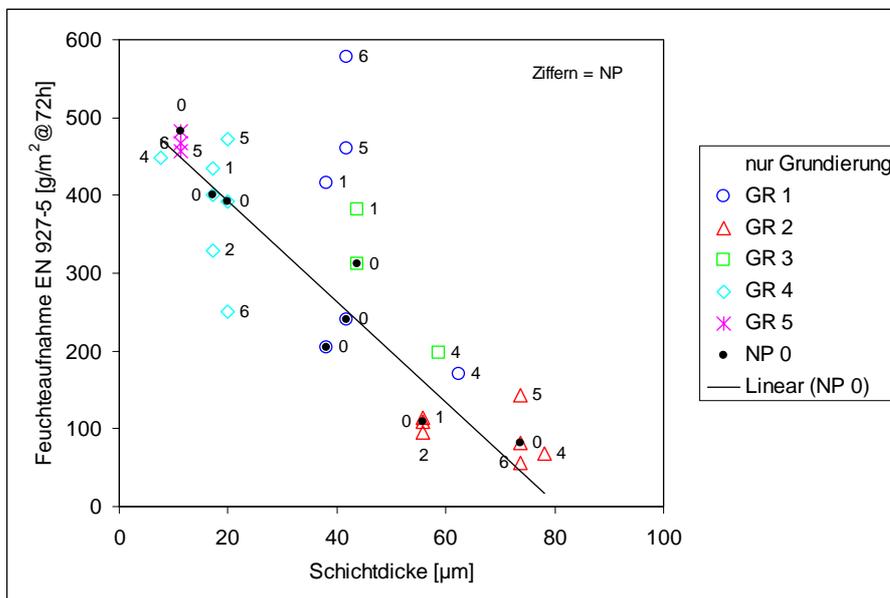
Bewertung (Beschichtungssysteme):

- Die Feuchteaufnahme des beschichteten Holzes ist erwartungsgemäss deutlich geringer als bei den lediglich hydrophobierten Proben (vgl. z.B. Bild 50 mit Bild 43).
- Die Feuchteaufnahme im Flüssigwasser ist bei den beschichteten Proben in aller Regel intensiver als im Wasserdampf (Bilder 45 und 47). Anders als bei den lediglich hydrophobierten Proben beeinflusst die filmbildende Beschichtung jedoch sowohl die Wasserdurchlässigkeit als auch die Wasserdampfdurchlässigkeit. Die beiden Messgrössen korrelieren stark.
- Die Beschichtungssysteme zeigen deutliche Unterschiede in der Feuchteschutzwirkung. Insgesamt konnte die Feuchteschutzwirkung der Beschichtungen im Laufe der Versuchsserien deutlich verbessert werden. Eine Ausnahme bilden die Proben im Hauptversuch 2, wo durch die teilweise durchgeschliffenen Grundierungen die Feuchteschutzwirkung der Gesamtschichtung stark vermindert wurde (Bilder 47, 48 und 50). Die Beschichtungssysteme mit Grundierung 2 sowie das Nanocoat-System (GR 5+DS 6) ergeben den besten Feuchteschutz aller getesteten Beschichtungssysteme (Bilder 47 bis 51).
- Die meisten Beschichtungssysteme erfüllen den Grenzwert von 175 g/m² für die Kategorie 'masshaltig'. Ausnahmen bilden einige Varianten im Vorversuch (Bild 46), die Beschichtungen mit den teilweise durchgeschliffenen Grundierungen im Hauptversuch 2 (Bild 50) sowie ein Teil der Beschichtungen mit einer NP 5-Hydrophobierung im Hauptversuch 3 (Bild 51).
- Der Effekt einer vorgängigen Hydrophobierung der Holzoberfläche im Verbund mit einem Beschichtungssystem scheint insgesamt gering zu sein und kann aufgrund von speziellen Wechselwirkungen teilweise sogar negativ ausfallen. Eine leicht positive Wirkung ist im Hauptversuch 1 bei den Beschichtungen mit Grundierung 2 festzustellen (Bild 50). Einen offensichtlich negativen Effekt verursacht NP 5 in Kombination mit der Grundierung 4 im Hauptversuch 3 (Bild 51). Dasselbe gilt für NP 4 mit den Grundierungen 1, 3 und 4 im Hauptversuch 2, wobei dieser Effekt sicher auch durch die teilweise durchgeschliffenen Grundierungen verursacht wird.
- Die Feuchteschutzwirkung ist bei den lediglich grundierten Proben erwartungsgemäss meist geringer als bei den kompletten Beschichtungssystemen (Bilder 48 und 49). Eine Ausnahme bildet die Grundierung 2, welche schon für sich allein einen hervorragenden Feuchteschutz bietet und wo die Deckschicht diesbezüglich keinen Zusatzwirkung bringt. Im Hauptversuch 2, wo die Grundierungen vor dem Aufbringen der Deckschicht teilweise durchgeschliffen wurden (während die lediglich grundierten Proben gar nicht geschliffen wurden, siehe Kapitel 2.2 und 3.1.2.1), zeigen entsprechend die lediglich grundierten Proben teilweise eine geringere Feuchteaufnahme als die kompletten Beschichtungssysteme. Der Beitrag der einzelnen Schichten (Grundierung, Deckschicht) zur gesamten Feuchteschutzwirkung ist somit je nach Kombination unterschiedlich gross.
- Die Unterschiede in der Feuchteschutzwirkung sind bei den lediglich grundierten Proben ausgeprägter als bei den kompletten Beschichtungssystemen. Dies deutet auf einen bestimmenden Einfluss der Grundierung im Gesamtsystem hin (Bilder 48 und 49).

- Die hydrophobierte Deckschicht 5 zeigt gegenüber der Standard-Deckschicht 2 keine verbesserte Feuchteschutzwirkung (Bild 49).
- Im Anfangsstadium der Bewitterung sinkt die Durchlässigkeit der Beschichtungen vermutlich als Folge der Auswaschung von hydrophilen Hilfsstoffen (Bild 52). Dieser vor allem bei Acrylaten bekannte Effekt stimmt mit der früheren Beobachtung von steigenden Kontaktwinkeln überein (siehe Bild 40). Mit zunehmenden Schäden an der Beschichtung (v.a. Risse) steigt die Feuchteaufnahme später aber wieder an (siehe Beschichtungen mit Grundierung 3 im Hauptversuch 1).

In den Auswertungen nicht berücksichtigt ist der erhebliche Einfluss der Schichtdicke auf die Feuchteschutzwirkung einer Beschichtung. Die Schichtdicke kann zwar als integraler Bestandteil der einzelnen Beschichtungssysteme aufgefasst werden, die genauere Kenntnis der schichtdicken-bereinigten Feuchteschutzeigenschaften ist aber dennoch ein wichtiger Aspekt einer umfassenden Beschichtungscharakterisierung. Die experimentelle Ermittlung dieses Einflusses für jede Beschichtung einzeln ist aber aufwendig. Ersatzweise wurde die Beziehung zwischen Schichtdicke und flächenbezogener Wasseraufnahme über alle Grundierungen (ohne Deckschicht) gleichzeitig ausgewertet, was eigentlich eine (nicht unbedingt gegebene) gleichartige Schichtdicken-Feuchteschutz-Beziehung voraussetzt (Bild 53).

Bild 53: Einfluss der Schichtdicke auf die Feuchteschutzwirkung der Grundierungen (ohne Deckschicht) auf Fichte in den Hauptversuchen 1 bis 3



Bewertung:

- Die Referenzvarianten ohne Hydrophobierung zeigen eine erstaunlich straffe lineare Abhängigkeit von der Schichtdicke. Demnach beruht ein erheblicher Teil der Unterschiede in der Feuchteschutzwirkung auf unterschiedlichen Schichtdicken und nicht so sehr auf unterschiedlichen Eigenschaften der verschiedenen Grundierungen.
- Die von der Ausgleichsgeraden abweichende Lage der Datenpunkte der Grundierungen 1 und 3 deutet auf eine eher überdurchschnittliche Wasserdurchlässigkeit dieser Beschichtungen hin. Insbesondere negativ erscheint die Feuchteschutzwirkung der Grundierung 1 auf einer zuvor hydrophobierten Holzoberfläche (v.a. NP 5 und 6).

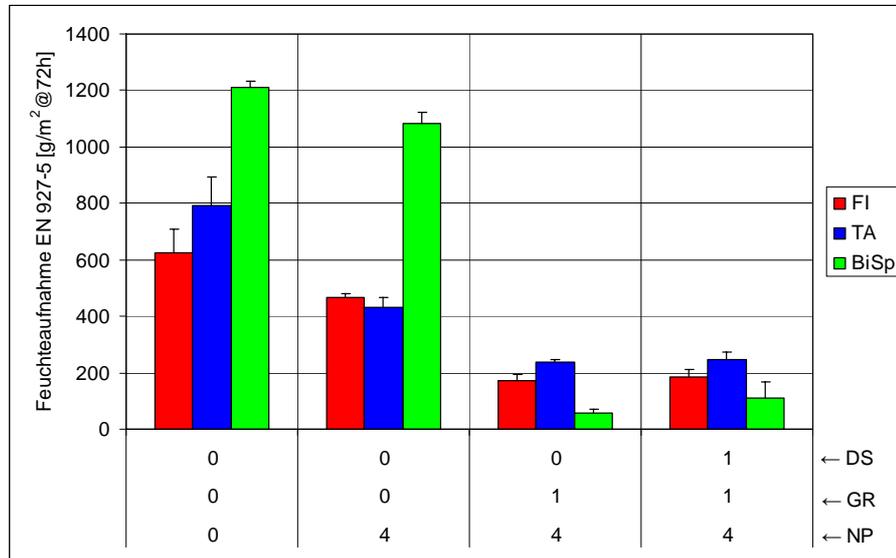
Eine unterschiedliche Feuchteaufnahme der Holzarten kann für deren Dauerhaftigkeit im Aussenbereich eine grosse Bedeutung haben. In diesem Projekt ging es insbesondere um diesbezügliche Unterschiede zwischen Fichte und Tanne (Bild 54).

Bewertung:

- Im Gegensatz zur dampfförmigen Wasseraufnahme (Sorptions) sind bei der Flüssigwasseraufnahme im unbehandelten Zustand aufgrund der unterschiedlichen Kapillarität und Permeabilität erhebliche Unterschiede zwischen den Holzarten vorhanden. Bei der wenig permeablen Fichte ist die Wasseraufnahme am geringsten, bei Tanne etwas höher. Bei Birkenperrholz ist die Wasseraufnahme besonders hoch.

- Eine Hydrophobierung mit NP 118F (NP 4) bewirkt bei allen Holzarten eine Verringerung der Flüssigwasseraufnahme. Zwischen Fichte und Tanne ist kein Unterschied mehr vorhanden, während Birkenesperrholz noch immer eine erheblich höhere Aufnahme zeigt. Nach einer Beschichtung (nur Grundierung oder komplettes Beschichtungssystem) verschwindet der Einfluss der Holzart weitgehend.

Bild 54: Einfluss der Holzart auf die Flüssigwasseraufnahme verschieden behandelter Proben im Hauptversuch 2



Eine allgemeine, modellhafte Quantifizierung der verschiedenen Einflussfaktoren auf die Feuchteschutzwirkung ist mit der statistischen Methode der Varianzanalyse möglich. Dabei kann für die vier Hauptfaktoren der Versuchsvarianten, nämlich Holzart (HA), Hydrophobierung (NP), Grundierung (GR) und Deckschicht (DS) sowie deren 2-fach Wechselwirkungen überprüft werden, ob ein statistisch signifikanter Einfluss auf die Wasserdurchlässigkeit vorhanden und wie gross dieser Einfluss ist. Daraus wiederum kann der Beitrag der Einzelschichten resp. Systemkomponenten auf die Feuchteschutzwirkung insgesamt abgeschätzt werden.

Ein Beispiel einer solchen Varianzanalyse-Berechnung zeigt Tabelle 20. Die Modellspezifikation geht von einer additiven Wirkung der 4 Hauptfaktoren HA, NP, GR und DS sowie deren 2-fach Wechselwirkungen auf die Wasserdurchlässigkeit gemäss EN 927-5 in g/m² nach 72 h (GM2_72) aus.

Tabelle 20: Beispiel einer Varianzanalyse (komplettes Beschichtungssystem im Hauptversuch 3)

Class	Levels	Values
HA	2	7 8
NP	3	5 6 0
GR	3	1 2 4
DS	2	2 5

Number of Observations Read		108
Number of Observations Used		108

Model: GM2_72 = HA|NP|GR|DS#2

Source	DF	Sum of Squares	Mean Square	F Value	Pr > F
Model	19	219543.1312	11554.9016	64.66	<.0001
Error	88	15725.2324	178.6958		
Corrected Total	107	235268.3636			

	R-Square	Coeff Var	Root MSE	GM2_72 Mean
	0.933160	12.69732	13.36772	105.2798

Source	DF	Type I SS	Mean Square	F Value	Pr > F
HA	1	1.2632	1.2632	0.01	0.9332
NP	2	22293.8174	11146.9087	62.38	<.0001
HA*NP	2	99.1884	49.5942	0.28	0.7583
GR	2	153139.6889	76569.8444	428.49	<.0001
HA*GR	2	604.4781	302.2391	1.69	0.1902
NP*GR	4	41179.5822	10294.8956	57.61	<.0001
DS	1	1695.5141	1695.5141	9.49	0.0028
HA*DS	1	3.3075	3.3075	0.02	0.8921
NP*DS	2	267.3541	133.6771	0.75	0.4763
GR*DS	2	258.9372	129.4686	0.72	0.4874

Aus den vollständigen Modellen wurden in einem Schritt alle nicht signifikanten Hauptfaktoren und Wechselwirkungen entfernt. Danach wurde mit dem reduzierten Modell der Beitrag der verbleibenden Faktoren zur gesamten Feuchteaufnahme geschätzt. In Tabelle 21 sind die Ergebnisse dieser Varianzanalysen unterteilt nach Beschichtungsaufbau und Versuchsserie zusammengefasst.

Tabelle 21: Ergebnisse der Varianzanalysen zur Feuchteschutzwirkung im Laborversuch (Wasserdurchlässigkeit gemäss EN 927-5). Im oberen Teil der Tabelle sind die statistisch signifikanten Faktoren markiert, während im unteren Teil deren geschätzter Beitrag zur gesamten Wasser-aufnahme (in g/m² nach 72 h) angegeben ist. Der Basiswert bezieht sich auf die jeweilige 'Referenz'-Variante mit Fichte (FI) ohne Hydrophobierung (NP 0) und falls vorhanden mit Grundierung 4 (GR 4) sowie mit Deckschicht 2 (DS 2). Rot und blau markiert sind die feuchtevermindernden resp. -steigernden Effekte, welche mehr als 30% des Basiswertes betragen.

Beschichtung	Beschichtungsvarianten										
	nur Hydrophobierung			nur Grundierung			Gesamtsystem				
Serie	HV1	HV2	HV3	HV1	HV3	HV1	HV3	HV1	HV3		
HA	FI / TA			FI / TA			FI / TA				
NP	0,1,2,3	0,4	0,5,6	0,1	0,1,2	0,5,6	0,1	0,1,2	0,5,6		
GR				1,2,3,4	2,4	1,2,4	1,2,3,4	2,4	1,2,4		
DS							1	1	2,5		
Faktoren	(☑ = signifikanter Faktor / – = nicht signifikanter Faktor)										
HA	–	–	☑	☑	–	–	–	–	–		
NP	☑	☑	☑	–	☑	☑	–	☑	☑		
GR				☑	☑	☑	☑	☑	☑		
DS							–	–	☑		
HA*NP	–	–	–	–	–	–	–	–	–		
HA*GR				☑	–	–	–	–	–		
HA*DS											
NP*GR				–	☑	☑	–	–	☑		
NP*DS									–		
GR*DS									–		
Schätzwert Beitrag zu Feuchteaufnahme EN 927-5 [g/m ² @72h]											
Basiswert (Intercept)	710	710	809	417	402	346	169	168	116		
Faktoren	Referenz	Vergleich									
HA	FI	TA			96	-1					
NP	0	1	-227			29		-3			
		2	-170			-69		-33			
		3	-190								
		4		-261							
		5			-93		149		65		
		6			-152		-93		-35		
GR	4	1			-107		-52	16			
		2			-306	-284	-271	-57	-51		
		3			-70			-34	-62		
DS	2	5						8			
HA*GR	FI 4	TA 1			395						
		TA 2			6						
		TA 3			93						
NP*GR	0 4	1 2				-36					
		2 2				48					
		5 1					76	-66			
		5 2					-112	-73			
		6 1					371	30			
		6 2					79	27			
Bestimmtheitsmass R ²			0.80	0.71	0.60	0.56	0.96	0.88	0.70	0.79	0.92

Anmerkung: Bei den beschichteten Probenvarianten wurde der Hauptversuch 2 nicht in diese Analyse einbezogen, da keine Referenzvariante ohne Hydrophobierung vorhanden ist. Ebenfalls nicht einbezogen wurde die Nanocoat-Beschichtung im Hauptversuch 3, da sie nicht mit den anderen Beschichtungsvarianten (v.a. Grundierungen) kombiniert ist.

Bewertung:

- Die Ergebnisse der Varianzanalysen bestätigen viele Beobachtungen aus den graphischen Darstellungen. Sie erlauben jedoch eine bessere Erkennung von systematischen Effekten sowie eine gewisse Quantifizierung. Wiederum wird die Trockenschichtdicke als integraler Bestandteil der Beschichtungssysteme und nicht als separate Einflussgrösse berücksichtigt.

- Das Beispiel einer Varianzanalyse-Berechnung (vollständiges Modell) bei den kompletten Beschichtungssystemen im Hauptversuch 3 weist auf einen statistisch signifikanten Einfluss eines Teils der einbezogenen Faktoren hin (Tabelle 20). Das Modell vermag 93% der Gesamtvarianz zu erklären. Signifikante Faktoren sind die Hydrophobierung (NP), die Grundierung (GR) und die Deckschicht (DS). Zusätzlich ist auch die Wechselwirkung zwischen Hydrophobierung und Grundierung (NP*GR) signifikant, was darauf hinweist, dass sich die verschiedenen Hydrophobierungsmittel nicht bei allen Grundierungen gleich verhalten. Die Grundierung zeigt den klar grössten Einfluss auf die Feuchteschutzwirkung (F-Wert 428). Die Holzart (HA) zeigt keinen signifikanten Einfluss auf die Feuchteaufnahme des Gesamtsystems.
- Die Übersicht über die statistisch signifikanten Einflussfaktoren der verschiedenen Beschichtungsvarianten (Tabelle 21, oberer Teil) zeigt einen konstanten Einfluss der Grundierung in allen Beschichtungsvarianten. Die Hydrophobierung ist vor allem bei den Varianten 'nur Hydrophobierung' von Bedeutung. Einen insgesamt nur geringen Einfluss auf die Feuchteschutzwirkung zeigen die Holzart und die Deckschicht (geringe Variantenzahl!).
- Es zeigen sich nur relativ wenige signifikante Wechselwirkungen. Interessanterweise ergeben sich nirgends signifikante Wechselwirkungen zwischen Holzart und Hydrophobierung (HA*NP). Die wichtigsten Wechselwirkungen treten zwischen Hydrophobierung und Grundierung auf (NP*GR). Die Interpretation von Wechselwirkungen im Verbund eines Beschichtungssystems ist generell schwierig und hängt oft mit dem ungewöhnlichem Feuchteverhalten von einzelnen Proben zusammen (z.B. Nasskern bei Tanne).
- Bei den Beschichtungsvarianten 'nur Hydrophobierung' reduzieren die verschiedenen Hydrophobierungsmittel die Wasseraufnahme um 150 bis 260 g/m² nach 72 h (Tabelle 21, unterer Teil). Die Unterschiede zwischen den Hydrophobierungsmitteln sind relativ gering, nur gerade NP 5 (118FAG) weist eine unterdurchschnittliche Reduktion auf (-93 g/m² nach 72 h).
- Im Verbund mit einer Beschichtung zeigen die Hydrophobierungen nur einen geringen positiven Effekt. NP 5 (118FAG) in Kombination mit Grundierung 4 führt sogar zu einer deutlichen Erhöhung der Wasseraufnahme (siehe auch Bild 51).
- Die Grundierungen haben einen bedeutenden Einfluss auf die Wasserdurchlässigkeit, wobei die Grundierung 'UV wässrig' (GR 2) die Wasseraufnahme am effizientesten reduziert.
- Wie schon anhand Bild 49 festgestellt, zeigt die hydrophobierte Deckschicht 5 gegenüber der Standard-Deckschicht 2 keine verbesserte Feuchteschutzwirkung, sondern ergibt sogar eine leichte Verschlechterung (+8 g/m² nach 72 h).

Die Feuchteschutzwirkung durch eine Hydrophobierung ist anhand des Ausmasses der kapillaren Durchfeuchtung des Holzes unter bestimmten Bedingungen auch visuell erkennbar. Zum einen ist die Durchfeuchtung an der unterschiedlich dunklen Färbung durch das aufgenommene Wasser bei bewittertem Holz (unbehandelt oder nur hydrophobiert) zu erkennen (Bild 55). Zum anderen kann im Wasserdurchlässigkeitsversuch im Labor und bei der Prüfung der Nasshaftung der Beschichtung (siehe Kapitel 2.3.2.1 und 2.3.3.2) unter Verwendung von angefärbtem Wasser die Durchfeuchtung permanent markiert werden (Bilder 56 bis 58). Besonders geeignet dazu sind die Probenvarianten mit einer transparenten Grundierung (ohne Deckschicht), wo insbesondere die Art der Unterfeuchtung der Beschichtung beobachtet werden kann.

Bewertung:

- Die kapillare Wasseraufnahme von schmelzendem Schnee wird durch eine Hydrophobierung der Holzoberfläche deutlich verringert (Bild 55). Der Effekt ist allerdings zu verschiedenen Zeitpunkten nicht gleich stark ausgeprägt. Dies hängt wahrscheinlich mit der jeweiligen Holzfeuchte im Substrat zusammen, wobei die wasserabweisende Wirkung bei einem trockenen Substrat grösser ist (siehe Kapitel 4.2).
- Beim Wasserdurchlässigkeitsversuch mit angefärbtem Wasser bei den lediglich hydrophobierten Proben ergibt sich je nach Hydrophobierungswirkung eine unterschiedlich intensive Färbung der Prüffläche (Bild 56). So zeigen die Hydrophobierungen NP 118, 119 und 118F eine deutlich geringere Färbung als die nicht-hydrophobierten Referenzproben. Demgegenüber ist bei NP 118FAG und 310523 eine ähnlich intensive Färbung wie bei den nicht-hydrophobierten Referenzproben vorhanden. Diese Beobachtung stimmt recht gut mit den gemessenen Wasseraufnahmen überein (siehe Bild 42 und 43).
- Die Eindringtiefe ist erwartungsgemäss bei Tanne deutlich grösser als bei Fichte. Auch hier zeigen die Hydrophobierungen NP 118, 119 und 118F eine deutliche Wirkung, während NP 118FAG bei Tanne die Wasseraufnahme offenbar kaum verringert.

- Nicht immer einfach interpretierbar ist die Art der Unterfeuchtung bei den transparenten Grundierungen ohne Deckschicht (Bilder 57 und 58). Beim Wasserdurchlässigkeitsversuch gemäss EN 927-5 und bei der Prüfung der Nasshaftung der Beschichtung wirken dabei recht unterschiedliche Mechanismen. Während beim Wasserdurchlässigkeitsversuch auch die Feuchteschutzwirkung der Grundierung zum Tragen kommt, zeigt sich bei der Prüfung der Nasshaftung vor allem der Widerstand der hydrophobierten Holzoberfläche gegenüber einer kapillaren Wasseraufnahme, da die Grundierungsschicht ja bereits durch die ringförmige Einfräsung überbrückt ist. Daher führen die beiden Versuche nicht unbedingt zu deckungsgleichen Effekten.
- Die Durchtrennung der Grundierung durch 4 Längsschnitte (linke Probenhälfte) dient als Simulation für die Situation bei (Schwind-)Rissen im Holz. Generell führte dies erwartungsgemäss zu einer lokal intensiveren Durchfeuchtung.
- Tanne zeigt gegenüber Fichte eine etwas intensivere Wasseraufnahme, resp. Unterfeuchtung der Grundierung. Dies ist makroskopisch vor allem auch an den Querschnitten zu beobachten.
- Wie bereits bei den bisherigen Auswertungen erkannt, zeigt die Grundierung 2 eine klar bessere Feuchteschutzwirkung als die Grundierung 1. Dies ist insbesondere bei NP 118FAG und 310523 der Fall, wo die Hydrophobierung sogar eine durchfeuchtungsfördernde (hydrophile) Wirkung hervorzurufen scheint.
- Wirksame Kombinationen bei beiden Grundierungen ergeben sich mit NP 118. Ebenfalls sehr wirksam erscheint die Kombination von Grundierung 2 mit NP 310523.
- Auffällig sind die unterschiedlichen Unterfeuchtungsmechanismen beim Wasserdurchlässigkeitsversuch gemäss EN 927-5 und bei der Prüfung der Nasshaftung der Beschichtung bei NP 118FAG (Bilder 57 und 58). Während die Hydrophobierung auf die Feuchteschutzwirkung der Grundierung offenbar eher negativ wirkt, wird die kapillare Wasseraufnahme aus der ringförmigen Einfräsung deutlich reduziert.

Bild 55: Kapillare Durchfeuchtung von hydrophobierten Proben durch Schnee-Schmelzwasser (gleiche Proben nach 5 resp. 6 Monaten Freibewitterung)

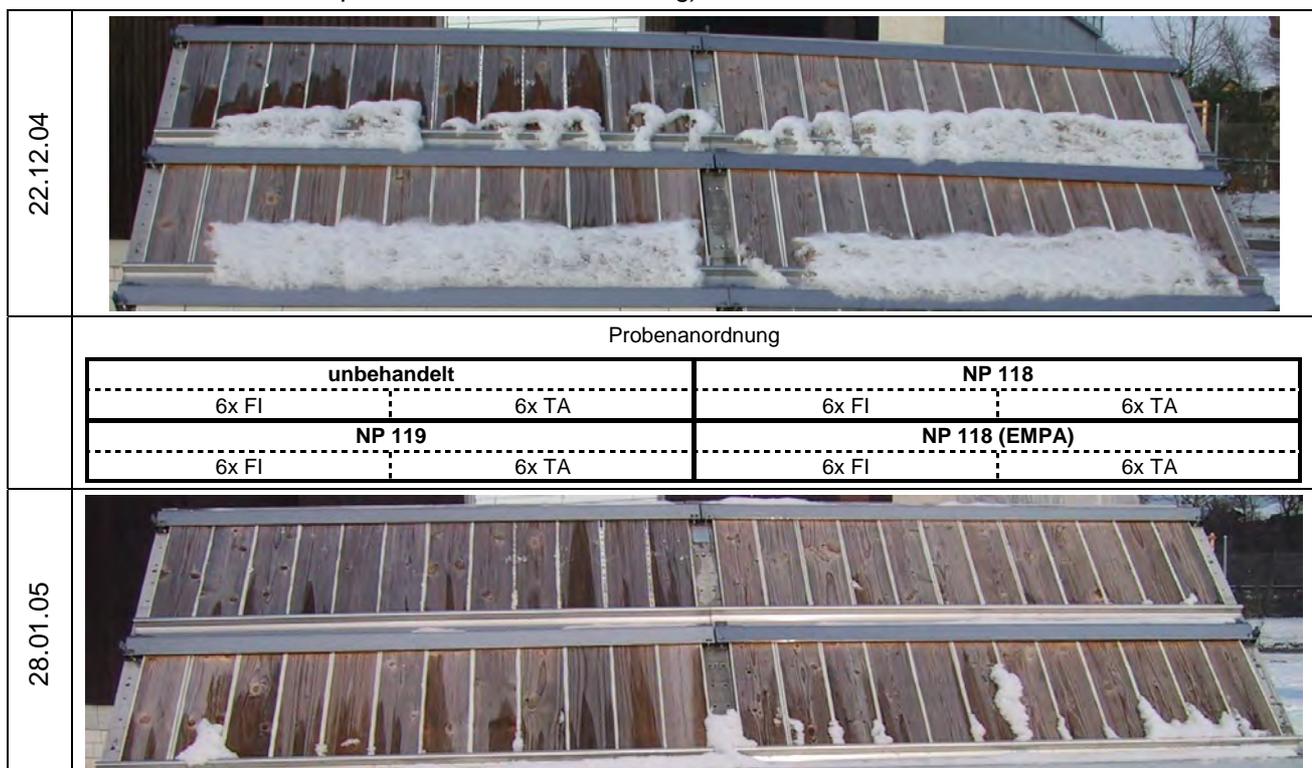


Bild 56: 'Optische' Feuchteschutzwirkung verschiedener Hydrophobierungsmittel bei Fichte und Tanne (Oberflächen und Querschnitte, EN 927-5 Test, 168h, mit blau eingefärbtem Wasser)

NP	Fichte	Tanne
ohne (HV3)		
118 (Sprühen)		
119 (Sprühen)		
118F (FWB)		
118FAG (Pinsel)		
310523 (Pinsel)		

Bild 57: Unterfeuchtung Grundierung 1 (EN 927-5 Test, 168h, mit blau eingefärbtem Wasser)

NP	Feuchteaufnahme EN 927-5						Adhäsion nass					
	Fichte			Tanne			Fichte			Tanne		
ohne (HV1)												
118 (Sprühen)												
118F (FWB)												
118FAG (Pinsel)												
310523 (Pinsel)												
ohne (HV3)												

Bild 58: Unterfeuchtung Grundierung 2 (EN 927-5 Test, 168h, mit blau eingefärbtem Wasser)

NP	Feuchteaufnahme EN 927-5						Adhäsion nass					
	Fichte			Tanne			Fichte			Tanne		
ohne (HV1)												
118 (Sprühen)												
118F (FWB)												
118FAG (Pinsel)												
310523 (Pinsel)												
ohne (HV3)												

3.2.2 Verlauf der Holzfeuchte in der Freibewitterung

Das Niveau und die Schwankungen der Holzfeuchte während der Freibewitterung sind ein weiteres Mass für die Feuchteschutzwirkung einer Beschichtung. Aufgrund der verschiedenen Bewitterungsperioden sind Vergleiche zwischen den Versuchsserien aber nur beschränkt möglich.

Der Verlauf der Holzfeuchte der unbehandelten und der lediglich hydrophobierten Proben in den Hauptversuchen 1 bis 3 ist in den Bildern 59 bis 61 dargestellt.

Bewertung:

- Die Holzfeuchte zeigt einen typischen Jahresverlauf mit hohen Holzfeuchten im Winter (>18%) und Tiefstwerten im Sommer (<10%).
- Die Wirkung der Holzart oder der Hydrophobierung ist gegenüber den jahreszeitlichen Schwankungen sekundär. Weisstanne und vor allem Birkensperrholz weisen ein gegenüber Fichte etwas höheres Holzfeuchteniveau auf (Bilder 59 und 60). Eine leicht positive Wirkung der Hydrophobierungen ist vor allem bei den Holzfeuchte-Spitzenwerten erkennbar.

Bild 59: Verlauf der Holzfeuchte bei den unbehandelten und den lediglich hydrophobierten Proben im Hauptversuch 1

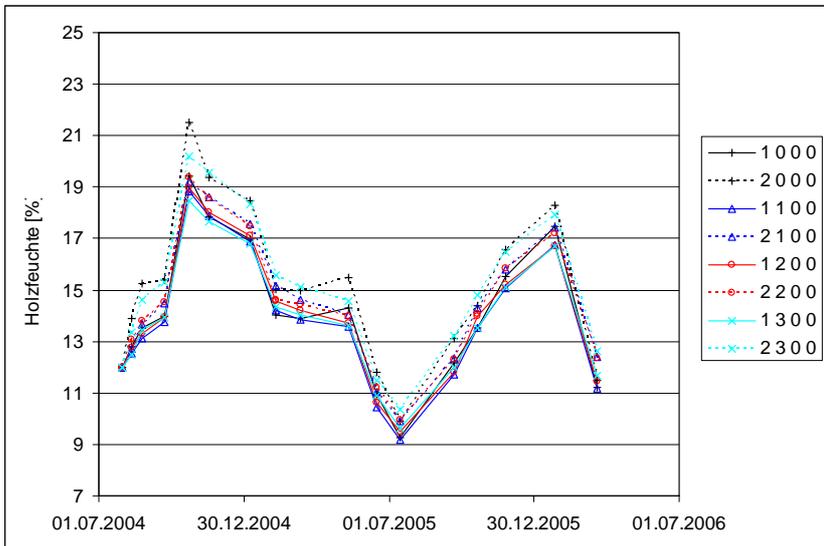


Bild 60: Verlauf der Holzfeuchte bei den unbehandelten und den lediglich hydrophobierten Proben im Hauptversuch 2

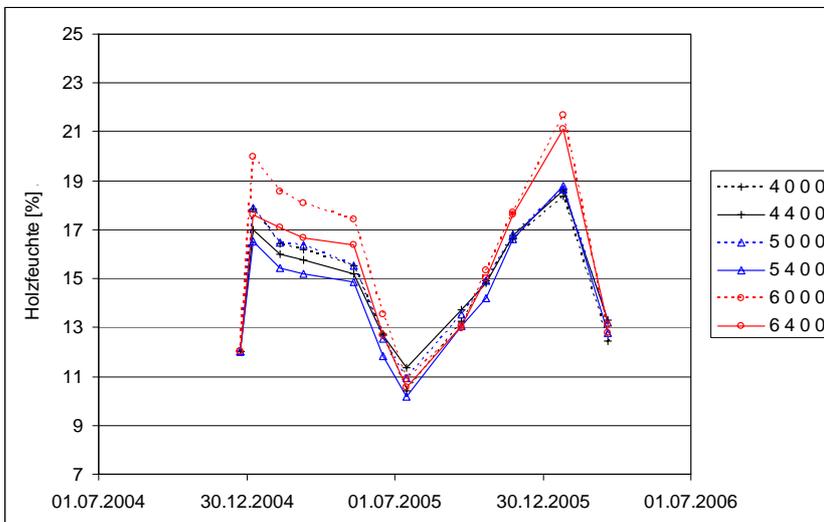
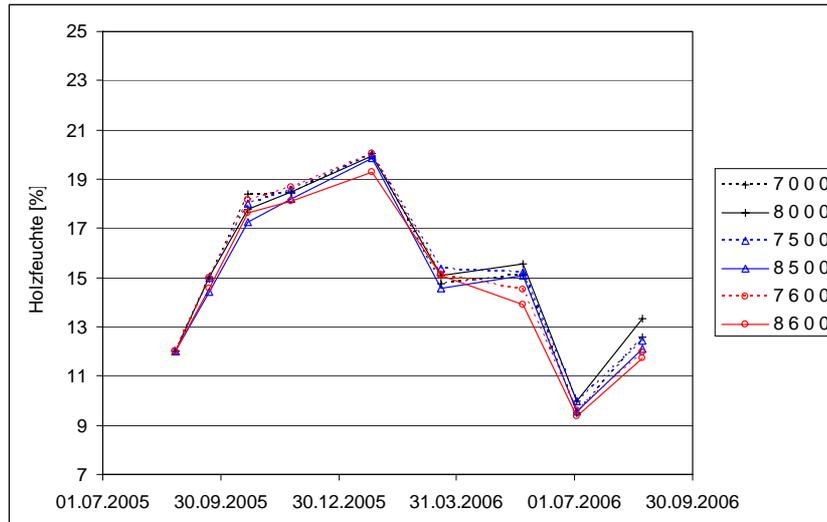


Bild 61: Verlauf der Holzfeuchte bei den unbehandelten und den lediglich hydrophobierten Proben im Hauptversuch 3



In den Bildern 62 bis 65 sind einige Beispiele für die Wirkung verschiedener Beschichtungskombinationen aufgezeigt.

Bewertung:

- Auch bei beschichteten Proben zeigt die Holzfeuchte einen dominanten, typischen Jahresverlauf. Eine Beschichtung dämpft aber die Holzfeuchteschwankungen gegenüber unbehandeltem Holz deutlich.
- Die unterschiedliche 'Sperrwirkung' der Grundierungen ist auch unter einer identischer Deckschicht noch erkennbar (Bild 63).
- Das Holzfeuchte-Niveau wird stark vom Farbton der Deckschicht bestimmt. Proben mit einer weissen Deckschicht weisen eine mehr als 2% höhere durchschnittliche Holzfeuchte auf als bei einer grauen Deckschicht (Bild 64).
- Die zusätzlich hydrophobierte Deckschicht 5 zeigt gegenüber der Standard-Deckschicht 2 keine verbesserte Feuchteschutzwirkung (Bild 65).

Bild 62: Verlauf der Holzfeuchte bei den unbehandelten und komplett beschichteten Proben im Vorversuch

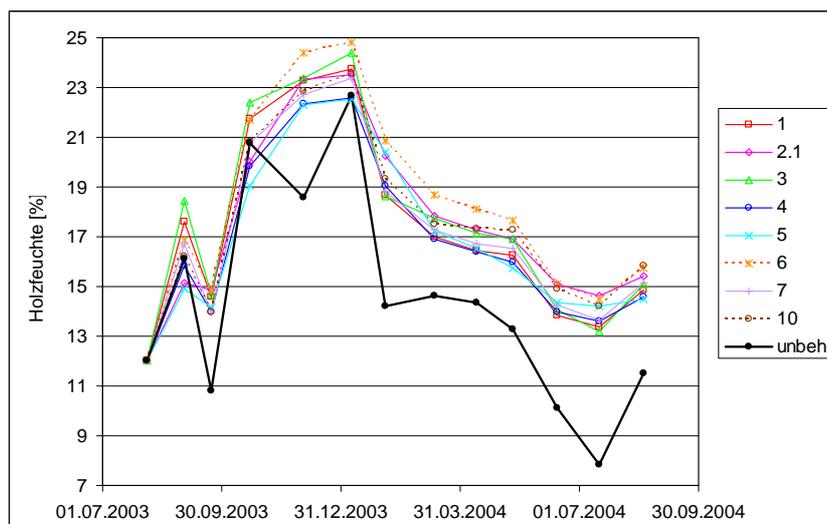


Bild 63: Beispiele des Verlaufes der Holzfeuchte bei verschiedenen behandelten Proben im Hauptversuch 1: Wirkung verschiedener Grundierungen

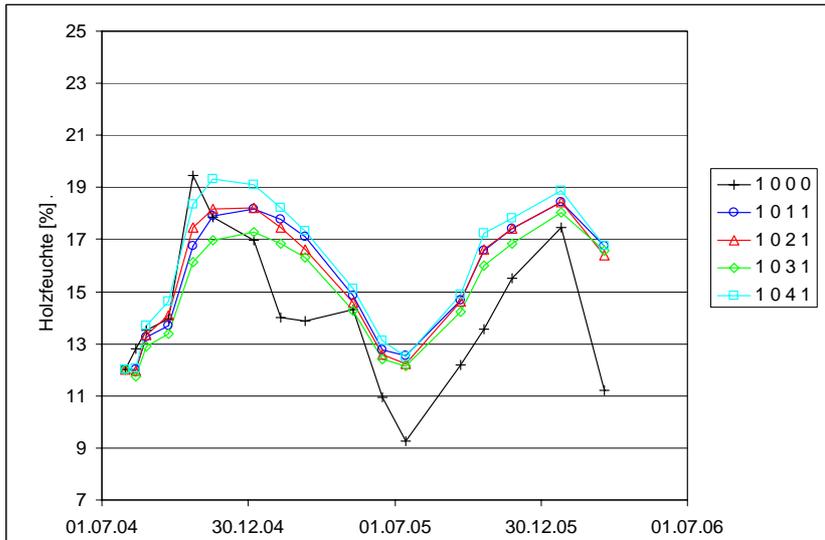


Bild 64: Beispiele des Verlaufes der Holzfeuchte bei verschiedenen behandelten Proben im Hauptversuch 2: Wirkung des Farbtones der Deckschicht (weiss oder grau)

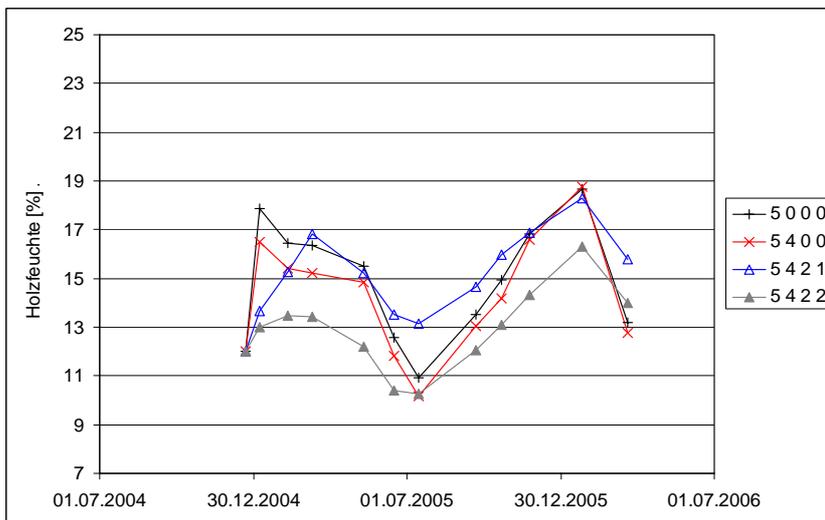
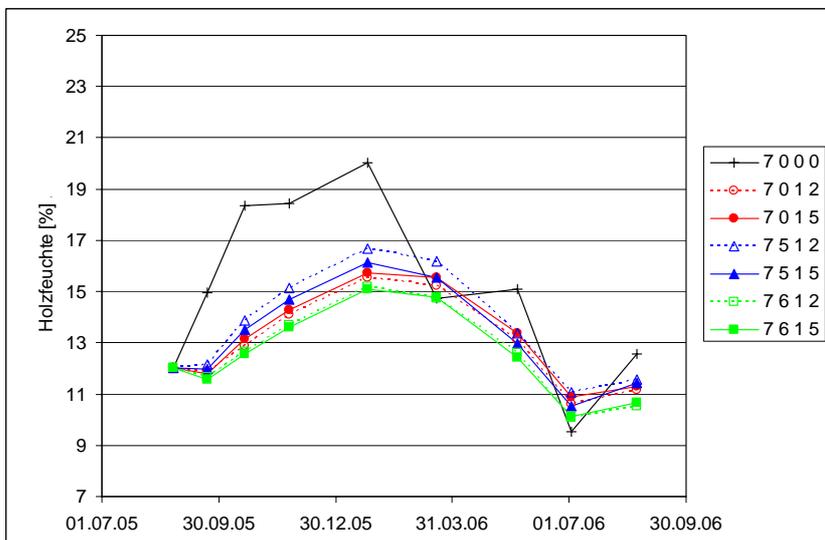


Bild 65: Beispiele des Verlaufes der Holzfeuchte bei verschiedenen behandelten Proben im Hauptversuch 3: Wirkung einer zusätzlich hydrophobierten Deckschicht



Für Vergleiche zwischen den vielen Versuchsvarianten werden wie im Laborversuch zur Wasserdurchlässigkeit wiederum abgeleitete Kenngrössen verwendet, nämlich die durchschnittliche Holzfeuchte (arithmetischer Mittelwert) als Mass für das generelle Holzfeuchte-Niveau und die Standardabweichung der periodischen Messungen als Mass für die Holzfeuchte-Schwankungen. Um primär die Feuchteschutzwirkung der weitgehend intakten Beschichtung zu erfassen, wurden nur die Werte im jeweils ersten Jahr der Bewitterung einbezogen (noch kaum Beschichtungsschäden). Die entsprechenden Daten des Vorversuchs und der Hauptversuche 1 bis 3 sind in den Bildern 66 bis 69 dargestellt.

Bewertung:

- Verglichen mit den grossen jahreszeitliche Schwankungen sind die Effekte der Versuchsfaktoren (Holzart, Hydrophobierung, Grundierung und Deckschicht) relativ gering.
- Eine tiefe durchschnittliche Holzfeuchte und geringe Schwankungen (Standardabweichung) deuten auf eine gute Feuchteschutzwirkung einer Beschichtung hin. Die beiden Kennwerte sind in der Regel korreliert, d.h. bei einer höheren durchschnittlichen Holzfeuchte sind auch grössere Schwankungen vorhanden.
- Die durchschnittliche Holzfeuchte liegt im Bereich zwischen 12 und 17%. Tendenziell tiefere Werte sind bei einer grauen Deckschicht und Fichtenholz, eher höhere Werte bei einer weissen Deckschicht und Weisstanne zu beobachten. Die Schwankung (Standardabweichung) der Holzfeuchte im Jahresverlauf beträgt bei den beschichteten Proben maximal 3.5%.
- In allen Hauptversuchen zeigen die Beschichtungsvarianten mit Grundierung 2 auffallend gute Werte.
- Die Wirkung der vorgängigen Hydrophobierung der Holzoberfläche zeigt sich bei einigen Beschichtungsvarianten in den Hauptversuchen 1 und 3 anhand den gegenüber nicht-hydrophobierten Proben geringfügig tieferen Holzfeuchte-Mittelwerten (Bild 67 und 69). Der Effekt scheint bei Tanne infolge der generell höheren 'Feuchteempfindlichkeit' etwas ausgeprägter zu sein.

Bild 66: Mittelwert und Schwankungen der Holzfeuchte im 1. Jahr der Freibewitterung bei den Beschichtungsvarianten im Vorversuch

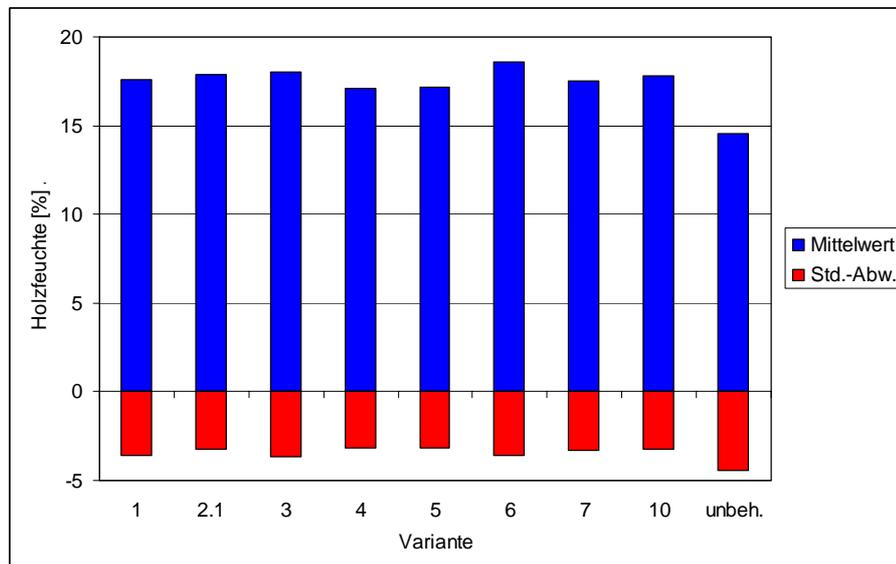


Bild 67: Mittelwert und Schwankungen der Holzfeuchte im 1. Jahr der Freibewitterung bei den Beschichtungsvarianten im Hauptversuch 1

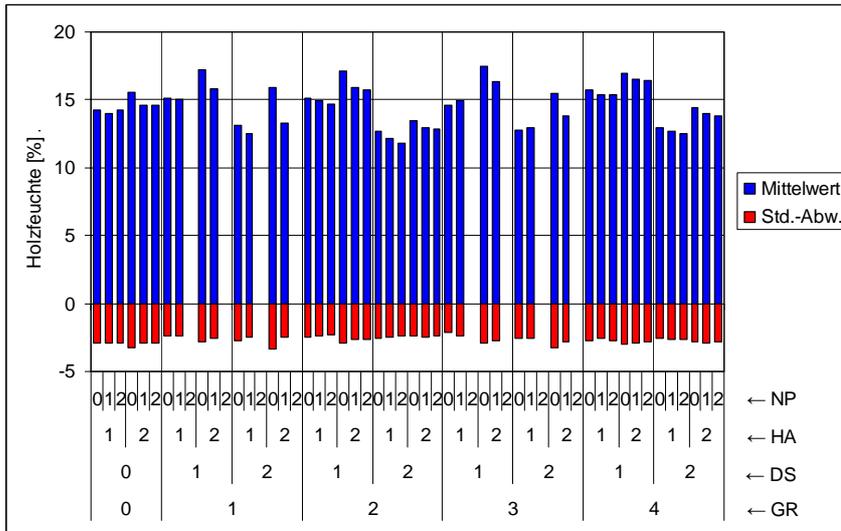


Bild 68: Mittelwert und Schwankungen der Holzfeuchte im 1. Jahr der Freibewitterung bei den Beschichtungsvarianten im Hauptversuch 2

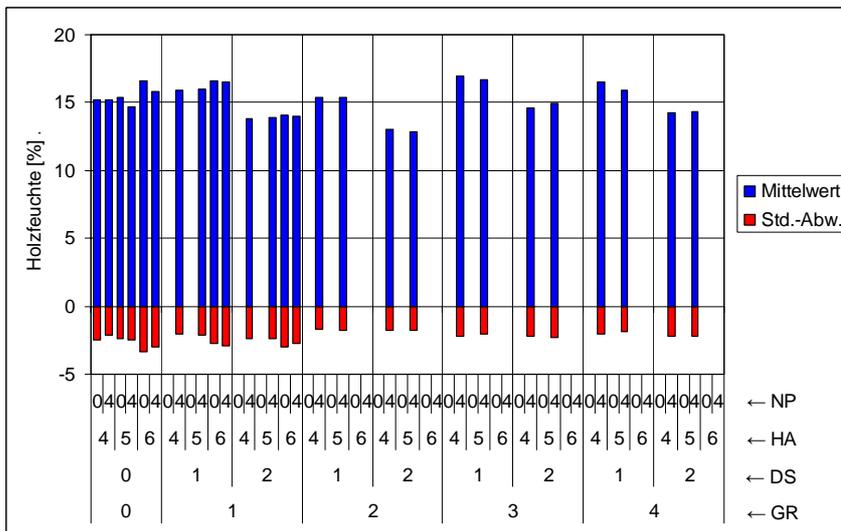
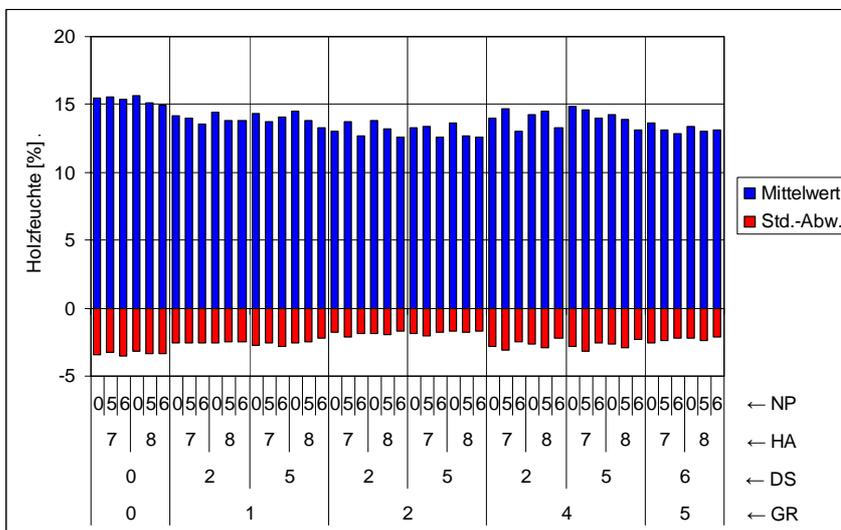


Bild 69: Mittelwert und Schwankungen der Holzfeuchte im 1. Jahr der Freibewitterung bei den Beschichtungsvarianten im Hauptversuch 3



Zur Quantifizierung des Einflusses der verschiedenen Versuchsfaktoren auf das Feuchteverhalten in der Freibewitterung wurden analog zu den Berechnungen beim Laborversuch zur Wasserdurchlässigkeit detaillierte Varianzanalysen durchgeführt (Kapitel 3.2.1.). Wiederum wurden aus den vollständigen Modellen in einem Schritt alle nicht signifikanten Hauptfaktoren und Wechselwirkungen entfernt und danach mit dem reduzierten Modell die Schätzwerte des Beitrages der verbleibenden Faktoren berechnet. In Tabelle 22 sind die Ergebnisse dieser Varianzanalysen unterteilt nach Beschichtungsaufbau und Versuchsserie zusammengefasst. Die Berechnungen erfolgten immer sowohl für die durchschnittliche Holzfeuchte (HF Mittelwert) als auch für die Holzfeuchte-Schwankungen (HF Schwankung) jeweils mit den Daten aus dem ersten Jahr der Bewitterung.

Tabelle 22: Ergebnisse der Varianzanalysen zur Feuchteschutzwirkung in der Freibewitterung. Im oberen Teil der Tabelle sind die statistisch signifikanten Faktoren markiert, während im unteren Teil deren geschätzter Einfluss auf die Holzfeuchte angegeben ist. Der Basiswert bezieht sich auf die jeweilige 'Referenz'-Variante mit Fichte (FI) ohne Hydrophobierung (NP 0) und falls vorhanden mit Grundierung 4 (GR 4) sowie mit Deckschicht 2 (DS 2). Rot und blau markiert sind die feuchtevermindernden resp. -steigernden Effekte, welche mehr als 10% des Basiswertes betragen.

Parameter	HF Mittelwert			HF Schwankung			HF Mittelwert			HF Schwankung						
	Beschichtungsvarianten															
Beschichtung	nur Hydrophobierung						Gesamtsystem									
Serie	HV1	HV2	HV3	HV1	HV2	HV3	HV1	HV2	HV3	HV1	HV2	HV3				
HA	FI / TA			FI / TA			FI / TA			FI / TA						
NP	0,1,2,3	0,4	0,5,6	0,1,2,3	0,4	0,5,6	0,1	0,1,2	4	0,5,6	0,1	0,1,2	4	0,5,6		
GR							1,2,3,4	2,4	1,2,3,4	1,2,4	1,2,3,4	2,4	1,2,3,4	1,2,4		
DS							1,2	1,2	1,2	2,5	1,2	1,2	1,2	2,5		
Faktoren (☑ = signifikanter Faktor / – = nicht signifikanter Faktor)																
HA	☑	–	–	☑	–	–	☑	☑	–	–	☑	☑	–	☑		
NP	☑	–	–	☑	–	–	☑	☑	–	☑	☑	☑	–	☑		
GR							☑	☑	☑	☑	☑	☑	☑	☑		
DS							☑	☑	☑	–	–	☑	☑	–		
HA*NP	☑	–	–	☑	–	–	☑	–	–	–	☑	–	–	–		
HA*GR							☑	–	–	–	☑	–	–	–		
HA*DS							–	–	–	–	–	☑	–	–		
NP*GR							☑	–	–	☑	☑	–	–	☑		
NP*DS							–	–	–	–	–	☑	–	–		
GR*DS							☑	☑	–	–	☑	–	–	–		
Schätzwert Beitrag zu Holzfeuchte Freibewitterung [% HF]																
Basiswert (Intercept)		14.30	15.12	15.36	2.93	2.39	3.35	15.47	14.43	16.29	14.34	2.68	2.78	1.98	2.81	
Faktoren	Referenz	Vergleich														
HA	FI	TA	1.30			0.36		1.74	1.16			0.34	0.29		-0.18	
NP	0	1	-0.25			0.00		0.11	-0.50			0.06	-0.14			
		2	-0.02			-0.03			-0.66				-0.16			
		3	-0.15			-0.23										
		5										0.10			0.29	
		6										-1.01			-0.34	
GR	4	1						-0.12		-0.33	0.01	-0.16		-0.15	-0.11	
		2							-0.17	-0.45	-1.07	-0.91	-0.16	-0.28	-0.30	-0.93
		3							-0.60		0.55		-0.38		0.13	
DS	1	2						-2.62	-2.65	-2.11			-0.09	0.18		
HA*NP	FI 0	TA 1	-0.68			-0.36		-0.98				-0.18				
		TA 2	-0.90			-0.36										
		TA 3	-0.11			0.03										
HA*GR	FI 4	TA 1						0.34				0.04				
		TA 2						-0.12				-0.10				
		TA 3						0.72				0.29				
HA*DS	FI 1	TA 2											-0.22			
NP*GR	0 4	1 1						-0.80				-0.33				
		1 2										-0.03				
		1 3											-0.07			
		5 1										-0.60			-0.36	
		5 2										-0.29			-0.13	
		6 1										0.35			0.24	
NP*DS	0 1	1 2											0.18			
		2 2											0.14			
GR*DS	4 1	1 2						0.51				0.23				
		2 2						-0.38	-0.31			-0.13				
		3 2						0.56				0.23				
Bestimmtheitsmass R ²		0.70	-	-	0.67	-	-	0.88	0.95	0.90	0.65	0.50	0.65	0.58	0.87	

Anmerkung: Bei den beschichteten Probenvarianten wurde der Hauptversuch 2 nicht in diese Analyse einbezogen, da keine Referenzvariante ohne Hydrophobierung vorhanden ist. Ebenfalls nicht einbezogen wurde die Nanocoat-Beschichtung im Hauptversuch 3, da sie nicht mit den anderen Beschichtungsvarianten (v.a. Grundierungen) kombiniert ist.

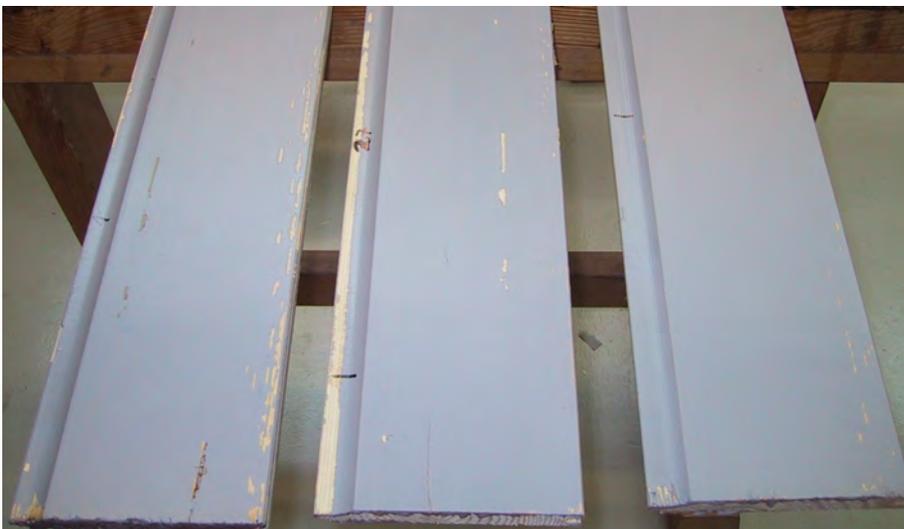
Bewertung:

- Aufgrund der variablen Versuchsbedingungen in der Freibewitterung ergeben sich oft recht komplexe Beanspruchungssituationen, welche die Holzfeuchte in den bewitterten Proben dynamisch beeinflussen. Die Effekte der Versuchsfaktoren fallen dadurch teilweise weniger deutlich aus als beim Laborversuch zur Wasserdurchlässigkeit (siehe Tabelle 21). Ein Vergleich der signifikanten Effekte ergibt aber trotzdem viele Übereinstimmungen. Gegenüber dem Laborversuch zur Wasserdurchlässigkeit zeigen sich mehr signifikante Wechselwirkungen, wobei diese insbesondere im Verbund eines kompletten Beschichtungssystems oft schwierig zu interpretieren sind.
- Die Varianzanalyse zeigt für beide Kenngrössen (Holzfeuchte-Mittelwert und -Schwankungen) aufgrund ihrer Korrelation meist ähnliche Einflussfaktoren (Tabelle 22, oberer Teil). Insgesamt ist aber ein etwas grösserer Einfluss der Versuchvariablen auf die Holzfeuchte-Schwankungen festzustellen.
- Die Holzart hat im Gegensatz zum Laborversuch zur Wasserdurchlässigkeit eine grössere Bedeutung. Tanne zeigt gegenüber Fichte sowohl ein leicht höheres Holzfeuchte-Niveau (ca. +1% HF) als auch grössere Schwankungen (ca. +0.3% HF).
- Die Wirkung der Hydrophobierungen ist insgesamt geringer als im Laborversuch zur Wasserdurchlässigkeit. Dies ist überwiegend auf den grossen Anteil von Diffusionsvorgängen an den Feuchtewechseln zurückzuführen, wogegen die angewendeten Hydrophobierungen keinen Schutz bieten. Bei den lediglich hydrophobierten Proben ergeben sich nur gerade im Hauptversuch 1 signifikante Hauptfaktoren oder Wechselwirkungen. Im kompletten Beschichtungssystem zeigt NP 5 wiederum einen negativen, d.h. hydrophilen Effekt.
- Wiederum zeigt die Grundierung 'UV wässrig' (GR 2) das günstigste Feuchteverhalten, wobei besonders das Ausmass der Holzfeuchte-Schwankungen reduziert wird.
- Die Deckschicht wirkt sich über den Farbton (weiss und grau) stark auf das Holzfeuchte-Niveau aus. Bei einem grauen Decklack liegt infolge der grösseren 'Aufheizung' der Proben die Holzfeuchte ca. 2% tiefer (siehe auch Bild 64). Die Holzfeuchte-Schwankungen werden dagegen nur geringfügig beeinflusst.
- Wie schon im Laborversuch zur Wasserdurchlässigkeit zeigt die hydrophobierte Deckschicht 5 gegenüber der Standard-Deckschicht 2 keine verbesserte Feuchteschutzwirkung.

3.3 Kompatibilität Schichten

Die verschiedenen Teilkomponenten eines Beschichtungssystems müssen gut aufeinander abgestimmt und verträglich sein. Als Beurteilungsgrundlagen dazu dienen das Benetzungsverhalten der Beschichtungsstoffe sowie die Haftung der aufgetragenen Schichten auf dem Holzsubstrat und untereinander. Ein Beispiel einer ungenügenden Kompatibilität zeigte sich in ausgeprägten Abstossungserscheinungen (Refusierung) der Deckschicht auf den Grundierungen 1 und 3 über NP 2 (119) im Hauptversuch 1 (Bild 70). Aufgrund dieser Probleme wurde NP 2 im weiteren Verlauf des Projektes nicht mehr verwendet und die betroffenen Beschichtungsvarianten wurden aus dem Untersuchungsprogramm gestrichen.

Bild 70: Abstossungserscheinungen der Deckschicht auf der Grundierung infolge Inkompatibilität mit der spezifischen Kombination von Hydrophobierung und Grundierung (Variante 1232)



3.3.1.1 Kontaktwinkel mit Beschichtungsstoffen

Als Ergänzung zu den Kontaktwinkelmessungen an Wassertropfen (siehe Kapitel 3.1.2.3) wurde auch das Benetzungsverhalten der Beschichtungsstoffe bei verschiedenen Beschichtungskombinationen untersucht. Als Tropfenmedien wurden die Flüssigmuster der Beschichtungsstoffe aus dem Hauptversuch 3 verwendet. Erfasst wurde der Kontaktwinkel an Tropfen von 3 Grundierungen auf 5 verschiedenen hydrophobierten Holzoberflächen (Tabelle 23) sowie von 2 Deckbeschichtungen auf 3 Grundierungen über jeweils 4 Hydrophobierungen (Tabelle 24). Als Vergleichsbasis wurde immer auch mit Wasser als Tropfenmedium gemessen. Auf je 1 Probe pro Variante (Fichte) wurde jeweils an 4 Tropfen der Verlauf des Kontaktwinkels während 60 s verfolgt. Ausgewertet wurde der gemessene Kontaktwinkel nach 60 s.

Tabelle 23: Durchgeführte Versuche zum Benetzungsverhalten der Beschichtungsstoffe: Grundierung auf hydrophobierter Holzoberfläche

NP		Probenserie	Medium / Beschichtungsstoff (Grundierung)			
			Wasser	1 100% UV	2 wässrig UV	4 Alkyd (oxyd. Härt.)
1	118	1100	X	X	X	X
2	119	1200	X	X	X	X
4	118F	4400	X	X	X	X
5	118FAG	7500	X	X	X	X
6	310523	7600	X	X	X	X

Tabelle 24: Durchgeführte Versuche zum Benetzungsverhalten der Beschichtungsstoffe: Deckbeschichtungen auf Grundierungen

GR	NP ¹⁾	Probenserie	Medium / Beschichtungsstoff (Deckschicht)		
			Wasser	2 Eterno (g)	5 Eterno H+Ag (g)
1 100% UV	0 - ohne	7010	X	X	X
	1 - 118	1110	X	X	X
	5 - 118FAG	7510	X	X	X
	6 - 310523	7610	X	X	X
2 wässrig UV	0 - ohne	7020	X	X	X
	1 - 118	1120	X	X	X
	5 - 118FAG	7520	X	X	X
	6 - 310523	7620	X	X	X
4 Alkyd (oxyd. Härt.)	0 - ohne	7040	X	X	X
	1 - 118	1140	X	X	X
	5 - 118FAG	7540	X	X	X
	6 - 310523	7640	X	X	X

Bemerkung: ¹⁾ Die Varianten mit NP 2 aus dem Hauptversuch 1 (Ausschluss wegen Refusierscheinungen) und die Varianten mit NP 4 aus dem Hauptversuch 2 (teilweise durchgeschliffene Grundierungen, siehe Kapitel 3.1.2.2) wurden nicht einbezogen.

Die gemessenen Kontaktwinkel auf den verschiedenen hydrophobierten Holzoberflächen sind in Bild 71 und diejenigen auf den Grundierungen in Bild 72 dargestellt.

Bewertung:

- Die Kontaktwinkel mit den verschiedenen Beschichtungsstoffen unterscheiden sich erwartungsgemäss beträchtlich, das relative Benetzungsverhalten wird aber durch alle Tropfenmedien ähnlich wiedergegeben (Bild 71).

- Alle Tropfenmedien zeigen auf den mit NP 118F und 118FAG hydrophobierten Holzoberflächen hohe Kontaktwinkel und deuten auf ein eher ungünstiges Benetzungsverhalten. Die insgesamt beste Benetzung zeigt sich bei NP 310523.
- Die wässrige UV Grundierung (GR 2) zeigt ein sehr ähnliches Verhalten wie Wasser mit durchwegs hohen Kontaktwinkeln, während die 100%UV (GR 1) und die Alkyd Grundierung (GR 4) auf NP 118, 119 und 310523 eine besonders gute Benetzung ergeben.
- Das Benetzungsverhalten der Deckbeschichtungen auf den Grundierungen hängt sowohl von der Grundierung selber als auch von der darunter liegenden Hydrophobierung ab (Bild 72). Dementsprechend zeigen sich Auffälligkeiten nur bei bestimmten Hydrophobierungs-Grundierungs-Kombinationen (z.B. NP 118 und GR 4).
- Wiederum zeigen Wasser und die Deckbeschichtungen ein ähnliches relatives Benetzungsverhalten, jedoch auf einem anderen absoluten Niveau. Die Kontaktwinkel bei den hydrophobierten Proben sind stets leicht höher als bei den nicht-hydrophobierten Holzoberflächen.
- Die mit einer zusätzlichen Hydrophobierung modifizierte Deckbeschichtung 5 zeigt das gleiche Benetzungsverhalten wie die Standard-Deckschicht 2.

Bild 71: Kontaktwinkel (Tropfenalter: 60 s) von 3 Grundierungen (und Wasser) auf verschiedenen hydrophobierten Holzoberflächen

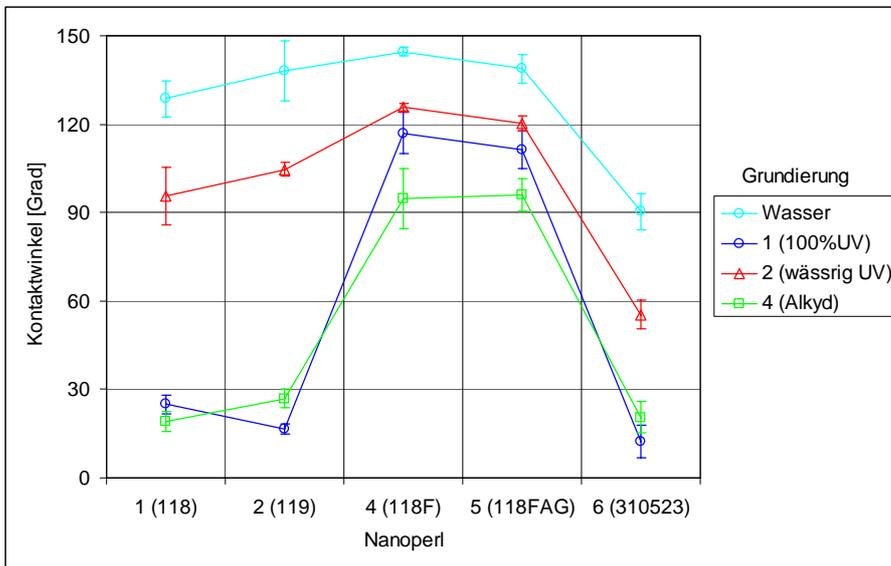
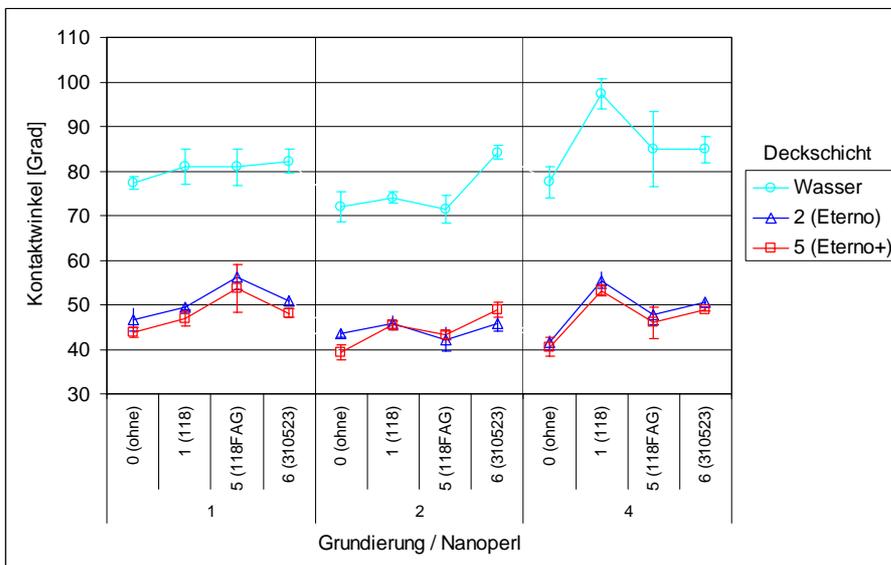


Bild 72: Kontaktwinkel (Tropfenalter: 60 s) von 2 Deckbeschichtungen (und Wasser) auf verschiedenen Grundierungs-Hydrophobierungs-Kombinationen



3.3.1.2 Haftfestigkeit

Die Haftung der Beschichtungen im unbewitterten Ausgangszustand wurde mit einem mechanischen Abreissversuch geprüft. Die gemessenen Haftfestigkeiten der kompletten Beschichtungen sind in den Bildern 73 und 74 dargestellt. Die beobachteten Bruchmodi (Art resp. Lage der Brüche) können in den Bildern 75 bis 76 als prozentuale Häufigkeit der Brüche zwischen Deckschicht und Grundierung oder im Interface zwischen Substrat und Beschichtung sowie der reinen Holzbrüche verglichen werden. Die restlichen Anteile (Ergänzung auf 100%) sind Brüche zwischen oder in den verschiedenen Schichten des Beschichtungssystems und werden nicht separat ausgewiesen.

Bild 73: Haftfestigkeit der kompletten Beschichtung in Abhängigkeit von Hydrophobierung, Grundierung und dem Feuchtezustand des Substrates (trocken, nass) in den Hauptversuchen 1 und 2 bei Fichte (links) und Tanne (rechts)

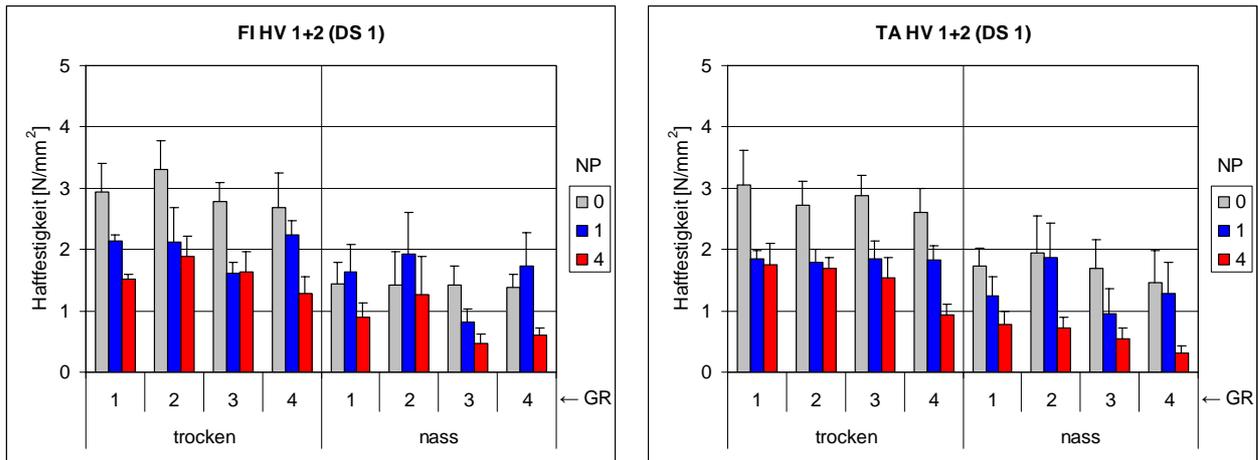
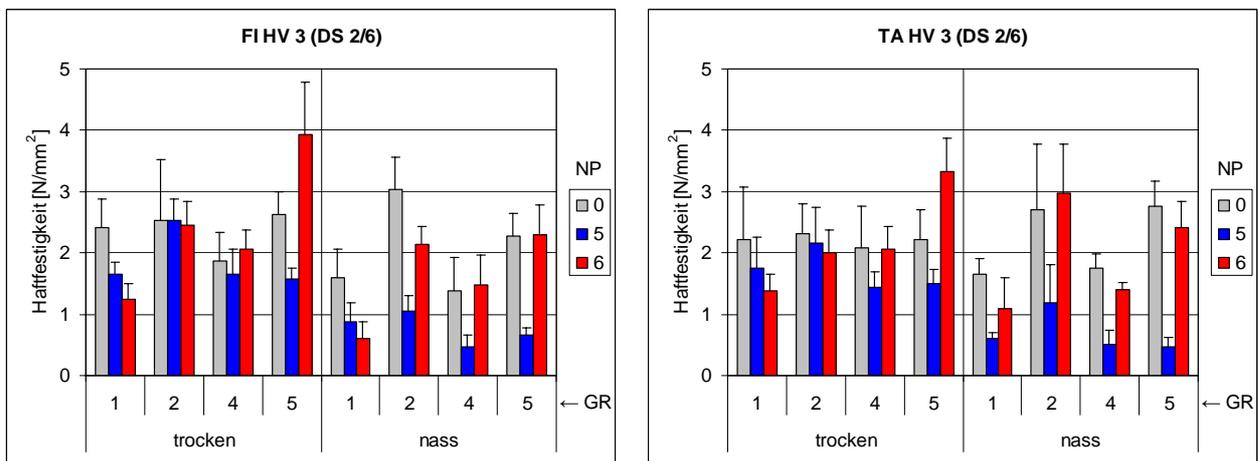


Bild 74: Haftfestigkeit der kompletten Beschichtung in Abhängigkeit von Hydrophobierung, Grundierung und dem Feuchtezustand des Substrates (trocken, nass) im Hauptversuch 3 bei Fichte (links) und Tanne (rechts)



Bewertung:

- Die durchschnittliche Haftfestigkeit der Beschichtungssysteme auf den nicht-hydrophobierten Substraten schwankt zwischen 1.5 und 3 N/mm² (Bilder 73 und 74). Aufgrund des grossen Einflusses von 'lokalen' Faktoren (Qualität der Holzoberfläche, Jahrringstellung, Anteil Früh- / Spätholz) streuen die Werte innerhalb der Versuchsvarianten relativ stark. Der Einfluss der eigentlichen Versuchsfaktoren (Substrat, Hydrophobierung, Grundierung und Deckschicht) ist deshalb nicht immer deutlich erkennbar (siehe HV3).
- Auf einem feuchten Substrat haften die Beschichtungen in der Regel deutlich schlechter (Reduktion auf ca. 50% der Trockenhaftung). Zwischen Fichte und Tanne ist kein genereller Unterschied feststellbar. Auch der Einfluss der Grundierungen ist interessanterweise recht schwach. Dies alles deutet auf einen grossen Einfluss der Oberflächeneigenschaften des Substrates auf die Haftfestigkeit hin.

- Eine Hydrophobierung der Holzoberfläche hat in den meisten Fällen einen negativen Einfluss auf die Haftung der nachfolgenden Beschichtung (Haftfestigkeiten z.T. $<1 \text{ N/mm}^2$). Das Ausmass der Reduktion ist abhängig vom Typ des Hydrophobierungsmittels. In den Hauptversuchen 1 und 2 ist die Haftfestigkeit bei NP 118F (NP 4) deutlich geringer als bei NP 118 (NP 1). Die Nasshaftung ist interessanterweise bei mit NP 118 hydrophobierter Fichte teilweise sogar besser als auf unbehandeltem Holz (Bild 73). Im Hauptversuch 3 ist der negative Einfluss der Hydrophobierungen insgesamt weniger ausgeprägt (Bild 74). Bei NP 118FAG (NP 5) zeigen sich (insbesondere bei der Nasshaftung) aber häufiger Haftungsdefizite als bei NP 310523 (NP 6). Einen auffallend geringen Einfluss hat die Hydrophobierung im Hauptversuch 3 auf die Trockenhaftung der Grundierung 2. In Kombination mit dem Nanocoat-System (GR 5 mit DS 6) ist bei NP 310523 (NP 6) eine deutliche Verbesserung der Trockenhaftung feststellbar.
- Der dominierende Bruchmodus ist die Delamination zwischen Substrat und Grundierung ('I-face', Bilder 75 und 76). Der prozentuale Anteil ist dabei bei den hydrophobierten Proben tendenziell leicht höher als bei den nicht-hydrophobierten Proben. Reiner Holzbruch ('Holz') kommt in grösserem Umfang nur bei den nicht-hydrophobierten Proben vor. Im Hauptversuch 3 waren, insbesondere bei Grundierung 2, häufiger Delaminationen zwischen Grundierung und Deckschicht zu beobachten als in den Hauptversuchen 1 und 2 (Effekt des geringen Zwischenschliffes?).

Bild 75: Bruchmodi der kompletten Beschichtung in Abhängigkeit von Hydrophobierung, Grundierung und dem Feuchtezustand des Substrates (trocken, nass) in den Hauptversuchen 1 und 2 bei Fichte (links) und Tanne (rechts). 'Holz': reiner Holzbruch, 'I-face': Bruch zwischen Substrat und Grundierung, 'GR-DS': Bruch zwischen Grundierung und Deckschicht.

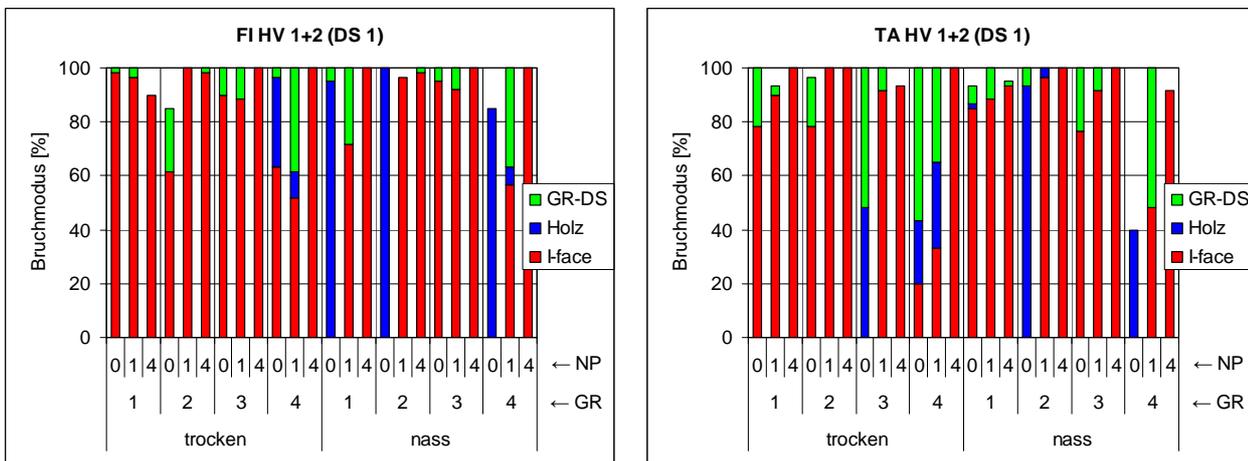
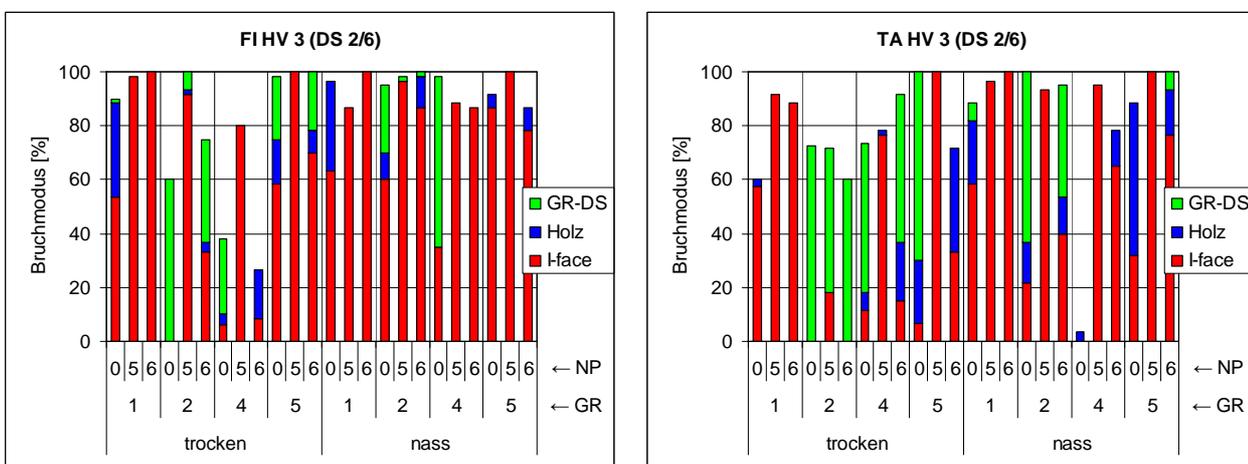


Bild 76: Bruchmodi der kompletten Beschichtung in Abhängigkeit von Hydrophobierung, Grundierung und dem Feuchtezustand des Substrates (trocken, nass) im Hauptversuch 3 bei Fichte (links) und Tanne (rechts). 'Holz': reiner Holzbruch, 'I-face': Bruch zwischen Substrat und Grundierung, 'GR-DS': Bruch zwischen Grundierung und Deckschicht.



Die Haftung der Beschichtungen nach einer Bewitterung wurde mit der Gitterschnittprüfung untersucht. Zwei Beispiele mit guter resp. schlechter Haftung sind in Bild 77 dokumentiert. Die Gitterschnittbewertungen sind für die Beschichtungen des Hauptversuchs 1 nach einer 1jährigen Freibewitterung in Bild 78 und für die Beschichtungen des Hauptversuchs 3 nach 2000 h künstlicher Bewitterung im QUV in Bild 79 dargestellt.

Bild 77: Beispiele von Gitterschnittprüfungen an einer identischen Beschichtung auf unbehandelter (links) und hydrophobierter Holzoberfläche (rechts) nach 2000 h künstlicher Bewitterung im QUV



Bild 78: Adhäsionsbeurteilung der kompletten Beschichtungen im Hauptversuch 1 nach 1jähriger Freibewitterung in Abhängigkeit von Hydrophobierung, Grundierung und Deckschicht bei Fichte (links) und Tanne (rechts). NP 2 (119) ist nur bei den Grundierungen 2 und 4 vorhanden.

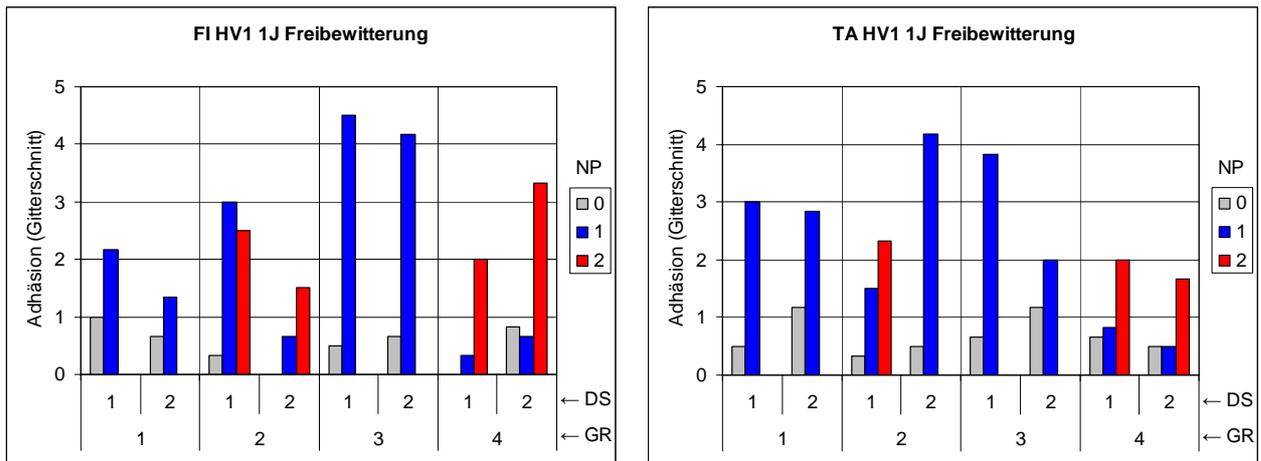
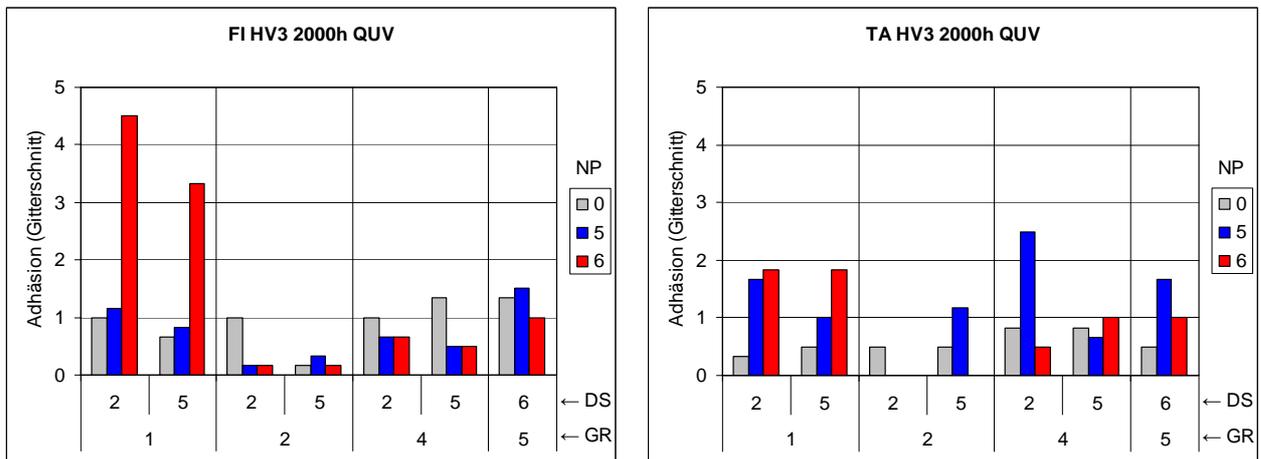


Bild 79: Adhäsionsbeurteilung der kompletten Beschichtungen im Hauptversuch 3 nach 2000 h künstlicher Bewitterung im QUV in Abhängigkeit von Hydrophobierung, Grundierung und Deckschicht bei Fichte (links) und Tanne (rechts)



Bewertung:

- Die Gitterschnittbewertungen der untersuchten Beschichtungen nach einer Bewitterung (Bilder 77 bis 79) reichen von fast perfekter Haftung mit keinen oder nur geringen Ablösungen (Bewertung <1) bis zu totalem Haftungsversagen mit grossflächigen Ablösungen (Bewertung >4). Die Unterschiede zwischen den verschiedenen Versuchsvarianten sind teilweise deutlich ausgeprägter als bei den mechanisch gemessenen Haftfestigkeiten im unbewitterten Ausgangszustand.
- Während die Haftung der Beschichtungen nach einer Bewitterung auf den nicht-hydrophobierten Proben unkritisch erscheint (Bewertung ≤ 1), ist sie auf den hydrophobierten Holzoberflächen meist deutlich vermindert. Wie bereits im unbewitterten Ausgangszustand beeinflusst der Typ des Hydrophobierungsmittels das generelle Ausmass der Reduktion. Auffallend ist jedoch, dass sich die grössten Probleme bei ganz bestimmten Kombinationen von Hydrophobierung und Grundierung ergeben. Ungünstig scheint im Hauptversuch 1 die Kombination von NP 118 (NP 1) mit den Grundierungen 1, 2 und 3 zu sein, während bei Grundierung 4 die Kombination mit NP 118 (NP 1) problemlos, jedoch mit NP 119 (NP 2) ungünstig ist (Bild 78). Im Hauptversuch 3 fällt besonders die Kombination von NP 310523 (NP 6) mit Grundierung 1 negativ auf (Bilder 77 und 79). Kaum Haftungsprobleme ergeben sich hingegen bei den Varianten mit Grundierung 2 im Hauptversuch 3, unabhängig von einer vorgängigen Hydrophobierung. Diese Beobachtung stimmt gut mit den mechanischen Trocken-Haftfestigkeiten im unbewitterten Ausgangszustand überein (siehe Bild 74).

3.4 Witterungsbeständigkeit / Dauerhaftigkeit

Die durchgeführten 'Norm'-Bewitterungsversuche sind ein umfassender und realitätsnaher Leistungstest für eine Beschichtung, in welchem alle zuvor einzeln betrachteten Eigenschaften simultan beansprucht werden. Die Ergebnisse (insbesondere die Zeitskala) gelten aber primär nur für diese 'verschärfte' Bewitterung und sind nicht direkt auf die Situation an einer Gebäudefassade übertragbar. Viele Verwitterungsvorgänge sind durch die Süd-Exposition, die 45°-Neigung und den fehlenden konstruktiven Schutz gegenüber den Bedingungen an einer Fassade je nach deren Beanspruchungssituation deutlich beschleunigt.

Die Beurteilung des Probenzustandes beruht vorwiegend auf einer visuellen Bewertung, welche keine 'präzisen' Messwerte liefert, sondern Skalawerte von 0 (keine Veränderung) bis 5 (sehr starke Veränderung) (siehe Kapitel 2.3.4). Mit derartigen 'Leistungs'-Daten können deshalb nur relativ grosse Unterschiede zwischen Versuchsvarianten zuverlässig erkannt werden.

Die Beobachtungsdauer der Freibewitterungen lag bei Projektende im Vorversuch bei 2 Jahren (24 Monate), im Hauptversuch 1 bei 1.5 Jahren (18 Monate), im Hauptversuch 2 bei 1 Jahr (12 Monate) und im Hauptversuch 3 bei 7 Monaten (siehe Bild 15). Alle Freibewitterungen werden zur Zeit noch weitergeführt. Die künstlichen Bewitterungen im QUV dauerten im Vorversuch 3000 h und in den Hauptversuchen 2000 h. Die unterschiedlichen Bewitterungsperioden und Beobachtungsdauern bei der Freibewitterung müssen bei der Interpretation der Ergebnisse berücksichtigt und anhand der künstlichen 'Referenz'-Bewitterungen im QUV gewichtet werden.

Die Ergebnisse der Bewitterungsversuche werden sowohl anhand von graphischen Darstellungen der Probenbewertung (Mittelwert von jeweils 3 Wiederholungsproben pro Versuchsvariante) als auch anhand von beispielhaften fotografischen Vergleichen diskutiert. Der Detailgenauigkeit der Fotos sind allerdings wegen der beschränkten Bildauflösung Grenzen gesetzt. Als wichtigste Kenngrössen für die Beurteilung der Witterungsbeständigkeit werden der Gesamtzustand (Gesamtbeurteilung), die Anzahl der Risse (Rissmenge) und das Ausmass der Astverfärbung sowie des oberflächlichen Pilzbewuchses (ungewaschener Zustand) verwendet (siehe Tabelle 18). Die Messungen von weiteren spezifischen Eigenschaften (Benetzungsverhalten, Feuchteschutzwirkung, Haftfestigkeit) an bewitterten Proben wurden bereits in den vorstehenden Kapiteln behandelt.

Die Ergebnisse des Vorversuches sind in den Bildern 80 bis 82 dargestellt.

Bewertung:

- Die verschiedenen Beschichtungsvarianten im Vorversuch zeigen insgesamt eine recht ähnliche Witterungsbeständigkeit, wobei sich bei der künstlichen Bewitterung eine etwas deutlichere Unterscheidung als bei der Freibewitterung ergibt.
- Die Beschichtungsvarianten 1 und 2.1 zeigen nach 2 Jahren Freibewitterung den besten, die Varianten 7 und 10 den vergleichsweise schlechtesten Zustand (Bilder 80 und 81). Die künstliche Bewitterung führt ausser bei den Varianten 5 und 7, welche vergleichsweise zu gut abschneiden, zum gleichen Befund.

- Alle Proben zeigen ein sehr ähnliches Ausmass an Verschmutzung resp. oberflächlichem Pilzbewuchs. Auffallend positiv sind die nur schwachen Astverfärbungen (Bild 81).
- Die Gesamtfarbänderung der Beschichtung (Deckschicht) nach 3000 h künstlicher resp. 2 Jahren Freibewitterung beträgt rund 5 bis 7 Einheiten (Bild 82). Dies ist angesichts der miteinbezogenen Verschmutzung resp. des oberflächlichen Pilzbefalles (ungewaschene Proben) als eine eher geringe Farbveränderung einzustufen. Auffällig ist die in der Freibewitterung erkennbare, anfänglich geringere Farbänderung der auf einer UV-Grundierung basierenden Beschichtungen 7 und 10 (Bild 82, rechts).

Bild 80: Bewertung der Witterungsbeständigkeit im Vorversuch

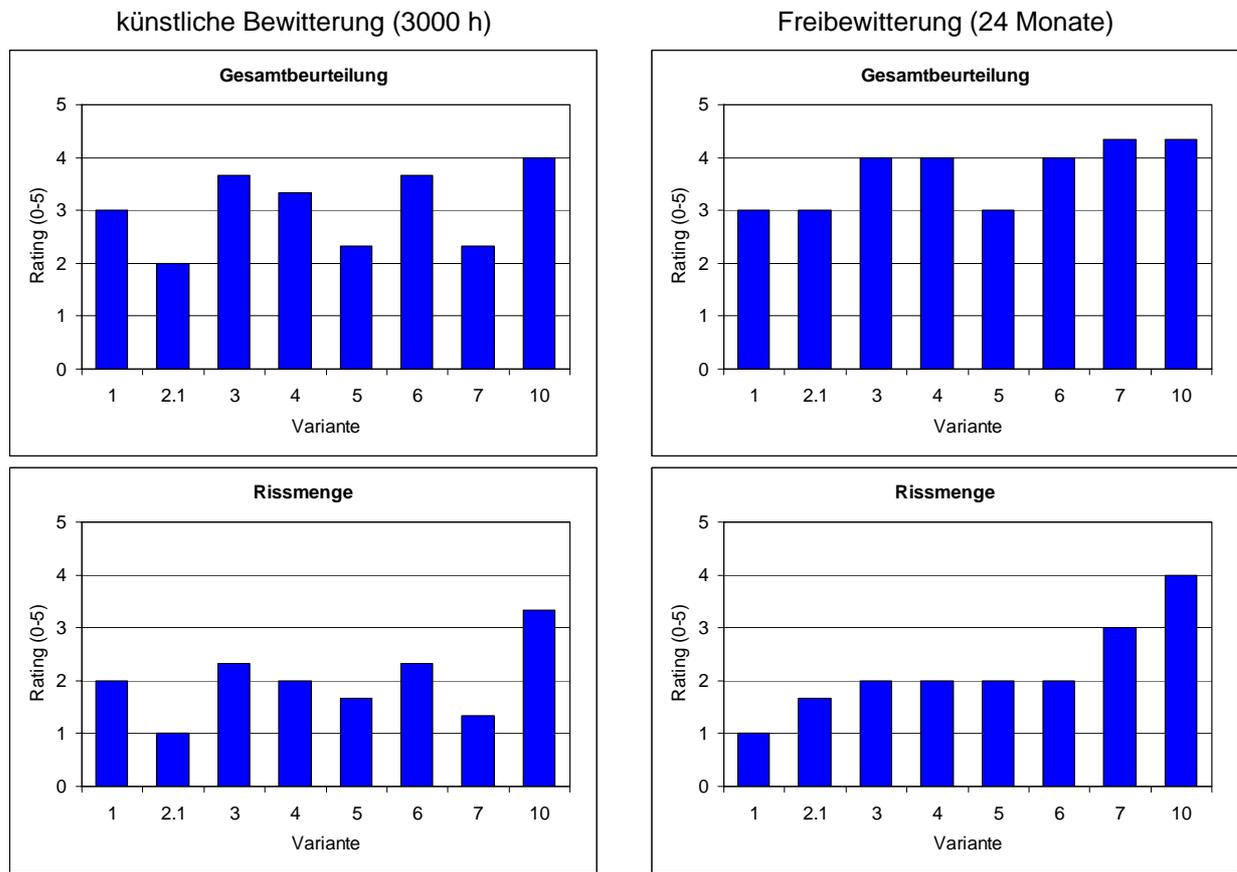


Bild 81: Beispiele des Probenzustandes nach 24 Monaten Freibewitterung im Vorversuch (unbewitterte Referenzprobe jeweils rechts)

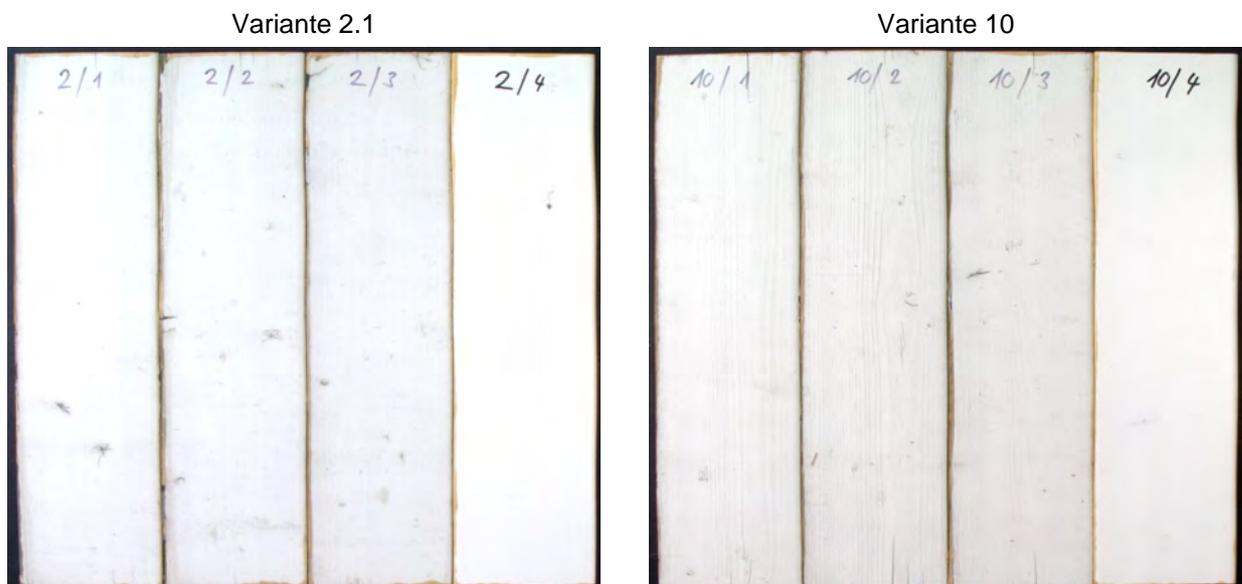
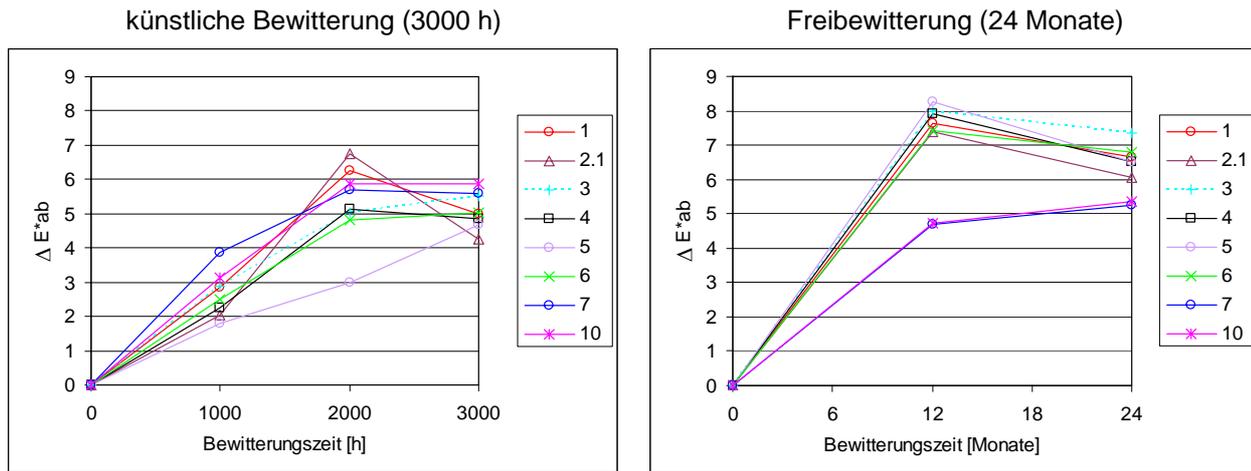


Bild 82: Farbänderung der Beschichtungen (Deckschicht) während der Bewitterungen im Vorversuch



Der Verlauf der Verwitterung bei den unbehandelten und lediglich hydrophobierten Proben (Fichte) in der Freibewitterung der Hauptversuche 1 bis 3 ist in den Bildern 83 bis 85 dokumentiert.

Bild 83: Verlauf der Verwitterung (Freibewitterung) bei den unbehandelten und lediglich hydrophobierten Proben (Fichte) im Hauptversuch 1

Hydrophobierung	Freibewitterung		
	3 Monate	7 Monate	12 Monate
ohne	(kein Bild verfügbar)		
118 (Sprühen)	(kein Bild verfügbar)		
119 (Sprühen)	(kein Bild verfügbar)		

Bild 84: Verlauf der Verwitterung (Freibewitterung) bei den unbehandelten und lediglich hydrophobierten Proben (Fichte) im Hauptversuch 2

Hydrophobierung	Freibewitterung								
	3 Monate			7 Monate			12 Monate		
ohne									
118F (FWB)									

Bild 85: Verlauf der Verwitterung (Freibewitterung) bei den unbehandelten und lediglich hydrophobierten Proben (Fichte) im Hauptversuch 3

Hydrophobierung	Freibewitterung								
	3 Monate			7 Monate			12 Monate		
ohne									
118FAG (Pinsel)									
310523 (Pinsel)									

Bewertung:

- In der Anfangsphase der Bewitterung bewirkt die wasserabweisende Wirkung der Hydrophobierungen, dass die Holzoberfläche gegenüber unbehandeltem Holz deutlich weniger durch Bläue- und Schimmelpilze besiedelt und dadurch weniger verfärbt wird. Infolge des fehlenden UV-Schutzes sind die Hydrophobierungen aber nur beschränkt witterungsbeständig und mit fortschreitender Verwitterung (nach ca. 1 Jahr) verschwinden die Unterschiede weitgehend. Diese Beobachtung stimmt gut mit der gemessenen Abnahme des Abperleffektes (Kontaktwinkel) im selben Zeitraum überein (Bild 24).
- Interessant ist ein Vergleich der vor direkter Bewitterung geschützten Bereiche am oberen Rand der Proben. Während bei den nicht-hydrophobierten Proben diese Bereiche Wasserflecken und Verfärbungen aufweisen, bleiben sie nach einer Hydrophobierung weitgehend unverändert (hell). Dieser Befund zeigt, dass die Wirkung der Hydrophobierung ohne direkte Bewitterung länger erhalten bleibt.
- Die Vergrauung der hydrophobierten Proben scheint etwas gleichmässiger zu sein als bei unbehandeltem Holz (subjektive Beobachtung).
- Wespenfrass ist auch bei hydrophobierten Proben zu beobachten (z.B. Bild 83, NP 119).

Die Ergebnisse der visuellen Bewertung (siehe Kapitel 2.3.4) des Zustandes der beschichteten Proben nach einer künstlichen oder natürlichen Bewitterung in den Hauptversuchen 1 bis 3 sind in den Bildern 86 bis 88 dokumentiert. Verschiedene Beispiele des Probenzustandes nach künstlicher oder natürlicher Bewitterung zeigen die Bilder 89 bis 93. Bei den Freibewitterungen der Hauptversuche 1 und 2 wurden jeweils 2 Farbton-Varianten (weiss, grau) untersucht, in den künstlichen Bewitterungen wurde nur 1 Farbton einbezogen (siehe Tabelle 12). Für Vergleiche zwischen den Freibewitterungsserien ist die unterschiedlich lange Bewitterungszeit zu beachten.

Bewertung:

- Die Ergebnisse der künstlichen Bewitterung im QUV und der Freibewitterung stimmen generell gut überein. Eine Erkennung von 'guten' resp. 'ungünstigen' Beschichtungsvarianten ist damit relativ zuverlässig möglich. Aufgrund der visuellen Bewertung und der damit verbundenen nicht-stetigen Beurteilungsskala (0-5) ist die Trennschärfe zwischen ähnlich guten Beschichtungsvarianten allerdings beschränkt.
- Von einem guten Beschichtungssystem kann erwartet werden, dass im ersten Jahr eines (verschärften) Freibewitterungsversuches gemäss EN 927-3 resp. nach 2000 h künstlicher Bewitterung nur geringe Verwitterungserscheinungen auftreten (siehe Kapitel 4.1). Entsprechend sollten insbesondere die 'kritischen' Bewertungsgrössen 'Rissbildung' und 'Haftfestigkeit' erst kleine Werte aufweisen (max. 1 bis 2). Erfahrungsgemäss treten dann im zweiten Jahr der Freibewitterung verstärkt Beschichtungsschäden auf.
- Der deutlichste Einflussfaktor auf die Witterungsbeständigkeit der Beschichtungssysteme sind die Grundierungen. Im Hauptversuch 1 erreichen die Beschichtungen mit Grundierung 2 oder 4 eine deutlich bessere Beurteilung (Gesamteindruck, Rissmenge) als die Grundierungen 1 und 3 (Bild 86). Einige Beschichtungsvarianten sind auch nach 18 Monaten Freibewitterung noch rissfrei. Ein Bildvergleich der Beschichtungen mit Grundierung 1 (Bild 89, schlechter Probenzustand) resp. Grundierung 2 (Bild 90, guter Probenzustand) verdeutlicht diese Beurteilung. Im Hauptversuch 2 zeigt insgesamt wiederum die Grundierung 2 die geringste Rissbildung, während Grundierung 4 als Folge des zu starken Zwischenschliffes resp. der geringen Schichtdicke nicht besser abschneidet als die Grundierungen 1 und 3 (Bild 87). Auffällig sind die deutlich schlechteren Werte mit Birkenperrholz, wo sich im Verlauf der Bewitterungen insbesondere eine zunehmend starke Rissbildung zeigte (Bild 91). Auch im Hauptversuch 3 zeigt bei vielen Kenngrössen die Grundierung 2 die besten Ergebnisse (Bild 88). Dies wird auch anhand eines Bildvergleichs der Beschichtungen mit Grundierung 1 resp. 2 augenfällig (Bild 92).
- Obwohl das Nanocoat-System (Grundierung 5 mit Deckschicht 6) in den Laborversuchen (z.B. Feuchteschutzwirkung in Bild 51) und in der künstlichen Bewitterung im QUV hervorragende Ergebnisse zeigt, versagte es unerwarteterweise im Freibewitterungsversuch innerhalb kurzer Zeit (Bild 88). Während der ersten Winterperiode im Dezember 2005 (tiefe Temperaturen, steigende Holzfeuchte) trat eine starke Rissbildung auf, welche auf eine ungenügende Elastizität (resp. zu hohe Glasübergangstemperatur) des Beschichtungsfilms hindeutet (Bild 93).

- In der bisherigen Versuchsdauer ist kein relevanter, positiver Einfluss der vorgängigen Hydrophobierung der Holzoberfläche auf die Witterungsbeständigkeit erkennbar. Bei mit NP 118 hydrophobiertem Birkensterrholz ist sogar eine Verschlechterung des Verwitterungsverhaltens (grössere Rissbildung) zu beobachten (Bild 91). Aufgrund der etwas 'versteckten' Lage der Hydrophobierungsschicht kann postuliert werden, dass die Schutzwirkung gegen Flüssigwasser erst bei stärkerer Verwitterung und grösseren Beschichtungsschäden (Risse) zum Tragen kommt. Diese Hypothese lässt sich aber erst anhand der Fortsetzung der Bewitterungen überprüfen.
- Der Farbton der Deckschicht zeigt bezüglich Gesamtzustand oder Rissmenge entgegen den Erwartungen (bis jetzt) kaum einen Einfluss. Bei den grauen Deckschichten ist eigentlich infolge der höheren Temperaturbelastung eine gegenüber den weissen Deckschichten beschleunigte Verwitterung zu erwarten (nur bei der Freibewitterung). Der Einfluss der darunter liegenden Grundierung ist aber offensichtlich dominanter.
- Die Beurteilung der Astverfärbungen ist heikel, da das Verfärbungs-Potential sehr stark von der Art der in den Proben vorkommenden Äste abhängt. Trotzdem zeigen sich auch beim Ausmass der Astverfärbungen die Grundierungen als bestimmende Faktoren; wiederum mit den geringsten Verfärbungen bei Grundierung 2 (Bilder 86 bis 88). Mit Ausnahme bei Grundierung 1 im Hauptversuch 1 ist kein genereller Einfluss des Farbtones der Deckschicht (durch Temperatureffekte) auf das Ausmass der Astverfärbung feststellbar (Bild 86). Neben der wichtigen Aufgabe als Feuchtesperre zeigt sich damit auch die Bedeutung der Grundierungen als Sperrschicht gegen die Migration von Holzinhaltstoffen.
- Auch die Beurteilung des oberflächlichen Pilzbewuchses ist heikel, da eine klare Unterscheidung zwischen Schmutzpartikeln und Pilzhyphen oft schwierig ist. Der oberflächliche Pilzbewuchs auf den beschichteten Proben in der Freibewitterung scheint jedoch stark durch den Farbton der Deckschicht beeinflusst zu sein. Auf den weissen Deckschichten ist der Pilzbewuchs deutlich stärker als auf den grauen, was auf die für das Pilzwachstum offenbar günstigeren (tieferen) Oberflächentemperaturen und den damit zusammenhängenden Phänomenen (mehr Kondenswasser, höhere Holzfeuchte) zurückzuführen ist (Bilder 86 und 87). Die mit nanoskaligem Silber ausgerüstete Deckschicht 5 zeigt gegenüber der Standard-Deckschicht 2 keinen geringeren Pilzbewuchs (Bild 88). Hingegen ist beim Nanocoat-System (Grundierung 5 mit Deckschicht 6) ein geringerer Oberflächenbewuchs feststellbar.
- Bereits aus den bisherigen (kurzzeitigen) Beobachtungen ergeben sich klare Hinweise auf 'gute' resp. 'ungünstige' Beschichtungsvarianten. Das insgesamt klar beste Verhalten zeigen dabei die Beschichtungsvarianten mit der wässrigen UV-Grundierung (Grundierung 2). Demgegenüber zeigen die Beschichtungen mit den Grundierungen 1 und 3 insbesondere eine zu hohe Rissanfälligkeit. Für eine abschliessende Beurteilung des Langzeitverhaltens ist die bisherige Bewitterungsdauer aber noch zu gering. Dafür sollten die Bewitterungsversuche auf mindestens 2 Jahre ausgedehnt werden.

Bild 86: Bewertung der Witterungsbeständigkeit im Hauptversuch 1

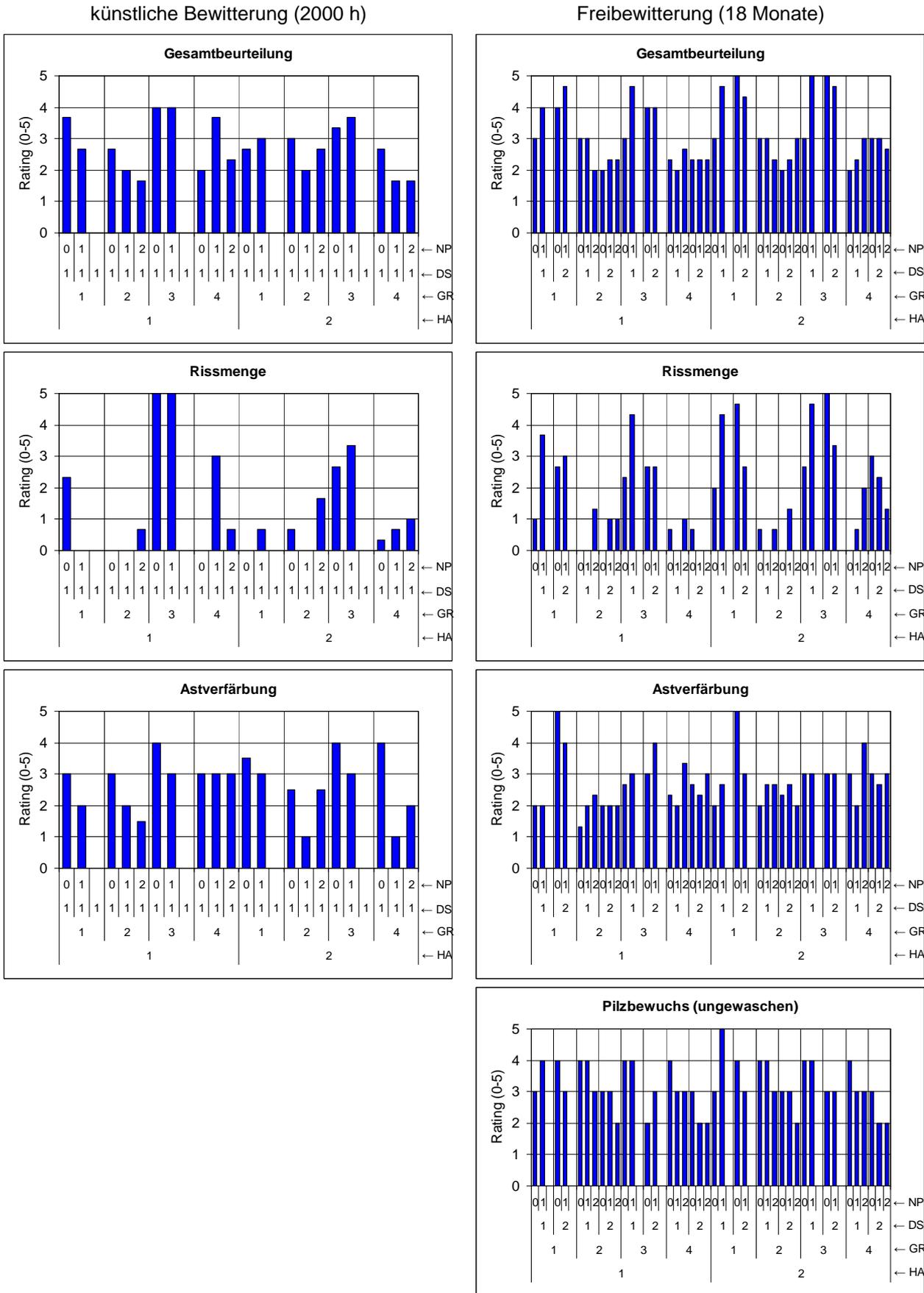


Bild 87: Bewertung der Witterungsbeständigkeit im Hauptversuch 2

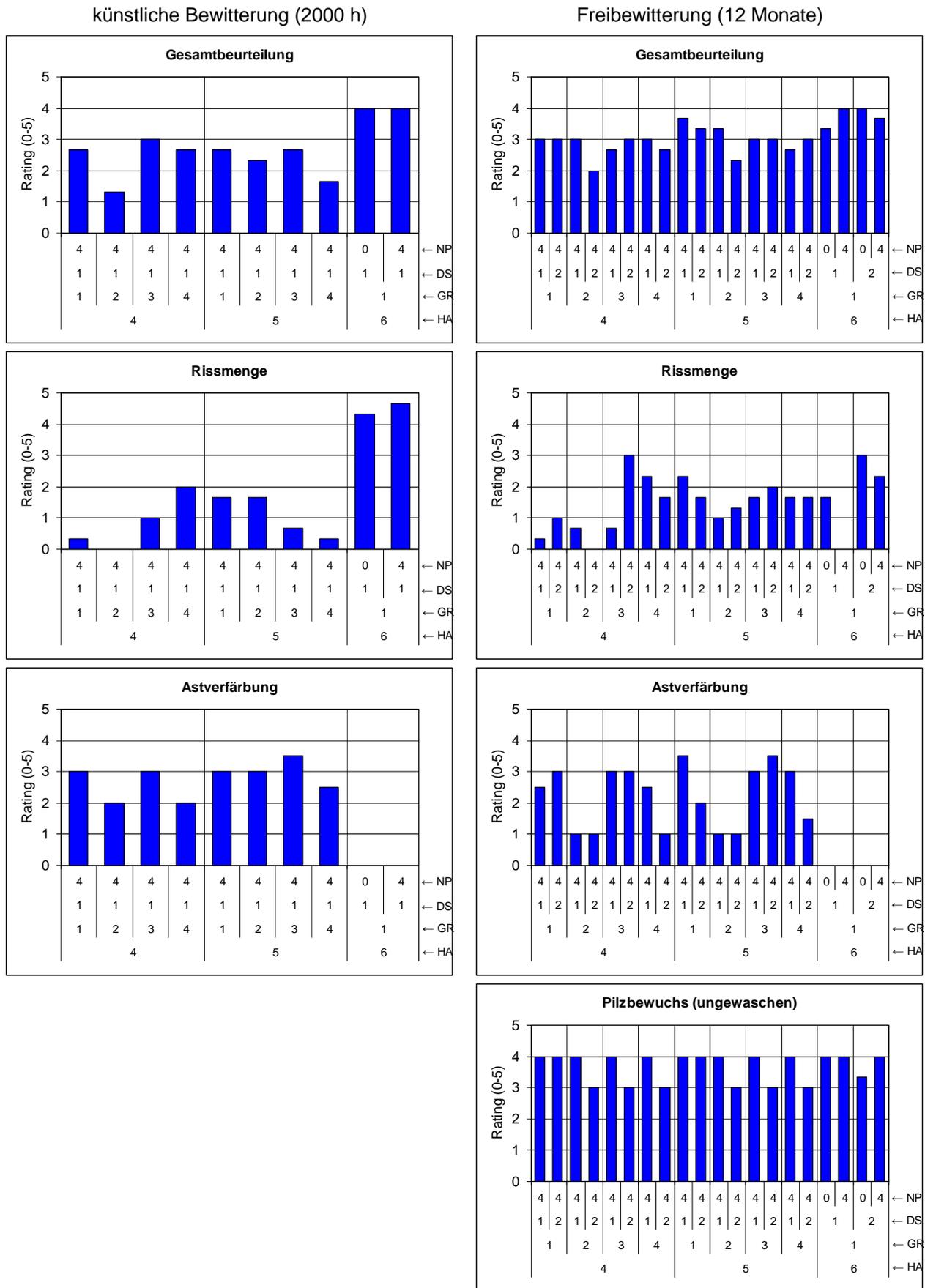


Bild 88: Bewertung der Witterungsbeständigkeit im Hauptversuch 3

künstliche Bewitterung (2000 h)

Freibewitterung (7 Monate)

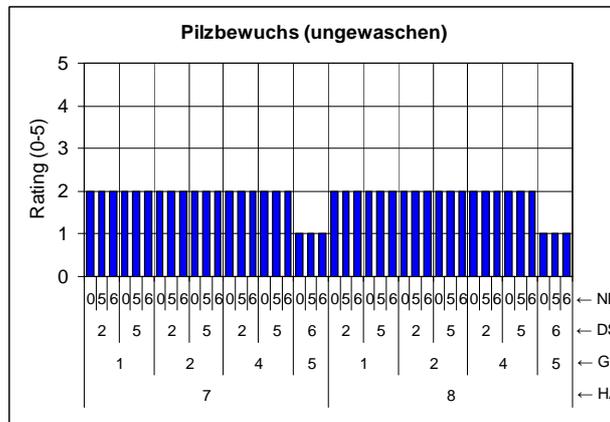
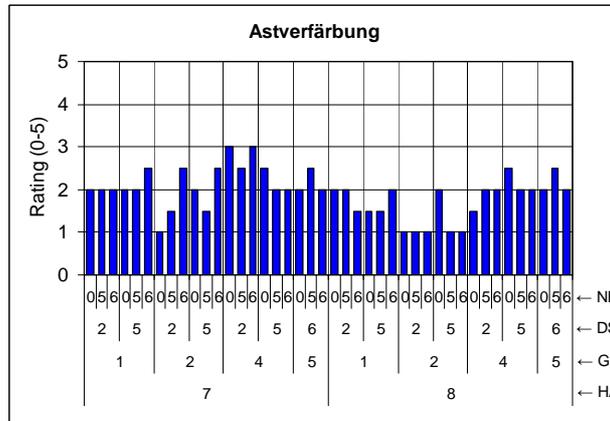
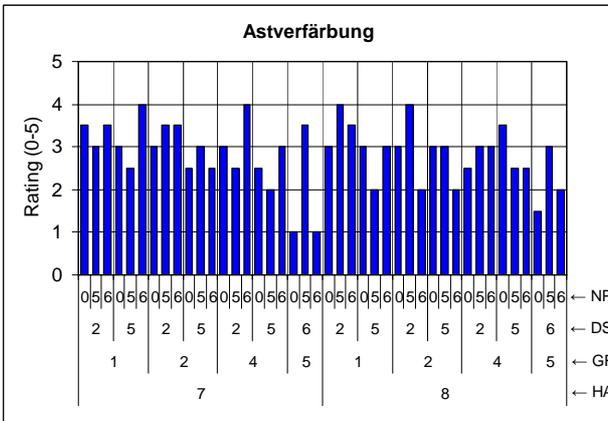
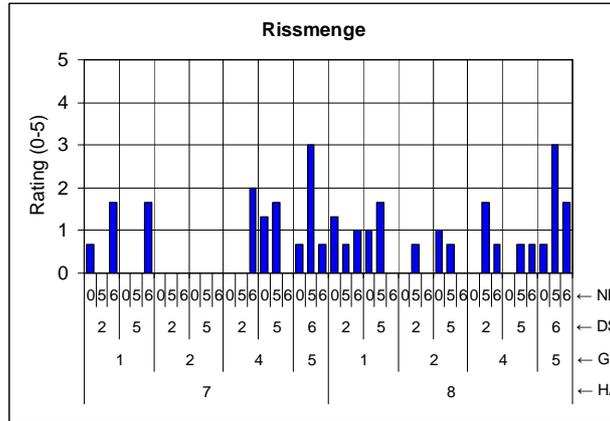
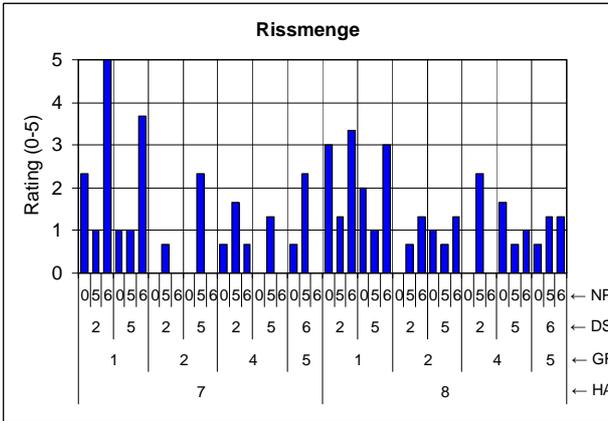
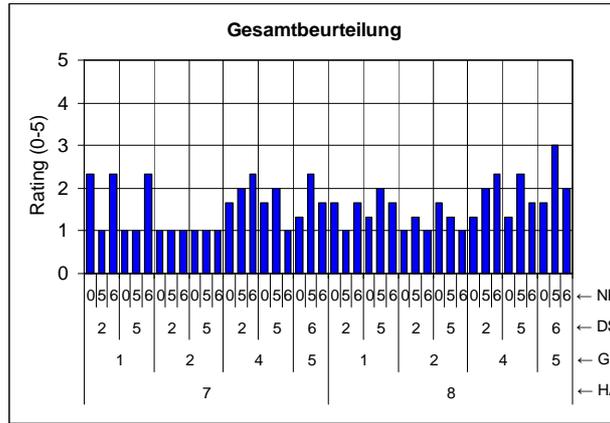
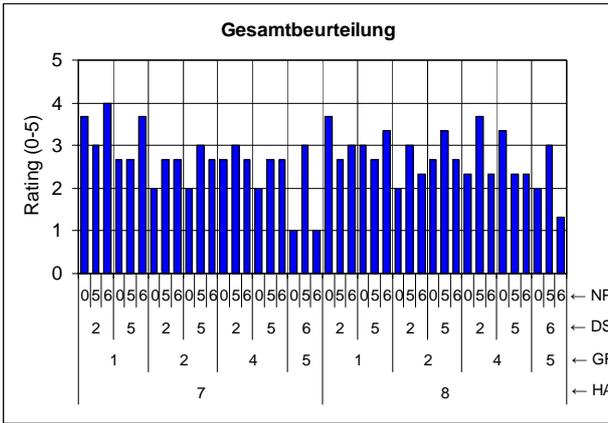


Bild 89: Beispiele des Probenzustandes nach 12 Monaten Freibewitterung der Beschichtungsvarianten mit Grundierung 1 im Hauptversuch 1 (unbewitterte Referenzprobe jeweils links)

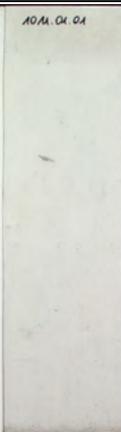
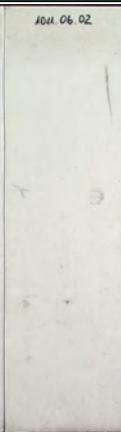
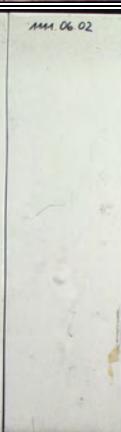
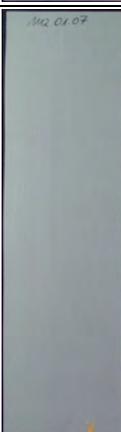
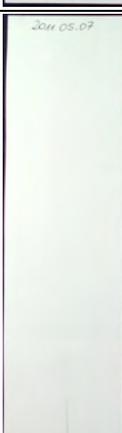
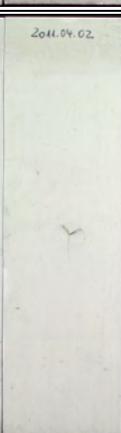
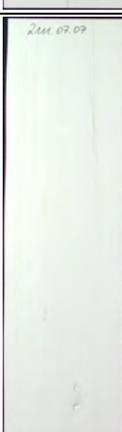
Holzart	Hydrophobierung	Grundierung 1 (schlechter Zustand)							
		DS 1 (weiss)				DS 2 (grau)			
FI	ohne								
	118								
TA	ohne								
	118								

Bild 90: Beispiele des Probenzustandes nach 12 Monaten Freibewitterung der Beschichtungsvarianten mit Grundierung 2 im Hauptversuch 1 (unbewitterte Referenzprobe jeweils links)

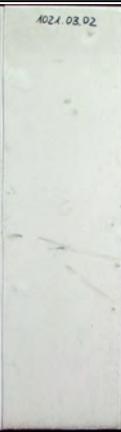
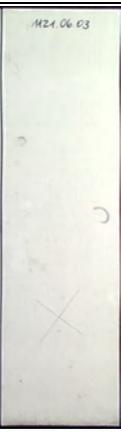
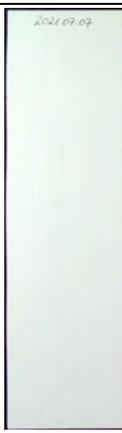
Holzart	Hydrophobierung	Grundierung 2 (guter Zustand)							
		DS 1 (weiss)				DS 2 (grau)			
FI	ohne								
	118								
TA	ohne								
	118								

Bild 91: Zeitliche Abfolge der Probenverwitterung im QUV bei beschichtetem Birkenperrholz (Hauptversuch 2)



Bild 92: Probenzustand aller Beschichtungsvarianten mit Grundierung 1 und 2 auf Fichte nach 2000 h künstlicher Bewitterung im QUV (Hauptversuch 3)

Hydrophobierung	Deckschicht 2	Deckschicht 5
<p>ohne</p> <p>NP 5 (118FAG)</p> <p>NP 6 (310523)</p>	Grundierung 1 (schlechter Zustand)	
	Grundierung 2 (guter Zustand)	
<p>ohne</p> <p>NP 5 (118FAG)</p> <p>NP 6 (310523)</p>		

Bild 93: Starke Rissbildung in der Nanocoat-Beschichtung (Grundierung 5 mit Deckschicht 6) nach 12 Monaten Freibewitterung (Hauptversuch 3, Probe 8556.07.01)



4 Zusatzauswertungen

In diesem Kapitel werden, basierend auf den für die Hauptfragestellungen oder in kleinen Zusatzversuchen erhobenen Daten, zusätzliche Auswertungen zu ausgewählten Detailspekten präsentiert. Aufgrund der teilweise ungenügenden Datenbasis erheben die Auswertungen keinen Anspruch auf Allgemeingültigkeit.

4.1 Leistungsbeurteilung gemäss EN 927-2

Die europäische Norm EN 927-2 legt Leistungskriterien für Beschichtungssysteme auf Holz im Aussenbereich fest. Das Ziel dieser Norm ist, anhand ausgewählter Leistungsmerkmale die Eignung von Beschichtungssystemen für die in EN 927-1 gemäss der geforderten Masshaltigkeit definierten Anwendungstufen 'masshaltig', 'begrenzt masshaltig' und 'nicht masshaltig' zu definieren (Tabelle 25). Die Leistungsbeurteilung erfolgt anhand von 4 Kriterien (Blasenbildung, Rissbildung, Ablätterung, Haftfestigkeit) aus der visuellen Zustandsbeurteilung nach einer 12-monatigen Freibewitterungsprüfung gemäss EN 927-3 sowie anhand der Wasseraufnahme gemäss EN 927-5. Nachfolgend wird eine orientierende Beurteilung der in diesem Projekt verwendeten Beschichtungssysteme nach diesem Schema durchgeführt.

Tabelle 25: Leistungsanforderungen für Holzbeschichtungen im Aussenbereich gemäss EN 927-2 (2006)

Bewertungsgrösse		Grenzwerte für Anwendungstufen (Masshaltigkeit) ⁵⁾		
		masshaltig	begrenzt masshaltig	nicht masshaltig
Blasenbildung (EN 927-3)	1)	0.3	0.7	1.0
Rissbildung (EN 927-3)		0.7	1.7	3.0
Ablätterung (EN 927-3)		0.3	0.7	1.3
Haftfestigkeit (EN 927-3)		1.0	1.0	1.0
Max. Gesamtwert	2)	7	12	19
Max. Differenz für gültige Prüfung	3)	2	3	4
Wasseraufnahme (EN 927-5)	4)	≤175 g/m ²	≤250 g/m ²	-
Bemerkungen:				
1) Zulässiges Maximum für den arithmetischen Mittelwert (auf eine Dezimalstelle) aus der Probenbeurteilung nach 12 Monaten Freibewitterung gemäss EN 927-3.				
2) Grenzwert, den die Summe aller 12 (4 x 3) Einzelergebnisse der (4) visuellen Beurteilungsparameter nicht überschreiten darf.				
3) Maximale Differenz zwischen der höchsten und der niedrigsten Bewertung bei jeder einzelnen Probenplatte. Wenn dieser Wert überschritten ist, wird die Prüfung als ungültig erklärt und muss wiederholt werden.				
4) Zulässiges Maximum für den arithmetischen Mittelwert der Prüfung nach EN 927-5. Die Grenzwerte sind zur Zeit noch unverbindliche Angaben, die nach laufenden Arbeiten der CEN/TC 139/WG 2 noch überarbeitet/bestätigt werden müssen.				
5) Beschichtungssysteme, die nicht alle diese Anforderungen erfüllen, stimmen mit den Anforderungen für eine der drei Anwendungstufen nicht überein.				

Grundsätzlich können Holzfassaden je nach Konstruktion und Anforderungen allen drei Anwendungstufen zugeordnet werden. Für beschichtete Fassaden sollte in der Regel aber eine Eignung zumindest für 'begrenzt masshaltig' gegeben sein.

Eine vollständige Einstufung der Beschichtungssysteme ist nur für den Hauptversuch 1 möglich, da lediglich bei dieser Versuchsserie auch die Prüfungen der Haftfestigkeit (Gitterschnitt) nach 12 Monaten Freibewitterung vorliegen. Bei den Hauptversuchen 2 und 3 konnte die Haftfestigkeit nicht geprüft werden, da alle Proben zugunsten einer längeren Beobachtungsdauer weiter bewittert wurden.

Die entsprechende Auswertung ist in Tabelle 26 dokumentiert und in Tabelle 27 als Übersicht gemäss den Versuchsfaktoren aufgeschlüsselt.

Tabelle 26: Leistungsbeurteilung gemäss EN 927-2 für die Beschichtungssysteme im Hauptversuch 1

Versuchsvariante				Leistungskriterien EN 927-2 (Mittelwerte)						Leistungsbewertung			
HA	NP	GR	DS	Riss- bildung	Blasen	Abblät- terung	Haft- festigkeit	Summe	Differenz	Riss- bildung	Haft- festigkeit	Summe	Gesamt
1	0	1	1	0.0	0.0	0.0	1.0	3.0	1.5	1	1	1	1
2	0	1	1	0.0	0.0	0.0	0.5	1.5	1.0	1	1	1	1
1	0	1	2	0.3	0.0	0.0	0.7	3.0	1.0	1	1	1	1
2	0	1	2	3.7	0.0	0.0	1.2	14.5	4.0	4	4	3	4
1	1	1	1	1.0	0.0	0.0	2.2	9.5	3.0	2	4	2	4
2	1	1	1	1.7	0.0	0.0	3.0	14.0	4.5	2	4	3	4
1	1	1	2	1.7	0.0	0.0	1.3	9.0	3.0	2	4	2	4
2	1	1	2	0.7	0.0	0.0	2.8	10.5	4.5	1	4	2	4
1	0	2	1	0.0	0.0	0.0	0.3	1.0	0.5	1	1	1	1
2	0	2	1	0.0	0.0	0.0	0.3	1.0	0.5	1	1	1	1
1	0	2	2	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	1	1	1	1
2	0	2	2	0.0	0.0	0.0	0.5	1.5	1.0	1	1	1	1
1	1	2	1	0.0	0.0	0.0	3.0	9.0	3.5	1	4	2	4
2	1	2	1	0.3	0.0	0.0	1.5	5.5	2.0	1	4	1	4
1	1	2	2	0.0	0.0	0.0	0.7	2.0	1.0	1	1	1	1
2	1	2	2	0.7	0.0	0.0	4.2	14.5	4.5	1	4	3	4
1	2	2	1	0.0	0.0	0.0	2.5	7.5	4.5	1	4	2	4
2	2	2	1	2.0	0.0	0.0	2.3	13.0	4.0	3	4	3	4
1	2	2	2	0.3	0.0	0.0	1.5	5.5	2.5	1	4	1	4
2	2	2	2	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	1	1	1	1
1	0	3	1	0.3	0.0	0.0	0.5	2.5	1.0	1	1	1	1
2	0	3	1	0.7	0.0	0.0	0.7	4.0	2.0	1	1	1	1
1	0	3	2	0.0	0.0	0.0	0.7	2.0	1.5	1	1	1	1
2	0	3	2	4.0	0.0	0.0	1.2	15.5	4.0	4	4	3	4
1	1	3	1	3.0	0.0	0.0	4.5	22.5	4.5	3	4	4	4
2	1	3	1	3.7	0.0	0.0	3.8	22.5	4.0	4	4	4	4
1	1	3	2	0.3	0.0	0.0	4.2	13.5	5.0	1	4	3	4
2	1	3	2	2.3	0.0	0.0	2.0	13.0	3.0	3	4	3	4
1	0	4	1	0.7	0.0	0.0	0.0	2.0	2.0	1	1	1	1
2	0	4	1	0.7	0.0	0.0	0.7	4.0	2.0	1	1	1	1
1	0	4	2	0.0	0.0	0.0	0.8	2.5	1.0	1	1	1	1
2	0	4	2	1.0	0.0	0.0	0.5	4.5	3.0	2	1	1	2
1	1	4	1	0.0	0.0	0.0	0.3	1.0	0.5	1	1	1	1
2	1	4	1	0.0	0.0	0.0	0.8	2.5	1.5	1	1	1	1
1	1	4	2	0.0	0.0	0.0	0.7	2.0	1.0	1	1	1	1
2	1	4	2	0.0	0.0	0.0	0.5	1.5	1.0	1	1	1	1
1	2	4	1	0.3	0.0	0.0	2.0	7.0	2.0	1	4	1	4
2	2	4	1	0.3	0.0	0.0	2.0	7.0	2.5	1	4	1	4
1	2	4	2	1.0	0.0	0.0	3.3	13.0	4.0	2	4	3	4
2	2	4	2	1.0	0.0	0.0	1.7	8.0	3.0	2	4	2	4

Legende:
 1 masshaltig
 2 beschränkt masshaltig
 3 nicht masshaltig
 4 nicht klassiert

Tabelle 27: Leistungsbeurteilung gemäss EN 927-2 für die Beschichtungssysteme im Hauptversuch 1

DS	GR	Fichte			Tanne		
		NP 0	NP 1	NP 2	NP 0	NP 1	NP 2
1 (weiss)	1	1	4		1	4	
	2	1	4	4	1	4	4
	3	1	4		1	4	
	4	1	1	4	1	1	4
2 (grau)	1	1	4		4	4	
	2	1	1	4	1	4	1
	3	1	4		4	4	
	4	1	1	4	2	1	4

Legende:
 1 masshaltig
 2 beschränkt masshaltig
 3 nicht masshaltig
 4 nicht klassiert

Bewertung:

- Bei der Bewertung der Ergebnisse ist zu beachten, dass die Prüfungen nicht mit der in EN 927-3 geforderten Standard-Probe (Kiefer Splint, definierte Jahrringstellung, ohne Holzfehler, keine Beschichtung auf Rückseite) durchgeführt wurden, sondern mit beschichtetem Täfer aus industrieller Produktion. Die in EN 927-2 (Tabelle 25) festgelegten Grenzwerte gelten grundsätzlich nur für diese Standard-Probe. Als 'orientierende' Richtwerte scheinen sie aber auch für den vorliegenden Fall sinnvoll.
- Nach 12 Monaten Freibewitterung wurden weder Blasen noch Abblätterungen festgestellt (Tabelle 26). Diese zwei Leistungskriterien müssen daher nicht weiter berücksichtigt werden.
- Alle vollständigen Beschichtungssysteme im Hauptversuch 1 erfüllen den Grenzwert von max. 175 g/m² Wasseraufnahme für die Anwendungsstufe 'masshaltig' (Bild 50). Auch dieses Leistungskriterium muss deshalb nicht weiter berücksichtigt werden.
- Als limitierende Leistungskriterien verbleiben somit die Rissbildung und die Haftfestigkeit (Gitterschnitt), wobei meistens die Haftfestigkeit den Ausschlag für eine tiefere Einstufung gibt (Tabelle 26). Der maximale Gesamtwert aller Einzelergebnisse ('Summe') übersteigt nie den in der entsprechenden Anwendungsstufe vorgesehenen Grenzwert und auch die maximal zugelassene Differenz ('Differenz') zwischen den Ergebnissen pro Probenplatte wird nicht überschritten.
- Die meisten Beschichtungen ohne vorherige Hydrophobierung der Holzoberfläche erreichen die Anwendungsstufe 'masshaltig' resp. 'beschränkt masshaltig' (Tabelle 27). Eine Ausnahme bildet die Kombination von grauer Deckschicht (DS 2) und Tanne. Auf hydrophobierten Holzoberflächen erreichen nur die Kombination von Grundierung 4 mit NP 1 sowie vereinzelte Beschichtungsvarianten mit Grundierung 2 und Deckschicht 2 die Anwendungsstufe 'masshaltig'. Die restlichen Beschichtungsvarianten können wegen der ungenügenden Haftfestigkeiten nicht klassiert werden.

4.2 Kontaktwinkel und Feuchteschutzwirkung

Für die Dauerhaftigkeit einer Beschichtung ist nicht primär ein möglichst 'schöner' Abperleffekt (Flüssigwasserschutz) ausschlaggebend, sondern die Verminderung der Feuchtewechsel des Substrates insgesamt (flüssig und dampfförmig). Primäres Ziel ist es, die Dimensionsstabilität des Substrates zu gewährleisten und damit die Rissbildung im Holz zu verringern. Insofern kann die isolierte Betrachtung des Kontaktwinkels zu Fehlschlüssen hinsichtlich der effektiven Feuchteschutzwirkung führen. Eine eingehendere Betrachtung des Zusammenhanges zwischen Kontaktwinkel und Feuchteschutzwirkung ist deshalb notwendig.

Bewertung:

- Wie bereits früher gezeigt, kann mit einer Hydrophobierung der Holzoberfläche nur eine Verbesserung des Schutzes vor kapillar eindringendem Wasser erreicht werden. Die Feuchteaufnahme durch Wasserdampf wird hingegen nicht beeinflusst (Bild 42). Mit einem guten Flüssigwasserschutz können somit zwar Feuchtespitzen durch Regen oder Kondenswasser reduziert werden, die jahreszeitlichen Schwankungen der Holzfeuchte und die damit verbundenen Dimensionsänderungen werden aber nicht vermindert (Bilder 59 bis 61).
- Die Aufnahme von flüssigem Wasser ist bei grossen Kontaktwinkeln tendenziell niedriger (Bild 94). Der Zusammenhang ist bei Fichte etwas straffer als bei Tanne. Eine auffällig hohe Wasseraufnahme zeigt NP 5 (118FAG). Der Kontaktwinkel kann somit als grober Hinweis für die Schutzwirkung bezüglich Flüssigwasseraufnahme verwendet werden. Dies gilt aber nur für hydrophobierte Holzoberflächen, jedoch nicht bei Beschichtungen, wo primär die Schichtdicke die Feuchteschutzwirkung bestimmt.
- Die Messungen der Kontaktwinkel erfolgen normalerweise an ausklimatisierten Proben bei ca. 12% Holzfeuchte (65%r.F./20°C). Die Beobachtung der Hydrophobierungswirkung insbesondere in den Freibewitterungsversuchen führte aber zur Vermutung, dass die Kontaktwinkel von der (schwankenden) Feuchte des Substrates (Holz) beeinflusst sein könnten. Um diese Abhängigkeit von der Holzfeuchte zu untersuchen, wurden in einem 'orientierenden' Zusatzversuch axiale Folgeproben aus einem Holzstab mit 3 ausgewählten Hydrophobierungsmitteln behandelt (NP 118, 118FAG, 310523) und bei verschiedenen Klimata (35, 65, 85 und 100%r.F., Wasserlagerung, Darren) auskonditioniert. Auf jeder Klimastufe wurden an jeweils 3 Wiederholungsproben je 4 Kontaktwinkelmessungen durchgeführt.

Während bei NP 118FAG die Kontaktwinkel über den ganzen hygrokopischen Bereich konstant hoch bleiben, sind sie bei NP 118 und 310523 bei absolut trockenem Holz am höchsten und sinken bei zunehmender Holzfeuchte mehr oder weniger kontinuierlich ab (Bild 95). Oberhalb der Fasersättigung ist die wasserabweisende Wirkung bei allen Hydrophobierungsmitteln gering (Kontaktwinkel <80°). Die Wirksamkeit der Hydrophobierungsmittel ist demnach auf trockenem Holz besser als auf feuchtem.

Bild 94: Zusammenhang zwischen Kontaktwinkel und Wasseraufnahme (Mittelwert aus 3 Proben) bei den lediglich hydrophobierten Proben (ohne Beschichtung) aus den Hauptversuchen 1 bis 3

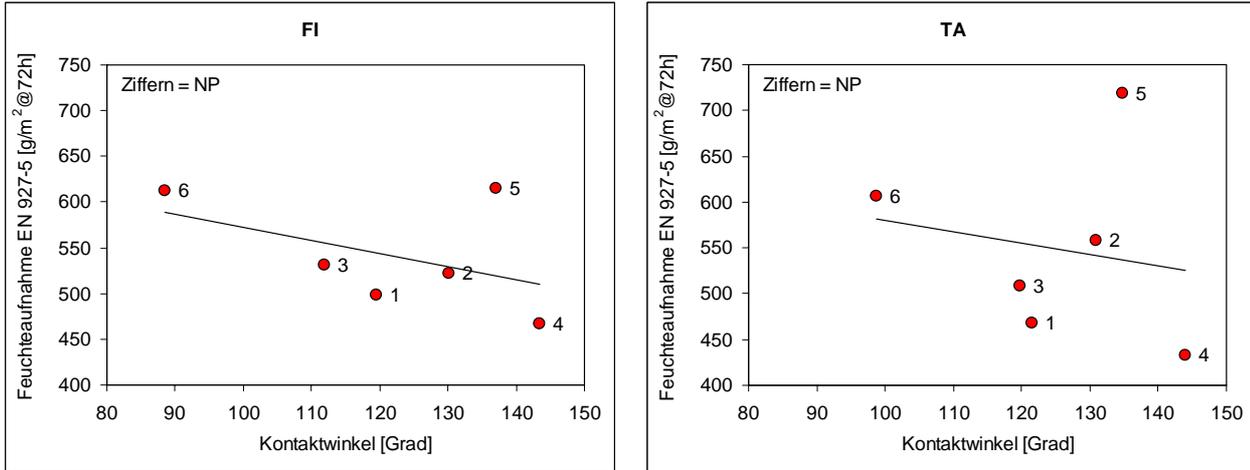
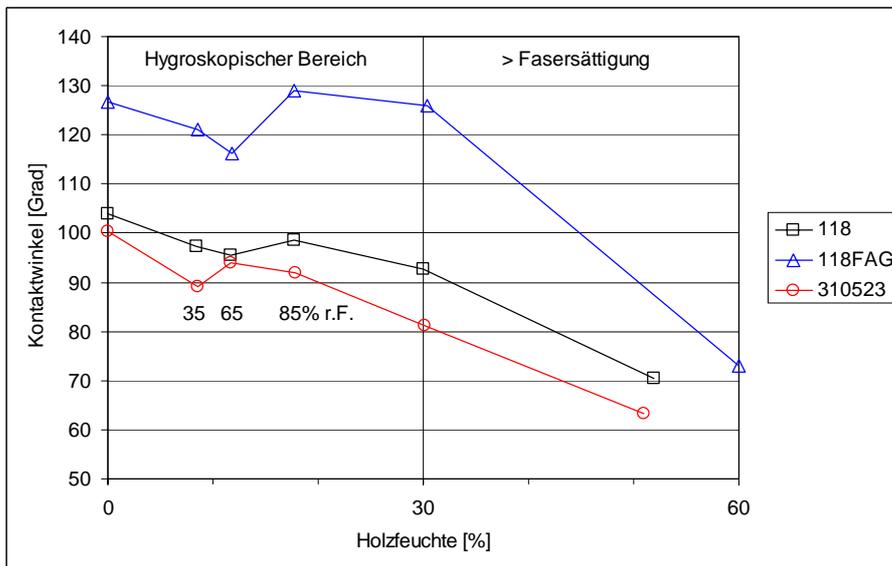


Bild 95: Abhängigkeit der Kontaktwinkel (Tropfenalter: 60 s) von der Holzfeuchte des Substrates (3 Hydrophobierungen auf Tanne)



4.3 Wechselwirkungen zwischen Systemkomponenten

Eine der Hauptschwierigkeiten bei der Bewertung der Versuchsergebnisse ist die Vielzahl und Komplexität der Wechselwirkungen resp. gegenseitigen Beeinflussungen zwischen den einzelnen Systemkomponenten. Während einige der Wechselwirkungen bekannt und damit nachvollziehbar sind, sind andere aufgrund unerwarteter und unbekannter chemischer oder physikalischer Reaktionen schwieriger einzuordnen. Ein besonderes Augenmerk muss diesbezüglich auf die Wechselwirkungen mit den verwendeten Silanen gelegt werden, weil sie zum einen chemisch relativ stark reaktiv sind und weil aus anderen Untersuchungen bekannt ist, dass sie in einem Beschichtungssystem mobil bleiben und in andere Schichten migrieren können (Hinder 2005, Horgnies 2006). Dies ermöglicht teilweise erwünschte Eigenschaften (z.B. 'selbstheilende Hydrophobierungen'), kann aber auch zu negativen Effekten führen (z.B. Adhäsionsprobleme).

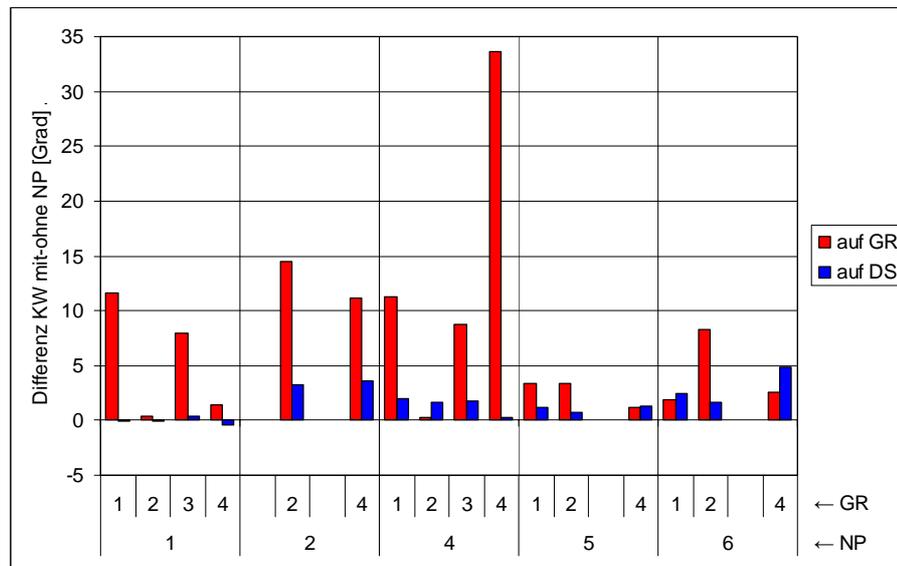
Bewertung:

- Substrat: Vom Substrat Holz beeinflusste Wechselwirkungen sind vor allem aufgrund von Unterschieden bei der Permeabilität und den Inhaltsstoffen zwischen den Holzarten denkbar. Zum Beispiel scheint das Eindringverhalten der Hydrophobierungsmittel erwartungsgemäss bei Tanne tendenziell besser zu sein als bei Fichte (Bild 20). Bei 'ähnlichen' Holzarten sind die Effekte insgesamt jedoch gering (siehe auch Kapitel 4.4).

- **Hydrophobierung:** Infolge der erheblichen Mobilität der Hydrophobierungsmittel ist deren Wirkung auch auf den nachfolgenden Beschichtungen erkennbar. Die gemessenen Kontaktwinkel (an Wassertropfen) auf den Grundierungen, welche auf einer hydrophobierten Holzoberfläche appliziert wurden, sind meist deutlich grösser (Grössenordnung 5-10°) als auf nicht-hydrophobierten Holzoberflächen (Bild 96). Der Einfluss der Hydrophobierungen ist teilweise sogar noch auf den Deckschichten nachweisbar, wenn auch betragsmässig deutlich geringer.

Bezüglich Effekten bei einzelnen Hydrophobierungen oder Grundierungen ist keine klare Systematik erkennbar. Vielmehr erweisen sich einzelne spezifische Kombinationen als unbedenklich resp. kritisch. Ein aussergewöhnlich grosser Effekt ist z.B. bei der Kombination von Grundierung 4 mit NP 4 erkennbar, wo der Kontaktwinkel auf der Grundierung von 95° bei nicht-hydrophobiertem Holz auf rund 130° bei hydrophobiertem Holz ansteigt. Auf der Deckschicht ist dieser Effekt dann aber nicht mehr nachweisbar. Bei Grundierung 2 ist weder bei NP 1 noch bei NP 4 eine Erhöhung der Kontaktwinkel feststellbar.

Bild 96: Differenzen der Kontaktwinkel auf den Beschichtungen appliziert auf einer hydrophobierten Holzoberfläche (Vergleichsbasis: gleiche Beschichtung auf nicht-hydrophobierter Holzoberfläche)



- **Grundierung:** Als Zwischenschicht ergeben sich für die Grundierungen besonders viele Möglichkeiten zu Wechselwirkungen, wobei diesbezüglich wie oben beschrieben vor allem die Hydrophobierungsmittel von Bedeutung sind (Bild 96). Neben der chemischen Reaktivität und der Migrationsfähigkeit könnte dabei auch das Auftragsverfahren der Grundierungen eine Rolle spielen (z.B. mechanische Durchmischung beim Flut-Walz-Bürstverfahren).

Aufgrund des noch ungenügenden Verständnisses der Mechanismen muss vorderhand auf den Ausschluss von ungünstigen Kombinationen aufgrund von empirischen Erfahrungen zurückgegriffen werden. Beispiele von solchen ungünstigen Kombinationen sind Grundierung 4 mit NP 5 bezüglich Feuchteschutz (Bild 51) sowie Grundierung 1 resp. 3 mit NP 1, Grundierung 1 mit NP 6 und Grundierung 4 mit NP 2 bezüglich Haftfestigkeit (Bilder 78 und 79).

- **Deckschicht:** Für die Deckschicht sind primär Wechselwirkungen mit der Grundierung zu erwarten. Ein Beispiel dafür sind die beobachteten Abstossungserscheinungen des Decklackes auf den Grundierungen 1 und 3 über NP 2 (Bild 70). Neben 'chemischen Inkompatibilitäten' kann auch hier der Applikationsprozess eine Rolle spielen, wie die schlechte Haftung der Deckschicht (häufiger Bruch zwischen Grundierung und Deckschicht) beim mechanischen Abreissversuch als (vermutliche) Folge der nicht oder ungenügend angeschliffenen Grundierung 2 im Hauptversuch 3 zeigt (Bild 76).

4.4 Einflüsse Substrat (Holz)

Die Eigenschaften des Holzes als Trägermaterial der Beschichtung haben wie kaum bei einem anderen Substrat einen grossen Einfluss auf das Verhalten des Gesamtsystems. Zum einen müssen die generellen 'Eigenheiten' des Holzes wie Inhomogenität, Anisotropie und Hygroskopizität berücksichtigt werden. Zum anderen können auch die Holzarten-spezifischen Unterschiede bedeutsam sein. Der Fokus in diesem Projekt liegt vor allem auf den verwendungstechnischen Unterschieden zwischen Fichte und Tanne.

Bewertung:

- Folgende Unterschiede zwischen Fichte und Tanne sind erwähnenswert:
 - Imprägnierbarkeit / Eindringung Hydrophobierungsmittel: siehe Kapitel 4.3
 - Feuchteverhalten: In den Laborversuchen zur Feuchteschutzwirkung der Beschichtungen ist kein genereller Unterschied zwischen Fichte und Tanne feststellbar (Tabelle 21). Vereinzelt waren bei Tanne allerdings ungewöhnlich hohe Wasseraufnahmen zu verzeichnen, welche auf das Vorhandensein von Nasskern-Bereichen in den Proben zurückgeführt werden. Der Verlauf der Holzfeuchte in der Freibewitterung wird hingegen zu einem gewissen Umfang von der Holzart bestimmt. Die durchschnittliche Holzfeuchte liegt bei Tanne ca. 1.5% höher als bei Fichte und die Holzfeuchte-Schwankungen sind ebenfalls leicht grösser (Tabelle 22). Tanne zeigt damit gegenüber Fichte ein etwas ungünstigeres Feuchteverhalten.
 - Haftfestigkeit: Bezüglich Haftung der Beschichtungen ist zwischen Fichte und Tanne kein relevanter Unterschied feststellbar. Während die Haftfestigkeit auf dem trockenen Substrat bei Tanne etwas geringer ist als bei Fichte, zeigt die Prüfung auf dem nassen Substrat gerade das umgekehrte Verhältnis (Tabelle 28). Durch die leicht höhere Rohdichte im Hauptversuch 3 ergeben sich insgesamt etwas höhere Haftfestigkeiten als im Hauptversuch 1 und 2 (Bild 5).
 - Witterungsverhalten: In der Freibewitterung zeigen die Tannen-Proben deutlich mehr Risse als die Fichten-Proben (Tabelle 29). Dies könnte unter anderem auch mit den beobachteten grösseren Feuchteschwankungen bei der Tanne zusammenhängen. Bei der künstlichen Bewitterung im QUV sind die Rissmengen hingegen praktisch identisch.
 - Insgesamt zeigen sich somit zwischen Fichte und Tanne nur verhältnismässig geringe verwendungstechnische Unterschiede, wobei die potentiell vorteilhaften Eigenschaften der Tanne (z.B. Fehlen von Harzgallen, bessere Imprägnierbarkeit) deren Nachteile (z.B. ungünstiges Feuchteverhalten) aber nicht entscheidend aufwiegen können.

Tabelle 28: Vergleich der Haftfestigkeit von Fichte und Tanne (mechanischer Abreissversuch, Mittelwert über alle Beschichtungsvarianten)

Versuchsserie	Prüf-Zustand	Haftfestigkeit [N/mm ²]		
		Fichte	Tanne	Differenz TA – FI
HV 1+2	trocken	2.05	1.95	- 5%
	nass	1.14	1.17	+ 3%
HV 3	trocken	2.26	2.23	- 1%
	nass	1.48	1.62	+ 9%

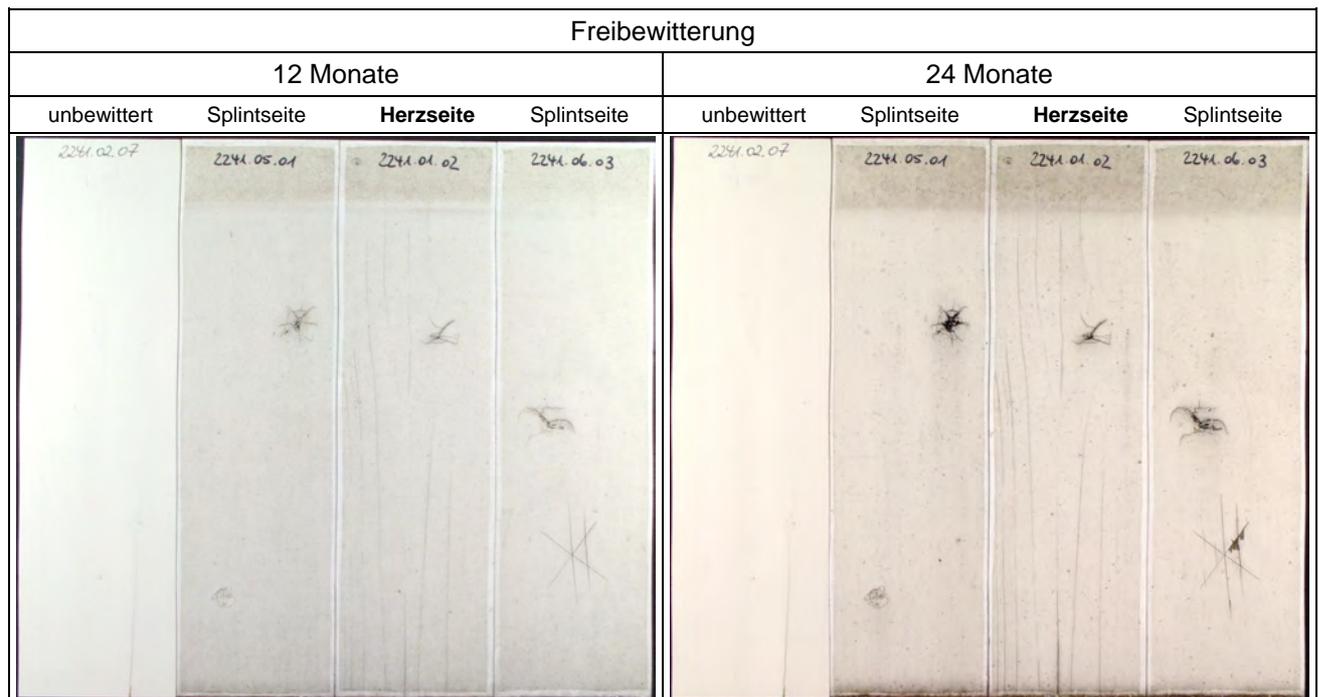
Tabelle 29: Vergleich der Rissmenge von Fichte und Tanne im Freibewitterungsversuch (Mittelwert über alle Beschichtungsvarianten)

Versuchsserie		Zeitpunkt	Rissmenge (0 - 5)		
			Fichte	Tanne	Differenz TA – FI
Freibewitterung	HV 1	18 Monate	2.00	2.56	+ 28%
	HV 2	12 Monate	1.67	2.17	+ 30%
	HV 3	7 Monate	1.00	1.13	+ 13%
QUV	HV 1-3	2000 h	1.27	1.20	- 5%

- Die Witterungsbeständigkeit des beschichteten Birkensperrholzes ist unbefriedigend (Bilder 87 und 92). Für Holzwerkstoffe sind demnach auf die jeweiligen Substrateigenschaften angepasste Beschichtungskonzepte notwendig. Bei Sperrholzplatten müssen z.B. die im Furnier vorhandenen Schälrisse berücksichtigt und dauerhaft 'gefüllt' werden.
- Problemzonen:
 - Die Hydrophobierungsmittel dringen im Spätholz generell weniger tief ein als im Frühholz (Bild 20). Analoges gilt auch bei Ästen. Dies gilt es bei der grundsätzlich angestrebten Erhöhung der Eindringtiefe zu beachten. Es wurden aber keine darauf zurückzuführenden negativen Konsequenzen beobachtet.

- Die Haftung der Beschichtungen auf den Ästen ist häufig problematisch. Schwierigkeiten ergeben sich insbesondere bei einer ungenügenden Aushärtung der Grundierungen in Astrissen, was eine genügende Haftung der Deckschicht verunmöglicht. Als Folge der Hydrophobierungen sind bei Ästen aber nicht vermehrt Probleme zu beobachten.
- Unzulänglichkeiten in der Holzqualität (z.B. vorhandenes Mark, Risse wegen Faserabweichungen um Äste, Rotstreifigkeit) führen in den meisten Fällen zu einem frühzeitigen lokalen Versagen der Beschichtung und müssen deshalb konsequent aussortiert werden.
- Beim heutzutage üblichen Rohmaterial für Fassadentäfer (2- oder 3-stielige Rohhobler) ist eine Bewitterung der Herzseite (rechte Brettseite) wegen der verstärkten Rissbildung ungünstig (Bild 97). Bei der Tanne ist bei vorhandenen Nasskernbereichen zudem auch mit einer höheren Feuchteaufnahme zu rechnen (Bild 57, oben). Beim Hobeln resp. bei der Profilierung der Täferbretter sollte deshalb nach Möglichkeit die linke Brettseite als bewitterte Aussenseite gewählt werden.

Bild 97: Vergleich des Rissbildes an Bewitterungsproben in Abhängigkeit von der bewitterten Brettseite.



4.5 Tanninblocker in Hydrophobierung

Das Hydrophobierungsmittel NP 5 (118FAG) im Hauptversuch 3 enthält einen Tanninblocker auf Zirkonbasis zur Immobilisierung von die Beschichtung verfärbenden Holzinhaltsstoffen, insbesondere auf den Ästen.

Bezüglich der Astverfärbungen ist in den künstlichen Bewitterungen im Hauptversuch 3 bei den Grundierungen 1 und 4 auf Fichte gegenüber den nicht-hydrophobierten oder mit NP 6 behandelten Proben ein leichter, positiver Effekt des Tanninblockers zu erkennen (Bild 88 und 92). Bei den Freibewitterungen ist wegen der durch Verschmutzung und Pilzbewuchs grösseren Verfärbungen kein solcher Einfluss erkennbar.

4.6 Nano-Silber in Hydrophobierung und Deckschicht

Das Hydrophobierungsmittel 118FAG (NP 5) sowie eine Deckschicht-Variante (DS 5) im Hauptversuch 3 wurde mit nanoskaligem Silber für einen verbesserten Schutz gegen den Befall durch Mikroorganismen (v.a. Schimmel- und Bläuepilze) ausgerüstet.

Die lediglich mit NP 5 hydrophobierten Holzoberflächen zeigen in der Freibewitterung keine geringere Verfärbung als bei anderen Hydrophobierungsmitteln (Bild 85). Die festgestellte Verzögerung der oberflächlichen Besiedelung durch Schimmel- und Bläuepilze ist daher eher auf den Mangel an für das Pilzwachstum nötigem Wasser infolge der wasserabweisenden Wirkung der Hydrophobierung denn auf eine fungizide Wirkung des Nano-Silbers zurückzuführen.

Die Wirkung des Nano-Silbers auf den tiefergehenden Befall des Holzes durch Bläuepilze resp. im Interface zwischen Holz und Beschichtung kann mit den durchgeführten Versuchen nicht beurteilt werden. Dazu wären spezielle Laborversuche (z.B. gemäss EN 152) notwendig.

Auf der mit Nano-Silber ausgerüsteten Deckschicht (DS 5) ist in den Freibewitterungsversuchen im Hauptversuch 3 verglichen mit der Standard-Deckschicht (DS 2) bisher kein geringerer Pilzbewuchs feststellbar (Bild 88, unten rechts). Die Nanocoat-Deckschicht weist hingegen gegenüber den Eterno-Deckschichten (DS 2 und 5) einen deutlich geringeren Pilzbewuchs auf.

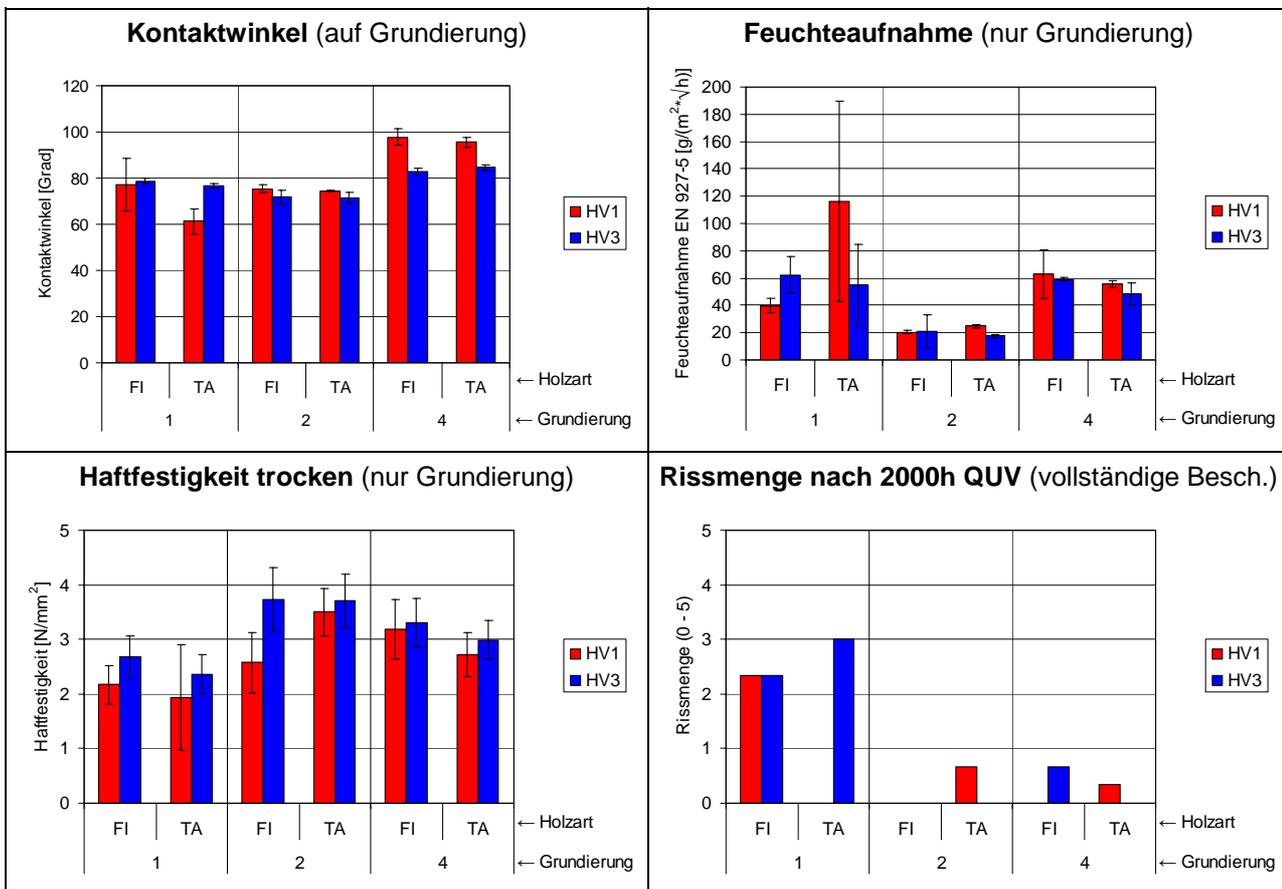
Insgesamt ist in den durchgeführten Freibewitterungsversuchen bisher somit kein positiver Effekt von Nano-Silber feststellbar. Dieser Befund ist allerdings vorläufig und wird in der fortgesetzten Bewitterung überprüft.

4.7 Modifizierte Grundierungen

Wie im Projektplan vorgesehen (AP 6), wurden für den Hauptversuch 3 verschiedene Optimierungen an den eingesetzten Beschichtungstoffen vorgenommen (siehe Kapitel 2.2). Davon waren auch 2 Grundierungen betroffen. Aufgrund der unbefriedigenden Ergebnisse in den vorhergehenden Versuchen hat die Firma Weibel die Formulierung der Grundierung 1 (100% UV) grundlegend geändert. Für die 'kommerzielle' Standard-Grundierung 4 (Alkyd) wurde ein Ersatzprodukt mit analogen Eigenschaften entwickelt.

Als Erfolgskontrolle kann untersucht werden, inwieweit sich die Eigenschaften der neu formulierten Grundierungen (Hauptversuch 3) von den ursprünglichen Produkten (Hauptversuch 1) unterscheiden, resp. ob Verbesserungen erzielt wurden. Grundsätzlich wären für einen detaillierten Vergleich der Eigenschaften speziell ausgelegte Vergleichsversuche notwendig, was im Rahmen dieses Projektes jedoch nicht möglich war. Im nachfolgenden wird aber basierend auf den verfügbaren Ergebnissen versucht, mögliche Eigenschaftsveränderungen abzuschätzen. Entsprechende Vergleiche von ausgewählten Eigenschaften der Grundierungen (auf nicht-hydrophobierten Holzoberflächen) im Hauptversuch 1 resp. 3, sind in Bild 98 dargestellt. Der Einbezug der nicht modifizierten Grundierung 2 dient als 'Null'-Vergleich.

Bild 98: Vergleich von ausgewählten Eigenschaften der Grundierungen in den Hauptversuchen 1 und 3



Bewertung:

- Die auf Grundierung 1 gemessenen Kontaktwinkel und damit deren Benetzungseigenschaften sind vor und nach der Modifikation praktisch identisch (Grundierung 1 auf Tanne im Hauptversuch 1 zeigt generell auffällige, nicht erklärbare Werte und wird daher nicht als repräsentativ betrachtet). Bei Grundierung 4 ist ein etwas tieferer Kontaktwinkel feststellbar, was allenfalls auch auf den Einsatz eines relativ grobkörnigen Perlglanzpigmentes zurückzuführen sein könnte.
- Die Wasserdurchlässigkeit der neu formulierten Grundierung 1 ist etwas höher als vorher. Der hohe Wert bei Tanne im Hauptversuch 1 ist auf eine übermässige Wasseraufnahme infolge Nasskern bei 2 der 3 Wiederholungsproben zurückzuführen und ist demnach nicht repräsentativ. Die Wasserdurchlässigkeit der neuen Grundierung 4 ist unverändert.
- Die Haftfestigkeit der neu formulierten Grundierung 1 ist etwas höher als vorher, aber gegenüber den Grundierungen 2 und 4 immer noch deutlich geringer.
- Die Rissbildung der Grundierung 1 konnte mit der Neuformulierung offenbar nicht verbessert werden und bleibt weiterhin unbefriedigend.
- Insbesondere wegen des unbefriedigenden Rissverhaltens muss die Verbesserung bei Grundierung 1 insgesamt als noch nicht genügend betrachtet werden, während bei Grundierung 4 kaum Unterschiede zur Original-Formulierung beobachtet werden können.

4.8 Hydrophobierung der Deckschicht

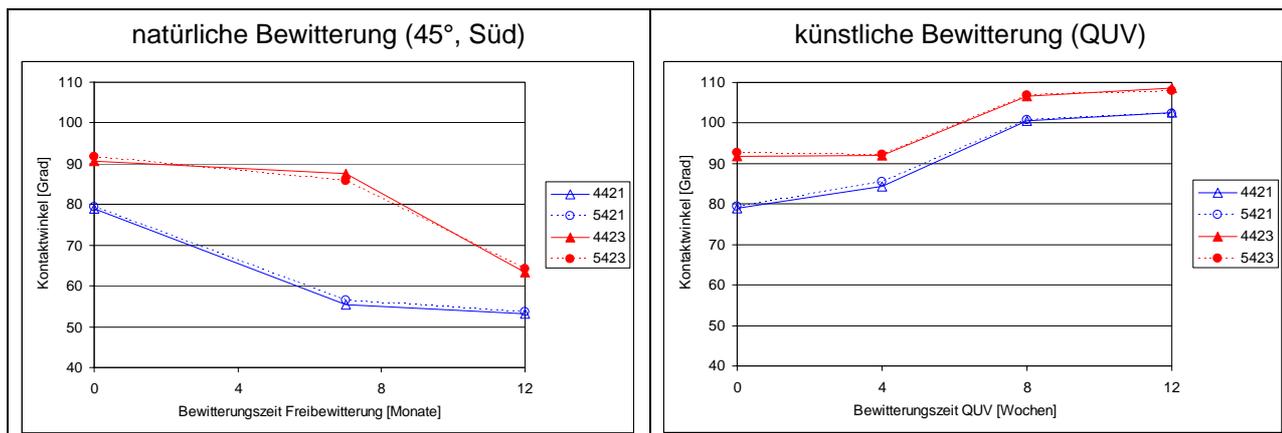
Eine weitere Möglichkeit zur Verbesserung des Feuchteschutzes ist neben der Hydrophobierung der Holzoberfläche auch die Hydrophobierung der Deckschicht. Mit diesem Ansatz wird versucht, das Wasser bereits an der Oberfläche des Beschichtungssystems 'abzufangen'. Gleichzeitig könnte damit auch eine verbesserte Schmutzabweisung erreicht werden. Dazu sind zwei verschiedene Strategien möglich, nämlich die Hydrophobierung lediglich der Oberfläche der Deckschicht (z.B. durch Spray-Applikation) oder die hydrophobe Ausrüstung des Beschichtungsstoffes (Einbau Hydrophobierungsmittel in Formulierung). Beide Ansätze wurden in diesem Projekt einbezogen.

Im Hauptversuch 2 wurde an einigen Zusatzproben mit Grundierung 2 die Standard-Deckschicht (Eterno) nachträglich mit NP 118F aus der Spraydose hydrophobiert (DS 3 und 4). Wegen eines Missverständnisses erfolgte die Applikation irrtümlich auf der unbewitterten Deckschicht, während diese gemäss Angaben der Firma Nanosys wegen der besseren Anbindung an die Beschichtung erst nach einer gewissen Bewitterungszeit erfolgen sollte. Die Proben wurden zusammen mit den anderen Versuchsvarianten natürlich und künstlich bewittert.

Bewertung:

- Die Spray-Applikation von NP 118F führt auf der (unbewitterten) Deckschicht zu einer leicht klebrigen Oberfläche mit unschönen Flecken. Dieser Effekt tritt gemäss Angaben der Firma Nanosys bei der Applikation auf einer vor-bewitterten Deckschicht nicht auf.
- Der Kontaktwinkel auf der hydrophobierten Deckschicht liegt zu Beginn rund 10° höher als auf der Standard-Deckschicht und erscheint mit etwas über 90° leicht hydrophob (Bild 99). Allerdings werden bei weitem nicht so hohe Kontaktwinkel wie auf den Holzoberflächen erreicht (118F: 140°, Bild 23). Wie bereits früher festgestellt (siehe Kapitel 3.1.2.3), nimmt bei einer natürlichen Bewitterung der Kontaktwinkel auf der Deckschicht ab, während er bei der künstlichen Bewitterung leicht ansteigt. Die Entwicklung verläuft für nicht-hydrophobierte und hydrophobierte Deckschichten nahezu parallel, wobei in der Anfangsphase der Freibewitterung der Abfall des Kontaktwinkels auf der hydrophobierten Deckschicht etwas verzögert ist.
- Mit der nachträglichen Hydrophobierung der Deckschicht kann ein einfacher, zusätzlicher Schutzmechanismus erreicht werden, welcher wiederholt aufgebracht werden kann und damit insbesondere auch als Pflegemassnahme (z.B. bei Lasuren) dienen könnte. Die Möglichkeiten einer späteren Erneuerung der Beschichtung muss allerdings sorgfältig abgeklärt werden (Überstreichbarkeit). Diese Aspekte waren aber nicht Gegenstand des vorliegenden Projektes.

Bild 99: Veränderung des Kontaktwinkels bei natürlicher und künstlicher Bewitterung einer mit NP 118F zusätzlich hydrophobierten Deckschicht (DS 3, rote Symbole) im Vergleich zu einer nicht-hydrophobierten Deckschicht (DS 1, blaue Symbole) auf Fichte und Tanne



Der zweite Ansatz wurde im Hauptversuch 3 durch den Einbezug eines mit einer perfluorierten, brushtype Acrylatdispersion modifizierten Decklackes (DS 5) getestet. Mit einer Hydrophobierung 'im Volumen' der Deckschicht sollte eine dauerhafte Wirksamkeit erreicht werden.

Bewertung:

- Mittels Elementdetektion in der Mikrosonde kann eine gleichmässige Verteilung von Fluor in der modifizierten Deckschicht nachgewiesen werden (Bilder 32 und 33).
- Der Kontaktwinkel auf der modifizierten Deckschicht (DS 5) liegt zu Beginn rund 5-10° höher als auf der Standard-Deckschicht (DS 2), kann aber mit unter 90° nicht als wirklich hydrophob bezeichnet werden (Bild 38). Entgegen den Erwartungen verbesserte sich die Hydrophobie im Laufe der Bewitterung nicht, sondern entwickelte sich analog zur nicht-hydrophobierten Deckschicht 2 (Bild 40, unten).
- Wie bereits früher festgestellt, zeigt die modifizierte Deckschicht keinen verbesserten Feuchteschutz (Bild 49). Dementsprechend ist auch in der Bewitterung gegenüber der Standard-Deckschicht (DS 2) keine bessere Witterungsbeständigkeit festzustellen (Bild 88).
- Die in diesem Projekt getestete Lösung kann somit nicht als erfolgreich betrachtet werden. Der Ansatz einer durchgehenden Hydrophobierung der gesamten Deckschicht verspricht gegenüber einer nur oberflächlichen Hydrophobierung jedoch einige Vorteile (z.B. grössere Dauerhaftigkeit, geringere mechanische Empfindlichkeit), der Wirkstoff muss aber mit dem Beschichtungsstoff kompatibel sein. In diesem Sinne sollten alternative Lösungen entwickelt und getestet werden.

5 Folgerungen

Moderne Holzbeschichtungen sind komplexe Systeme mit vielfältigen Wechselwirkungen zwischen den einzelnen Komponenten resp. Schichten. Die durchgeführten Projektarbeiten ermöglichen eine breit abgestützte Beurteilung der Bedeutung der einzelnen Komponenten in einem Beschichtungssystem sowie der Leistungsfähigkeit spezifischer Beschichtungsaufbauten. Und nicht zuletzt ergeben sich auch viele Ansätze für weitere Optimierungen. Realistischerweise können mit diesem lediglich 2-jährigen Projekt aber nicht alle offenen Fragen bezüglich Funktionsweise und Wirksamkeit des eingesetzten Beschichtungskonzeptes abschliessend beantwortet werden. Zudem ist angesichts der bis jetzt nur kurzen Beobachtungszeiträume der gestarteten Bewitterungsversuche (max. 18 Monate) erst eine vorläufige Abschätzung der Witterungsbeständigkeit möglich. Eine Fortsetzung der Arbeiten (insbesondere der begonnenen Bewitterungsversuche) scheint sinnvoll und ist notwendig für eine Vertiefung der Erkenntnisse und Beantwortung der noch offenen Fragen.

Im vorliegenden Bericht wird versucht, die wichtigsten Ergebnisse der durchgeführten Untersuchungen darzustellen und zu interpretieren. Jeder Projektpartner sollte aber zusätzlich die für ihn wichtigsten Informationen 'herausfiltern' und aufarbeiten. Aus Sicht der Empa als wissenschaftliche Projektleiterin ermöglicht das Projekt einen erheblichen, spezifischen Wissenszuwachs bei allen Partnern (Tabelle 30).

Tabelle 30: Spezifischer Wissenszuwachs bei den einzelnen Projektpartnern

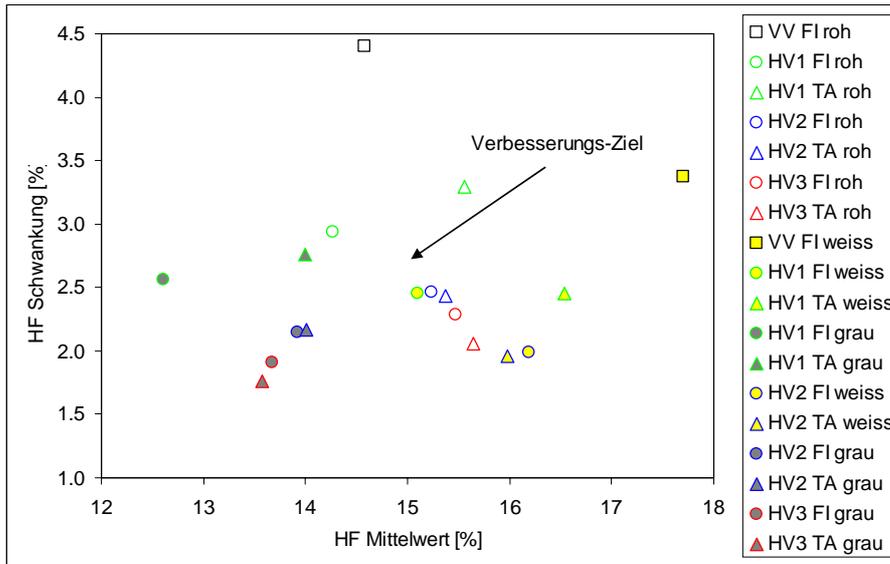
Partner	Wissenszuwachs
Kälin & Co. AG, Hobelwerk, Winterthur	<ul style="list-style-type: none"> • Umfassende Charakterisierung der Leistungsfähigkeit der gewählten Beschichtungssysteme, inkl. Leistungsbeurteilung gemäss EN 927-2 • Hinweise für Verbesserungen bei der Beschichtungsapplikation (z.B. Zellstauchungen durch mechanische Bearbeitung, Zwischenschliff Grundierung) • Entscheidungsgrundlagen für weitere Produktionsplanung
NanoSys GmbH, fluids + consulting, Wolfhalden	<ul style="list-style-type: none"> • Erste Untersuchungen zu Modellvorstellungen über chemische Anbindungsmechanismen an Holzkomponenten • Wirksamkeit und Witterungsbeständigkeit der Hydrophobierungsmittel (ohne nachfolgende Beschichtung) • Wirkung der Hydrophobierungsmittel im Verbund mit einem Beschichtungssystem
Otto Weibel AG, Lacke und Farben für Holz, Urdorf	<ul style="list-style-type: none"> • Know-how bezüglich Beschichtung von hydrophobierten Holzoberflächen • Kenndaten zur Leistungsfähigkeit von UV-Grundierungen im Aussenbereich, inkl. Leistungsbeurteilung gemäss EN 927-2 • Untersuchung von neuen Beschichtungskombinationen / -modifikationen
Empa, Abt. Holz, Dübendorf	<ul style="list-style-type: none"> • Umfassende Untersuchung der Leistungsfähigkeit eines Mehrkomponenten-Beschichtungssystems • Wissenschaftliche Erkenntnisse und Anwendungserfahrungen bezüglich nanotechnologischen Beschichtungskomponenten • Verfeinerung der Untersuchungs- und Analysemethoden für Beschichtungssysteme

5.1 Gesamtbeurteilung

Die durchgeführten Untersuchungen führen zu folgenden generellen Aussagen:

- Dem Projektziel entsprechend konnte im Projektverlauf der Feuchteschutz der Beschichtungen erheblich verbessert werden. Die optimierten Beschichtungssysteme zeigen eine hervorragende Feuchteschutzwirkung und damit verbunden eine hohe Witterungsbeständigkeit (Bild 100). Eine gute Leistungsfähigkeit der Beschichtungen ist aber nur bei einer gegenseitigen Ergänzung und Kompatibilität aller Teilkomponenten im Gesamtsystem gegeben. Eine dominierende Rolle spielen dabei die Grundierungen als eigentliche Sperr- und zugleich Verbindungsschicht zwischen Substrat und Deckschicht. Besonders gute Leistungsmerkmale (inkl. Witterungsbeständigkeit) zeigen die Beschichtungsvarianten basierend auf der wässrigen UV-Grundierung (Grundierung 2).

Bild 100: Verbesserung der Feuchteschutzwirkung im Laufe der verschiedenen Versuchsserien (Holzfeuchte-Niveau und -Schwankungen in der Freibewitterung)



- Mit nanoskaligen Hydrophobierungsmitteln lassen sich auf Holzoberflächen verblüffende wasserabweisende Effekte erzielen (Aberlen von Wassertropfen). Die Tiefenwirkung der durch Sprühen, Tauchen oder Pinselauftrag applizierten Hydrophobierungen beschränkt sich jedoch auf ein paar wenige Zehntelmillimeter. Die Behandlung ist damit nur gegen Flüssigwasser wirksam und beeinflusst die Wasserdampfsorption (d.h. Schwinden und Quellen) kaum. Wegen der nur schwachen chemischen Anbindung an die Holzkomponenten ist die Witterungsbeständigkeit der Hydrophobierungen ohne zusätzlichen UV-Schutz teilweise gering. Zwei der untersuchten Hydrophobierungsmittel (NP 118FAG und 310523) sind aber auch nach 12 Monaten Freibewitterung noch wirksam. Die Wirksamkeit und Dauerhaftigkeit der Hydrophobierungen könnte vermutlich durch eine grössere Eindring- resp. Wirktiefe sowie eine stärkere chemische Anbindung ans Holz noch deutlich verbessert werden.
- Hydrophobierte Holzoberflächen sind grundsätzlich bei geeigneter Beschichtungsformulierung und Applikationstechnik beschichtbar. Die Beschichtungshaftung ist dabei zwar meist vermindert, bei den Bewitterungsversuchen wurden aber nicht vermehrt 'spontane' Adhäsionsprobleme beobachtet. Somit scheint der gezielte Einbau von 'Feuchtesperren' im Beschichtungssystem möglich, wobei derzeit noch unklar ist, wo (d.h. in welcher Schicht) damit die grösste Wirkung erzielt werden kann. Die verminderte Beschichtungshaftung führt allerdings zu einer relativ schlechten Leistungseinstufung gemäss EN 927-2.
- Der Einfluss einer vorgängigen Hydrophobierung der Holzoberfläche auf die Feuchteschutzwirkung im Verbund mit einem kompletten Beschichtungssystem ist nicht zuletzt wegen der Beschränkung auf den Flüssigwasserschutz insgesamt gering und kann aufgrund von speziellen Wechselwirkungen teilweise sogar negativ ausfallen. Aus den bisherigen Versuchen ist kein relevanter, positiver Einfluss auf die Witterungsbeständigkeit der darauf applizierten Beschichtungssysteme zu erkennen. Allenfalls 'neutralisieren' die darüber liegenden, bereits sehr feuchtigkeitsdichten Beschichtungen den zusätzlichen Flüssigwasserschutz der Hydrophobierungen, und die potentiell positiven Effekte werden durch eine Verschlechterung der Beschichtungshaftung sowie durch ungünstige Wechselwirkungen zwischen den Systemkomponenten weitgehend aufgehoben. Möglicherweise kommt die Schutzwirkung gegen Flüssigwasser aber auch erst bei stärkerer Verwitterung und grösseren Beschichtungsschäden (Risse) zum Tragen, was einen positiven Effekt auf die langfristige Dauerhaftigkeit hätte. Dies werden die fortgesetzten Bewitterungsversuche und allenfalls Erfahrungen aus der Praxis zeigen. Als zusätzliche oder alternative Massnahme ist eine Hydrophobierung der Deckschicht zu erwägen.
- Insgesamt hat sich bei den Untersuchungen gezeigt, dass die Wirksamkeit der getesteten nanotechnologischen Ansätze bei Holzbeschichtungen systemabhängig unterschiedlich gross ist. Sie können aber einen Beitrag zur gezielten Eigenschaftsverbesserung leisten und sind somit eine wertvolle Ergänzung zu konventionellen Beschichtungen. Für die erfolgreiche Umsetzung von theoretischen Grundlagen sind weiterhin intensive Forschungs- und Entwicklungsarbeiten nötig. Zu beachten und eingehender zu untersuchen sind insbesondere die vielfältigen und komplexen Wechselwirkungen zwischen den einzelnen Komponenten.

Die Projektarbeiten erlauben nicht nur generelle Aussagen zur Wirksamkeit und den Eigenschaften der Beschichtungssysteme insgesamt, sondern geben auch Hinweise zu verschiedenen spezifischen Detailspekten:

- Für ein gutes Gesamtergebnis sind nicht nur geeignete Beschichtungsstoffe notwendig, sondern ebenso auch geeignete Substrate und eine geeignete Applikationstechnik. Allen drei Aspekten muss gleichermaßen Aufmerksamkeit geschenkt werden.
- Die Mechanismen der vielfältigen Wechselwirkungen werden zur Zeit erst teilweise verstanden. Deshalb muss vorderhand auf den Ausschluss von ungünstigen Kombinationen aufgrund von empirischen Erfahrungen zurückgegriffen werden. Zu beachten ist ferner, dass negative wie positive Wechselwirkungen nicht generell erkennbar, sondern meist spezifisch für einzelne Eigenschaften sind.

Tabelle 31: Abschätzung der (qualitativen) Wirkung der Einzelkomponenten im Gesamtsystem

Faktor	Eigenschaft / Kriterium				
Holzart	Witterungsbeständigkeit	Feuchteempfindl.	Eindringung Hydrophob.		Bemerkungen
Fichte		+			
Tanne	- ¹⁾	-	+		¹⁾ mehr Risse als Fichte
Birken-Sperrholz	-	-			
Hydrophobierung	Witterungsbeständigkeit	Feuchteschutz	Eindringtiefe ins Holz	Beschichtbarkeit	Bemerkungen
NP 118		+	+		
NP 119			- ²⁾	-	²⁾ Refusierung DS
NP 118F					
NP 118FAG	+	-			
NP 310523	+		+	+	
Grundierung	Witterungsbeständigkeit	Feuchteschutz	Adhäsion	Sperrwirkung (Astverfärbung)	Bemerkungen
100% UV	-				UV-Härtung in Rissen
wässrig UV	+	+	+	+	
UV / oxydativ	-				UV-Härtung, Blasen
Alkyd (oxyd. Härt.)	+				
Nanocoat			+		
Decklack	Witterungsbeständigkeit	Feuchteschutz	UV – Stabilität	Sperrwirkung (Astverfärbung)	Bemerkungen
Eterno weiss	³⁾		+		³⁾ bestimmt durch Grund.
Eterno grau			+		höhere Oberfl.-Temp.
Eterno grau +H+Ag			?		Modifizierung unwirksam
Nanocoat	- ⁴⁾	+	+	+	⁴⁾ zu spröd (Risse)
Legende: - + : positive Wirkung					
- - : negative Wirkung					
- ? : Wirkung unklar					

- Beschichtungsstoffe:
 - Die Wirkung der einzelnen Komponenten in einem Beschichtungssystem ist aufgrund der vielfältigen Wechselwirkungen schwierig zu bewerten. Basierend auf einer umfassenden Betrachtung der verschiedenen Untersuchungsergebnisse ist aber die in Tabelle 31 dargestellte grobe Qualifikation möglich. Auf besonders ungünstige Kombinationen wurde jeweils bei der Diskussion der Ergebnisse hingewiesen.
 - Die Anbindung der Hydrophobierungsmittel an die Holzkomponenten ist noch weitgehend unklar. Erste Ergebnisse deuten darauf hin, dass diese nur teilweise den chemischen Modellvorstellungen entsprechen. Notwendig ist auch ein Einbezug der Migrationsphänomene in diese Modelle. Für ein besseres Verständnis der Funktionsweise der Hydrophobierungsmittel sind diesbezüglich noch intensive Untersuchungen notwendig.
 - Änderungen in der Formulierung der Beschichtungsstoffe sind heikel, da oft die Verbesserung einer Eigenschaft eine Verschlechterung bei einer anderen hervorruft. So sind z.B. zwischen dem Hydrophobierungsmittel NP 118F und dessen modifizierter Variante 118FAG teilweise erhebliche und nicht erklärbare Eigenschaftsunterschiede zu beobachten (v.a. schlechtere Feuchteschutzwirkung bei NP 118FAG). Hier müsste abgeklärt werden, ob der zugefügte Tanninblocker oder das Nano-Silber zu unerwarteten Wechselwirkungen geführt haben. Bei Modifizierungen an den Beschichtungsstoffen sind deshalb umfassende und systematische Vergleichsuntersuchungen notwendig.
 - UV-härtende Grundierungen zeigen teilweise hervorragende Leistungsmerkmale auch in der Aussenanwendung. Kritisch ist allerdings die unvollständige Aushärtung z.B. in Astrissen.
 - Trotz der in diesem Projekt ausgebliebenen Erfolge sollten die Möglichkeiten zur Hydrophobierung der Deckschicht weiter verfolgt werden.
- Substrat:
 - Die Holzqualität ist mitentscheidend für die Qualität des Endproduktes 'Fassadentäfer'. Holz mit potentiellen Fehlstellen eignet sich nicht als Beschichtungsträger. Ungeeignete Bretter sind daher auszusortieren.
 - Insgesamt zeigen sich zwischen Fichte und Tanne nur verhältnismässig geringe verwendungstechnische Unterschiede, wobei die potentiell vorteilhaften Eigenschaften der Tanne (z.B. Fehlen von Harzgallen, bessere Imprägnierbarkeit) deren Nachteile (z.B. ungünstiges Feuchteverhalten) aber nicht entscheidend aufwiegen können.
 - Für Holzwerkstoffe sind auf die jeweiligen Substrateigenschaften angepasste Beschichtungskonzepte notwendig. Bei Sperrholzplatten müssen zum Beispiel die im Furnier vorhandenen Schälrisse berücksichtigt und dauerhaft 'gefüllt' werden.
- Applikationstechnik:
 - Hobeln und Schleifen sind wichtige Prozesse zur Vorbereitung der Holzoberfläche als Anstrichträger. Den Ansprüchen der nachfolgenden Beschichtung muss daher bereits bei der Bereitstellung des Rohstäfers Rechnung getragen werden. Verletzungen der Holzstruktur (z.B. gequetschte Fasern) sind möglichst zu vermeiden.
 - Besonders heikel ist auch der Zwischenschliff der Grundierungen. Einerseits kann ein fehlender Zwischenschliff zu einer rauhen Oberfläche und Haftungsproblemen für die Deckschicht führen, während andererseits bei einem zu starken Zwischenschliff die Grundierungen stellenweise durchgeschliffen werden und daher ihre Sperrwirkung verlieren. Die Stärke des Zwischenschliffes ist daher für jede Grundierung zu definieren und zu kontrollieren (Schichtdicke!). Optimal wären Grundierungen, wo gar kein Zwischenschliff notwendig ist.
 - Für einen 'symmetrischen' Feuchteschutz ist auf eine genügende Beschichtung der Täfer-Rückseiten (bis und mit Grundierung) zu achten. Der Applikationsprozess ist entsprechend einzurichten und zu kontrollieren.
 - Bei besonders feuchtedichten Grundierungen könnte allenfalls die Schichtdicke der Deckschicht reduziert werden, da durch die Deckschicht kein zusätzlicher Feuchteschutz erreicht wird (z.B. Grundierung 2). Die für die Integrität der Deckschicht notwendige minimale Schichtdicke (inkl. UV-Transmission) ist vorher zu bestimmen.

5.2 Offene Fragen / Forschungsbedarf

Im vorliegenden Projekt konnte nur ein beschränkter Teil der vielen offenen Fragen untersucht und beantwortet werden. Naturgemäss tauchten sogar viele zusätzliche Fragen auf, welche erst mit weiteren Versuchen beantwortet werden können. Tabelle 32 enthält eine (unvollständige) Liste von offenen Fragen und zeigt mögliche Ansatzpunkte für weiterführende Untersuchungen auf.

Tabelle 32: Offene Fragen und Lösungs- resp. Untersuchungsansätze

Bereich	Offene Fragen	Lösungsansätze / Untersuchungsmethoden
Substrat	Beschichtung von Holzwerkstoffen	<ul style="list-style-type: none"> • Entwicklung von 'rissfüllenden' Grundierungen
Hydrophobierung	Unvollständiges Verständnis der Wirk- und Anbindungsmechanismen	<ul style="list-style-type: none"> • Ausmass Eindringung in Zellwände (TEM mit Elementanalytik) • Chemische Anbindung an Holzkomponenten • Einfluss Holzfeuchte auf Eindringung / Anbindung
	Optimale / notwendige Tiefenwirkung	<ul style="list-style-type: none"> • Erhöhung Langzeitwirkung? • Verminderung Dampfdiffusion?
	Optimale Auftragsmenge und Applikationsart	<ul style="list-style-type: none"> • Systematische Versuche mit Sprühen, Streichen, Fluten • Versuche mit Druck- / Zonenimprägnierung
	Umfang und Folgen Migration Silane in Beschichtung / im Substrat	<ul style="list-style-type: none"> • Elementanalytik • Kontaktwinkel, Adhäsion
	Wirkung Hydrophobierung bei weniger feuchtedichten Beschichtungen	<ul style="list-style-type: none"> • Feuchteschutztest mit Lasuren
Grundierung	Verankerung / Eindringung in Substrat	<ul style="list-style-type: none"> • Anfärbung / Mikroskopie • Einsatz von Haftvermittlern
Deckschicht	Hydrophobierungen bei halbtransparenten und transparenten Beschichtungen	<ul style="list-style-type: none"> • Einfluss auf Witterungsbeständigkeit • Nachträgliche Hydrophobierungen als Pflegemassnahme?
Gesamt-system	Fehlende Langzeiterfahrung	<ul style="list-style-type: none"> • Weiterführung gestartete Bewitterungsversuche • Beobachtung von Pilotobjekten
	Qualitätssicherung	<ul style="list-style-type: none"> • Entwicklung von Prüfmethode zur Erfassung Wirksamkeit Hydrophobierung gegen Flüssigwasser • Vergleich Freibewitterungen 45° und 90°

5.3 Umsetzung / Optimierungen

Ein wichtiges Projektziel war die Erkennung und Gewichtung von Verbesserungsansätzen für das ganze Beschichtungskonzept. Eine Übersicht über die erkannten Optimierungsmöglichkeiten gibt Tabelle 33. Mit der Umsetzung verschiedener Verbesserungen wurde bereits im Laufe der Projektarbeiten begonnen (AP 6).

Tabelle 33: Optimierungsansätze für das Beschichtungskonzept und Stand der Umsetzung

Bereich	Verbesserung	Umsetzung
Substrat	Holzqualität (Ausschluss Rotstreif, Astrisse / Fehlstellen ausfüllen)	(✓)
	Auswahl bewitterte Brettseite, Schnittart / Jahring-Stellung (vermehrtes Auftreten von Radialrissen bei Tangentialflächen)	
	Zellstauchungen durch Oberflächenbearbeitung (Hobelqualität, Schleifen)	
Hydrophobierung	Kompatibilität mit / Einfluss auf Folgeanstrichen (Haftung, Verfärbung)	(✓)
	Einbezug weiterer Hydrophobierungsmittel	✓
	Verbesserung Wirtiefe und –dauer (Zonenimprägnierung)	
Grundierung	Evaluation 'bestes' UV-System / Einbezug alternative Systeme (Nanocoat)	✓
	Sicherstellung minimale Schichtdicke	(✓)
	(UV-)Härtung in Rissen verbessern (Fehlstellen vorgängig ausfüllen?)	
Deckschicht	gezielte Hydrophobierung (im Volumen oder nur Oberfläche)	(✓)
	Optimierung Schichtdicke (z.B. Verringerung bei genügendem Feuchteschutz)	
Applikation	Anschliff Grundierung (wenn möglich Verzicht!)	(✓)
	vollständige Beschichtung Rückseite	(✓)
Legende: - ✓ : weitgehende Umsetzung im Projekt - (✓) : teilweise Umsetzung im Projekt, weitere Arbeiten nötig		

Folgende Massnahmen werden aufgrund der Untersuchungsergebnisse zur prioritären Umsetzung empfohlen:

- Weiterführung und Auswertung der gestarteten Bewitterungsversuche
- Dokumentation von Erfahrungen aus Praxisobjekten
- Einführung von Beschichtungen basierend auf der wässrigen UV Grundierung (Grundierung 2):
 - Optimierung der Haftung zwischen Grundierung und Deckschicht
 - Ausführung von Praxisobjekten und Beobachtung Witterungsbeständigkeit
 - Abklärung der ökonomischen und logistischen Machbarkeit
- Weiterentwicklung der hydrophoben Ausrüstung der Deckschicht (nur oberflächlich oder im Volumen)

Weitere Ansätze für Verbesserungen sind auch aus grundsätzlichen Überlegungen abzuleiten, wie eine ideale Beschichtung aussehen sollte und welche Funktionen dazu die Einzelschichten zu erfüllen haben. Insbesondere ist die Frage zu beantworten, wo eine zusätzliche Hydrophobierungsschicht am wirksamsten sein könnte.

Literatur

- De Vetter L., Cnudde V., Masschaele B., Jacobs P.J.S., Van Acker J. (2006). Detection and distribution analysis of organosilicon compounds in wood by means of SEM-EDX and micro-CT. *Materials Characterization* 56:39–48
- Donath S., Militz H., Mai C. (2004). Wood modification with alkoxysilanes. *Wood Sci. Technol.* 38:555–566
- Donath S., Militz H., Mai C. (2006). Creating water-repellent effects on wood by treatment with silanes. *Holzforschung* 60:40–46
- Hinder S.J., Lowe C., Maxted J.T., Watts J.F. (2005). Migration and segregation phenomena of a silicone additive in a multilayer organic coating. *Progress in Organic Coatings* 54:104–112
- Horgnies M., Darque-Ceretti E. (2006). Study of siloxane additives migration to the surface of polyester-(melamine)-polyurethane coatings: Aging effects after ethanol cleaning. *Progress in Organic Coatings* 55:27–34.
- Mai C., Militz H. (2004a). Modification of wood with silicon compounds. Inorganic silicon compounds and sol-gel systems: a review. *Wood Sci. Technol.* 37:339–348
- Mai C., Militz H. (2004b). Modification of wood with silicon compounds. Treatment systems based on organic silicon compounds – a review. *Wood Sci. Technol.* 37:453–461
- Schulte Y., Donath S., Krause A., Militz H. (2004). Evaluation of outdoor weathering performance of modified wood. Document No. IRG/WP/0420296. International Research Group on Wood Protection, Stockholm, Sweden
- Sèbe G., Tingaut P., Safou-Tchiama R., Pétraud M., Grelier S., De Jéso B. (2004). Chemical reaction of maritime pine sapwood (*Pinus pinaster* Soland) with alkoxysilane molecules: a study of chemical pathways. *Holzforschung* 58:511–518
- Tingaut P., Weigenand O., Militz H., De Jéso B., Sèbe G. (2005). Functionalisation of wood by reaction with 3-isocyanatopropyltriethoxysilane: Grafting and hydrolysis of the triethoxysilane end groups. *Holzforschung* 59:397–404
- Tingaut P., Weigenand O., Mai C., Militz H., Sèbe G. (2006). Chemical reaction of alkoxysilane molecules in wood modified with silanol groups. *Holzforschung* 60:271–277
- Tshabalala M.A., Gangstad J.E. (2003). Accelerated weathering of wood surfaces coated with multifunctional alkoxysilanes by sol-gel deposition. *J. Coatings Technol.* 75(943):37-43

Normen

- EN 927-1 (1996). Lacke und Anstrichstoffe - Beschichtungsstoffe und Beschichtungssysteme für Holz im Außenbereich - Teil 1: Einteilung und Auswahl
- EN 927-2 (2006). Lacke und Anstrichstoffe - Beschichtungsstoffe und Beschichtungssysteme für Holz im Außenbereich - Teil 2: Leistungsanforderungen
- EN 927-3 (2000). Lacke und Anstrichstoffe - Beschichtungsstoffe und Beschichtungssysteme für Holz im Außenbereich - Teil 3: Freibewitterung
- EN 927-4 (2000). Lacke und Anstrichstoffe - Beschichtungsstoffe und Beschichtungssysteme für Holz im Außenbereich - Teil 4: Beurteilung der Wasserdampfdurchlässigkeit (zurückgezogen 2005)
- EN 927-5 (2000). Lacke und Anstrichstoffe - Beschichtungsstoffe und Beschichtungssysteme für Holz im Außenbereich - Teil 5: Beurteilung der Wasserdurchlässigkeit
- prEN 927-6 (2004). 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 (1997). Paints and varnishes – Determination of film thickness
- 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
- ISO 4628-6 (2001). Beschichtungsstoffe - Beurteilung von Beschichtungsschäden - Bewertung von Ausmass, Menge und Größe von Schäden - Teil 6: Bewertung des Kreidungsgrades nach dem Klebbandverfahren
- ISO/DIS 7724-3 (1997). Paints and varnishes – Colorimetry – Part 3: Calculation of colour differences by CIELAB

Anhang

- A1. KTI-Projektantrag (Auszug)
- A2. Berichte zur industriellen Beschichtungsapplikation (Wirtschaftspartner)
- A3. Bericht zur chemischen Analytik der Hydrophobierungsmittel (Empa)
- A4. Schema Probenidentifikation (loses Einzelblatt)

A1. KTI-Projektantrag (Auszug)

Inhalt: **Fachlicher Teil des KTI-Projektantrages vom 09.03.2004**

Autoren: **Klaus Richter, Martin Arnold (Empa, mit Input von Wirtschaftspartnern)**

Seitenzahl: **15**

Beitragsgesuch	KTI P-Nr:	REF:	Co-REF:
-----------------------	------------------	-------------	----------------

Titel des Projektes (1 - 2 Zeilen zur Veröffentlichung bestimmt)

Dauerhafter Holzoberflächenschutz auf der Basis von Nanocomposites

Hauptgesuchsteller/in

Name	Vorname		Titel	
Richter	Klaus		Dr.	
Name der Institution	Erreichbar unter:			
EMPA, Holzabteilung	Telefon G:	01 823 41 15	E-Mail:	Klaus.richter@empa.ch

Hauptfinanzierungspartner/in

Name	Vorname		Titel	
Kipfer	Hans-Ulrich		Dipl.-Ing	
Name der Institution	Erreichbar unter:			
Kälin&Co. AG, Hobelwerk	Telefon G:	052 24519 90	E-Mail:	052 242 44 27

Life Sciences	Enabling Technologies	Nano / Micro	Engineering
<input type="checkbox"/> Biomedizin <input type="checkbox"/> Chemie (Biochemie / Pharmakologie) <input type="checkbox"/> Biotechnologie <input type="checkbox"/> Medizintechnik <input type="checkbox"/> Landwirtschaft <input type="checkbox"/> Lebensmitteltechnologie <input type="checkbox"/> Bioinformatik	<input type="checkbox"/> Unternehmensführung (Finanzen, Strategie, Marketing) <input type="checkbox"/> Öffentl. Verw. (Raumplanung, Tourismus, Publ. Managem.) <input type="checkbox"/> Informations- und Kommunikationstechnologie ICT (SW orientiert) <input type="checkbox"/> Architektur / Design <input type="checkbox"/> Integrierte Produktion (Logistik / e-Business)	<input type="checkbox"/> Nanotechnologien <input type="checkbox"/> Mikrosystemtechnik <input type="checkbox"/> Systems Engineering <input type="checkbox"/> Robotik <input type="checkbox"/> Electronic Engineering / Optoelektronik / Sensoren <input type="checkbox"/> Telecommunication Engineering (Hardware orientiert)	<input type="checkbox"/> Produktionstechnologien <input checked="" type="checkbox"/> Materialtechnologien <input type="checkbox"/> Mechanical & Thermal Engineering <input type="checkbox"/> Civil Engineering <input type="checkbox"/> Chemical Engineering <input type="checkbox"/> Umwelttechnologie / Ökologie <input type="checkbox"/> Electrical Engineering
Anmerkung: Bitte nur 1 Disziplin ankreuzen!		“Discovery project”	<input type="checkbox"/> Ja <input type="checkbox"/> Nein

Beteiligung eines Neunternehmens (Datum Firmengründung: _____) **Förderbereich International**

Neues Projekt Fortsetzung des KTI-Projektes Nr. _____ EUREKA

Projektbeginn: 1.4.2004 Dauer: 24 Monate IMS

Anbegehrter Bundesbeitrag CHF 238'944 Space/ESA

Beiträge Dritter / Wirtschaftsbeitrag CHF 246'912 andere

Gesamtkosten des Projektes CHF 485'856

Projektgegenstand/Kurzbeschreibung (480 Zeichen) Der Text kann zur Publikation z.B. im Tätigkeitsbericht der KTI verwendet werden

Im vorliegenden Projekt wird ein System von drei aufeinander abgestimmten Komponenten für den Langzeitschutz von Holzfassaden entwickelt und charakterisiert. Das System baut auf der sich ergänzenden Wirkung von Hydrophobierung (Flüssigwasserschutz), Sperrschicht (Dampfdiffusionsschutz) und dekorativer Schicht (UV-Schutz, Farbgebung) auf, deren optimales Zusammenwirken bisher ungelöst ist. Um dieses Schutzsystem mit den erforderlichen anwendungstechnischen Eigenschaften verwirklichen zu können, werden wissenschaftliche Untersuchungen zum Verständnis der Einzelsysteme und ihrer Kompatibilität miteinander bzw. zur Anbindung an die Holzfasern durchgeführt. Parallel werden die entwickelten Systeme in natürlichen und künstlichen Bewitterungstests auf ihre effektive Schutzwirkung hin untersucht und die Verbesserung gegenüber herkömmlichen Beschichtungssystemen quantifiziert. Ziel ist es, eine Unterhaltsfreiheit von wetterexponierten Holzoberflächen von 15 Jahren zu erreichen .

Projekttitle in Englisch

Durable exterior wood coating system based on nanocomposites

Projektleiter/in

Name		Vorname		Titel	
Arnold		Martin			
Name der Institution		Erreichbar unter:			
EMPA		Telefon G:	01 823 46 83	E-Mail:	Martin.arnold@empa.ch

Gesuchsteller (Forschungsstätten) und Projektpartner (Unternehmen)**Hauptgesuchsteller/in**

Name		Vorname		Titel		
Richter		Klaus		Dr		
Name der Institution		Kurzname	Postadresse			
Eidgenössische Materialprüfungs- und Forschungsanstalt		EMPA	Straße:		Ueberlandstr. 129	
			PLZ:	8600	Ort:	Dübendorf
Homepage / E-Mail: www.empa.ch / klaus.richter@empa.ch		Telefon G:	01 823 41 15		Fax-Nr.:	01 823 40 07

Hauptfinanzierungspartner/in

Name		Vorname		Titel		
Kipfer		Hans-Ulrich		Dipl.Ing		
Name der Institution		Kurzname	Postadresse			
Kälin & Co. AG		Kälin	Straße:		Hobelwerkweg 7	
			PLZ:	8404	Ort:	Winterthur
Homepage / E-Mail: www.kaelintaefer.ch / info@kaelintaefer.ch		Telefon G:	052 242 4427		Fax-Nr.:	052 24282 58
Branche:	Hobelwerk, Holzbeschichtung		Anzahl Mitarbeiter der Firma:		30	

Mitfinanzierungspartner/in

Name		Vorname		Titel		
Koch		Walter		Dipl.Ing.		
Name des Unternehmens/der Institution		Kurzname	Postadresse			
NanoSys GmbH		NanoSys	Straße:		Dorf 32	
			PLZ:	9427	Ort:	Wolfhalden
Homepage / E-Mail: www.nanosys.ch / walter.koch@nanosys.ch		Telefon G:	071 890 09 75		Fax-Nr.:	071 890 09 76
Branche:	Oberflächentechnologie		Anzahl Mitarbeiter der Firma:		4	

Mitfinanzierungspartner/in

Name		Vorname		Titel		
Weibel		Otto		Dr.		
Name des Unternehmens/der Institution		Kurzname	Postadresse			
Otto Weibel AG		OW	Straße:		Stationsstr. 47	
			PLZ:	8902	Ort:	Urdorf
Homepage / E-Mail: ottoweibel@otto-weibel.ch		Telefon G:	01 736 60 70		Fax-Nr.:	01 736 60 77
Branche:	Lacke und Farben		Anzahl Mitarbeiter der Firma:		30	

(Bitte Einlageblatt verwenden, falls mehrere Mitgesuchsteller / Mitfinanzierungspartner eingetragen werden müssen)

1. Welches sind die wirtschaftlichen Ziele und die Deliverables (quantifiziert, messbar) der vorgesehenen Zusammenarbeit? Wurde z.B. eine Marktuntersuchung durchgeführt? (evtl. Businessplan als Beilage; vgl. auch entspr. Merkblatt [Untern Ziele](#))^{1) 2)}

Das aktuelle Marktvolumen für industriell gefertigte Fassadenschalung aus Holz in der Schweiz beträgt ca. 1 Mio m². Bisher haben die relativ kurzen Unterhaltsintervalle von beschichteten Holzfassaden ein Wachstum des Marktes behindert. Jüngste, im Rahmen eines parallel laufenden Projektes durchgeführte Marktanalysen und Trendberechnungen zum künftigen Holzverbrauch in der Schweiz weisen für den Fassadenbereich überdurchschnittliche Mengensteigerungen aus [1, 2]. Dies ist einerseits bedingt durch gute Zuwachspotenziale des Holzbaus (der sehr eng mit Fassadenschalungen aus Holz verbunden ist), der CO₂ Neutralität von Holz, andererseits durch weiter zunehmende energetische Sanierungen von Gebäudehüllen des Baubestandes. Die Firma Kälin besitzt gegenwärtig einen Anteil von ca. 3% am Holzfassadenmarkt. Durch die Vermarktung der neuen Technologie wird sie ihren Marktanteil steigern können und am prognostizierten Volumenzuwachs für industrielle Fassadenschalung aus Holz überproportional teilhaben. Mit der neuen Technologie soll das Unterhaltsintervall für Fassadenschalungen markant auf ca. 15 Jahre verlängert werden, d.h. auf den Wert der konkurrierenden metallischen und mineralischen Bekleidungen. Das verlängerte Unterhaltsintervall wird die wirtschaftlichen Vorteile von Holzbauten mit Holz aussenhülle verbessern.

Das Projektkonsortium geht davon aus, dass nach erfolgreicher Einführung die neue Technologie auch an Konkurrenten von Kälin gegen Lizenzgebühren weitergegeben wird. Diese Einnahmen sind im folgenden Businessplan, der die erwarteten wirtschaftlichen Ziele (Umsätze, Ertrag) sowie Marketingmassnahmen quantifiziert, nicht enthalten.

Businessplan der Wirtschaftspartner

Jahr --->	2004/05	2006	2007	2008	2009	2010
Marktvolumen CH/ m ² a	1'000'000	1'000'000	1'000'000	1'200'000	1'400'000	1'600'000
Kälin						
CH-Marktanteil %	3	4	6	8	12	18
Ausstoss m ²	30'000	40'000	60'000	96'000	168'000	288'000
Umsatz CHF	900'000	1'200'000	1'800'000	2'880'000	5'040'000	8'640'000
Verkaufspreis / m ²	30	30	30	30	30	30
Brutto Marge %	45	45	45	45	45	45
Brutto Marge CHF	405'000	540'000	810'000	1'258'500	2'194'250	3'816'750
(inkl. Zins u. Abschr.)						
Marketingmassnahmen	100'000	200'000	250'000	250'000	250'000	250'000
Kapazität m ² /Schicht	120'000	120'000	120'000	180'000	240'000	240'000
Investitionen	0	0	0	500'000	0	0
(Hobelmaschine)						
OW Lacke						
Kapazität (Tonnen)	3000	3000	3000	3000	3000	3000
Lacklieferungen (t)	6	8	12	19.2	33.6	57.6
Investitionen	0	0	0	0	0	0
NanoSys						
Kapazität (Tonnen)	500	500	500	500	500	500
Nano-Perl Lieferungen (t)	1.8	2.4	3.6	5.8	10.1	17.3
Investitionen	0	0	0	0	0	0

[1] Planconsult (1998): Studie über den Endverbrauch des Holzes in der Schweiz im Jahre 1996, Basel

[2] Hofer P., Taverna R., Richter K. und Werner F. (2002): Gebäudepark als Holzlager. GEO Partner AG, Zürich

2. Welches sind die wissenschaftlich-technischen Ziele und die 'deliverables' dieses Vorhabens ?

Die innovative Idee, eine hydrophobe Schicht in der Grenzschicht Holz / Beschichtungsstoff zu platzieren, baut auf Vorversuchen und bisherigen Erfahrungen der Wirtschaftspartner auf (s. 3.a). Der vorliegende Ansatz der Hydrophobierung von Holzoberflächen für den Fassadenbereich basiert auf Polydimethylsiloxanen mit aktiven Gruppen und Edelmetallkatalysatoren. Um diese mit einer zweistufigen Oberflächenbeschichtung aus Sperr- und dekorativer Schicht langfristig wirksam und industriell applizierbar zu kombinieren, werden anspruchsvolle chemische Analysen und die Wirkung charakterisierende Untersuchungen eingesetzt, die thematisch und zeitlich aufeinander abgestimmt durchgeführt werden.

Teilziel 1:

Chemische Charakterisierung der vom Hersteller eingesetzten Varianten bzw. Modifikationen des Hydrophobierungssystems (eingesetzte Siliziumverbindungen, Lösungs- bzw. Bindemittel)

Deliverable 1

- Genaue Produktspezifikationen
- Chemisch-analytische Charakterisierung der Produkte und ihrer Funktionalitäten
- Beschreibung der erwarteten Wirkungsweise, Vor- und Nachteile

Holz als natürlicher, jedoch chemisch komplexer Bindungspartner kann die Funktionalität der Hydrophobierung beeinträchtigen. Es muss analysiert werden, ob die Wirksamkeit auf unterschiedlichen Substraten (Nadelholz und Birkensperrholz) und auf Problemzonen (Astbereich, Frühholz/Spätholz) unterschiedlich ist. Es werden im Projekt 2 Nadelholzarten mit dem grössten Potenzial im Fassadenbereich untersucht (Fichte, Tanne), sowie Birkensperrholz als im Fassadenbereich einsetzbarer plattenförmiger Holzwerkstoff.

Teilziel 2:

Quantifizierung der Wirksamkeit der Hydrophobierung (ohne nachträgliche Beschichtung) auf unterschiedlichen Substraten (Holzarten) unmittelbar nach dem Auftrag (Nullproben) und nach künstlicher und natürlicher Bewitterung. Ermittlung der Ursachen möglicher Unterschiede.

Deliverable 2

- Kontaktwinkelmessreihen als Mass der Hydrophobierung
- Messreihen der Wasserdampf- bzw. Flüssigwasseraufnahme (EN927-4/-5)
- Ergebnisse der chemischen Oberflächenanalyse
- Interpretation der Ergebnisse

Neben der Oberflächenwirkung ist auch die Kenntnis der Tiefenwirkung der Wasserabweisung für eine Gesamtbeurteilung von Bedeutung. Es werden die Eindringtiefen der Hydrophobierung quer zur Faserrichtung bei Standardapplikation auf Fichtenholz (geringe Wegsamkeit) quantifiziert und Tiefenprofile der wasserabweisenden Wirkung ermittelt. Zudem wird der Anbindungszustand der aktiven hydrophobierenden Substanzen an die Holzmatrix als entscheidend für die Wirksamkeit erachtet. Entscheidend ist die Frage, ob nur die kapillar zugänglichen Zelllumina von den Wirkstoffen ausgekleidet werden, oder ob die nanoskalierten Teile in die interfibrillären Hohlräume der Zellwand eindringen und dort verankert werden.

Teilziel 3:

Quantifizierung der Eindringung sowie der Tiefenwirkung der Hydrophobierung. Ansprache des Anbindungszustandes an die Holzmatrix

Deliverable 3:

- Messwerte der Eindringung quer zur Faserrichtung.
- Qualitative Ansprache der Anbindung an bzw. in die Zellwand
- Einschätzung möglicher Verfahren zur Verbesserung der Tiefenwirkung
- Interpretation der Ergebnisse

Im Hinblick auf die angestrebte hohe Dauerhaftigkeit und Unterhaltsfreiheit hat die Verträglichkeit der Hydrophobierung mit einer zweistufigen schichtbildenden und pigmentierten Oberflächenbehandlung (Sperrschicht und dekorative Schicht) entscheidende Bedeutung. Dies erfordert eine optimale chemisch-physikalische Abstimmung beider Teilsysteme. Dieser entscheidende Schritt wird in Modellversuchen bearbeitet. Aufgrund der vorhandenen chemischen Kenntnisse und dem Einblick in die Rezepturen der Teilsysteme werden definierte Eigenschaften des kombinierten Systems erwartet, die überprüft und beurteilt werden. Entsprechend der Resultate werden die Ausgangssysteme optimiert.

Teilziel 4:

Ermittlung der optimalen Haftung und Abschätzung der Haltbarkeit einer pigmentierten Oberflächenbeschichtung auf nano-hydrophobierten Oberflächen

Deliverable 4:

- Quantifizierung der Adhäsion der Oberflächenbeschichtung auf hydrophobierten Oberflächen
- Kontaktwinkelmessreihen als Mass der Hydrophobierung des Gesamtsystems
- Quantifizierung der Feuchteschutzwirkung (Flüssigwasser und Wasserdampf) des Gesamtsystems
- Erfahrungswerte zur Dauerhaftigkeit unter natürlicher und künstlicher Bewitterung

¹⁾ Diese Angaben sind vom /von der Wirtschaftspartner/in einzutragen

²⁾ Maximal 200 Worte. Diese sind für die Evaluation massgebend. Falls weitere Informationen (nur in Ausnahmefällen!) als notwendig erachtet werden, sind diese als Beilage zusammenzufassen. Keine Wiederholung des Kurzbeschriebes!

3. Worin besteht der Innovationsgehalt der vorgesehenen Arbeiten gegenüber a) dem Stand der eigenen Forschung und Entwicklung, und b) bezogen auf den heutigen Stand der nationalen und internationalen Technik? Wurden Recherchen durchgeführt (Angabe der Quellen usw.)?

A: Eigene Forschung und Entwicklung

Im Jahr 2001 entwickelte die nanosys mit dem Produkt-Nanoperl eine reaktive 2-komponentige Nanoprägnierung für Holz. Dieses Produkt wird auf die fertig beschichteten oder rohen Holzobjekte mittels Sprühen aufgetragen und führt dazu, dass die damit behandelten Objekte wesentlich weniger Wasser aufnehmen als unbehandelte Objekte (siehe Abbildung unten). Die verminderte Wasseraufnahme führt zu einem geringeren Quellen und Schwinden und somit zu einer längeren Haltbarkeit der Holzobjekte. Durch die verminderte Wasseraufnahme wird allenfalls ein Befall durch Mikroorganismen ebenfalls reduziert, und dies ohne den Einsatz von Fungiziden.

Abbildung: Wirkung einer Hydrophobierung der Holzoberfläche: Tropfenbildung auf Hirnholz (links) und Verhinderung der kapillaren Wasseraufnahme bei Astrissen (rechts).



Die Lebensdauer der so behandelten Objekte ist, bedingt durch die natürliche Erosion einer Beschichtung bei der Freibewitterung von ca. 1-3 μm / Jahr, zeitlich aber sehr beschränkt. Diese so genannte on-coat Variante ist nicht dazu geeignet, Holzfassaden über 10-15 Jahre nachhaltig zu schützen.

In Zusammenarbeit mit der Firma Kälin entwickelte sich der Gedanke, vergleichbar mit Freizeitkleidung, die hydrophobe Schicht in der Grenzschicht Holz/ Beschichtungsstoff zu platzieren. Dieses Vorgehen soll die Lebensdauer der wasserabweisenden Funktion der Nanoprägnierung über die ganze Lebensdauer des

Anstrichstoffes erhalten. Zusätzlich soll die Hydrophobierung derart formuliert werden, dass ein tiefes Eindringen in den Holzuntergrund erreicht wird, damit bei später auftretenden Rissen die Hydrophobie des Holzobjektes trotzdem gewährleistet ist.

Erste Vorversuche zeigten, dass ein solches System grundsätzlich auf Basis oxidativ härtender Alkydharzlacke machbar ist. Diese Systeme sind jedoch veraltet, umweltbelastend und mit den industriellen Beschichtungsverfahren nicht kompatibel. Die Beschichtbarkeit verlangt eine neue Formulierung der Hydrophobierungsmittel und der darauf applizierten Beschichtungsstoffe auf Basis von umweltfreundlichen Lacken. Um eine wirksame Hydrophobierung in der Zwischenschicht zu formulieren, sind jedoch Kenntnisse des Mechanismus unabdingbar. Es ist zurzeit völlig unklar, wie die Struktur der Hydrophobierungsmittel auf oder gar in den Zellwänden der Holzfaser ist. Die Selbstorganisation des Hydrophobierungsmittels an der Cellulose oder anderen Holzbestandteilen wird zwar postuliert, ist aber angesichts des Einflusses der darauf applizierten Lackschicht nicht nachgewiesen.

Der Einsatz hydrophobierender Substanzen in Holzoberflächenbehandlungen reduziert die Aufnahme von flüssigem Wasser ins Holz. Die Massnahme gilt als wichtiges Glied des vorbeugenden Holzschutzes, der zum Ziel hat, die Bedingungen für einen Abbau des Holzes insbesondere durch Pilze zu unterbinden. Die hydrophobierenden Behandlungen beeinflussen jedoch nicht das hygroskopische Verhalten des Holzes, so dass Wasserdampfdiffusion und damit Dimensionsänderungen aufgrund von Schwind- und Quellungsbewegungen weiterhin möglich sind. Diese Bewegungen induzieren Spannungen im Holz, die beim Überschreiten der Holzfestigkeit in den Oberflächenzonen zu Rissen führen. In diese Risse kann flüssiges Wasser eindringen, die hydrophobierte Zone unterwandern und zu tieferliegenden Durchfeuchtungen führen, so dass die Voraussetzungen für eine Aktivität holzerstörender Pilze gegeben ist.

Bisherige kommerziell erhältliche Hydrophobierungen auf der Basis von Paraffinen, Wachsen oder Ölbehandlungen haben insbesondere in Bezug auf die UV-Stabilität und Langzeitwirkung unter Praxisbedingungen die Erwartungen nicht erfüllt.

Die Idee, durch die Applikation von 1) Untergrundhydrophobierung und 2) Oberflächenbehandlung ein doppeltes Schutzprinzip aufzubauen, ist nicht neu. Bereits im Jahr 1999 befasste sich die Abteilung Holz im Rahmen einer internen Untersuchung mit dieser Fragestellung. Die Ergebnisse erfüllten jedoch nicht die Erwartungen, da keine spezifischen Kenntnisse über den Mechanismus der Hydrophobierung sowie die verwendeten Beschichtungssysteme vorlagen. Die gewonnenen Erfahrungen machten deutlich, dass die Mitwirkung von Fachleuten aller betroffenen Kompetenzbereiche erforderlich ist, um die Potenziale des Gesamtsystems 'Hydrophobierung plus Anstrich' auszuschöpfen. Diese Voraussetzung ist mit dem zusammengestellten Projektkonsortium erfüllt, in dem Spezialisten aus den Bereichen Nanotechnologie / Hydrophobierung, Oberflächenbeschichtung, Lack- und Polymerchemie, Holztechnologie, und Analytik zusammenarbeiten.

Ebenfalls auf dem Prinzip der Untergrundstabilisierung aufbauend und auf eine Haftverbesserung von Anstrichen auf Holz abzielend war eine Untersuchung der Holzabteilung der EMPA, in der Grundierungen/Imprägnierungen auf der Basis von Isocyanaten und Resorcin eingesetzt wurden. Sie führten zur Verbesserung der Anstrichhaftung insbesondere unter hohem Feuchteinfluss.

Der Fokus der im vorliegenden Projekt untersuchten Wirkungsprinzipien liegt aber auf einer industriell umsetzbaren Technologie und reicht damit weiter. Der Innovationsgehalt der vorliegenden Entwicklung liegt auf der Abstimmung und Kombination zweier Schutzmechanismen auf Holz mit dem Ziel einer dauerhaften Funktionserfüllung

B: Stand der nationalen und internationalen Technik

Die Optimierung der Haltbarkeit von Oberflächenbehandlungen ist ein seit Jahrzehnten verfolgtes Ziel sowohl der Lackforschung- und -entwicklung als auch der Holztechnologie. Die EMPA Holzabteilung bewertet und beurteilt routinemässig im Rahmen des Lignum Gütezeichens die Funktionalität und Wirkungsweise von Oberflächenbehandlungen [1]. Sie engagiert sich seit langem im Rahmen der Europäischen Forschung und Normung von Anstrichstoffen [2], und charakterisiert und beurteilt Beschichtungsstoffe und Behandlungssysteme für Holz im Aussenbereich [3,4].

Fortschritte auf nationaler und internationaler Ebene wurden geprägt durch

- Entwicklungen im Bereich der Lackroh- und Zusatzstoffe (Alkyde, Acrylate, Polyurethan, Hybridsysteme)
- gesetzlich forcierte Umstellungen zur Reduktion der Lösemittel (VOC-Emissionen)
- veränderte Applikations- und Aushärtetechnologien (Strahlenhärtung, Pulverbeschichtung)

Insbesondere für den Einsatz von wetterexponierten Bauteilen sind qualitativ überzeugende und wirtschaftlich

vertretbare Lösungen noch immer nicht befriedigend verfügbar. Lasierende und schichtbildende Oberflächenbehandlungen weisen nach wie vor Defizite im Bereich ihrer Langzeitbeständigkeit auf, die kurzfristige Renovationszyklen erfordern. Wesentliche Ursachen für die auftretenden Schäden liegen in einer zu geringen UV-Stabilität der Anstriche und in einer Unterfeuchtung der Anstrichschichten über Risse, Schadstellen oder Feuchtediffusion, die zu einer Ablösung der Anstriche führen.

Die in Konsequenz auf die Schadensentwicklung vorgenommenen Bemühungen um eine Dimensionsstabilisierung der Holzsubstanz beruhen auf unterschiedlichen Ansätzen

- a) Hydrophobierung durch Öl-, Wachs-, Paraffinbehandlungen, auch in Kombination mit Holzschutzmitteln. Die Verfahren verändern nicht die Struktur der holzeigenen OH-Gruppen, die Verträglichkeit mit Folgeanstrichen insbesondere auf wässriger Basis ist unbefriedigend.
- b) Modifikation mit Harzen und Polymeren. Melaminharze und unterschiedliche Polymere (Alkyde, Acryl, Epoxy, Styren, u.a.) werden mit Druckverfahren ins Holz eingebracht und verhindern bzw. verzögern die Wasseraufnahme. Die meisten Harze füllen die makroskopischen Zellwandkomponenten aus, andere dringen in die submikroskopischen Zellwandräume ein.
- c) Druckimprägnierung mit komplexbildenden Holzschutzsalzen. Diese Technologie verbessert die Haltbarkeit von Folgeanstrichen deutlich, wird aber heute aus Umweltgründen (Schwermetalle des HSM) im Fassadenbereich nicht mehr eingesetzt.
- d) Hitzebehandlung der Hölzer mit dem Ziel, die Wasseraufnahme und damit das Schwind- und Quellverhalten zu verringern. Die Verfahren reduzieren die Hygroskopizität nachweisbar, resultieren aber in technologisch veränderten Holzeigenschaften, Dunkelfärbungen und Geruchsentwicklungen. Es sind grosse prozesstechnische Anlagen nötig. Die Produktionskapazität in Europa beträgt zur Zeit ca. 160.000 m³.
- e) Chemische Modifikation des Holzes, insbesondere über Veresterung durch Acetylierung mit Essigsäureanhydrid. Die Blockierung der für die Wasseraufnahme verantwortlichen OH- Gruppen reduziert die Hygroskopizität der Holz, verbessert die UV-Stabilität und führt zur Verbesserung der biologischen Resistenz. Diese Verfahren benötigen eine komplexe Verfahrenstechnik und sind entsprechend teuer. Ein Einsatz im Fassadenbereich ist ökonomisch nicht wahrscheinlich.
- f) Einsatz von Siliziumverbindungen zur Holzvergütung. Siliziumverbindungen können das Feuchteverhalten und die Dimensionsstabilität beeinflussen. Wasserglasbehandlungen alleine sind als unzureichend bekannt, weil die hohen pH-Werte zur Hydrolyse der Zellwandkomponenten führen. Über den Einsatz mit organischen Lösungsmitteln (Organosilane) und den mehrstufigen Verfahrensschritte (Sol-Gel Verfahren) wurden bessere Ergebnisse erzielt, die aber aufgrund der Kosten und Prozesse nicht praxistauglich sind. Siliconhaltige Mikro-Emulsionen sind als ausgezeichnete Hydrophobierungsmittel bekannt, die auch an anderen Materialien (Mauerwerk) eingesetzt werden.

Die im Projekt untersuchte Hydrophobierungstechnologie basiert auf der Siliziumchemie. Die Wasserabweisung wird durch Polydimethylsiloxane in Nanometergrösse bewirkt, die mit aktiven Gruppen und Edelmetallkatalysator eingesetzt werden. Nach dem bisherigen Verständnis der Wirkungsweise lagern sich die aktiven Komplexe in molekularer Anordnung an den Holzfasern an, ummanteln sie und verändern durch Abspalten eines Wasserstoffatoms deren molekulare Struktur. Dieses Prinzip wird bereits unter dem Label Nano-Perl in der Schweiz vermarktet.

Ebenfalls auf der Basis von Poly- und Hydroxymethylsiloxanen sind Produkte auf dem Markt, die im Bautenschutz und der Bauabdichtung eingesetzt werden. Orientierende Beurteilungen zur Kombinationswirkung von derartiger Hydrophobierungen und Anstrichen verliefen unbefriedigend [5]. Auch für Textilfasern wurden grundlegende Untersuchungen zur Hydrophobierung mit Polyorganosiloxanen durchgeführt.

Neben dem im Projekt untersuchten Hydrophobierungssystem werden aus der Schweiz von einem weiteren Hersteller (Böhme AG, Liebefeld) alternative Hydrophobierungssysteme für Holzaußenanstriche vermarktet. Das System Aqua-Stop enthält organische Carboxylate und Metallkomplexbildner und erzielt mit angekoppelten langkettigen Fettsäuren ebenfalls offene, transparente Schutzschichten gegen flüssiges Wasser. Da auch diese Behandlung keine Wirksamkeit gegen UV-Strahlung und Dampfdiffusion erzielt, kombinieren die Hersteller die Hydrophobierung neu mit Aluminium-Pigmenten. Allerdings bleibt das System atmungsaktiv, eine Reduktion der Dampfdiffusion wird nicht angestrebt. Ein weiteres Produkt mit wasserabweisender Wirkung (WoodCare) wird zur transparenten Behandlung von Holzfassaden angeboten, das auf der Basis von reaktiven Silanverbindungen formuliert ist. Es wird eine Schutzfunktion von mindestens fünf Jahren im Außenbereich angestrebt.

Im Rahmen der Forschungsprogramme der EU ist 2003 auch das Projekt 'HYDROPHOB' (Improvement of wood product properties by increased hydrophobicity obtained by the use of silicon compounds, QLK5-CT-2002-01439) angelaufen, welches sich spezifisch mit der Hydrophobierung von Holzoberflächen durch Silikate befasst. Ein Schwerpunkt ist neben der Analyse der Anbindungsmechanismen der verschiedenen Hydrophobierungsmittel ans Holz speziell auch die Wirksamkeit der Hydrophobierung gegen einen Pilzbefall.

Die Auswertung der relevanten Fachliteratur hat ergeben, dass die im Projekt angestrebte, aufeinander abgestimmte Kombination von Polyorganosiloxanen mit einer schichtbildenden Oberflächenbehandlung bisher weder als Gesamtsystem beschrieben wurde, noch kommerziell vermarktet wird

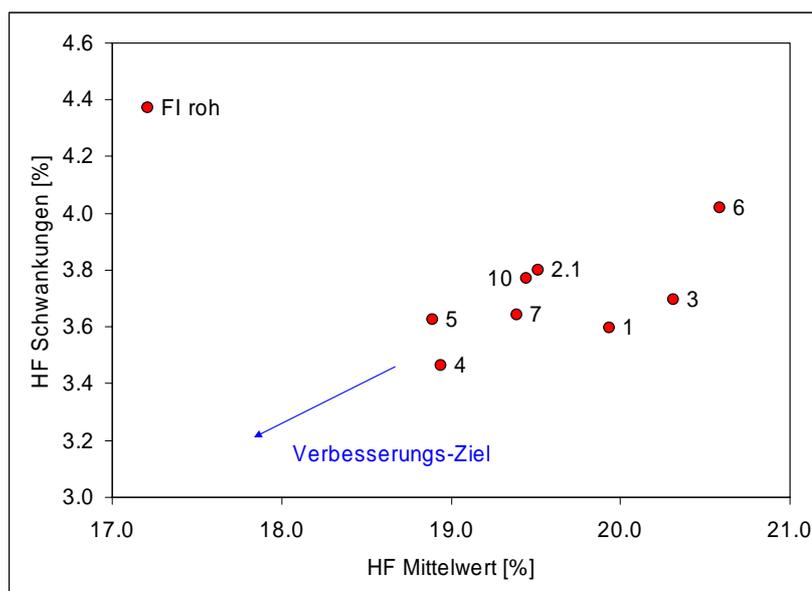
1. Graf., E., Sell, J., Fischer, J. Das Lignum-Gütezeichen für Holzschutz- und Holzpflegemittel — Der Stand Ende 1991. Holz-Zentralbl. 118(1992)3/4, S. 13 - 14
2. Arnold, M., Sell, J. Moisture content (MC) of painted wood during outdoor exposure. Tagungsunterlagen, Final Seminar EU/AIR3-CT94-2463 'Performance and durability ...', Akzo Nobel, Sassenheim, NL, 11.-12. Mai, 1998. 16 S.
3. Arnold, Martin Beschichtungsstoffe für Holz im Aussenbereich. Bulletin Kompetenz-Zentrum Holz 7(1999)1, S. 8 – 11
4. Sell, J., Fischer, J., Wigger, U. Oberflächenschutz von Holzfassaden. Lignatec (2001)13 Seiten
5. Richter K. EMPA Prüfbericht Nr. 840'390. Hydrophobierung durch und Überstreichbarkeit von Primern auf Siloxanbasis. 2002. Unveröffentlicher Prüfbericht

3.1 Wurden bereits Vorarbeiten durchgeführt und wenn ja, welche? ¹⁾

Die Industriepartner haben in Vorversuchen eine Voreinstellung der beiden Systeme 'Nanohydrophobierung' und 'Farbanstrich' vorgenommen. Die vorgenommenen Untersuchungen zur Wirkungsweise erfolgten jedoch ohne wissenschaftliche Dokumentation und Begleitung. Applikationen an Aussenfassaden auf dem Werksgelände der Kälin AG weisen qualitativ nach mehrmonatiger Freibewitterung noch wasserabweisende Eigenschaften und eine intakte Anstricherscheinung auf. Auch die Dimensionsstabilität von hydrophobierten, wetterexponierten Mehrschichtplatten ist im Vergleich zu unbehandelten Proben qualitativ erheblich verbessert.

Orientierende, wissenschaftlich quantifizierte Erkenntnisse zu dem im Projekt angestrebtem kombinatorischen Effekt werden von der EMPA Abt. Holz derzeit erarbeitet. Acht unterschiedlich beschichtete Varianten wurden zusammen mit unbeschichteten Vergleichsproben in natürlichen und künstlichen Bewitterungstest exponiert. Erste Auswertungen zur Änderung der Farbe, der Kontaktwinkel, und der Holzfeuchte über die Bewitterungszeit liegen bereits vor. Es zeigt sich, dass im Vergleich zu konventionellen Systemen (Systeme 6 und 10) bei Systemen mit einer vorgängigen Hydrophobierung der Holzoberfläche sowohl die mittlere Holzfeuchte als auch die Holzfeuchte-Schwankungen deutlich reduziert sind (siehe Abbildung unten).

Abbildung: Ergebnisse der Holzfeuchtemessungen aus einem Vorversuch (natürliche Bewitterung Aug. 2003 bis Feb. 2004) mit 8 Beschichtungs-Varianten sowie unbehandelter Fichte.



Aus den bisherigen Erkenntnissen lassen sich die folgenden Ziele eines optimierten Schichtsystems, wie es in dem beantragtem Projekt angestrebt ist, ableiten:

¹⁾ Wichtige Veröffentlichungen sind dem Gesuch beizulegen

- Möglichst tiefe durchschnittliche Holzfeuchte über die Gebrauchsphase
- Geringe Holzfeuchteschwankungen während der gesamten Gebrauchsphase
- Schutz vor photochemischem Abbau des Holzes und der Beschichtung
- Gleichmässig ausreichende Haftung des Beschichtungssystems auf allen drei Holzonen: Frühholz, Spätholz und Ästen während der ganzen Gebrauchsdauer

3.2. Welche personellen und materiellen Mittel stehen den Projektpartnern zur Verfügung? (z.B. Anzahl Mitarbeiter am Institut/im F&E-Bereich, bereits vorhandene Geräte, usw.)

EMPA Abt. Holz

An der Abteilung Holz der EMPA sind derzeit 19 MitarbeiterInnen beschäftigt; 9 Mitarbeiterstellen werden von WissenschaftlerInnen mit holzwissenschaftlicher, holztechnologischer und biologischer Ausbildung besetzt. Die Abteilung ist nach SN EN ISO/IEC 17025 als Prüfstelle für Holz- und Holzwerkstoffe (STS 163) sowie für Holzschutz und Mikrobiologie im Bauwesen (STS 047) akkreditiert. Das Q-Management erfüllt die Anforderungen der Norm ISO 9001. Die Kompetenz der Abteilung auf dem Gebiet der Holzoberflächentechnologie ist unter 3.1 dokumentiert.

Es werden aus der Abteilung Holz, neben dem/r unter 6.3 beantragten SachbearbeiterInnen, folgende Personal-Eigenleistungen in das beantragte Projekt eingebracht:

Person	Funktion	Personenjahre/Projekt
K. Richter	Abteilungsleitung	0.1
M. Arnold	Projektleitung	0.2
E. Strub	Gefügeanalyse	0.3
W. Risi	holztechn. Beratung	0.1
D. Heer	techn. Betreuung/Präparation	0.2
M. Conradin	Sekretariat	0.1
Gesamt		1.0

Es stehen in der Abteilung Holz alle gängigen Labor- und Prüf- und Analyseeinrichtungen zur Verfügung, die für die Durchführung des Forschungsplans notwendig sind (Klimaräume, Optische Geräte, div. Registrier- und Messgeräte, Präparationseinrichtungen). Insbesondere werden zum Einsatz kommen:

- Geräte zur künstl. Bewitterung (QUV mit solar eye)
- Freibewitterungsstand
- Farbspektrophotometer, evtl. Glanzmessgerät
- Rasterelektronenmikroskop mit Feldemissionskathode und EDAX
- Umwelt- Rasterelektronenmikroskop
- Dynamischer Kontaktwinkel-Messgerät CAS-OCA

Darüber hinaus werden Methoden zur Oberflächenanalyse eingesetzt, die an anderen EMPA Abteilungen vorhanden sind und mitbenutzt werden:

- FTIR Infrarotspektroskopie
- XPS Röntgen-Photoelektronenspektroskopie
- AFM Atomic Force Microscopy

Die Nanotechnologie ist einer der spezifischen Schwerpunkte innerhalb der gesamten Aktivitäten der EMPA. Für das vorliegende Projekt ergeben sich daher vielfältige Synergien mit den Forschungsarbeiten und dem Know-how anderer Fachabteilungen.

Kälin AG

Die Kälin AG verfügt über 30 Jahre Erfahrung in der industriellen Applikation von Anstrichsystemen auf Fassadentäfern. Die Firma vermarktet sowohl endbehandelte Täfer und Platten als auch ein eigenes Anstrichsystem unter dem Label Samicolor. Es stehen Anlagen zur industriellen Applikation mit unterschiedlichen Verfahren (Walzen, Sprühen, Fluten) und Trocknung von Anstrichsystemen zur Verfügung. Der Firmeninhaber und technischen Mitarbeiter werden 0.5 Personenjahre in das Projekt einbringen.

NanoSys GmbH

Die seit 2001 bestehende Firma beschäftigt 2 Wissenschaftler, die über eine langjährige Erfahrung in der Entwicklung und Formulierung von Beschichtungssystemen für unterschiedliche Substrate verfügen. Besondere Erfahrung besteht in der Formulierung von Systemen auf Basis von Bestandteilen im Nanometermassstab. Laboreinrichtungen zur Applikation und Untersuchung von transparenten Beschichtungen auf unterschiedlichen Substraten stehen zur Verfügung. Die Firma hat direkten Zugang zu

Produktionseinrichtungen mit einer Kapazität von 1 Tonne pro Durchlauf. Der Firmeninhaber und ein technischer Mitarbeiter werden 0.4 Personenjahre in das Projekt einbringen.

Otto Weibel AG, Abt. F&E Lacke

OW verfügt über eine langjährige Erfahrung in der Herstellung von leistungsfähigen transparenten und pigmentierten Anstrichen zur Holzbehandlung. Acht Wissenschaftler und Techniker beschäftigen sich mit der Entwicklung und Formulierung von Beschichtungen für Nischenmärkte. Laboreinrichtungen zur Herstellung, Applikation und Prüfung der Anstriche stehen zur Verfügung, u.a. Viskosimeter, Farbmessgeräte, Testgeräte zur Charakterisierung von Lackfilmen. UV-Beschichtungs- und Härungsanlagen sind vorhanden, um eine praxisgerechte Beschichtung des Holzsubstrates zu gewährleisten. Die Gruppe verfügt über direkten Zugang zur Pilotanlage der Firma mit industriellen Produktionsmengen.

Der Firmeninhaber und weitere technische Mitarbeiter werden 1.0 Personenjahre in das Projekt einbringen.

4. Position dieses Projektes innerhalb Ihrer F+E Tätigkeiten

Mit Transparenz der F+E Förderung möchten wir Sie noch zielgerichteter unterstützen. Zu diesem Zweck sind die nachfolgenden Informationen von hoher Relevanz.

4.1. Haben Sie Grundlagen zu diesem Projekt im Rahmen anderer geförderter Projekte und/oder mit anderen Mitteln erarbeitet ? Nein Ja, bitte spezifizieren:

Thema	Förderstelle	Beginn und Dauer
Performance of wooden window joinery painted with new types of paints with low organic solvent content	BBW / EU-AIR3	1995 - 3 Jahre
ARWOOD - A reliable artificial weathering test for wood coatings	BBW / EU-SMT4	1996 - 3 Jahre
NanoWood - Multifunctional timber facade system made from Nanosol finished Thermowood for sustainable building facades	BBW / EU-Craft	2003 - 2 Jahre

4.2. Benötigen Sie auch weiterhin - ausserhalb dieses Projektes - Mittel, um Grundlagenwissen in diesem F+E Bereich zu erarbeiten ? Nein Ja, bitte spezifizieren:

Thema	Förderstelle	Beginn und Dauer

4.3. Wurde oder wird das vorliegende oder ein ähnliches Beitragsgesuch noch bei einer weiteren Förderungsinstanz eingereicht? Ja Nein

Wenn ja, bei welcher?

4.4. Erhalten Sie zur Zeit für den Forschungsbereich des vorliegenden Beitragsgesuches Unterstützungen ?

Nein Ja, bitte spezifizieren:

Thema	Förderstelle	Beginn und Dauer
NanoWood - Multifunctional timber facade system made from Nanosol finished Thermowood for sustainable building facades	BBW / EU-Craft	2003 - 2 Jahre
Entwicklung eines dauerhaften, fungizidarmen Beschichtungssystems auf Holzfassaden unter Berücksichtigung des integrierten Holzschutzes*)	KTI Nr. 7015.1 –IWS - IW	04/2004 – 3 Jahre

- *) Dieses vom KTI geförderte Projekt wird ebenfalls in der Abteilung Holz durchgeführt, federführend jedoch in der Arbeitsgruppe Holzschutz und Mikrobiologie (Standort EMPA St. Gallen). Der methodische Ansatz des Projektes unterscheidet sich deutlich von dem in diesen Antrag verfolgten Vorgehen, obwohl die Zielsetzung „Verbesserung der Qualität und Unterhaltsfreiheit von beschichteten Fassaden“ gleich ist. Daher wurde beschlossen, beide Projekte getrennt zu planen und durchzuführen. Die organisatorische Klammer <Holzabteilung> stellt jedoch sicher, dass ein ausreichender Informationsstand zu den Arbeiten und Erkenntnisse zwischen den Sachbearbeitern besteht. Wenn möglich, werden Synergien, die sich aus dem Erfahrungsaustausch ergeben, genutzt.

5. Forschungs- und Projektplan

5.1. Vorgesehener, inhaltlich klar definierter Lösungsweg

Es wird ein System zur Behandlung von Holzoberflächen für den Fassadenbereich entwickelt, das auf der Kombination einer chemisch ans Holz fixierten Hydrophobierung und einer Oberflächenbeschichtung aufbaut. Anhand des nachfolgenden Forschungsplans wird das Beschichtungssystem charakterisiert und seine Leistungsfähigkeit sowie Anwendbarkeit durch wissenschaftliche Untersuchungen beurteilt.

1. Herstellung und Formulierung der Hydrophobierungsmittel und Charakterisierung anhand folgender Anforderungen:
 - Hydrophobierungswirksamkeit
 - spezifische Affinität und Bindungszustand an die Holzoberfläche
 - Sensitivität zu Holzarten, Oberflächen, Schnitttrichtung
 - Eindringtiefe
 - Kompatibilität zu Folgeanstrichen
 - Eignung der industriellen Applikation
2. Begleitende Analyse, Charakterisierung, Interpretation zur Selektion der Varianten:
 - Die Vergleichsbasis für die Beurteilung der erreichten Verbesserungen bilden jeweils mitgeprüfte Vergleichs-Systeme ohne vorgängige Hydrophobierung, insbesondere bezüglich Feuchteschutzwirkung, Farbänderung, Glanzgrad, Rissbildung und oberflächlichem Pilzbefall.
3. Entwicklung von speziellen Lasuren und Lacken zur Endbehandlung der hydrophobierten Hölzer anhand folgender Anforderungen:
 - optimale Trocken- und Nasshaftung
 - gute Filmelastizität
 - Applikation und Trocknungsverhalten entspricht industriellen Bedingungen
4. Industrielle Applikation des Gesamtsystems mit folgenden Anforderungen:
 1. Schritt: Fluten der Nanoimprägnierung
 2. Schritt: Fluten der Zwischenbeschichtung
 3. Schritt: Spraysen der Endbeschichtung

5.2. Projektplan mit Arbeitspaketen, mit Zeitplan sowie inhaltlich und zeitlich klar definierten Meilensteinen (Was kann bis wann überprüft, gesehen, gemessen usw. werden?) sowie geplanter Ressourceneinsatz (Definition der Meilensteine und der abzuliefernden Resultate, Balkendiagramm als Beilage)

Die für eine umfassende Beurteilung der Systeme notwendige natürliche Bewitterung über einen maximal verfügbaren Zeitraum erfordert es, das Projekt mit einem möglichst umfassenden Variantenspektrum zu starten. Die begleitenden wissenschaftlichen Untersuchungen haben zum Ziel, Eigenschaften und Wirksamkeit der Behandlungsvarianten zu analysieren und erklärbar zu machen, nicht geeignete Varianten zu verwerfen und Ansatzpunkte für eine Optimierung der bestgeeigneten Verfahren zu erkennen. Diese sollen in der zweiten Phase des Projektes wiederum künstlich bewittert und evaluiert werden. Nach Ablauf eines Jahres wird anhand der Zwischenergebnisse ein Stop-Go Entscheid vorgenommen, zu dem auch eine Zwischenbeurteilung der über 10 Monate freibewitterten Proben vorgenommen wird.

Detaillierte Angaben zum Projektplan sind in den unten aufgeführten Zusammenstellungen enthalten:

- Liste der Arbeitspakete
- graphische Gesamtübersicht über die Arbeitspakete
- Balkendiagramm/Zeitplan
- Definition Meilensteine

Liste der Arbeitspakete (AP) mit angestrebten Ergebnissen (Partner 1: EMPA, 2: Kälin, 3: NanoSys, 4: OW)

AP1 : Spezifikation der Ausgangsvarianten und Herstellung der Ausgangsproben	
Ziel:	Festlegung der Behandlungsvarianten für die Ausgangsuntersuchung und Herstellung der Proben für die nachfolgenden Untersuchungen
Inhalt:	<p>Die Angaben zu den Varianten der Hydrophobierung und der Oberflächenbehandlung leiten sich aus den bisherigen Erfahrungen der Industriepartner ab. Es werden 16 Kombinationsvarianten aus Hydrophobierung, Grundierung, dekorative Schicht und Holzart in die Untersuchung aufgenommen:</p> <ul style="list-style-type: none"> - Hydrophobierung: Art der Siliziumkomponente; Lösungsmittel, Gehalt aktive Substanzen - Oberflächenbehandlung: Bindemittel, Trocknung/Härtungsverfahren, Auftragsmenge - Holzarten: Fichte als wichtigstes einheimisches Fassadenholz; Tanne als harzfreies einheimisches Fassadenholz, Birkensperrholz als Holzwerkstoffplatte mit Potential für dem Ausseneinsatz). Es werden handelsübliche Sortierungen und Schnittrichtungen einbezogen, bekannte Problemzonen (Astbereiche) werden erfasst und dokumentiert. <p>Es werden für die Bewitterung jeweils 3 Wiederholungsproben hergestellt; an jeweils einer der oberflächenbeschichteten Proben wird mit einem Gitterschnitt-Messer die äusserste Schicht der Behandlung vorgeschädigt, um die Beanspruchung zu verschärfen. In jeder Bewitterungsprüfung werden unbehandelte und Vergleichsproben mit einer spezifizierten Standardbeschichtung (ohne Hydrophobierung) mitgetestet, an der die Ergebnisse der Projektvarianten gemessen werden.</p>
Partner	1,2,3,4
Dauer (Monate)	2
Ergebnis	Einsatzbereiche und spezifizierte Ausgangsproben

AP2 : Bewitterung der Anstrichproben	
Ziel:	Gestaffelte künstliche und natürliche Bewitterung
Inhalt:	<p>Die behandelten Proben werden einer beschleunigten künstlichen und natürlichen Bewitterung unterzogen, um Aussagen über die Wirksamkeit der Oberflächenbehandlung machen zu können. Die EMPA hat für die Prüfung von Holzoberflächenbeschichtungen einen feuchtemässig 'optimierten' Zyklus entwickelt (periodischer Holzfeuchtwechsel durch Betauung/Besprühung und UV-Bestrahlung), der zwar insbesondere bei deckend gestrichenem Holz noch immer eine gegenüber der Wirklichkeit vergleichsweise (zu) geringe Feuchtebeanspruchung bewirkt, für die vorliegende Fragestellung aber als orientierendes Verfahren geeignet ist. Als Faustregel kann angenommen werden, dass ein Bewitterungslauf von 12 Wochen (2016 h) je nach Beschichtungssystem eine 5 bis 10 fache Beschleunigung im Vergleich zur verschärften Freibewitterung ergibt.</p> <p>Bei der natürlichen Bewitterung werden die Proben in 45° Neigung nach Süden in Bewitterungsgestellen auf dem EMPA Gelände exponiert.</p> <p>Es werden kontinuierlich die Holzfeuchteänderungen ermittelt und der Zustand der exponierten Oberflächen periodisch qualitativ und quantitativ beschrieben (Rissbild, Kreidung, Glanzgrad, Farbänderungen) und den Vergleichsproben gegenübergestellt. Es werden im Projektverlauf mehrere gestaffelte künstliche und natürliche Bewitterungsversuche durchgeführt.</p>
Partner	1
Dauer (Monate)	QUV Bewitterungszyklus mit Auswertung 4 Monate, Freibewitterung 18 Monate
Ergebnis	Bewitterte Proben zur weiteren Untersuchung, Qualitative und quantitative Beurteilung des Oberflächen- und Probenzustands im Vergleich untereinander, zum Vergleichsanstrich und zu unbehandelten Proben.

AP3 : Charakterisierung Interface Hydrophobierung-Holz	
Ziel:	Verstehen des Anbindungszustands der wasserabweisenden Substanzen; Nachweis der Eindringtiefe
Inhalt:	An den hydrophobierten Ausgangsproben werden chemisch-analytische und mikroskopische Untersuchungen durchgeführt, um Aussagen zur Bindung der Hydrophobierung an die Holzfasern, die Qualität der Verteilung der wirksamen Schichten, und die Eindringtiefe vornehmen zu können. Dazu werden verschiedene

	chemisch-analytische Methoden eingesetzt, die in der Literatur zur Beschreibung vergleichbarer Phänomene eingesetzt wurden: Röntgenphotoelektronen-Spektroskopie (XPS), Infrarot-Spektroskopie, AFM Rastertunnel-Mikroskopie, event. ESEM. Wenn geeignete Methoden etabliert sind, werden damit potentielle Problemzonen (Astbereich, Reaktionsholz) ebenfalls analysiert. Ebenso ist vorsehen, die Analysen an bewitterten/gealterten hydrophobierten Proben durchzuführen
Partner	1
Dauer (Monate)	Hauptphase 6 Monate
Ergebnis	Kenntnis der molekularen Anbindung der Hydrophobierung an die Holzmatrix, Ansprache von Unterschieden nach Bewitterung

AP4 : Quantifizierung der Feuchteschutzwirkung	
Ziel:	Bestimmung der Schutzwirkung gegen Wasserdampfdiffusion, Flüssigwasseraufnahme
Inhalt:	Die Feuchteschutzwirkung wird an allen Ausgangsproben und, zeitlich gestaffelt, allen bewitterten/gealterten Proben ermittelt. Dazu werden zunächst jeweils die Kontaktwinkel gegenüber Wasser auf den Proben ermittelt. Das Verfahren erlaubt es, Unterschiede zwischen Früh- und Spätholz, Astholz und Reaktionsholz zu untersuchen. Integrierte Beurteilungen der Feuchteschutzwirkung werden für Einzelproben nach den Normen EN927-4/-5 erfasst.
Partner	1, 3
Dauer (Monate)	Jeweils 3 Monate
Ergebnis	Quantifizierte Feuchteschutzwirkung im Ausgangszustand und nach Bewitterung, Vergleichende Beurteilungen

AP5 : Kompatibilität Hydrophobierung-Anstrich	
Ziel:	Quantifizieren der Affinität zwischen Hydrophobierung-Zwischenanstrich und der Haftfestigkeit des Gesamtanstrichs
Inhalt:	In zwei Phasen wird die Kompatibilität Hydrophobierung-Sperrschicht an der Grundvarianten (Phase 1) und nach der Optimierung der Varianten (Phase 2) untersucht. Dazu wird zunächst die Kontaktwinkelmethode eingesetzt, wobei als Flüssigkeitsmedium der Zwischenanstrich selbst verwendet wird. Anschliessend wird die mechanische Anstrichhaftung der Zwischen- und Gesamtbeschichtung durch Zugversuche nach EN 24 624 sowie an der Gesamtbeschichtung mit der Gitterschnittmethode nach EN ISO 2409 (jeweils an Ausgangs- und QUV bewitterten Proben) ermittelt.
Partner	1, 3, 4
Dauer (Monate)	2 x 3 Monate
Ergebnis	Beurteilung der Anstrichhaftung auf der Hydrophobierung

AP 6 : Modifikation und Optimierung	
Ziel:	Optimierung der Hydrophobierung und Oberflächenbehandlung
Inhalt:	Die Rezepturen beider Teilsysteme werden aufgrund der Erkenntnisse der ersten Phase im Hinblick auf materialtechnologische und wirtschaftliche Aspekte angepasst. Die Einstellungen werden dokumentiert und Parameter zur Qualitätssicherung erarbeitet
Partner	3, 4
Dauer (Monate)	1.5 Monate
Ergebnis	Rezepturen für die industrielle Produktion

AP 7 : Industrielle Applikation	
Ziel:	Nachweis der industriellen Applizierbarkeit und Qualitätssicherung
Inhalt:	Die im Verlauf des Projektes bestimmten Varianten (Hydrophobierung, Oberflächenbeschichtung) werden unter industriellen Bedingungen auf Profildrehtafeln aufgetragen. Die relevanten Parameter werden dokumentiert, an Stichproben werden die Trockenschichtdicken bestimmt und die Anstrichhaftung ermittelt.
Partner	1, 2, 3, 4
Dauer (Monate)	3 Monate
Ergebnis	Parameter der industriellen Applikation

Abbildung: Gesamtüberblick über die Arbeitspakete.

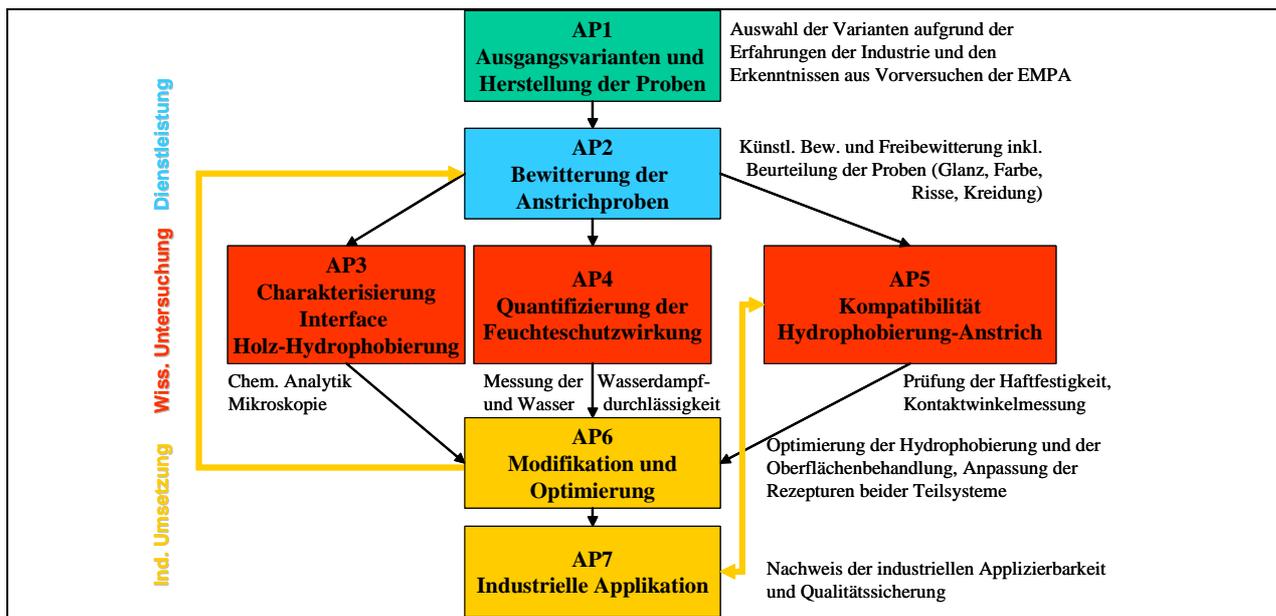
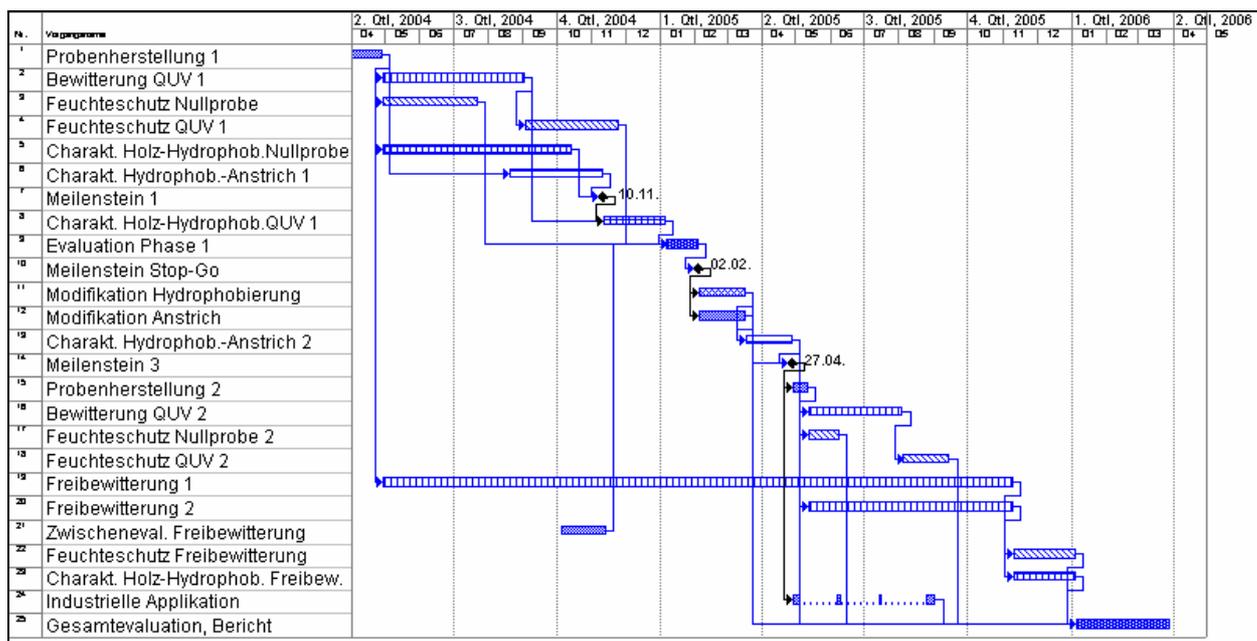


Abbildung: Balkendiagramm / Zeitplan.



Im Projektablauf sind die folgenden drei Meilensteine vorgesehen (s. auch Zeitplan)

Meilenstein	Resultat
1	Laborberichte mit Informationen über a) Art und Chemismus der Hydrophobierung b) Methoden zur wissenschaftlichen Analyse c) Aussagen zur Holzartenabhängigkeit d) zum Eindringverhalten
2 Stop-Go	Zwischenbericht mit Aussagen zur Feuchteschutzwirkung und zum Erhaltungszustand nach verschiedenen Alterungsbeanspruchungen. Voraussetzung für die Weiterführung des Projektes ist eine gegenüber den konventionellen Behandlungsvarianten ohne vorgängige Hydrophobierung deutliche Verbesserung der Gesamtsystemperformance.
3	Abschluss der Phase der Systemoptimierung. Beschreibung der umzusetzenden

	Behandlungen
--	--------------

5.3. Projektleitung und Organisation des Projektes

Die Projekt wird nach den Prinzipien des Projektmanagements durchgeführt. Die Zuordnungs- und Verantwortungsbereiche sind folgendermassen festgelegt. Eine Projektsteuerungsgruppe wird vom Hauptgesuchssteller geleitet (Dr. K. Richter, EMPA) der auch die Ansprechstelle und Kontaktperson zum BBT/KTI ist. In der Steuerungsgruppe haben der wissenschaftl. Projektleiter (Herr Arnold, EMPA) sowie der Gesamtprojektleiter (Herr Kipfer, Kälin AG) Einsitz. Diese Gruppe führt alle 3 Monate Projektsitzungen durch und überprüft den Projektverlauf. Herr Arnold ist wissenschaftlich verantwortlich für die Arbeiten an der EMPA: Er plant mit den Sachbearbeiterinnen die Arbeitspakete und stellt den Kontakt zu den Partnern innerhalb der EMPA her. Der Gesamtprojektleiter übernimmt die Terminkontrolle und prüft den Arbeitsfortschritt anhand der Deliverables, er ist für die Koordination der Beiträge der Industriepartner verantwortlich. Die Projektsteuerungsgruppe und alle weiteren Industriepartner sowie die im Projekt eingebundenen Sachbearbeiter treffen sich innerhalb von zwei Wochen vor den Meilenstein –Terminen und präsentieren bzw. besprechen die Untersuchungsergebnisse, die in den Meilensteinberichten einfließen. Entscheidungen über die Auswahl der Parameter und Varianten für die nächsten Phasen werden besprochen und von der Steuerungsgruppe entschieden.

Die finanzielle und administrative Projektabwicklung wird im Auftrag des Projektleiters von der EMPA durchgeführt.

5.4. Sind Ergebnisse zu erwarten, welche im geplanten Projekt zu einem Patent führen? Ja Nein

5.5. Haben sich die Projektpartner bezüglich Abtretung oder Verwertung allfälliger Forschungsergebnisse, Patente und/oder Lizenzen, die sich aus diesem geplanten KTI-Projekt ergeben können, vorgängig schriftlich geeinigt?

Ja Nein

Wenn Ja, kurzer Beschrieb oder Kopie der Abmachung:

Die Abmachungen sind formuliert und werden, wie unten gefordert, bei Vertragsabschluss vorliegen.

*** Die Projektpartner nehmen zur Kenntnis, dass sie spätestens bis Vertragsabschluss mit der Eidgenossenschaft, die patentrechtlichen sowie die Frage der kommerziellen Verwertung der Ergebnisse untereinander schriftlich geregelt haben müssen.**

5.6. Rekapitulation des Projektplanes:

Von welche/m/r Projektpartner/in werden die einzelnen Forschungs- und Entwicklungsarbeiten durchgeführt?

Beschreibung der F+E-Arbeiten gemäss Projektplan (Arbeitspakete)	Hochschulinstitut usw.	% ² Anteil	Wirtschaft (Firma)	% ² Anteil	Auftrag an Dritte	% ² Anteil
AP1:Spezifikation der Ausgangsvarianten und Herstellung der Ausgangsproben	EMPA	20	Kälin	4		
AP2: Bewitterung der Anstrichproben						
AP3: Charakterisierung Interface Hydrophobierung-Holz			Nanosys	4		
AP4: Quantifizierung der Feuchteschutzwirkung						
AP5: Kompatibilität Hydrophobierung-Anstrich			OW	4		
AP 6: Modifikation System			Nanosys	6		
			OW	6		
AP 7: Industrielle Applikation			Kälin	6		
Total in %		<u>70</u>		<u>30</u>		

A2. Berichte zur industriellen Beschichtungsapplikation (Wirtschaftspartner)

Inhalt: **Berichte zur industriellen Beschichtungsapplikation der Wirtschaftspartner zu den verschiedenen Versuchsserien**

- 1) Vorversuch (O. Weibel AG, Juli 2003)
- 2) Hauptversuch 1 (O. Weibel AG, Juni 2004)
- 3a) Hauptversuch 2 - Nanoprägung (NanoSys GmbH, Sept. 2004)
- 3b) Hauptversuch 2 - Beschichtungen (O. Weibel AG, Sept. 2004)
- 4a) Hauptversuch 3 - Nanoprägung (NanoSys GmbH, Juni 2005)
- 4b) Hauptversuch 3 - Beschichtungen (O. Weibel AG, Juni 2005)

Autoren: **Walter Koch, Hugh Laver (Wirtschaftspartner)**

Seitenzahl: **10**

1) Vorversuch (O. Weibel AG, Juli 2003)

Bewitterungsproben für EMPA

Juli 2003

Versuch	1. Schicht	2. Schicht	3. Schicht	Bemerkungen
1	Nanoperl 118	Grundierung 936 40 g/m ²	Eterno 36 190 g/m ²	Nicht einbeziehen, gelbe Aeste
2.1	Nanoperl 118	Imprägniergrund 958 40 g/m ²	Eterno 36 190 g/m ²	
3	Nanoperl 118	entfällt	Eterno 36 190 g/m ²	
4	Nanoperl 118	Samicolor S-33 40 g/m ²	Eterno 36 190 g/m ²	
5	Nanoperl 118	Samicolor S-22 40 g/m ²	Eterno 36 190 g/m ²	
6	entfällt	Eterno Imprägniergrund 40 g/m ²	Eterno 36 190 g/m ²	Referenz
7	Nanoperl 118	AC-UV-Grund standard 40 g/m ²	Eterno 36 190 g/m ²	
10	entfällt	AC-UV-Grund 960 40 g/m ²	Eterno 36 190 g/m ²	

Grundierung 936
 Imprägniergrund 958
 Samicolor S-33 und S-22
 Eterno Imprägniergrund
 AC-UV-Grund standard
 AC-UV-Grund 960

pigmentierte, wasserverdünnbare Sperrgrundierung
 pigmentierte, lösemittelhaltige Sperrgrundierung
 pigmentierte, lösemittelhaltige Lasuren als Sperrgrundierung
 unpigmentierte, lösemittelhaltige Sperrgrundierung
 unpigmentierte, UV-härtende Sperrgrundierung
 unpigmentierte, UV-härtende Sperr- und Haftgrundierung

2) Hauptversuch 1 (O. Weibel AG, Juni 2004)

Applikationsbedingungen:

Holz Oberfläche:

Gehobelt und geschliffen (Körnung 60 und 80)

Imprägnierungen:

Gespritzt

Nanoperl 118 Auftrag: 73.6 g/m²

Nanoperl 119 Auftrag: 73.6 g/m²

Grundierungen:

System 1

100% UV Lack

Laborjournal-Nr 15. und Referenz-Nr. HL34/6

Verfahren: 1 x Fluten/Walzen/Bursten

Auftrag (Nass): 36.2 g/m²

Feststoffgehalt = 95.8%

Auftrag (Trocken): 35 g/m²

Härtung mit Ga- und undotierten Lampen

System 2

Wässriger- UV Lack

Laborjournal-Nr 15. und Referenz-Nr. HL33/8

Verfahren: 2 x Fluten/Walzen/Bursten, + UV-Härtung + Schleifen+ Spritzauftrag + UV-Härtung

Auftrag (Nass): 61.5 (2x geflutet/gewalzt/geburstet) 49.6 (gespritzt) g/m²

Feststoffgehalt = 44.9 %

Auftrag (Trocken): 50 g/m²

Härtung mit Ga- und undotierten Lampen

System 3

UV-oxidativ „dual-cure“ Lack

Laborjournal-Nr 15. und Referenz-Nr. HL29/18

Verfahren: 1 x Fluten/Walzen/Bursten

Auftrag (Nass): 31.0 g/m²

Feststoffgehalt = 93.0%

Auftrag (Trocken): 28.8 g/m²

Härtung mit Ga- und undotierten Lampen

System 4

Oxidativ-härtende Alkydlack

Samicolor 2000 S33

Verfahren: Fluten/Walzen/Bursten

Auftrag (Nass): 69.6 g/m²

Feststoffgehalt = 47.6 %

Auftrag (Trocken): 33 g/m²

Härtung mit Ga- und undotierten Lampen

Decklack

Eterno 36

(SamicolorTop 33 weiss RAL 9010 / 28802)

Produktionsnummer 241343

Appliziert: 10.06.2004

Verfahren: Spritzauftrag

Auftrag (Nass): 146 g/m² (gravimetrische Bestimmung)

Schichtdicke (Nass): 175 µm (Lackkamm Bestimmung)

Feststoffgehalt = 51.3%

Auftrag (Trocken): 75 g/m² (grav.)

Eterno 36

(SamicolorTop 77 grau 27641)

Produktionsnummer 232420

Appliziert: 10.06.2004

Verfahren: Spritzauftrag

Auftrag (Nass): 142 g/m² (gravimetrische Bestimmung)

Schichtdicke (Nass): 125 µm (Lackkamm Bestimmung)

Feststoffgehalt = 48.5%

Auftrag (Trocken): 35 g/m²

Anmerkung:

Bei dem Flut/Walz/Burst-Verfahren ist die Verteilung zwischen der oberen Seite und der unteren Seite nicht bekannt. Die Schichtdicke wurde berechnet unter der Annahme, dass der Lack gleichmässig verteilt ist.

Bei der Spritzapplikation wurde angenommen, dass der Lack sich gleichmässig auf den beiden Seiten und der oberer Oberfläche befindet.

3a) Hauptversuch 2 (NanoSys GmbH, Sept. 2004)

NanoSys GmbH
Dorf 31-32, Postfach 135
CH-9427 Wolfhalden

Tel: +41 (71) 890 09 75
Fax: +41 (71) 890 09 76
Internet: www.nanosys.ch
E-Mail: info@nanosys.ch



Kälin AG
Otto Weibel AG
EMPA, Dübendorf

Wolfhalden, 12.10.2004

Fi / Ta Muster KTI Nanocomposites on wood 2. Serie Auftragen der Nanoprägnierungen

Datum: 13.09.04, nachmittags, bewölkt, um 19 °C

Untergrund Fichte und Tanne, gehobelt und geschliffen,
3-Schichtplattenriemen (2,5 x 0,145 x 0,021),
Birkensperrholzriemen (1,80 x 0,30 x 0,032)

Applikationsgerät Schiehle, Flutbürstmaschine, Bürsten reverse laufend

Nanoprägnierung Nano-Perl 118F

Auftragsmengen gemessen auf 3 Schichtplatten
43 – 49 g/Riemen = 52 – 59 gr/m² nass

gemessen auf Birkensperrholz
28 g/Riemen = 46 gr/m² nass

Beobachtungen:

Zum Teil erfolgte der Auftrag anlagenbedingt nicht gleichmässig über die Breite der Bretter. Düsenverstopfer verursachten ab und zu einen kurzen Unterbruch. Der halbmaschinelle Vortrieb verursachte ein „Schlagmuster“.

NanoSys GmbH

Walter Koch

3b) Hauptversuch 2 (O. Weibel AG, Sept. 2004)

Herstellung von den EMPA Proben. 13 – 17. Sept. 2004

Holz

Tanne: Rechteckiger Querschnitt, 80/100 geschliffen,	143 x 21 x 5015 mm
Fichte: Rechteckiger Querschnitt, 80/100 geschliffen,	149 x 21 x 5015 mm
Birkensperrholzlatten, „Standardschliff“ ca. Körnung 100,	150 x 14 x 1800 mm

Machineneinstellungen

- Rillenwalze oben, Planwalze unten.
- Vorschub: 10
- Ohne Lochblech
- Bürstendrehzahl 0
- Bürsteneintauchtiefe 1 cm
- UV-Anlagetransportgeschwindigkeit: 40 m/min
- Schleifvorschub: 6.5
- Spritzbandgeschwindigkeit: 50 m/min
- Spritzdüse 14/94
- Spritzdruck: 4.6 bar

System 2 Wässrig-UV

- Laborrezeptur HL 53/1
- Viskosität unter Versuchsbedingungen: 80“
- Feststoffgehalt: 48.4%
- Auftragsverfahren: Beidseitiger Auftrag in FWB-Verfahren mit anschliessender „Nass auf Nass“ einseitiger Spritzapplikation. Nach ca 6 Std. Trockenzeit, UV-Härtung (1 Durchgang) mit allen Lampen bei 35 m/min.

Auftrag in FWB-Verfahren: 36.0 g auf 0.8525m²
= 42.2 g/m² Nassauftrag
= 20.4 g/m² Trockenauftrag
Auftrag in der Spritzapplikation: 65.0 g auf 0.479 m²
= 42.2 g/m² Nassauftrag
= 65.6 g/m² Trockenauftrag
Gesamter Auftrag (trocken): 86 g/m²

System 3 oxidativ-UV

- Laborrezeptur HL 55/1
- Viskosität: 37“
- Feststoffgehalt: 98.2%
- Auftragsverfahren: Beidseitiger Auftrag in FWB-Verfahren ohne anschliessender UV-Härtung. Nach 7 minutiger Einwirkzeit folgte die 2.er Applikation in FWB-Verfahren mit anschliessender UV-Härtung mit allen Lampen bei 50 m/min. Eine zweite UV-Härtung bei 35 m/min folgte zum Schluss.“

1er. Auftrag: 31.0 g auf 0.8525m²
= 36.4 g/m² Nassauftrag
1.er und 2.er Auftrag: 51.1 g auf 0.8525 m²
= 59.9 g/m² Nassauftrag
Gesamter Auftrag (trocken): 58.9 g/m²

System 1 100%-UV

- Laborrezeptur HL 56/2
- Viskosität: 48“
- Feststoffgehalt: 100%
- Auftragsverfahren: Beidseitiger Auftrag in FWB-Verfahren ohne anschliessender UV-Härtung. Nach 5 minutiger Einwirkzeit folgte die 2.er Applikation in FWB-Verfahren mit anschliessender UV-Härtung mit allen Lampen bei 50 m/min. Eine zweite UV-Härtung bei 35 m/min folgte zum Schluss.“

1er. Auftrag: 39.0 g auf 0.8525m²
= 45.7 g/m²

1.er und 2.er Auftrag: 42.5 g auf 0.8525 m²

Gesamter Auftrag (trocken): 49.8 g/m²

System 4, oxidativ trocknend

Samicolor 2000 weiss

Auftragsverfahren: Beidseitiger Auftrag in FWB-Verfahren.

Feststoffgehalt: 55%

Nassauftrag: 70 g/m²

Trockenauftrag: 38.5 g/m²

Schleifen von allen Proben am 16.9.2004

Bei Fa. Zurbuchen, Amlikon mit einer Bütfering Schleifmaschine.

1.er Schliff mit Körnung 180 bei 4.5 m/Sek.

2.er Schliff mit Körnung 280 bei 4.0 m/Sek.

Vorschub: 15m/Min

Stärke: 22.4

Anschliessend wurden die Proben von Hand mit beschichteten Schaumstoffpads 03809 Typ „Fine“ der Fa. 3M Co. geschliffen.

Überlackieren von allen Proben am 16.9.2004

Eterno 36 weiss spezial

Viskosität: 75“

Feststoffgehalt: 49.45%

Nassauftrag mit Kamm: 200 µm

Nassauftrag: 53.2g auf 150 x 1800mm

= 197 g/m² Nassauftrag

Trockenauftrag: 97.4 g/m²

Eterno 36 RAL 7042 spezial

Viskosität: 72“

Feststoffgehalt: 48.78%

Nassauftrag mit Kamm: 225 µm

Nassauftrag: 48.1 g auf 150 x 1800mm

= 178 g/m² Nassauftrag

Trockenauftrag: 86.9 g/m²

4a) Hauptversuch 3 (NanoSys GmbH, Juni 2005)

Nanoprägnierung 3. Probenserie

Datum: 6.6.05, 13.30 – 18.00 Uhr

Ort: Kälin Täferwerk, Winterthur

Klima: Bewölkt, windstill, 22 °C, 62% rel. Luftfeuchtigkeit

Untergrund:

Tannentäfer 2m x 0.132 m mit Profil, sichtseitig mit 80er Schliff

Fichtentäfer 2m x 0.142 m mit Profil, sichtseitig mit 80er Schliff

Nano-Prägnierungen:

Kti-Nanoprägnierung 118FAG mit Tanninblocker, wasserverdünnbar

Kti-Nanoprägnierung 310523 mit Nano-Silber, Lösemittelhaltig

Applikation:

Händisch mit Flachpinsel, Vorder- und Rückseite einmal satt eingestrichen und verschlichtet. Trocknung bei Raumtemperatur im Hordenwagen.

Auftragsmengen:

Je Holzart und Nanoprägnierung wurden Wurzel N Stichproben sofort nach der Applikation der Nanoprägnierung auf einer Mettler 4000 Waage mit 0.1 g Anzeige gewogen.

Tanne/118FAG mit Tanninblocker:

min. 35g, max 45g, Durchschnitt 39g, entspricht 75 gr/m²

Fichte/310523

min. 27g, max 34g, Durchschnitt 31g, entspricht 55 gr/m²

Fichte/118FAG mit Tanninblocker:

min. 43g, max 50g, Durchschnitt 46g, entspricht 81 gr/m²

Tanne/310523:

min. 27g, max 35g, Durchschnitt 31g, entspricht 59 gr/m²

Täfer mit Rissen lagen am oberen Ende der beobachteten Auftragsmengen.
Makellose Täfer konnten reproduzierbar mit einer Abweichung von nur +/- 2 gr
Nanoprägierung/Täfer behandelt werden.

WK/wk 17.6.05

4b) Hauptversuch 3 (O. Weibel AG, Juni 2005)

H. Laver

05.07.2005

Applikationsbedingungen der 3. Probenserie für EMPA

Grundierungen:

System 1

100% UV Lack

Laborjournal-Nr 20. 045 Referenz-Nr. HL 131/3

Verfahren: 1 x Fluten/Walzen/Bursten

Appliziert am 22.06.2005

Auftrag bei 33.4°C Lacktemperatur . Viskosität 4mm: 32"

Nassauftrag: 39.1 g/m²

Bei einem Feststoffgehalt von 99.5% beträgt der gesamte Trockenauftrag: 39 g/m²

Härtung mit Ga- und undotierten Hg-Lampen.

Rückseite in 2.er Gang zusätzlich gehärtet.

System 2

Wässriger- UV Lack

Laborjournal-Nr 20.042, Referenz-Nr. HL 128/2

Verfahren: 1 x Fluten/Walzen/Bursten (beidseitig), + Spritzauftrag (Sichtseite) für zusätzliche Schichtdicke. Nach der Lufttrocknung (ca 18 Std.) folgte die UV-Härtung.

Appliziert am 07.06.2005

Nassauftrag im FWB-Verfahren (beide Seiten zusammen): 26g/m²

Nasser Spritzauftrag (nur Sichtseite): 62 g/m²

Bei einem Feststoffgehalt von 44.9% beträgt der gesamte Trockenauftrag: 39.5 g/m²

und der Sichtseitenauftrag ca: 33.7 g/m²

Härtung mit Ga- und undotierten Hg-Lampen in einem Gang.

System 4

Oxidativ-härtende Alkydlack

Samicolor Industrie deckend (Laborjournal-Nr 20. 006 Referenz-Nr. HL 111/2)

Verfahren: Fluten/Walzen/Bursten

Appliziert am 07.06.2005

Nassauftrag: 60.0 g/m²

Bei einem Feststoffgehalt von 60.2% beträgt der gesamte Trockenauftrag: 36.0 g/m²

System 5

„Nanocoat“ Grundierung 2-K System

Laborjournal-Nr 20. 056 Referenz-Nr. HL 138/6)

Verfahren: Rückseite wurde zuerst am 22.06.2005 gespritzt. (Spritzvisk. bei ca 30°C: 12" DIN 4mm).

Nach 18 Std wurde die Sichtseite (am 23.06.2005) gespritzt und eingepinselt.

Nassauftrag auf Rückseite: 90.0 g/m²

Bei 34.84% Feststoffe beträgt der Trockenauftrag (Rückseite) 31.4 g/m²

Nassauftrag auf Vorderseite: 86.7 g/m²

Bei 34.84% Feststoffe beträgt der Trockenauftrag (Sichtseite) 30.2 g/m²

Decklacken

System 2

Eterno 36 RAL 7042

Applikation auf Grundierungen 2 und 4 am 8.06.2005

Spritzapplikation auf Sichtseite: 154g/m² Nassauftrag (Kammauftrag: 150-175µm)

Bei 47.6% Feststoffe beträgt der Trockenauftrag 73.3g/m²

Applikation auf Grundierungen 1 am 23.06.2005

Spritzapplikation auf Sichtseite: 168g/m² Nassauftrag (Kammauftrag: 175µm)

Bei 47.6% Feststoffe beträgt der Trockenauftrag 79.8 g/m²

System 5

Eterno 36 RAL 7042 mit Hydrophobierung und nanoskaligem Silber

Applikation auf Grundierungen 2 und 4 am 8.06.2005

Spritzapplikation auf Sichtseite: 156g/m² Nassauftrag (Kammauftrag: 150-175µm)

Bei 46.9% Feststoffe beträgt der Trockenauftrag 73.1 g/m²

Applikation auf Grundierungen 1 am 23.06.2005

Spritzapplikation auf Sichtseite: 156g/m² Nassauftrag (Kammauftrag: 175µm)

Bei 46.9% Feststoffe beträgt der Trockenauftrag 73.1 g/m²

System 6

„Nanocoat“ Decklack

Laborjournal-Nr. 20.058 Referenz-Nr. HL140/1

Spritzapplikation auf „Nanocoat“ Grundierung Nr.5 am 24.06.2005 (nach 24 Std. Trocknung) bei 25°C (Visk. 4mm: 21“)

Spritzapplikation auf Sichtseite: 133.3g/m² Nassauftrag

Bei 45.67% Feststoffe beträgt der Trockenauftrag 60.9 g/m²

A3. Bericht zur chemischen Analytik der Hydrophobierungsmittel (Empa)

Inhalt: **Untersuchungsbericht zu den durchgeführten chemischen Analysen der Hydrophobierungsmittel Nanoperl 118, 118F und 119 bezüglich Zusammensetzung und chemischer Bindung / Wechselwirkung mit den Holzkomponenten von Fichte und Tanne**

Autoren: **Nico Bordeanu (Empa)**

Seitenzahl: **32**

Nanoki-Projekt

Teil: Analytik

Untersuchung der Zusammensetzung der kommerziellen Nanoperl-Produkte 118, 118F und 119 und deren Bindung / Wechselwirkung mit den Holzkomponenten der Fichte und Tanne

1. Allgemeines	3
2. Spektroskopische Methoden	3
2.1 FT-IR-Spektroskopie (Fourier-transformierte Infrarotspektroskopie).....	3
2.2 RAMAN Spektroskopie.....	3
3. Chemische Zusammensetzung der Nanoperl Produkte	4
3.1 Nanoperl 118	4
3.1.1 FT-IR-Spektroskopie	4
3.1.2 RAMAN-Spektroskopie	7
3.2 Nanoperl 118F.....	9
3.2.1 FT-IR-Spektroskopie	10
3.2.2 RAMAN-Spektroskopie	12
3.3 Nanoperl 119	12
3.3.1 FT-IR-Spektroskopie	13
3.3.2 RAMAN-Spektroskopie	15
4. Untersuchung der Bindung / Wechselwirkung von Nanoperl 118 und 119 mit den Holzkomponenten der Fichte und Tanne	17
4.1 Untersuchung der Bindung / Wechselwirkung von Nanoperl 118 mit Cellulose und Lignin	19
4.1.1 Gemisch Cellulose / <i>Nanoperl 118</i>	20
4.1.2 Gemisch Lignin (aus Fichte) / <i>Nanoperl 118</i>	22
4.2 Untersuchung der Bindung / Wechselwirkung von Nanoperl 119 mit Cellulose und Lignin	24
4.2.1 Gemisch Cellulose / <i>Nanoperl 119</i>	25
4.2.2 Gemisch Lignin (aus Fichte) / <i>Nanoperl 119</i>	27
5. Zusammenfassung	30

1. Allgemeines

Die Untersuchung der Zusammensetzung der Nanoperl-Produkte **118, 118F und 119** als auch deren Bindung/Wechselwirkung mit den Holzkomponenten von Fichte und Tanne wurde *spektroskopisch* mittels *FT-IR*- und *RAMAN*-Spektroskopie durchgeführt.

2. Spektroskopische Methoden

2.1 FT-IR-Spektroskopie (Fourier-transformierte Infrarotspektroskopie)

Infrarotspektren (IR) wurden mit einem FT-IR-Spektrometer *FTS 6000* der Firma Bio-Rad Inc. als Absorptionsspektren mit der GoldenGate-Mikro-ATR-Technik und der Flüssigkeitsmesszelle aufgenommen. Die Auswertung aller IR-Spektren erfolgte mit dem Programm *Origin 7.0* der Firma Microcal Inc. Die Wellenzahlen charakteristischer Banden sind in cm^{-1} angegeben. Die lokalisierten Schwingungen werden mit ν für Valenzschwingungen und δ für Deformationsschwingungen gekennzeichnet.

2.2 RAMAN Spektroskopie

RAMAN-Spektren wurden mit einem *Renishaw Ramascope* der Firma Renishaw PLC gemessen. Die Auswertung der Spektren erfolgte, wie im Falle der IR-Spektren, mit dem Programm *Origin 7.0* der Firma Microcal Inc. Die Wellenzahlen charakteristischer Banden sind in cm^{-1} angegeben.

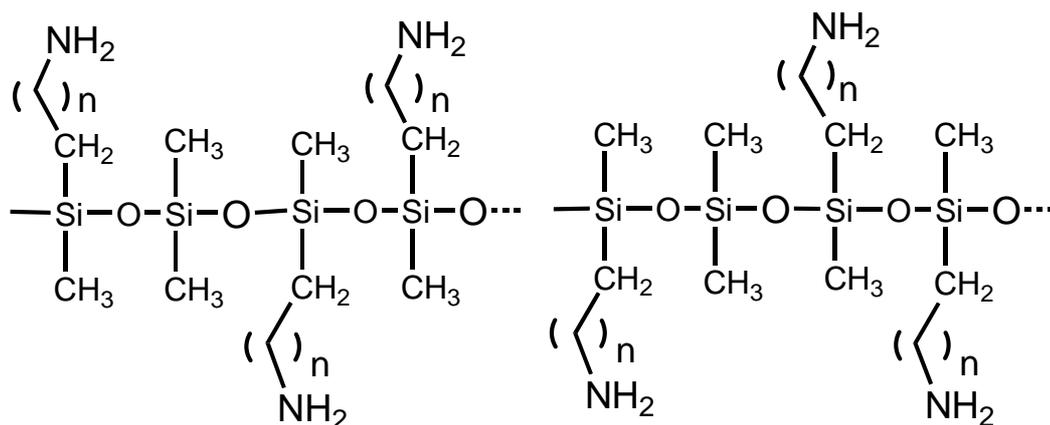
3. Chemische Zusammensetzung der Nanoperl Produkte

3.1 Nanoperl 118

Zusammensetzung **Nanoperl 118** – Angaben des Herstellers:

Aminofunktionelles Polydimethylsiloxan (PDMS); Si-Gehalt ca. 30%; 5%-ig in hochsiedendem Naphta.

⇒ Mögliche Struktur:



Schema 1: Mögliche Struktur von *Nanoperl 118*.

3.1.1 FT-IR-Spektroskopie

Mittels IR-Spektroskopie wurden die charakteristischen IR-Banden der chemischen Bindungen in Schema 1 zugeordnet.

Das IR-Spektrum von *Nanoperl 118* ist in Abbildung 1 dargestellt.

Die charakteristischen IR-Schwingungsbanden sind in Tabelle 1 zugeordnet.

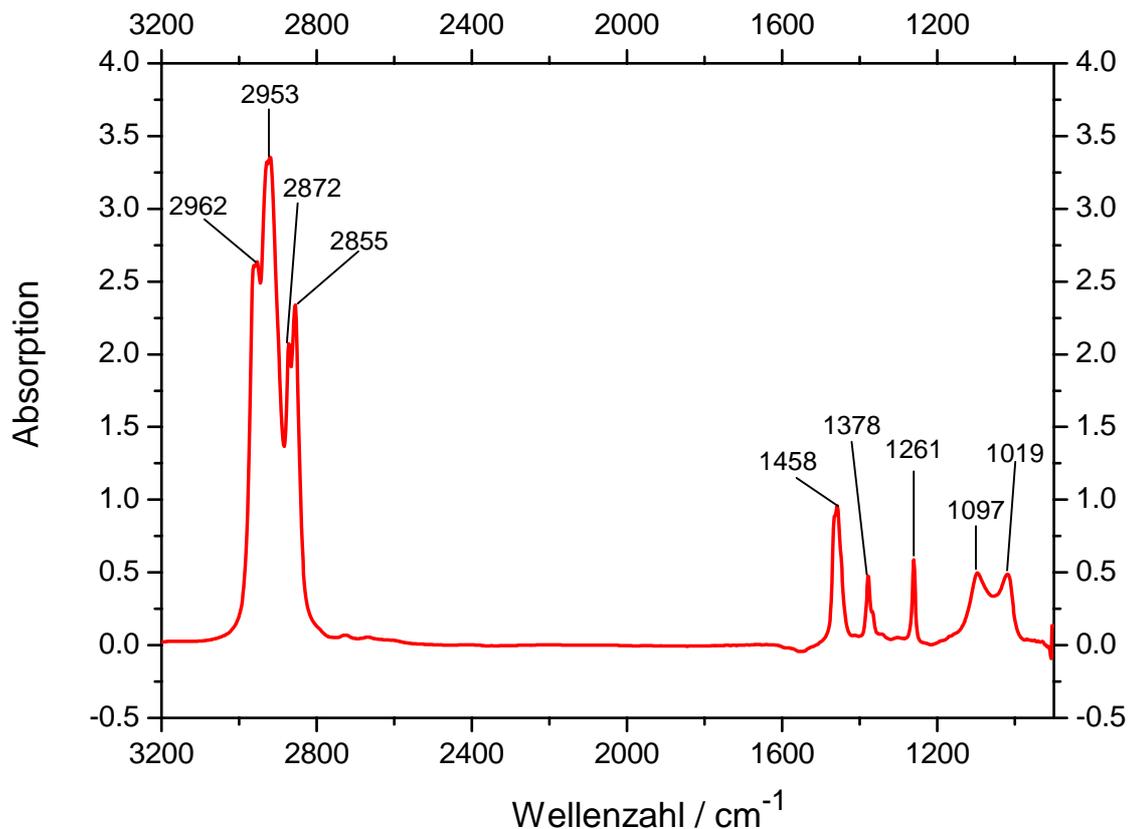


Abb. 1: IR-Spektrum von *Nanoperl 118* (2 Gew.% in Tetrachlorkohlenstoff).

Tabelle 1: Charakteristische IR-Schwingungsbanden von *Nanoperl 118*.

Wellenzahl [cm^{-1}]	Schwingungsbreite [cm^{-1}]	Zuordnung
2962	2850 - 2935	ν (C-H): asymmetrische C-H Valenzschwingung der CH_3 -Gruppen im PDMS
2953		ν (C-H): symmetrische C-H Valenzschwingung der acyclischen CH_2 -Gruppen im PDMS
2872		ν (C-H): C-H Valenzschwingung der $\text{CH}_2 / \text{CH}_3$ -Gruppen im Naphta
2855		
1458	1440-1465	δ (C-H): C-H Deformationsschwingung der CH_3 -Gruppen

1378	1370 - 1390	δ (C-H): C-H Deformationsschwingung der CH ₃ -Gruppen
1261	1250 - 1280	δ (C-H): C-H Deformationsschwingung in Si-CH ₃
1097 1019	1010 - 1150	ν (Si-O): antisymmetrische Si-O-Valenzschwingung der Si-O-Si Kette ν (C-N): C-N- Valenzschwingung der C-N Bindung in -CH ₂ -NH ₂

3.1.2 RAMAN-Spektroskopie

RAMAN-Spektroskopie wurde als komplementäre Methode zu FTIR verwendet. Das Spektrum von *Nanoperl 118* ist in Abbildung 2 dargestellt.

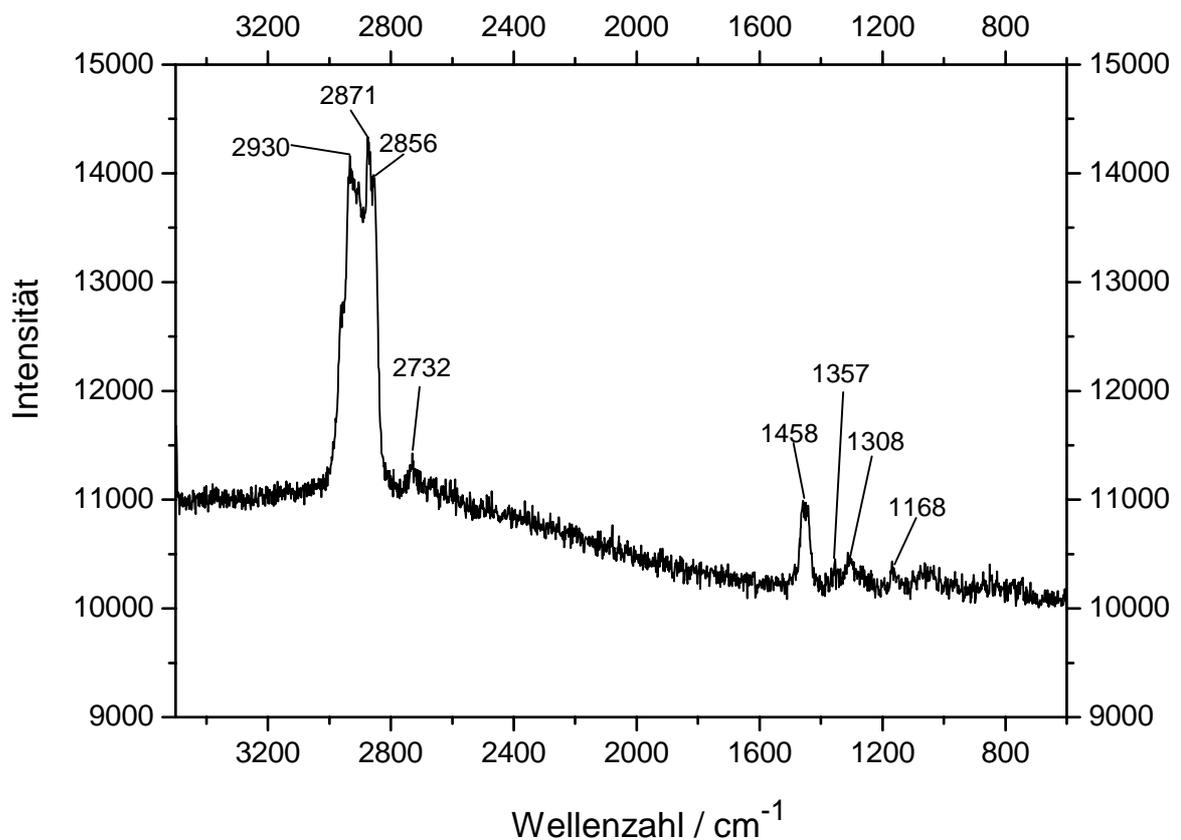


Abb. 2: RAMAN-Spektrum von *Nanoperl 118* (unverdünnte Lösung).

Die charakteristischen RAMAN-Schwingungsbanden sind in Tabelle 2 zugeordnet.

Tabelle 2: Charakteristische RAMAN-Schwingungsbanden von *Nanoperl 118*.

Wellenzahl [cm^{-1}]	Schwingungsbreite [cm^{-1}]	Zuordnung
2930 2871 2856 2732	2730 - 2930	<p>ν (C-H): asymmetrische C-H Valenzschwingung der CH_3-Gruppen im PDMS</p> <p>ν (C-H): symmetrische C-H Valenzschwingung der acyclischen CH_2-Gruppen im PDMS;</p> <p>ν (C-H): C-H Valenzschwingung der $\text{CH}_2 / \text{CH}_3$-Gruppen im Naphta</p>
1458	1440-1465	δ (C-H): C-H Deformationsschwingung der CH_3 -Gruppen
(1357) (1308)	1295 - 1365	δ (C-H): C-H Deformationsschwingung
(1168)	1165-1175	ν (C-C) : C-C- Valenzschwingung der C-C Bindungen in PDMS

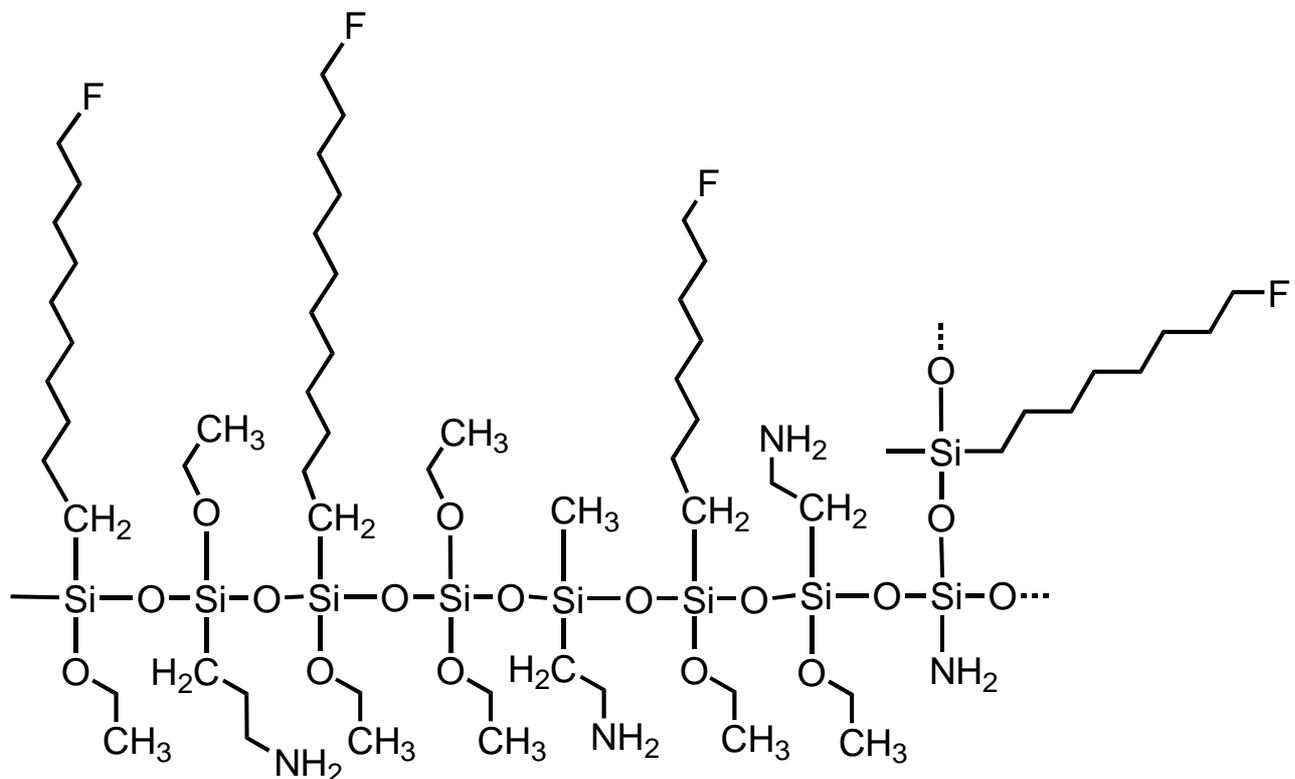
Bemerkung: Im RAMAN-Spektrum von Nanoperl 118 zeigen nur die CH_3 bzw. CH_2 -Bindungen gut aufgelöste Signale.

3.2 Nanoperl 118F

Zusammensetzung **Nanoperl 118F** – Angaben des Herstellers:

Aminofunktionelles Fluorsilan; Si-Gehalt ca. 10%; wässrige, leicht Aceton und alkoholhaltige, anhydrolysierte Zubereitung.

⇒ Mögliche Struktur:



Schema 2: Mögliche Struktur von *Nanoperl 118F*.

3.2.1 FT-IR-Spektroskopie

Das IR-Spektrum von *Nanoperl 118F* ist in Abbildung 3 dargestellt.

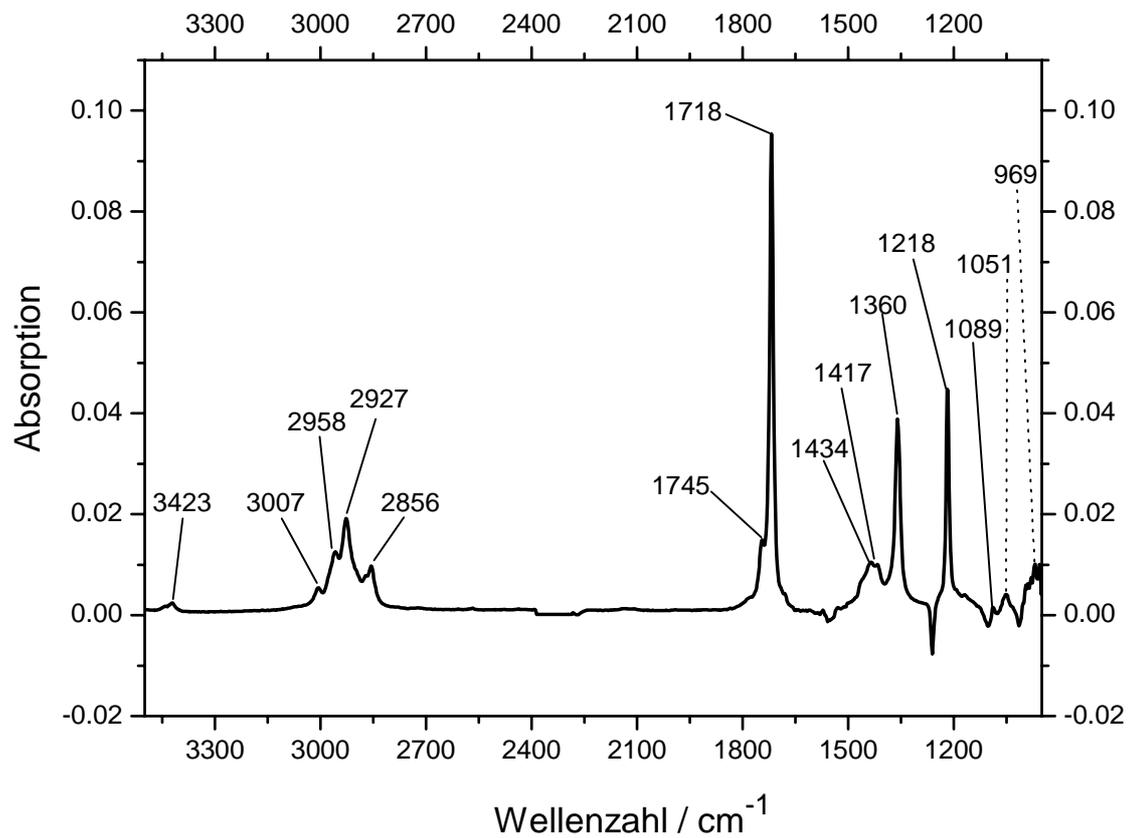


Abb. 3: IR-Spektrum von *Nanoperl 118F* (2 Gew.% in Tetrachlorkohlenstoff).

Die charakteristischen IR-Schwingungsbanden sind in Tabelle 3 zusammengestellt.

Tabelle 3: Charakteristische IR-Schwingungsbanden von *Nanoperl 118F*.

Wellenzahl [cm^{-1}]	Schwingungsbreite [cm^{-1}]	Zuordnung
3423 (geringe Intensität!)	3230-3550	$\nu(\text{O-H})$: O-H Valenzschwingung der OH-Gruppen vom Alkohol (Lösemittel); intermolekulare H-Brücken; $\nu(\text{N-H})$: N-H Valenzschwingung der NH_2 -Gruppen
3007 2958 2927 2856	2850 - 2935	$\nu(\text{C-H})$: asymmetrische C-H Valenzschwingung der CH_3 -Gruppen im PDMS $\nu(\text{C-H})$: symmetrische C-H Valenzschwingung der acyclischen CH_2 -Gruppen im PDMS
1745 1718	1715-1745	$\nu(\text{C=O})$: C=O Valenzschwingung vom Aceton (Lösemittel)
1434	1430-1470	$\delta(\text{C-H})$: asymmetrische C-H Deformationsschwingung der $-\text{OCH}_3$ -Gruppen
1417	1400-1450	$\delta(\text{C-H})$: asymmetrische C-H Deformationsschwingung in COCH_3 -Gruppen von Aceton
1360	1370 - 1390	$\delta(\text{C-H})$: symmetrische C-H Deformationsschwingung in den COCH_3 -Gruppen von Aceton
1218	1215-1325	Aceton
1089	1065 - 1090	$\nu(\text{C-N})$: C-N- Valenzschwingung der C-N Bindung in $-\text{CH}_2\text{-NH}_2$

1051	960-1060	C-C Grundgerüstschiwingung
969		C-F Schwiwingung

3.2.2 RAMAN-Spektroskopie

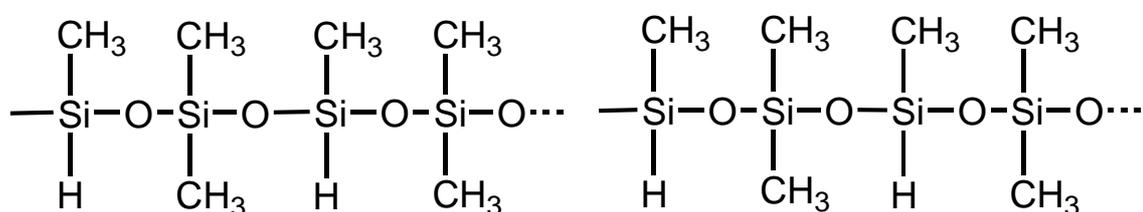
Bemerkung: Aufgrund der hohen Fluoreszenz der Probe konnte kein RAMAN-Spektrum aufgenommen werden.

3.3 Nanoperl 119

Zusammensetzung **Nanoperl 119** – Angaben des Herstellers:

H-funktionelles PDMS + Titansäurester; Si-Gehalt ca. 38%; 5%-ige in hochsiedendem Naphta.

⇒ Mögliche Struktur:



Schema 3: Mögliche Struktur von *Nanoperl 119*.

3.3.1 FT-IR-Spektroskopie

Das IR-Spektrum von *Nanoperl 119* ist in Abbildung 4 dargestellt.

Die charakteristischen IR-Schwingungsbanden sind in Tabelle 4 zugeordnet.

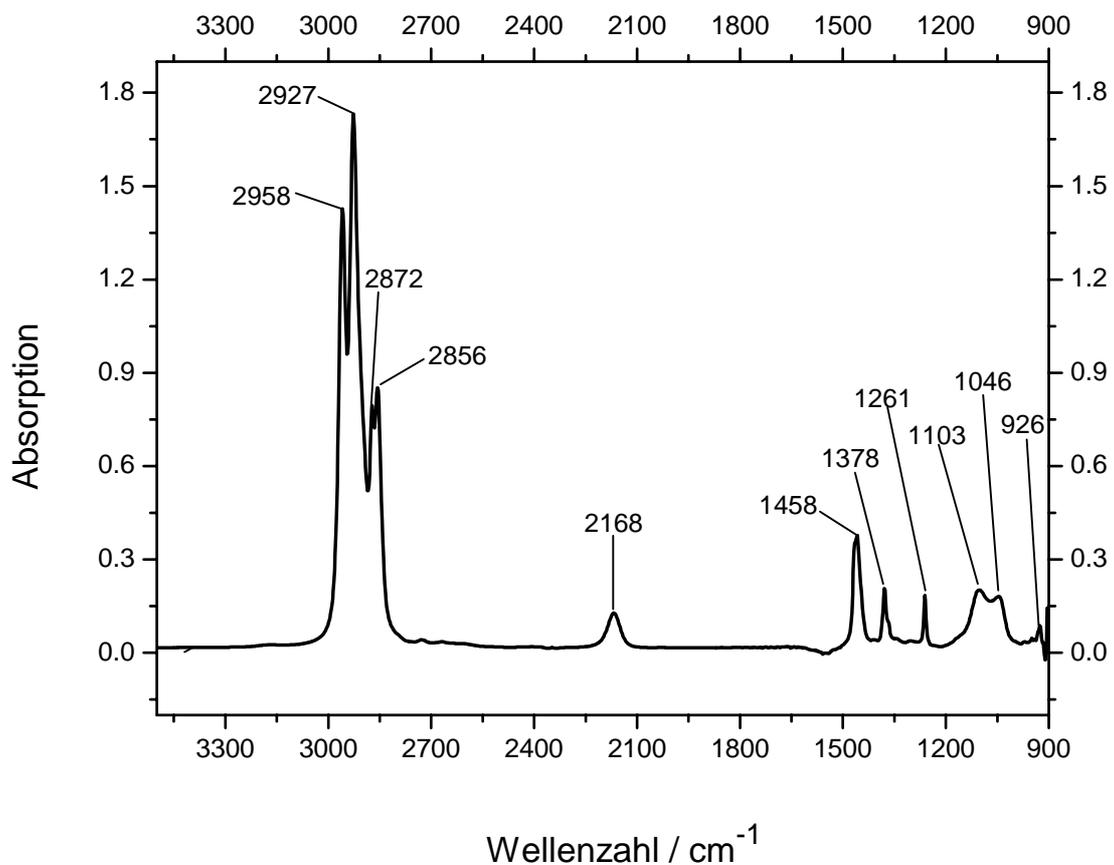


Abb. 4: IR-Spektrum von *Nanoperl 119* (2 Gew.% in Tetrachlorkohlenstoff).

Tabelle 4: Charakteristische IR-Schwingungsbanden von *Nanoperl 119*.

Wellenzahl [cm^{-1}]	Schwingungsbreite [cm^{-1}]	Zuordnung
2958 2927	2850 - 2935	ν (C-H): asymmetrische C-H Valenzschwingung der CH_3 -Gruppen im PDMS ν (C-H): symmetrische C-H Valenz-

2872		schwingung der acyclischen CH ₂ -Gruppen im PDMS
2856		ν (C-H): C-H Valenzschwingung der CH ₂ / CH ₃ -Gruppen im Naphta
2168	2100-2170	ν (Si-H): Si-H Valenzschwingung
1458	1440-1465	δ (C-H): C-H Deformationsschwingung der CH ₃ -Gruppen
1378	1370 - 1390	δ (C-H): C-H Deformationsschwingung der CH ₃ -Gruppen
1261	1250 - 1280	δ (C-H): C-H Deformationsschwingung in Si-CH ₃
1103 1046	1010 - 1150	ν (Si-O): antisymmetrische Si-O-Valenzschwingung der Si-O-Si Kette
926	925-930	ν (C-C): C-C Grundgerüst (rocking)

3.3.2 RAMAN-Spektroskopie

Das Spektrum von *Nanoperl 119* ist in Abbildung 5 dargestellt.

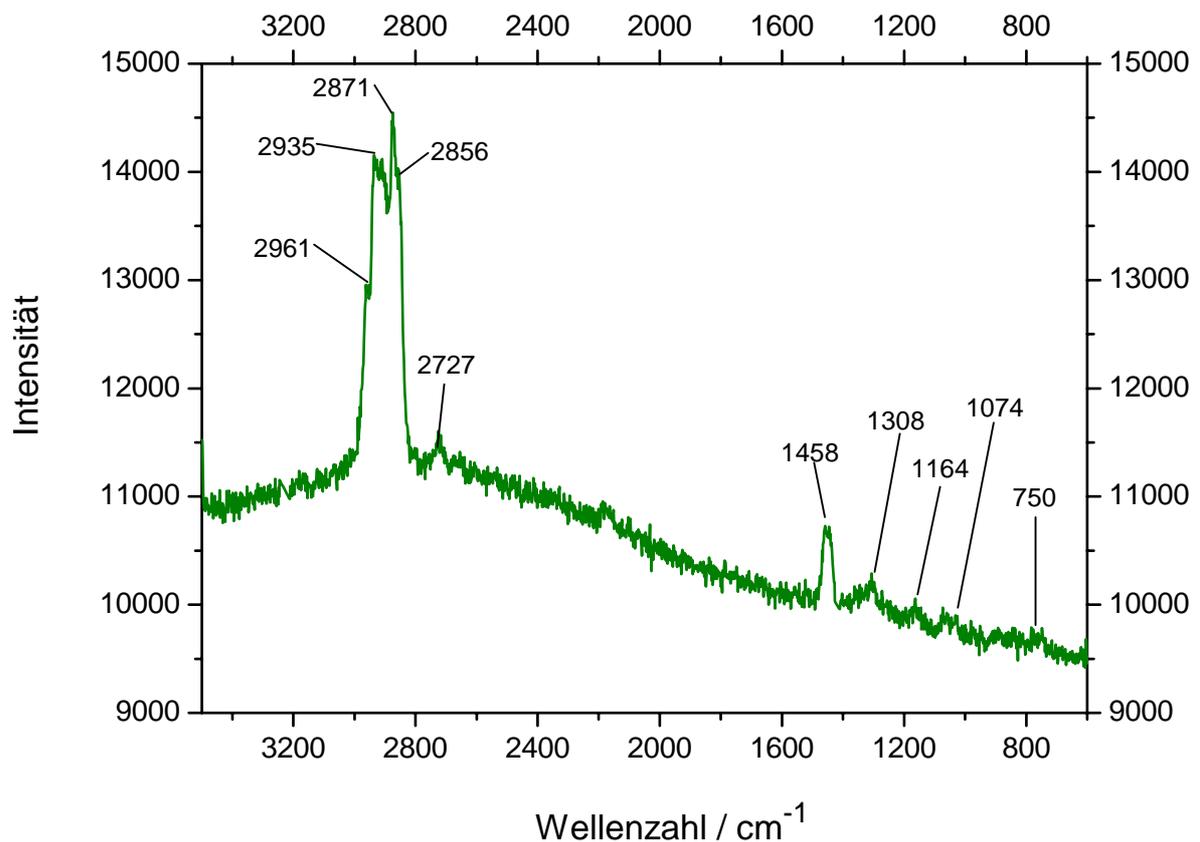


Abb. 5: RAMAN-Spektrum von *Nanoperl 119* (unverdünnte Lösung).

Die charakteristischen IR-Schwingungsbanden sind in Tabelle 5 zusammengestellt.

Tabelle 5: Charakteristische RAMAN-Schwingungsbanden von *Nanoperl 119*.

Wellenzahl [cm^{-1}]	Schwingungsbreite [cm^{-1}]	Zuordnung
2961 2935	2730 - 2930	ν (C-H): asymmetrische C-H Valenzschwingung der CH_3 -Gruppen im PDMS ν (C-H): symmetrische C-H Valenz-

2871 2856 2727		schwingung der acyclischen CH ₂ - Gruppen im PDMS; v (C-H) : C-H Valenzschwingung der CH ₂ / CH ₃ -Gruppen im Naphta
1458	1440-1465	δ (C-H) : C-H Deformationsschwingung der CH ₃ -Gruppen
(1308)	1295 - 1365	δ (C-H) : C-H Deformationsschwingung
(1164) (1074) 720	1070-1175 720-770	v (C-C) : C-C- Valenzschwingung der C-C Bindungen in PDMS v (C-C) : C-C Grundgerüst (rocking)

Bemerkung: Im RAMAN-Spektrum von *Nanoperl 119* zeigen nur die CH₃ bzw. CH₂-
Bindungen gut aufgelöste Signale.

4. Untersuchung der Bindung / Wechselwirkung von Nanoperl 118 und 119 mit den Holzkomponenten der Fichte und Tanne

Geht man davon aus, dass die *Nanoperl* Produkte mit dem zum beschichteten Holz eine **chemische Bindung** eingehen, so müssen alle reaktionsfähigen funktionellen Gruppen der Holzkomponenten (Cellulose, Hemicellulose und Lignin) in Betracht gezogen werden (siehe Abbildung 6).

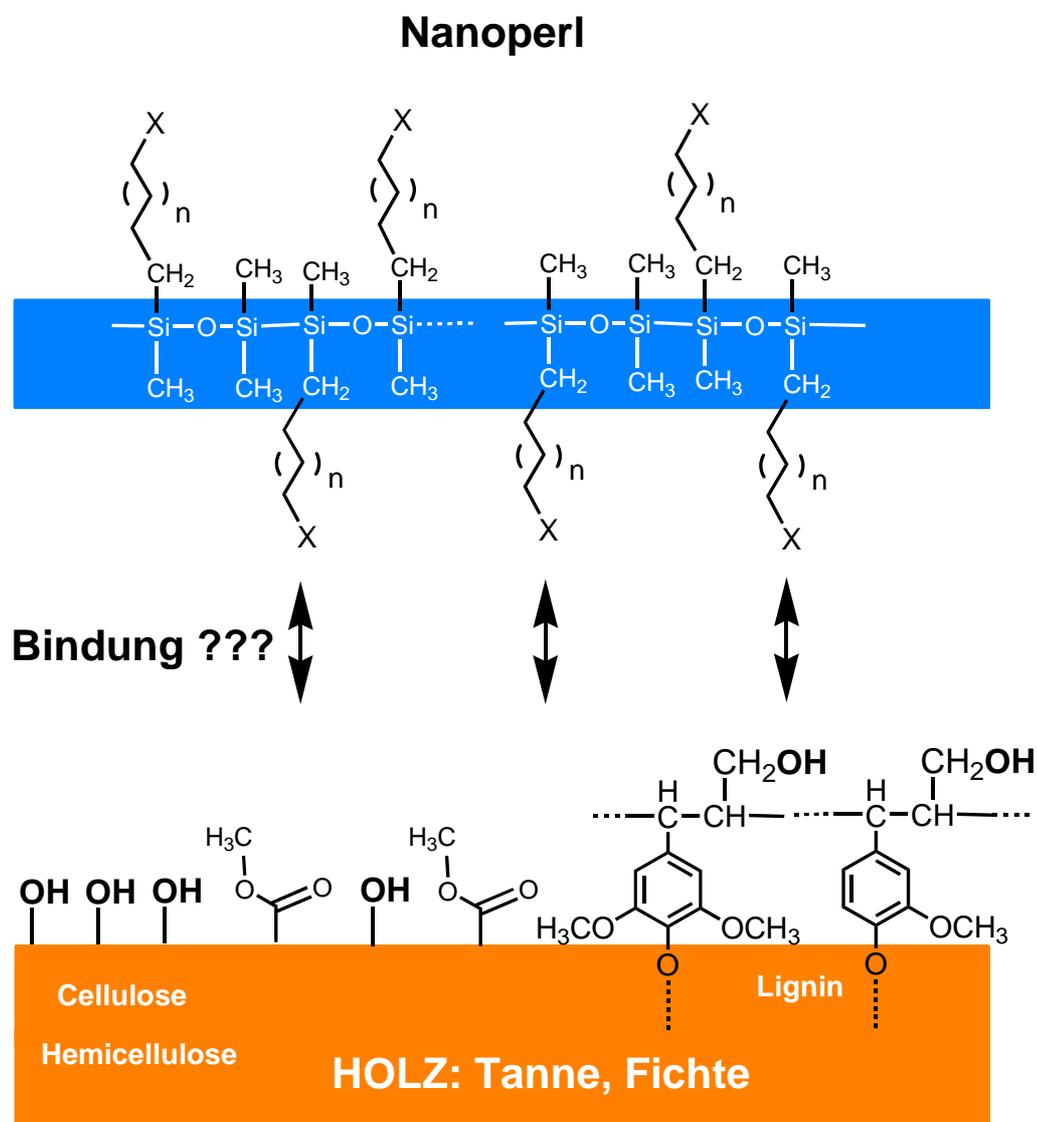


Abb. 6: Schematische Darstellung der reaktionsfähigen Gruppen in Fichte und Tanne.

Zusätzlich sind auch Einflussfaktoren wie pH und Wasserlöslichkeit zu berücksichtigen. Die chemischen Eigenschaften von Tanne und Fichte sind in Tabelle 6 zusammengestellt.

Tabelle 6: Chemische Eigenschaften von Tanne und Fichte ^[1].

Chemische Eigenschaften	Tanne	Fichte
Benzol-Alkohol-Auszug	1.2 - 2.8 %	etwa 2.3 %
Ether-Auszug	-	0.8 - 1.4 %
Wasserlöslichkeit	etwa 1.3 %	1.4 - 1.8 % (4.1%)
Lignin	28.0 - 29.9%	19 - 29 %
Gesamtzucker	-	67.9 - 75.7%
Cellulose	40.6 - 44.1% (59.9%)	41.0 - 57.8%
Pentosane	etwa 11.5 %	8.0 - 13.3%
Acetylgruppen	-	1.1 - 1.4%
pH-Wert	5.5 - 6.1	4.0 - 5.3
Sonstiges	Methoxyl etwa 4.7%	Methoxyl 4.6 - 5.0%

Aus Tabelle 6 ist ersichtlich, dass von allen Komponenten der Gesamtzucker-Anteil am höchsten ist (70-76%), davon nimmt die Cellulose zwischen 40-60% ein. Als zweithäufige Komponente ist das Lignin vorhanden mit einem Gehalt von 20-30%.

Betrachtet man nun die am häufigsten vorkommenden Komponenten (Gesamtzucker, Lignin) hinsichtlich deren Struktur, so kommen für eine mögliche Reaktion mit den Nanoperl Produkten nur die *Hydroxyl-Gruppen* dieser Komponenten in Frage (siehe Abbildung 6: OH-Gruppen von Cellulose/Hemicellulose und Lignin sind fett hervorgehoben).

[1] R. Wagenführ, Chr. Scheiber, *Holzatlas*, 3. Auflage, VEB Fachbuchverlag Leipzig, 1989, 653-659.

4.1 Untersuchung der Bindung / Wechselwirkung von Nanoperl 118 mit Cellulose und Lignin

Aus den Angaben des Herstellers soll sich das Produkt *Nanoperl 118* aufgrund der Amino-Funktionalität vorzugsweise an den polaren Gruppen des Holzes (damit sind die Hydroxyl-Gruppen gemeint) über Wasserstoffbrückenbindungen ausrichten und die hydrophilen Gruppen des Holzes mit den CH₂- und CH₃-Gruppen abschirmen.

Die Bindung von *Nanoperl 118* an Holz über Wasserstoffbrückenbindungen (H-Brücken) ist in Abbildung 7 schematisch dargestellt.

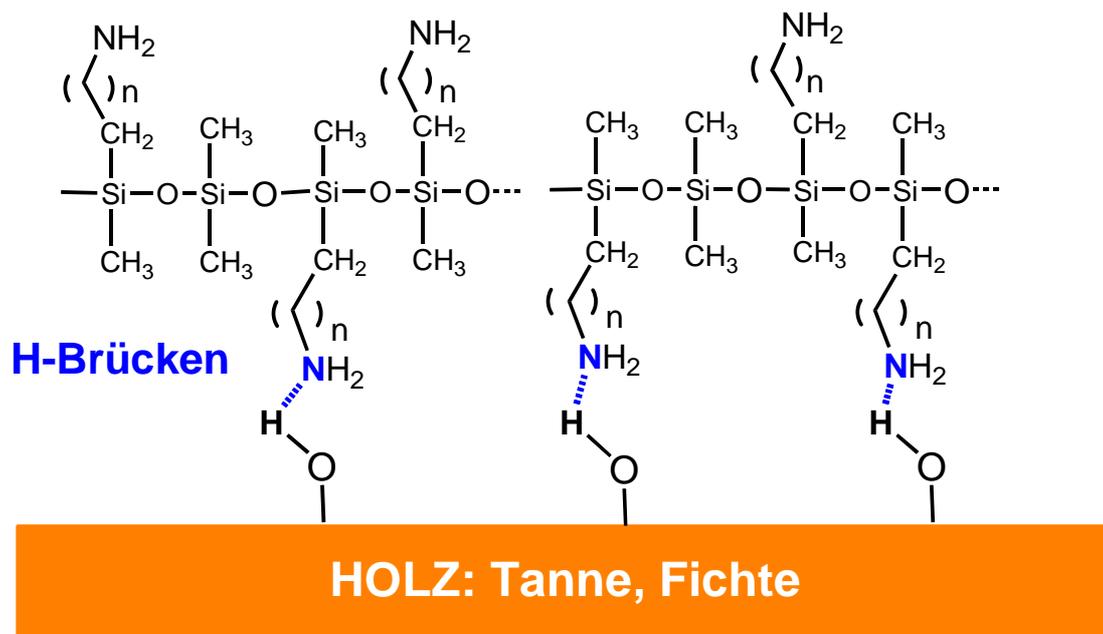


Abb. 7: Mögliche Bindung von *Nanoperl 118* an Holz über Wasserstoffbrückenbindungen.

Um festzustellen ob *Nanoperl 118* an die **OH-Gruppen** der Cellulose oder Lignin über H-Brücken bindet wurden 1:1 Gemische vom Hydrophobierungsmittel und Cellulose bzw. Lignin hergestellt.

4.1.1 Gemisch Cellulose / Nanoperl 118

Probenvorbereitung

Zur Untersuchung der Bindung zwischen *Nanoperl 118* mit der Cellulose-Komponente aus dem Holz wurde eine native mikrokristalline Cellulose (Fa Mikro-Technik) verwendet.

Das hergestellte 1:1 Gemisch der beiden Komponenten wurde anschließend 3 Stunden bei Raumtemperatur gerührt und danach ohne weiteres Rühren stengelassen (*Beobachtung*: Cellulose setzt sich mit der Zeit ab!).

Das Gemisch wurde nach 3 Wochen spektroskopisch, mittels FT-IR- und RAMAN-Spektroskopie, untersucht. Vor den Messungen wurde das Gemisch nochmals für 1 Stunde kräftig gerührt.

Unter der Annahme, dass *Nanoperl 118* über Wasserstoffbrückenbindungen an die Cellulose bindet, sollte sich dies im IR-Spektrum vom Gemisch durch eine breite Bande zwischen $3300\text{-}3500\text{ cm}^{-1}$ bemerkbar machen.

Das IR-Spektrum vom 1:1 Gemisch Cellulose / *Nanoperl 118* in Tetrachlorkohlenstoff (CCl_4) Lösung ist in Abbildung 8 dargestellt. Dabei wurde sowohl von der überstehenden Lösung als auch vom Bodensatz (abgesetzte Cellulose) ein IR-Spektrum aufgenommen.

Aus Abbildung 8 ist zu erkennen, dass die IR-Spektren vom Gemisch sich vom Spektrum des *Nanoperls* nicht unterscheiden. Die erwartete IR-Schwingungsbande für Wasserstoffbrückenbindungen zwischen den NH_2 -Gruppen des *Nanoperls* und den OH-Gruppen der Cellulose ist nicht zu sehen. Zudem sind die IR-Schwingungsbanden des Cellulose-Moleküls im IR-Spektrum des Gemisches nicht zu erkennen

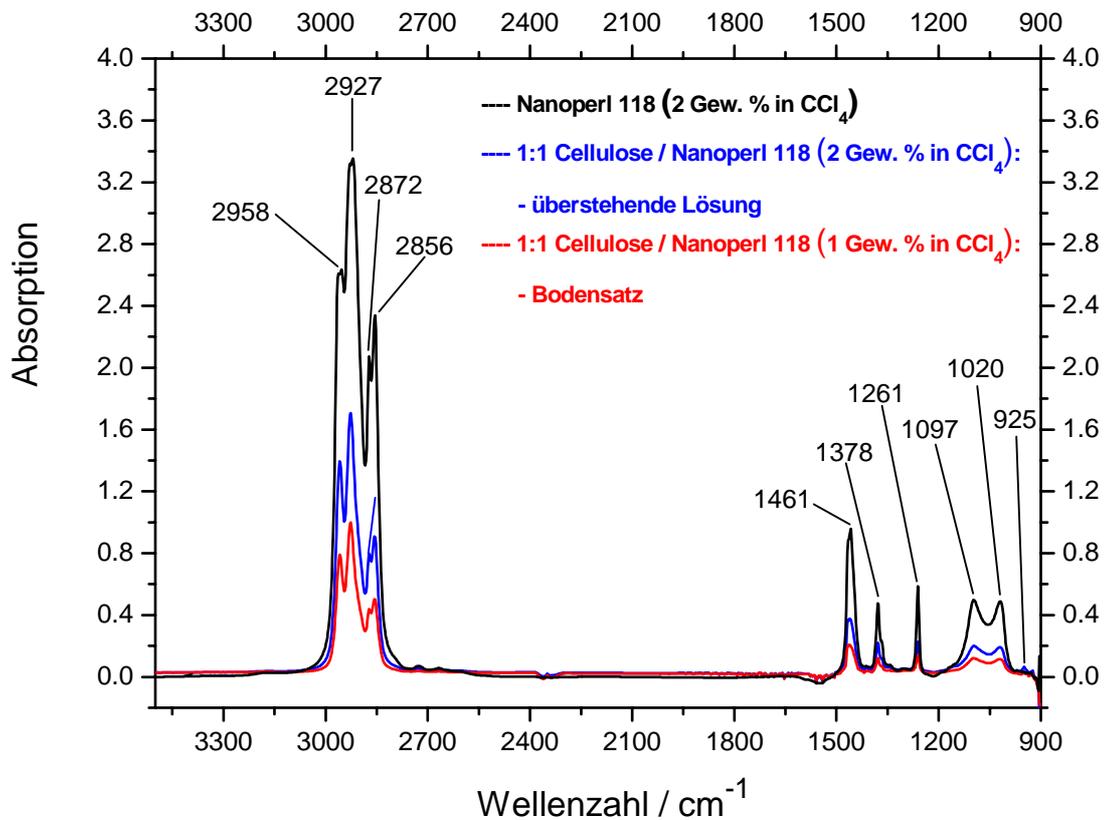


Abb. 8: IR-Spektrum von *Nanoperl 118* (2 Gew.% in Tetrachlorkohlenstoff), 1:1 Gemisch mit Cellulose (überstehende Lösung, 2 Gew.% in Tetrachlorkohlenstoff) und 1:1 Gemisch mit Cellulose (Bodensatz, 1 Gew.% in Tetrachlorkohlenstoff).

Auch die RAMAN-Spektren vom Gemisch und *Nanoperl 118* zeigen identische Molekülschwingungen (siehe Abbildung 9).

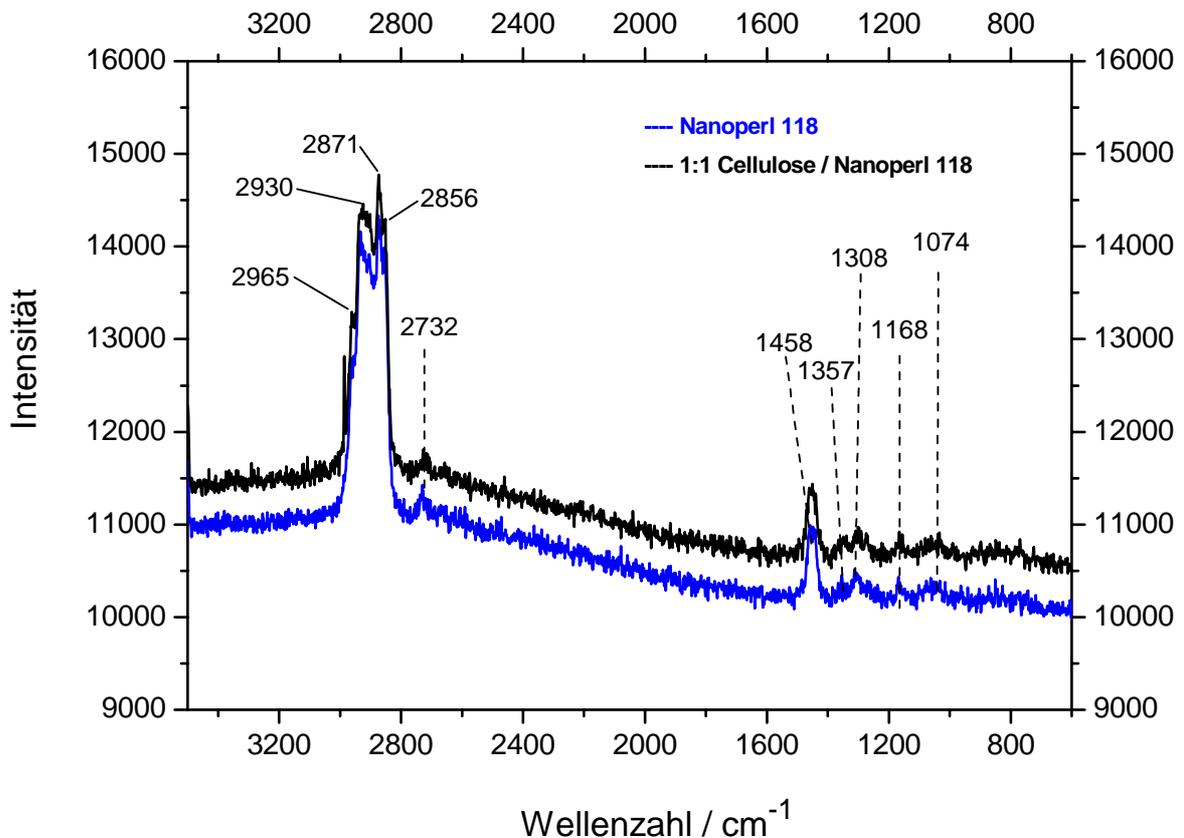


Abb. 9: RAMAN-Spektrum von *Nanoperl 118* (unverdünnte Lösung) und 1:1 Gemisch mit Cellulose.

4.1.2 Gemisch Lignin (aus Fichte) / *Nanoperl 118*

Probenvorbereitung

Für die Untersuchung der Bindung zwischen *Nanoperl 118* und Lignin wurde Lignin aus der Fichte nach dem *Acetosolv*-Verfahren isoliert.

Das hergestellte 1:1 Gemisch der beiden Komponenten wurde anschließend 3 Stunden bei Raumtemperatur gerührt und danach ohne weiteres Rühren stengelassen (*Beobachtung*: Lignin setzt sich mit der Zeit ab!).

Das Gemisch wurde nach 4 Wochen spektroskopisch, mittels FT-IR- und RAMAN-Spektroskopie, untersucht. Vor den Messungen wurde das Gemisch nochmals für 1 Stunde kräftig gerührt.

Beobachtung: die überstehende Nanoperl-Lösung zeigte nach 4 Wochen eine gelbliche Färbung.

Das IR-Spektrum vom 1:1 Gemisch Lignin / *Nanoperl 118* in Tetrachlorkohlenstoff (CCl_4) Lösung ist in Abbildung 10 dargestellt.

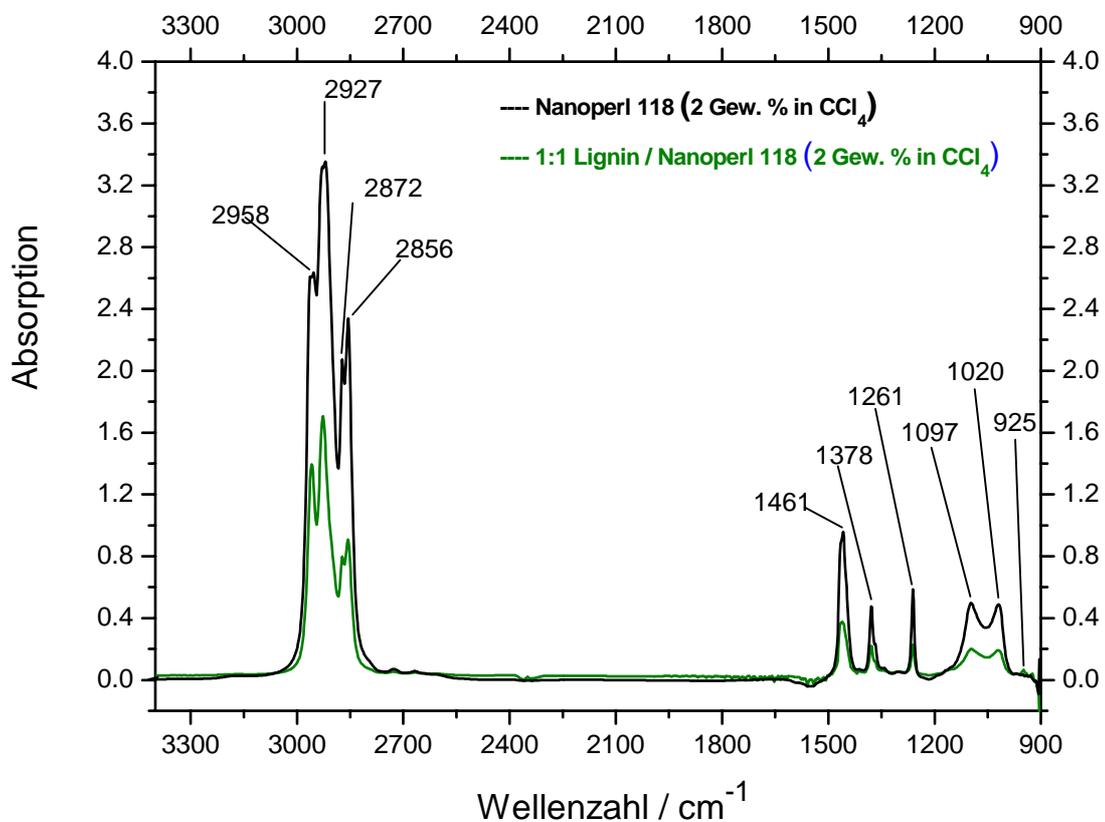


Abb. 10: IR-Spektrum von *Nanoperl 118* (2 Gew.% in Tetrachlorkohlenstoff), 1:1 Gemisch mit Lignin (2 Gew.% in Tetrachlorkohlenstoff).

Auch hier sind beide IR-Spektren, vom Gemisch und *Nanoperl 118*, gleich. Die erwartete IR-Schwingungsbande für Wasserstoffbrückenbindungen zwischen den NH_2 -Gruppen des Nanoperls und den primären OH-Gruppen der Coniferylalkohol-Einheiten im Lignin ist nicht zu sehen. Zudem sind die charakteristischen IR-Schwingungsbanden des Lignin-Moleküls im IR-Spektrum des Gemisches nicht zu erkennen.

Bemerkung: Aufgrund der hohen Fluoreszenz der Probe konnte kein RAMAN-Spektrum aufgenommen werden.

4.2 Untersuchung der Bindung / Wechselwirkung von Nanoperl 119 mit Cellulose und Lignin

Aus den Angaben des Herstellers ist das Produkt *Nanoperl 119* ein H-funktionelles Polydimethylsiloxan (PDMS), das mit einem Titansäureester kombiniert ist und als 5%-ige Lösung in einem hochsiedenden Naphta vorliegt. Diese Kombination reagiert unter anderem mit den OH-Gruppen des Untergrundes unter Freisetzung von Wasserstoff (H₂). Die kovalent an das Substrat gebundenen PDMS-Moleküle bewirken eine hydrophobe Ausrüstung des entsprechenden Substrates.

Die mögliche Bindung von *Nanoperl 119* an Holz ist in Abbildung 11 schematisch dargestellt.

Findet eine Bindung zwischen Cellulose und *Nanoperl 119* statt, so sollte eine Abnahme / Verschwinden der Si-H Bande bei 2168 cm⁻¹ im Spektrum stattfinden. Zusätzlich müsste durch die Bildung von Si-O-Bindungen mit der Cellulose eine Erhöhung der Intensität der Si-O-Banden im Bereich zwischen 1046-1103 cm⁻¹ bemerkbar sein.

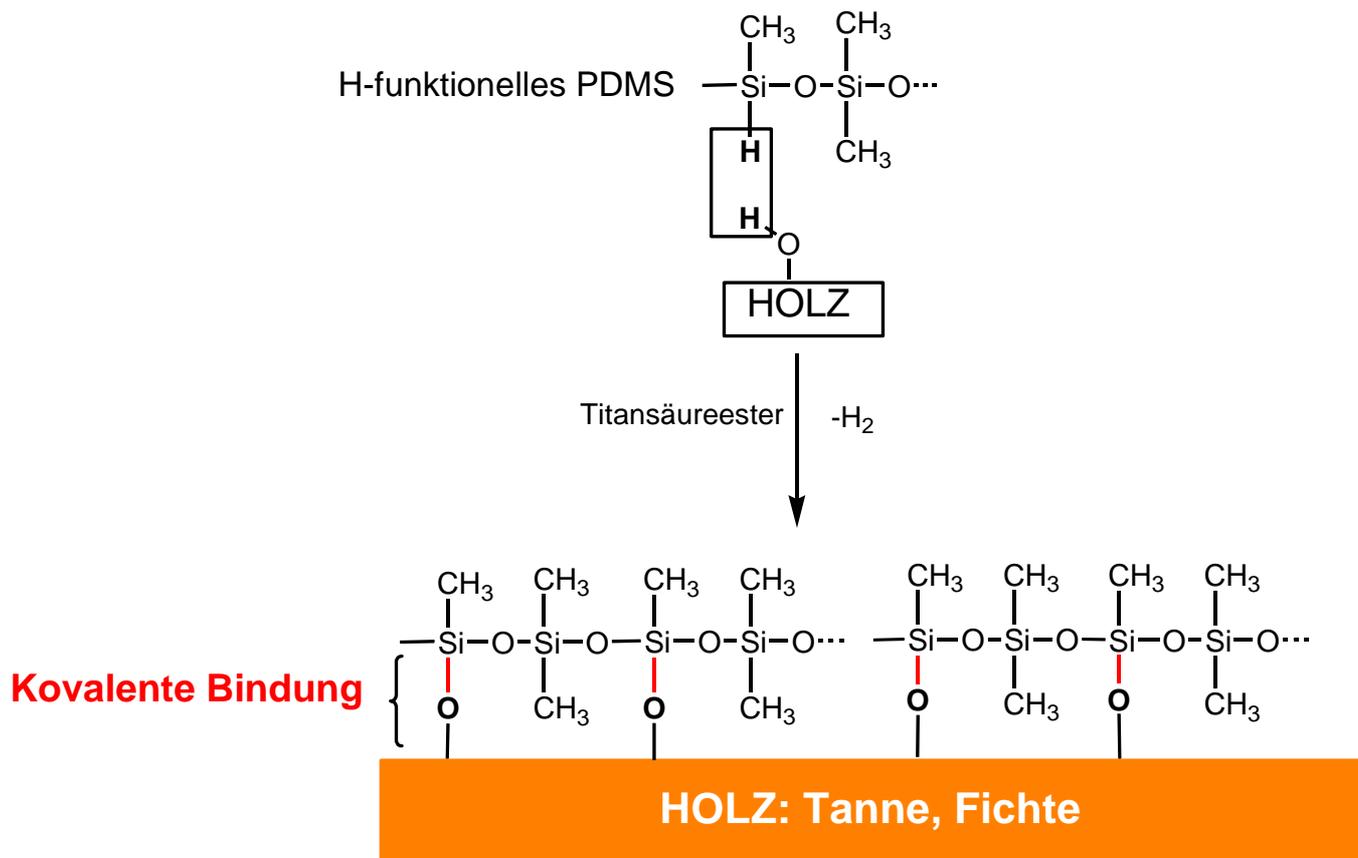


Abb. 11: Mögliche Bindung von *Nanoperl 119* an Holz.

4.2.1 Gemisch Cellulose / *Nanoperl 119*

Probenvorbereitung: siehe Nanoperl 118.

Das IR-Spektrum vom 1:1 Gemisch Cellulose / *Nanoperl 119* in Tetrachlorkohlenstoff (CCl₄) Lösung ist in Abbildung 12 dargestellt. Dabei wurde sowohl von der überstehenden Lösung als auch vom Bodensatz (abgesetzte Cellulose) ein IR-Spektrum aufgenommen.

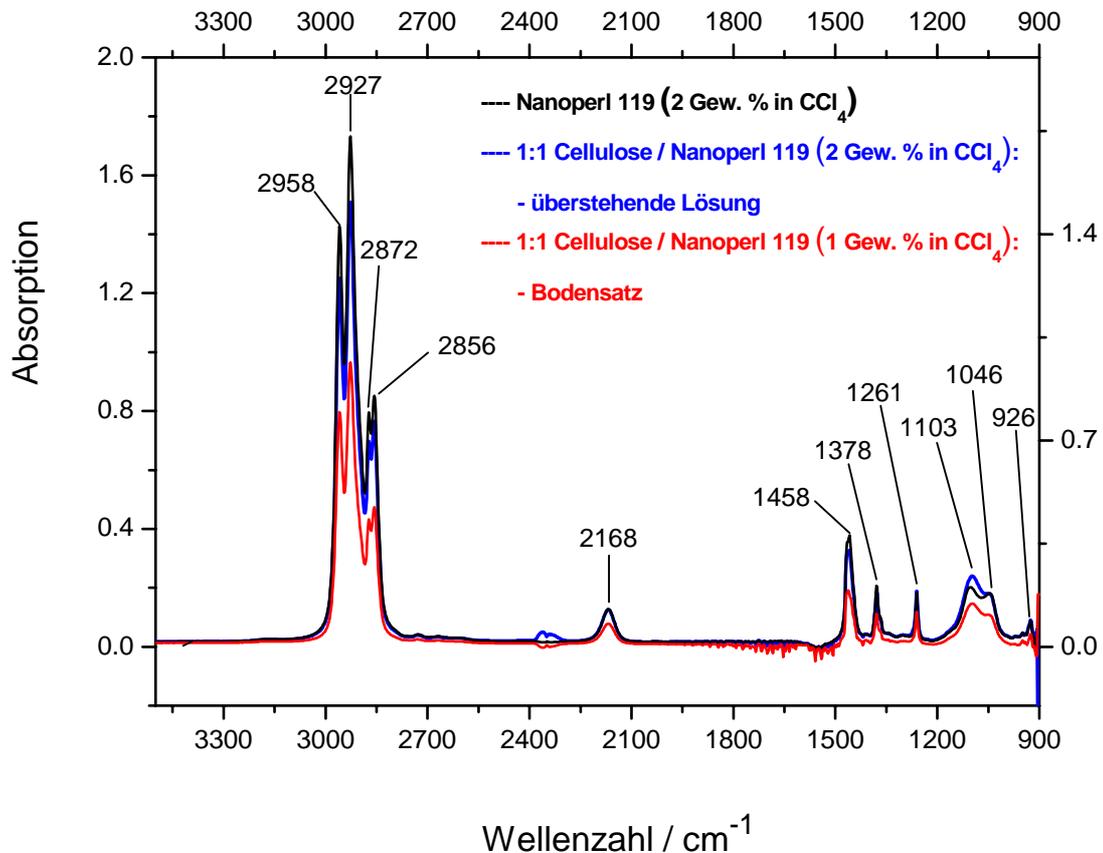


Abb. 12: IR-Spektrum von *Nanoperl 119* (2 Gew.% in Tetrachlorkohlenstoff), 1:1 Gemisch mit Cellulose (überstehende Lösung, 2 Gew.% in Tetrachlorkohlenstoff) und 1:1 Gemisch mit Cellulose (Bodensatz, 1 Gew.% in Tetrachlorkohlenstoff).

Die Gegenüberstellung des IR-Spektrums von *Nanoperl 119* (schwarze Kurve) mit dem vom Gemisch (blaue Kurve) zeigt deutlich, dass keine Abnahme der Si-H Bande bei 2168 cm⁻¹ stattgefunden hat und somit mit hoher Wahrscheinlichkeit auch keine kovalente Bindung zwischen *Nanoperl 119* und Cellulose.

Die Abnahme dieser Bande im Spektrum vom Bodensatz (rote Kurve) ist durch die unterschiedliche Konzentration vom *Nanoperl* im Bodensatz und durch die unterschiedliche Verdünnung mit CCl₄ (1 Gew.%) zu erklären.

Bemerkung: Aufgrund der hohen Fluoreszenz der Probe konnte kein RAMAN-Spektrum aufgenommen werden.

4.2.2 Gemisch Lignin (aus Fichte) / Nanoperl 119

Probenvorbereitung: siehe Nanoperl 118.

Das IR-Spektrum vom 1:1 Gemisch Lignin / Nanoperl 119 in Tetrachlorkohlenstoff (CCl_4) Lösung ist in Abbildung 13a dargestellt.

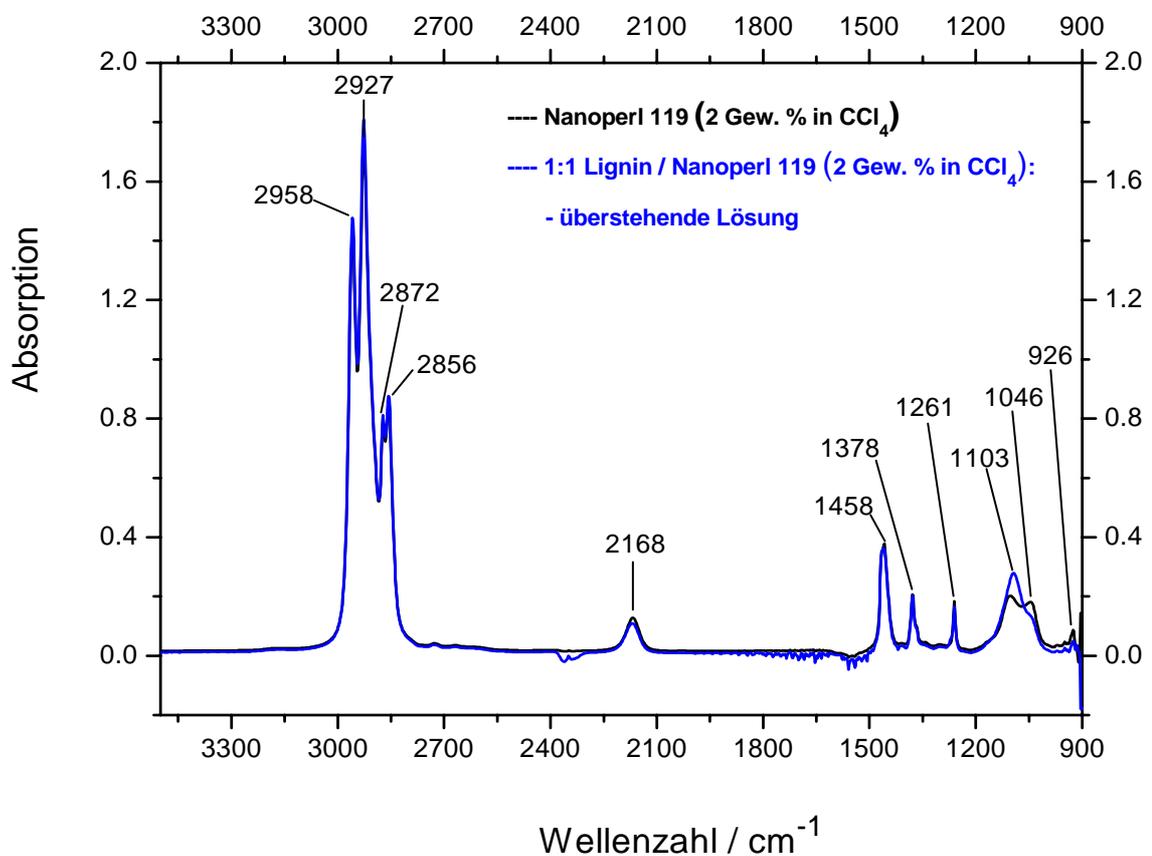


Abb. 13a: IR-Spektrum von *Nanoperl 119* (2 Gew.% in Tetrachlorkohlenstoff), 1:1 Gemisch mit Lignin (überstehende Lösung, 2 Gew.% in Tetrachlorkohlenstoff).

In Abbildung 13 b belegt die Abnahme der Si-H Valenzschwingungsbande bei 2168 cm^{-1} und die Erhöhung der Intensität der antisymmetrischen Si-O-Valenzschwingungsbande bei 1103 cm^{-1} eindeutig, dass *Nanoperl 119* mit dem Lignin eine **kovalente Bindung** eingeht.

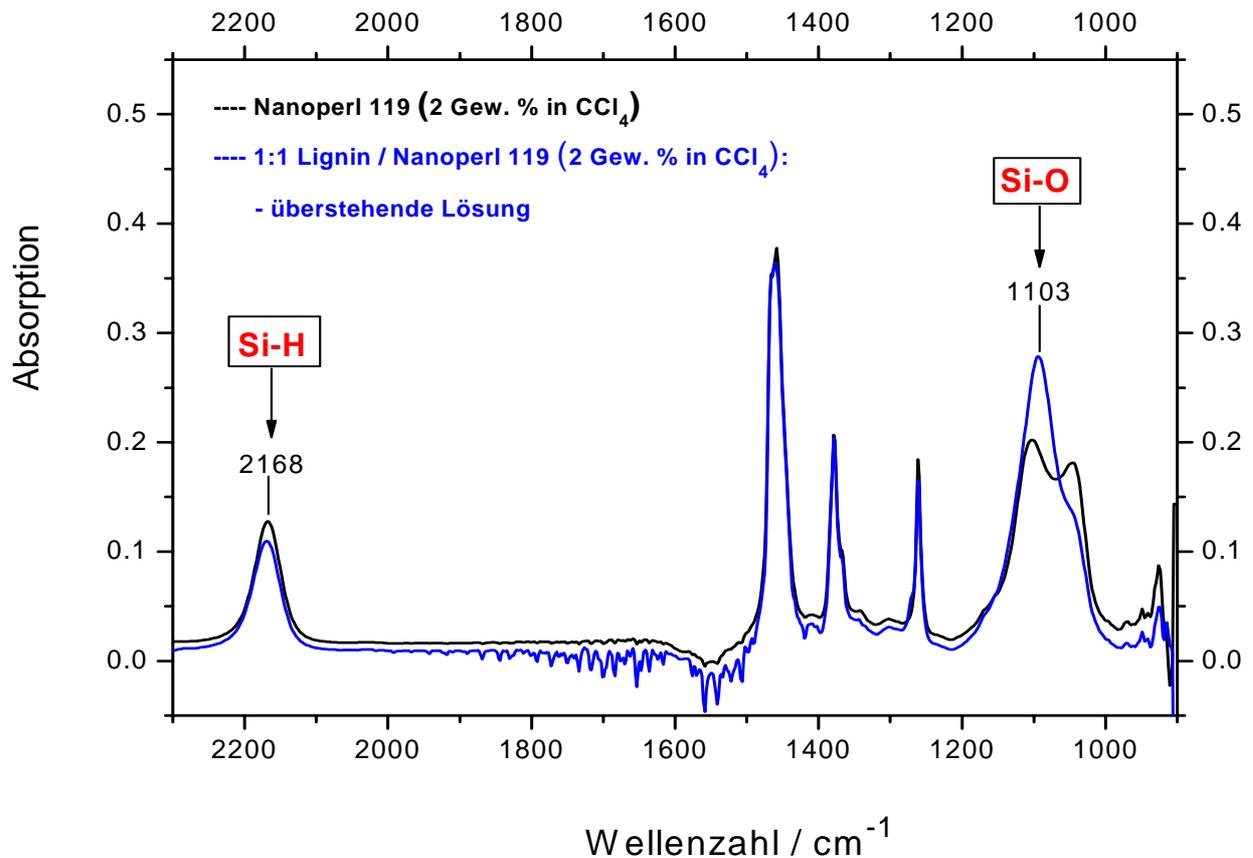


Abb. 13b: IR-Spektrum von *Nanoperl 119* (2 Gew.% in Tetrachlorkohlenstoff), 1:1 Gemisch mit Lignin (überstehende Lösung, 2 Gew.% in Tetrachlorkohlenstoff) mit dem für die kovalente Bindung charakteristischen IR-Schwingungsbanden.

Diese Bindungen scheinen sich jedoch langsam auszubilden:

- Messungen wurden nach 3 Wochen durchgeführt;
- es sind noch Si-H Bindungen vorhanden die weiter reagieren können.

Bemerkung: Aufgrund der hohen Fluoreszenz der Proben konnte kein RAMAN-Spektrum aufgenommen werden.

Findet eine Reaktion zwischen *Nanoperl 119* und den Holzkomponenten statt, sollte es zu einer Wasserstoff-Entwicklung kommen (wie in Abbildung 11 gezeigt). Um dies zu überprüfen wurden Mischungen des Nanoperls mit den einzelnen Komponenten: Lignin

aus Fichte und Tanne, Sägemehl von Tanne und Fichte und Cellulose, unter visueller Auswertung durchgeführt (siehe Abbildung 14).

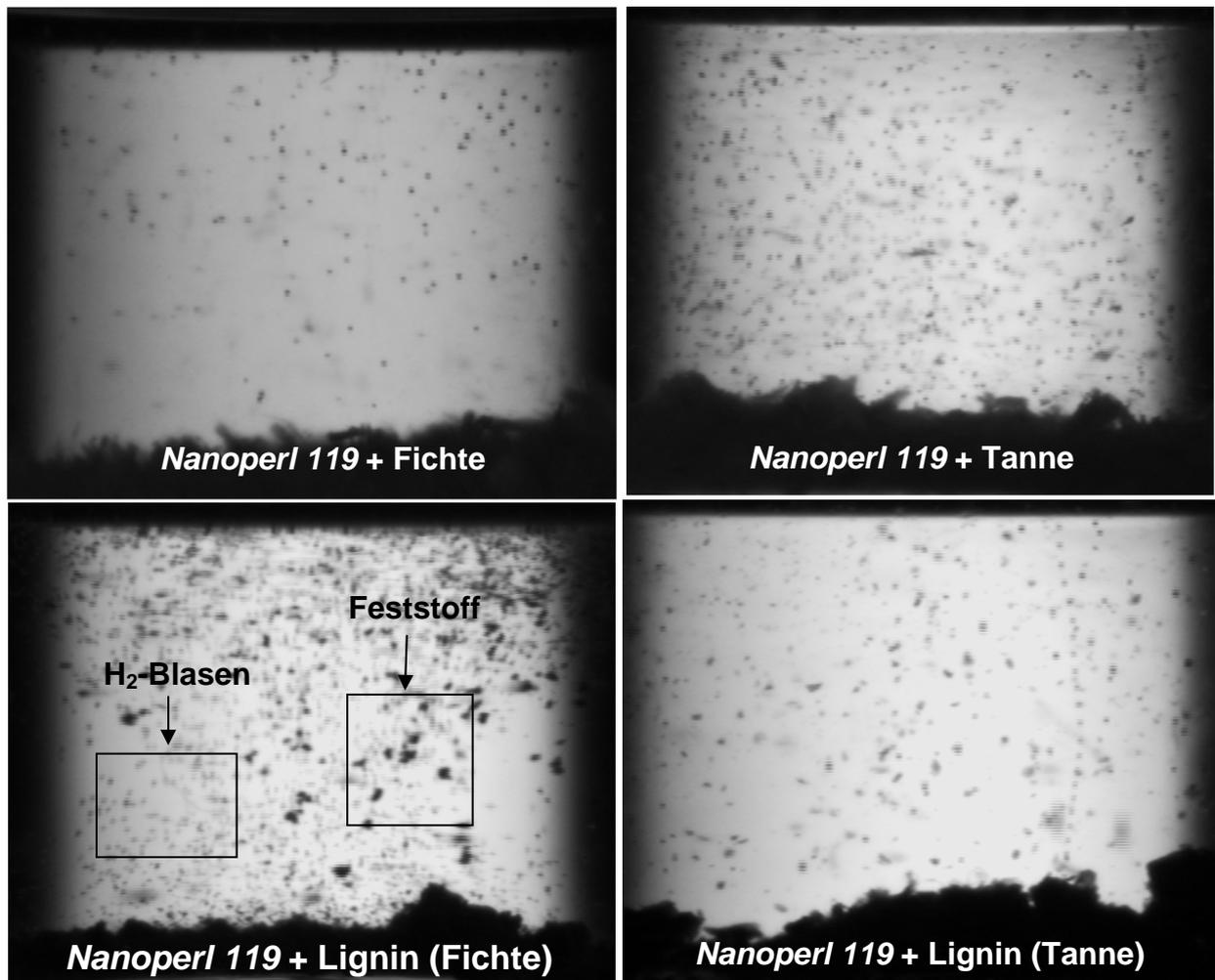


Abb. 14: Wasserstoff-Entwicklung bei der Mischung von *Nanoperl 119* mit Lignin aus Fichte und Tanne und Sägemehl von Tanne und Fichte.

Alle Mischungen in Abbildung 14 zeigen Wasserstoff-Entwicklung, was zusätzlich die Reaktion zwischen *Nanoperl 119* und Lignin unterstützt. Die Mischungen mit Cellulose (siehe Abbildung 15) bzw. Wasser zeigen hingegen keine Blasenbildung.

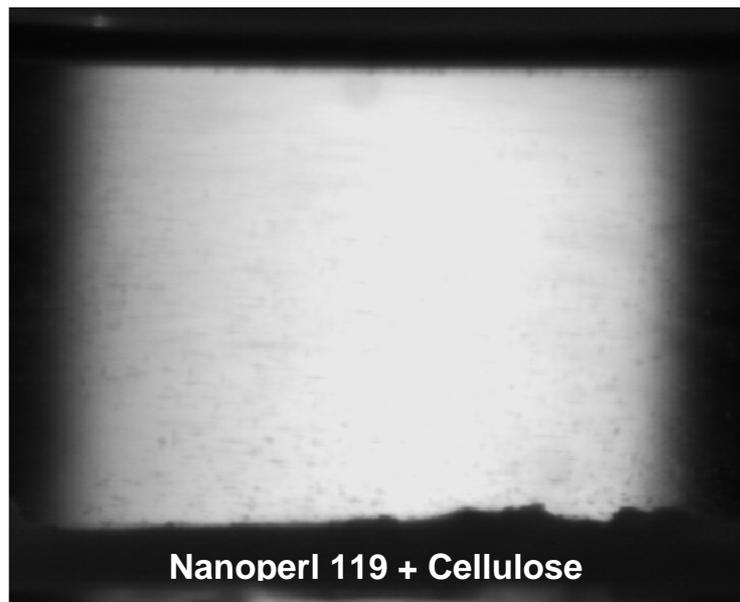


Abb. 15: Mischung von *Nanoperl 119* mit Cellulose zeigt keine Blasenbildung.

5. Zusammenfassung

Mit Hilfe spektroskopischer Methoden wie FT-IR- und RAMAN-Spektroskopie wurden die Nanoperl Produkte 118, 118F und 119 hinsichtlich ihrer chemischen Zusammensetzung untersucht. Alle drei Nanoperl Produkte zeigen das charakteristische Grundgerüst eines Polydimethylsiloxans (PDMS).

Nanoperl 118

Die NH₂-funktionellen Gruppen konnten im IR-Spektrum von *Nanoperl 118* zugeordnet werden. Die Länge der C-C-Seitenketten, an denen die NH₂-Gruppen gebunden sind, konnte jedoch mittels IR- und RAMAN nicht bestimmt werden.

Nanoperl 118F

Die F (Fluor)- und NH₂-funktionellen Gruppen von *Nanoperl 118F* konnten im IR-Spektrum nachgewiesen werden. Jedoch zeigen deren charakteristischen IR-Banden niedrige Intensitäten, was auf einen geringen Anteil dieser funktionellen Gruppen im Produkt hindeutet. Durch IR- und RAMAN Spektroskopie konnte nicht geklärt werden, ob die Fluoratome direkt am Silizium oder an den langkettigen Seitenketten (nach Angabe des

Herstellern: C8, C10 und C12) gebunden sind. Aufgrund dieser komplexen Problematik und der daraus resultierenden ungenauen Kenntnis der Struktur von *Nanoperl 118F* wurden in dieser Studie keine weiteren Untersuchungen (bezüglich Bindung an Holz) vorgenommen.

Nanoperl 119

Im IR- und RAMAN-Spektrum des Produktes ist neben der charakteristischen PDMS-Struktur auch die für ein H-funktionelles PDMS charakteristische Si-H Bindung bei 2168 cm^{-1} sehr gut zu erkennen.

Die Untersuchung der Bindung der Nanoperl Produkte *118* und *119* an Holz (Tanne und vor allem Fichte) wurde an Gemischen dieser Produkte mit Cellulose und Lignin durchgeführt. Dadurch sollte geklärt werden, an welche dieser Holzbestandteile die Nanoperl Produkte binden.

Bemerkung: Die Untersuchungen der Gemische mit den Hemicellulosen aus Tanne und Fichte (*Acetylgalactomanan*, *Arabinocyclan*) konnten in dieser Studie nicht durchgeführt werden, da diese zur entsprechenden Zeit nicht zur Verfügung standen.

Nanoperl 118: Gemische mit Cellulose und Lignin (aus Fichte)

Aus den IR-Spektren der Gemische konnte die Bindung des *Nanoperls 118* an die Hydroxyl-Gruppen der Cellulose oder Lignin über Wasserstoffbrückenbindungen nicht nachgewiesen werden. Die charakteristischen IR-Schwingungsbanden für die H-Brückenbindungen zwischen den NH_2 -Gruppen des Nanoperls und die OH-Gruppen der Cellulose bzw. Lignin im Bereich zwischen $3300\text{-}3500\text{ cm}^{-1}$ sind nicht zu erkennen.

Nanoperl 119: Gemische mit Cellulose und Lignin (aus Fichte)

Aus den IR-Spektren der Gemische konnte die Bindung des *Nanoperls 119* an die Hydroxyl-Gruppen von Lignin nachgewiesen werden. Dies ist durch die Abnahme der Intensität der Si-H Schwingungen bei 2168 cm^{-1} und Zunahme der Intensität der Si-O Schwingung bei 1103 cm^{-1} zu erkennen. Die Wasserstoff-Entwicklung, die bei dieser Reaktion stattfindet, konnte durch Mischung des Nanoperls mit den einzelnen

Komponenten (Lignin aus Fichte und Tanne, Sägemehl von Tanne und Fichte) und visueller Auswertung beobachtet werden. Der Versuch mit der Cellulose war dabei negativ.

Aus den Untersuchungen können zurzeit keine Aussagen über die Kinetik dieser Reaktion (d.h. wie schnell oder langsam sie abläuft) getroffen werden.

Weitere Arbeiten

Die durchgeführten Untersuchungen und die daraus gezogenen Schlussfolgerungen müssen mit zusätzlichen Methoden unterstützt werden wie: NMR (^1H -, ^{13}C -, ^{29}Si -), XPS-, Röntgenfluoreszenz-Spektroskopie.

Des Weiteren sollen die gleichen spektroskopischen Untersuchungen auch an Gemischen der Nanoperl-Produkte mit dem Lignin aus der Tanne bzw. mit den Hemicellulosen aus Tanne und Fichte durchgeführt werden.

A4. Abkürzungen und Probenidentifikation (loses Einzelblatt)

Inhalt: **'Lesehilfe' für Abkürzungen und codierte Versuchsvarianten**

Seitenzahl: **1**

Abkürzungen

Abkürzung	Bedeutung	Details
AP	Arbeitspaket	
BiSp	Birkensperrholz	
DS	Deckschicht	
EN	Europäische Norm	
FI	Fichte	
GR	Grundierung	
HA	Holzart	Substrat
HF	Holzfeuchte	
HV	Hauptversuch	Versuchsserien 1 bis 3
IR	Infrarot-Licht	Wellenlängenbereich im Lichtspektrum
ISO	Internationale Norm	
NP	Nanoperl	Hydrophobierung
QUV	Bewitterungsgerät	Gerätetyp für künstliche Bewitterung
TA	(Weiss-)Tanne	
UV	Ultraviolett-Licht	Wellenlängenbereich im Lichtspektrum
VIS	sichtbares Licht (Visible)	Wellenlängenbereich im Lichtspektrum
VV	Vorversuch	Versuchsserie vor Projektbeginn

