



Lebensdauervorhersage von Holzbeschichtungen

Highlights aus dem Projekt SERVOWOOD

Boris Forsthuber, Gerhard Grill

Einleitung

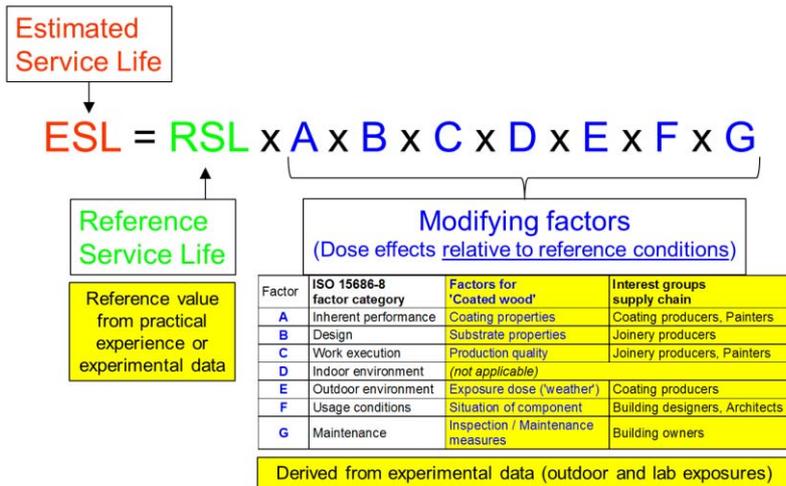
In Europa besteht der Bedarf, Holz als nachhaltiges Konstruktionsmaterial im Bauwesen verstärkt zum Einsatz zu bringen. Im Sinne einer optimalen Ressourcennutzung ist es dabei von großer Wichtigkeit, die Nutzungsdauer von beschichteten Holzbauteilen, wie z.B. Fenster, Außentüren und Fassaden zu optimieren sowie gleichzeitig den Instandhaltungsaufwand so gering wie möglich zu halten. Um diese Herausforderungen zu bewältigen, wurde das europäische Projekt SERVOWOOD ins Leben gerufen, mit dem Ziel, Europäische Normen (EN) zu etablieren, die eine Vorhersage der Lebensdauer von Beschichtungen in verschiedenen Klimazonen Europas ermöglichen und die Aussagekraft von beschleunigten Labormethoden, einschließlich künstlicher Bewitterung, zu verbessern. An diesem Projekt waren insgesamt 15 Partner aus Europa beteiligt. Das Konsortium bestand aus Vertretern der Beschichtungs- und Holzverarbeitenden Industrie, sowie aus mehreren Forschungsinstituten. Unter der Koordination des Europäischen Dachverbandes der Farben-, Druckfarben- und Künstlerfarbenhersteller (CEPE) waren an diesem Projekt die Forschungsinstitute EMPA (CH), FCBA (FR), PRA (GB), CATAS (IT) und Holzforschung Austria (AT) beteiligt.

Im Projekt wurde ein mehrstufiger Versuchsplan entwickelt, in dem 52 verschiedene Modellformulierungen von Holzbeschichtungen mit bekannter Zusammensetzung und erwartetem Leistungsvermögen, zwei Schichtdickenniveaus und fünf der meist verwendeten Nadel- und Laubholzarten im Bauwesen in Europa enthalten waren. Beschichtete Brettproben wurden an fünf Freilandstandorten und in Laborbewitterungsanlagen mit UV- und Xenonbogenlampen exponiert. Die Daten aus diesen Versuchen ermöglichten detaillierte Auswertungen der Bewitterungsdosis im Vergleich zum Materialverhalten der Beschichtungen, was die Grundlage für die Entwicklung eines Lebensdauervorhersagemodells darstellte.

Das Lebensdauer-Vorhersagemodell

Das Hauptergebnis des SERVOWOOD-Projektes ist ein Konzept für eine verbesserte Lebensdauervorhersage von Holzbeschichtungen unter der Verwendung eines adaptierten Faktorenmodells nach ISO 15686-8. Mit diesem Ansatz wird eine angenommene Referenzlebensdauer durch eine Reihe von modifizierenden Faktoren angepasst, die die Unterschiede zu den Referenzbedingungen wiedergeben.

Dabei kommt der Referenzlebensdauer naturgemäß eine große Bedeutung zu, die mit Hilfe von Langzeiterfahrungen aus der Praxis oder langzeitigen Bewitterungsversuchen mit bekannten Systemen ermittelt wird. Die modifizierenden Faktoren wurden von Dosis-Wirkungs-Beziehungen, auf Grundlage der Versuchsdaten sowie auf Basis der Ergebnisse von vorangegangenen Projekten und der Literatur entwickelt. Darüber hinaus konnte das Konsortium erfolgreich gemeinsam relevante Grenzzustände für Holzaußenbeschichtungen definieren, die das Ende der technischen Nutzungsdauer der Beschichtung anzeigen. Es wurde Übereinstimmung gefunden, den entscheidenden Grenzzustand hauptsächlich auf das Ausmaß der Rissbildung zu beziehen, da dieser Schaden das Aufbringen eines Wartungsanstriches, aber noch nicht die Entfernung der Originalbeschichtung erfordert. Rein ästhetische Veränderungen wie Farb- und Glanzänderungen sind nicht berücksichtigt. Innerhalb der Projektlaufzeit wurde das Modell in einer Prototypversion mit einem User-Interface erstellt. Die Validierung erfolgte durch Vergleich der Vorhersagen des Modells mit den Ergebnissen von Inspektionen von existierenden Gebäuden in ganz Europa. Aufgrund des beschränkten Projektzeitraumes konnten noch nicht alle notwendigen Daten für die Berechnung aller Faktoren generiert werden. Es ist jedoch daran gedacht, die noch fehlenden Faktoren des vorliegenden Modells durch zukünftige Forschungsarbeiten zu ergänzen.



SERVWOOD SLP Factor Model (Prototype)

User Interface V 1.0 (20.12.16)
M. Arnold, Empa

Use steps:
1 Quantify RSL (as close as possible to conditions of interest)
2 Describe reference conditions (for indicated RSL)
3 Select conditions for prediction (change only limited # of factors)

Performance parameter		Cracking density (ISO 4628-4)	
Failure limit		1,0	
Service life		Reference (RSL)	Prediction (ESL)
		10,0	10,0
		1	1,00

ISO 15688-8 factors				Conditions		Factor Product
Main factor	Category	Sub factor	Single dose parameter	Reference	Prediction	
Inherent quality	A Inherent performance (Coating)	A1	Dry film thickness	2 (30µm)	2 (30µm)	1,00
		A2	Pigmentation	clear	clear	1,00
		A3	Mechanical properties (tensile)	OK: E<400MPa & eR>30%	OK: E<400MPa & eR>30%	1,00
		A4	Tg	n/a due to incomplete experim. data in SERVWOOD		
	A5	Water permeability	n/a due to incomplete experim. data in SERVWOOD			
	A6	Adhesion				
	A7	Fungicides				
B Design (Substrate)	B1	Wood species	Pine	Pine	1,00	
	B2	Growth ring orientation	45°	45°	1,00	
	B3	Impregnation/Modification				
	B4	Surface quality				
C Work execution (Production)	C1	Tightness of joints / end grain				
	C2	Coating application				
	D Indoor environ.	Dx	(not used)			
E Outdoor environment (Exposure dose)	E1	Irradiance	L (0.60 W/m2)	L (0.60 W/m2)	1,00	
	E2	TOW	L (29%)	L (29%)	1,00	
	E3	Surface temperature	L (60°)	L (60°)	1,00	
	E4	Site specifics				
F Usage conditions (Situation of component)	F1	Inclination	n/a due to lack of 'failures' in MFER experiment			
	F2	Compass direction	n/a due to lack of 'failures' in MFER experiment			
	F3	Sheltering	e<0.15	e<0.15	1,00	
	F4	Detail design (cladding)	1Excellent	1Excellent	1,00	
G Maintenance	Gx	Inspection / Maintenance coat				

Source: SERVWOOD, WoodExter
no experimental data (in SERVWOOD) available

active factors

Abbildung 1: Lebensdauervorhersagemodell und Prototyp eines Tabellenkalkulations-Userinterface zur Abschätzung der Lebensdauer einer Beschichtung (Darstellung: EMPA)

Eine weitere Errungenschaft war die Entwicklung eines Modells zur Vorhersage der Farbveränderung von Lärchen- und Fichtenholz, das mit halbtransparenten Beschichtungssystemen beschichtet ist, einschließlich der Applikation von Wartungsanstrichen. Dieses Modell kann verwendet werden, um einem Konsumenten den Farbeindruck eines Holzbauteils darzustellen, der sich im Laufe der Zeit einstellen wird, abhängig von der Farbe des verwendeten Beschichtungsmaterials.

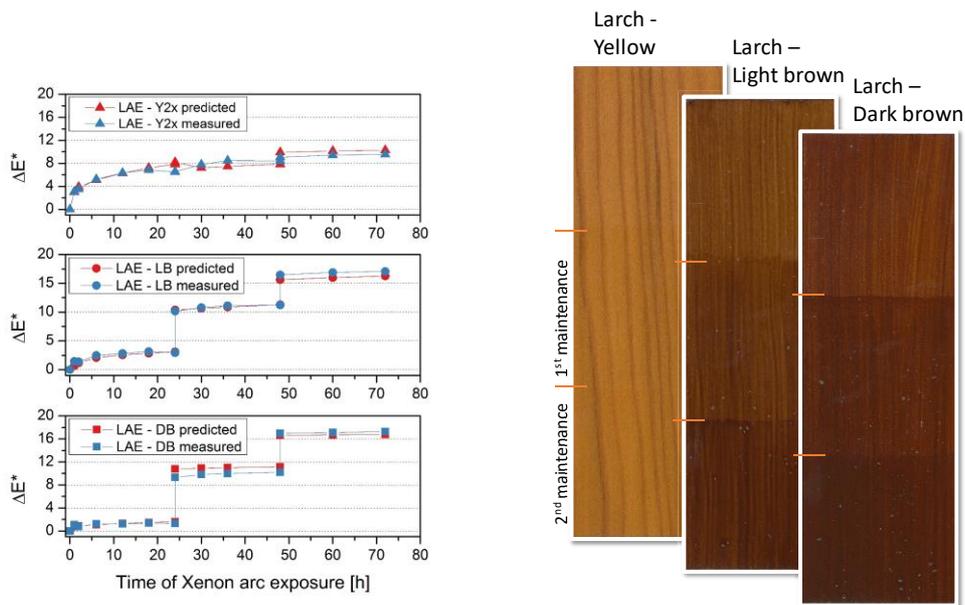


Abbildung 2: Farbvorhersagemodell für halbtransparente Wartungsanstriche auf Lärchenholz; Sprünge in den Farbänderungsverläufen zeigen Wartungsanstriche an (Bilder: HFA)

Dosisvariation in der natürlichen Bewitterung

Um die Variation der Bewitterungsdosis, wie sie an den verschiedenen Seiten und Fassaden eines Hauses auftritt zu untersuchen, wurde ein mehrseitiger Bewitterungsstand für Freilandversuche entwickelt. Dieser erlaubt die Bewitterung von beschichteten Proben in neun verschiedenen Richtungen vertikal und 45° geneigt in jede Himmelsrichtung sowie horizontal auf der Oberseite des Gestells. Drei dieser Bewitterungsstände wurden zusätzlich mit Sprüheinrichtung, einer Heizung oder einer Kombination davon ausgestattet, um zusätzlich zum Effekt der Himmelsrichtung auch die Dosis von Feuchtigkeit und Wärme in der natürlichen Bewitterung zu variieren.

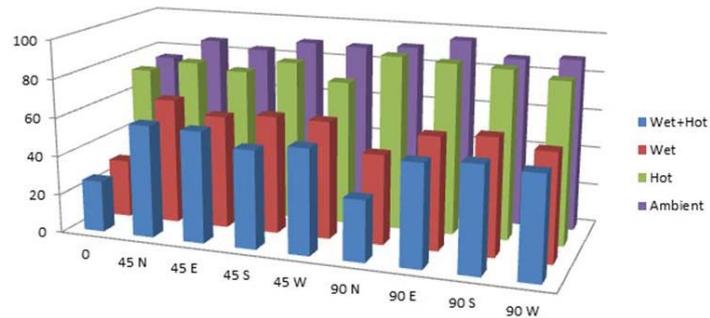


Abbildung 3: Der mehrseitige Bewitterungsstand ermöglichte Dosisvariationen in der Freilandbewitterung, einige waren mit zusätzlichen Wassersprüh- und Heizeinrichtungen ausgestattet; Ergebnisse der Glanzhaltung einer wasserbasierten Beschichtung, 3 Anstriche nach 9 Monaten Bewitterung (Bilder: PRA)

Auf diesen Bewitterungsständen wurden zahlreiche Unterschiede in der Dauerhaftigkeit der Beschichtungen beobachtet. Die meisten Veränderungen traten auf den horizontalen Oberflächen auf, gefolgt von den 45° geneigten Flächen, die Richtung Süden und Westen ausgerichtet waren. Pilzbewuchs trat verstärkt an Oberflächen auf, die Richtung Norden exponiert waren. Die geringsten Veränderungen wurden an vertikal bewitterten Proben festgestellt.

Die Bewitterungsstände mit variierender Feuchtigkeit und Wärmeeinwirkung zeigten Unterschiede in der Schadensentwicklung der Beschichtungen. Insbesondere die feuchten Bedingungen führten zu intensiverem Pilzbewuchs der Proben. Die Ergebnisse beschreiben in sehr guter Weise die Variationen in der Verwitterung von Holzbeschichtungen, die auf den verschiedenen Seiten eines Hauses und in unterschiedlichen Neigungen der Oberflächen von Holzbauteilen auftreten und sind eine wichtige Grundlage des Lebensdauervorhersagemodells. Obwohl die Dauer dieser Freilandbewitterungsversuche relativ kurz war, konnten erste Ergebnisse mit unpigmentierten Beschichtungssystemen erzielt werden. Pigmentierte Systeme haben geringere Unterschiede in Farbe und Glanz gezeigt. Es ist vorgesehen, diese Bewitterungsversuche zu verlängern, um zusätzliche Daten für die Verbesserung des Vorhersagemodells zu erhalten.

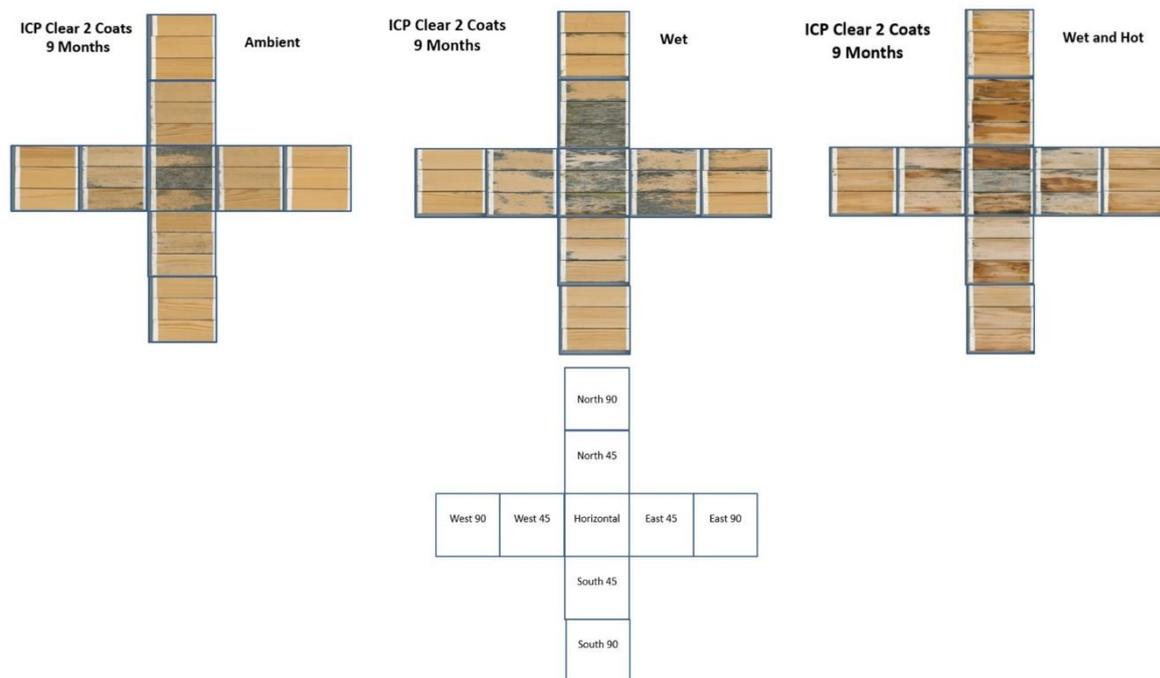


Abbildung 4: Proben mit lösemittelbasierten Beschichtungen, 2 Anstriche nach 9 Monaten Bewitterung auf den Seiten der Bewitterungsstände mit und ohne zusätzlicher Wasserbesprühung und Heizung (Bilder: PRA)

Es konnte gefolgert werden, dass die relative Leistungsfähigkeit von Beschichtungssystemen in der Freilandbewitterung sehr stark durch Faktoren wie der Orientierung beeinflusst wird. Die systematische Exposition auf dem mehrseitigen Bewitterungsstand ergab Daten, die eine Interpretation erlauben, wie die Dosis der Sonneneinstrahlung in tatsächlichen Anwendungsbedingungen moduliert wird. Die Bewitterungsstände zeigten eine größere Bandbreite des Verhaltens in Freilandbewitterung als normale 45° Bewitterungsgestelle. Sie haben es ermöglicht, einige Dosis-Faktoren für die Modifikation der Referenzlebensdauer zu erstellen. Die Anwendung von zusätzlicher Beheizung und/oder Beregnung hat Veränderungen in der Beschichtung verursacht, die mit anderen Bewitterungsklimata verglichen werden können. Der Effekt von Wasser auf den Abbau des Beschichtungsfilms und die biologische Aktivität einschließlich Schimmelbewuchs war größer als jener der Beheizung. Die Daten der mehrseitigen Bewitterungsstände werden zur weiteren Entwicklung der EN 927-1 verwendet, in der eine Einteilung nach dem Einfluss des Klimas und der Orientierung hinsichtlich der Beschichtungsqualität getroffen wird. Die Daten bieten zusätzliche Möglichkeiten zur Erklärung des Zusammenhanges zwischen künstlicher und natürlicher Bewitterung in Form von Dosis und Wirkung. Dies ist insbesondere deshalb von Bedeutung, weil beispielsweise die trockeneren Bedingungen in der künstlichen Bewitterung nicht alle Arten von Abbauvorgängen vorhersagen können, die bei Freilandbewitterung auftreten.

Wie lange ist es nass?

Viele Holzproben wurden mit einer Reihe von speziellen Sensoren ausgestattet, um die Reaktion von beschichtetem Holz bei variabler Bewitterungsdosis im Freiland und im Labor untersuchen zu können. Die Datenspeicherung in kurzen Intervallen ermöglichte es, den Zustand der Beschichtungen zwischen den Intervallen der visuellen Beurteilungen zu verfolgen. Im Besonderen haben sich Messungen der Holzfeuchtigkeit an der Grenzfläche zwischen Holz und Beschichtung mit einem neu entwickelten Sensor als exzellente Methode zur Bestimmung des Wartungszeitpunktes für Holzbeschichtungen herausgestellt. Wenn die ersten Risse in der Beschichtung einen Verlust der feuchteschützenden Eigenschaften verursacht haben, wurden höhere Schwankungen der Holzfeuchtigkeit an der Grenzfläche gemessen. Diese Erkenntnis kann die Basis für die Entwicklung von elektronischen Systemen sein, die den Wartungsbedarf von Holzbeschichtungen anzeigen. Innerhalb des Projektes war es eine wirkungsvolle Methode, um Informationen zur Dauerhaftigkeit von Beschichtungen in kontinuierlichen in-situ Messungen zu erhalten. Darüber hinaus wurden neue Sensoren zur Messung der Oberflächenfeuchtigkeit direkt auf beschichteten Holzoberflächen entwickelt, mit dem Fokus auf die Bestimmung der Zeitdauer in der die Oberfläche feucht ist („time of wetness“). Diese Sensoren auf den beschichteten Brettproben wurden erfolgreich mit einem kommerziellen Feuchtigkeitssensor neben den

Holzproben validiert. Es war jedoch nicht möglich den Einfluss der Farbe und der Wasserdurchlässigkeit von Beschichtungen auf die Zeitdauer der Oberflächenbefeuchtung in einem Standard-Bewitterungsversuch 45° Richtung Süden zu messen. Diese Sensoren haben Potenzial für weiterführende Forschungsarbeiten zur Bildung von Tau auf Fassadenoberflächen von Gebäuden mit hoher Wärmedämmung der Außenwände.

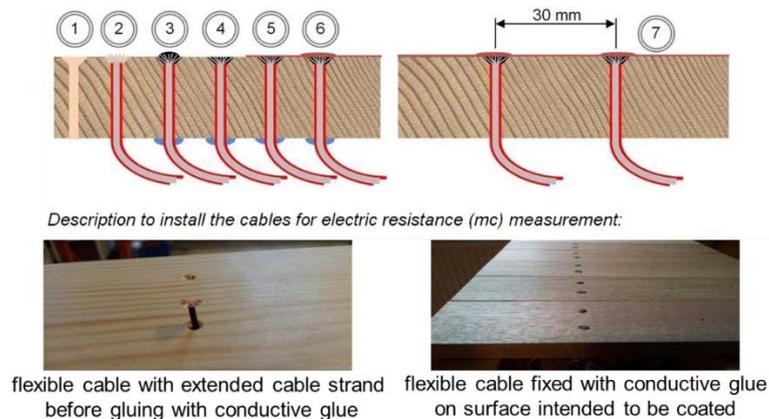


Abbildung 5: Bretter in der Freilandbewitterung mit Sensoren zur Messung der Oberflächenfeuchtigkeit (Bilder: HFA)

Feuchtigkeit auf beschichteten Brettoberflächen begünstigt Pilzbewuchs, welcher im Detail mit verschiedenen Probenreihen im Versuchsplan untersucht wurde. Der Pilzbewuchs wurde hauptsächlich in Form von Bläue vorgefunden. Ergebnisse haben eindeutig gezeigt, dass ein geringerer Pilzbewuchs bei pigmentierten Beschichtungen im Vergleich zu farblosen Beschichtungen aufgetreten ist. Auch bei einem höheren Gehalt an Biozid in einem farblosen lösemittelbasierten Beschichtungsprodukt war dieses anfälliger auf Bläuebewuchs als die pigmentierte Formulierung. In den wasserbasierenden Beschichtungen war der Anteil an Biozid bei den farblosen und pigmentierten Beschichtungen gleich hoch. Die pigmentierte wasserbasierte Beschichtung war jedoch weniger anfällig auf den Bewuchs mit Bläuepilzen. Nach 12 Monaten Freilandbewitterung war das Ausmaß des Bläuebewuchses gleich stark ausgebildet, unabhängig davon ob die Rückseiten der Proben versiegelt waren oder nicht. Das Wachstum von Bläuepilzen war nicht zwingend mit einer Rissbildung der Beschichtung verbunden.

Der Vergleich verschiedener Holzarten hat gezeigt, dass das Wachstum von Bläuepilzen bei Beschichtungen auf Lärchenholz und Meranti aufgrund von Unterschieden im Feuchtehaushalt gegenüber den Holzarten Fichte, Kiefer und Eiche geringer ausgebildet war. Die mehrseitigen Bewitterungsstände haben die Erkenntnis gebracht, dass das größte Befallsausmaß mit Bläuepilzen auf farblos beschichteten Proben mit Expositionsrichtung 45° gegen Norden aufgetreten ist und an der Oberseite des Bewitterungsstandes (horizontale Exposition).

In allen Probenreihen zeigten die Ergebnisse den selben Trend: pigmentierte Beschichtungen waren weniger vom Bläuebefall betroffen als farblose Beschichtungen. Der Einfluss der Pigmente kann mit folgenden Hypothesen erklärt werden:

- Dunkle Pigmente auf den Oberflächen von Holzproben führten zu einer höheren Oberflächentemperatur und damit zu weniger Feuchtigkeit auf der Holzoberfläche. Diese geringere Feuchtigkeit führt zu einem geringeren Pilzwachstum.
- Die Pigmente beinhalten Eisen. Eisen könnte einen biologischen Effekt auf Bläuepilze haben. Dieser Effekt wurde bereits auf Bakterien und Pilzkonidien nachgewiesen.
- Die Acidität der Oberflächen kann für farblos und pigmentiert beschichtete Flächen unterschiedlich sein.

In diesem Arbeitspaket wurde eine unterschiedliche Auslegung des Begriffes „Schimmelbewuchs“ zwischen den Forschungspartnern identifiziert. Bei der nächsten Überarbeitung der EN 927-3 wird daher empfohlen, die Wortwahl „Schimmelbewuchs“ zu diskutieren. Schimmelbewuchs inkludiert oberflächlichen Schimmel (reversibel) und Bläuepilze (irreversible Verfärbung). Oberflächliche Schimmelpilze können abgewaschen und damit von der Beschichtung leicht entfernt werden. Bläuepilze entwickeln sich sowohl an der Beschichtungsoberfläche als auch im Beschichtungsfilm. Oberflächenschimmelpilze bauen Beschichtungen nicht ab, während die Hyphen von



Bläuepilzen in die Beschichtung eindringen können und den Beschichtungsfilm zerstören. Da die Auswirkung auf die Integrität des Beschichtungsfilms unterschiedlich ist, wird empfohlen in EN 927-3 eine klarere Unterscheidung einzuführen. Da Bläuepilze zu Nadelstichen im Beschichtungsfilm führen können, kann die Lebensdauer der Beschichtung dramatisch reduziert werden, weil diese Schäden die Eindringung von Wasser verstärken können.

Kiefer ist die Holzart, die für Bewitterungsversuche nach EN 927-3 verwendet wird. Das Splintholz dieser Holzart ist sehr anfällig auf Bläuepilze. In der praktischen Anwendung und insbesondere für Fenster wird empfohlen, diese Holzart mit einem Holzschutzmittel gegen Bläuepilze zu schützen, welches als Imprägnierung als erste Schicht im Beschichtungsaufbau aufgebracht wird. Daher ist es auch zu empfehlen, bei Bewitterungsversuchen auf Kiefernholz eine Holzschutzimprägnierung mit Wirksamkeit gegen Bläuepilze im Beschichtungssystem anzuwenden, um die Lebensdauer der Beschichtung mit Relevanz für die Praxis vorhersagen zu können.

Bestätigung der künstlichen Bewitterungsmethode

Die Testpräzision der künstlichen Bewitterungsmethode, die in EN 927-6 beschrieben wird, wurde mit einem Ringversuch unter Teilnahme der Labors der Forschungspartner bestimmt. Die Variabilität der Prüfergebnisse zwischen und innerhalb der Labors wurde in derselben Größenordnung festgestellt, sie ist jedoch abhängig vom Ausmaß der aufgetretenen Veränderungen der Proben. Ein formelles Präzisionsstatement wurde für die Überarbeitung der EN 927-6 erstellt und eingebracht. Diese Methode verwendet fluoreszierende UV-Lampen, Wasserbesprühung und Kondensation. Die Laborbewitterungsgeräte ermöglichen in einem gewissen Ausmaß eine systematische Variation der Bewitterungsdosis, was in Freilandbewitterungsversuchen üblicherweise nicht möglich ist. Dosisvariationen wurden durch Modifikation von künstlichen Bewitterungszyklen untersucht und es hat sich herausgestellt, dass der Zyklus, der in der gegenwärtigen Norm beschrieben wird, eine optimale Kombination von UV-Bestrahlung und Feuchtebeanspruchung darstellt. Es wurde bestätigt, dass dieser künstliche Bewitterungszyklus die Charakteristika von wichtigen Abbaueffekten verschiedener Holzbeschichtungssysteme darstellen kann, wie sie auch in natürlicher Bewitterung auftreten, allerdings in kürzerer Zeit. Die Modifikationen der Zyklen mit längerer Beregnungszeit haben zur geringeren Abbauraten geführt, hauptsächlich deshalb, weil die Zeit der UV-Bestrahlung reduziert wurde um die Feuchtebeanspruchung zu erhöhen. Zyklen mit höherer Temperatur haben zu rascheren Abbauraten aber gleichzeitig zu geringen Holzfeuchtigkeiten der Proben geführt.

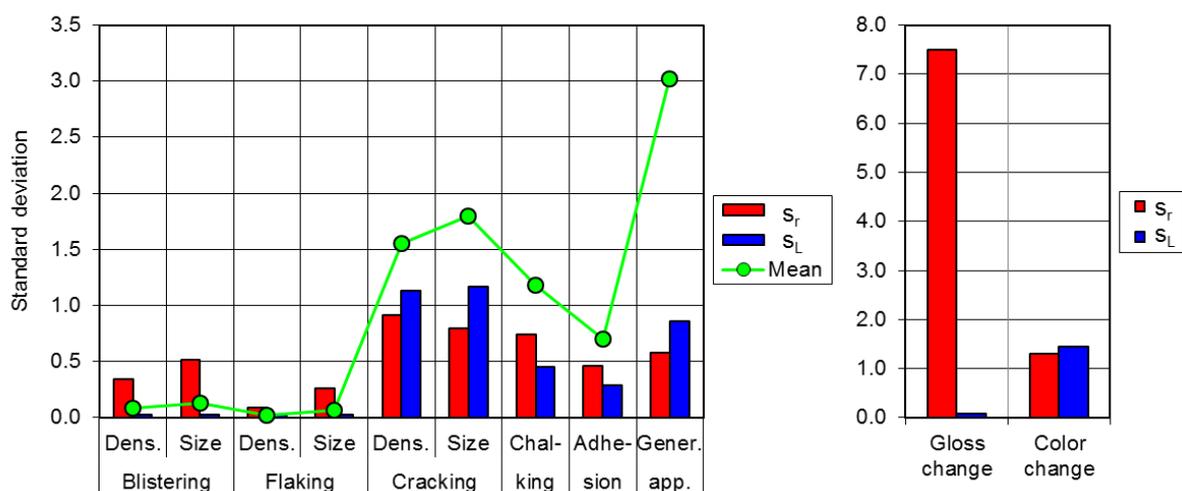


Abbildung 6: Variabilität innerhalb (s_r) und zwischen (s_L) den Labors, verschiedene Leistungsparameter (3 Anstriche ICP, 2016 Stunden) (Bilder: EMPA)

Der Ringversuch hat zu wichtigen Verbesserungen der künstlichen Bewitterungsmethode geführt, wie z.B. bessere Wartungspläne der Geräte, eine neue Routine zur Probenrotation innerhalb der Geräte und interne Datenchecks zum Beispiel durch Messungen von Farbe und Glanz auch auf den nicht exponierten Vergleichsproben zu jedem Beurteilungsintervall. Ein neues Referenzmaterial, das im Ringversuch getestet wurde, ermöglicht einen Vergleich der Dosis in verschiedenen Bewitterungsgeräten und kann als interner Kontrollstandard zur Überprüfung der Methode verwendet werden. Dieser „Wartungsindikator“ bestand aus

orangen PMMA Platten mit einer witterungslabilen weißen Deckbeschichtung, die unter den Einflüssen von Licht, Feuchtigkeit und Regen abgebaut wird. Der Abbau dieser Beschichtung in verschiedenen Schichtdicken resultierte in einer schrittweisen Freilegung des signalorangenen Untergrundes. Die Anwendung dieses Referenzmaterials in der künstlichen Bewitterung war erfolgreich. Für die Anwendung in der Freilandbewitterung würde es jedoch einer Weiterentwicklung bedürfen, um auch biologischen Einflüssen wie Schimmelbewuchs und frühzeitigen Ausfällen zu widerstehen.



Abbildung 7: Referenzmaterial für die künstliche Bewitterung (Bilder: HFA, EMPA)

Der Einfluss von Holzarten

Die Holzarten Eiche, Meranti, Lärche, Fichte und Kiefer mit Variationen der Jahrringlage wurden in einem Teil des Projektes untersucht, um den Einfluss des Holzuntergrundes zu erfassen. Beschichtungen auf Kiefer und Eiche zeigten die frühesten und deutlichsten Veränderungen, gefolgt von jenen auf Fichte und Beschichtungen auf Meranti und Lärche mit den geringsten Veränderungen. Die Jahrringlage hat die Dauerhaftigkeit bei Freilandbewitterung nur gering beeinflusst, jedoch wurden deutliche Effekte bei künstlichen Bewitterungsversuchen erzielt. Auf Nadelhölzern haben Bretter mit liegenden Jahrringen stärkere Veränderungen gezeigt als jene mit 5° bis 45° Jahrringlage, bei Proben aus Laubhölzern wurde kein eindeutiger Einfluss der Jahrringlage festgestellt. Die dominierenden Einflüsse wurden in diesem Versuch jedoch von den verschiedenen Beschichtungssystemen festgestellt. Deren Unterschiede zwischen pigmentierten und farblosen Beschichtungen hatten einen höheren Einfluss als die Variationen der Holzart und Jahrringlage.



Abbildung 8: Einfluss der Holzart und Jahrringlage (0° und 5°-45°) auf die Dauerhaftigkeit einer Beschichtung (Bilder: HFA)

Das Projekt SERVOWOOD (www.servowood.eu) war ein 3-jähriges Projekt gefördert von der Europäischen Union im 7. Rahmenprogramm (FP7/2007-2013) unter dem Fördervertrag FP7-SME-2013-606576. Der Autor dankt allen Konsortialpartnern für ihre Beiträge.

Weiterführende Literatur

- Forsthuber B, Ecker M, Grüll G. Treffsichere Prognosen: Farbveränderung vorhersagen. Farbe & Lack 2017;123(04):156–62.
- Forsthuber B, Monika E, Gerhard G. Fine-Grained Analysis. European Coatings Journal 2017(04).
- Forsthuber: Lebensdauervorhersage von Holzbeschichtungen, HFA-Magazin 1 2017
- Truskaller, Forsthuber, Grüll: Feuchtemonitoring von bewitterten Holzbauteilen, Holz-Zentralblatt, Nummer 39, 29. September 2017
- Grüll: Lebensdauervorhersage von Holzbeschichtungen – Konstruktionsmaterial Holz im Bauwesen. DIN-Mitteilungen 2017, 20-26
- Grüll, Ecker, Forsthuber: Damit beschichtetes Holz lange hält. Farbe & Lack 2016, 1: 56-61