

Schlussbericht

zum Vorhaben

Thema:

Entwicklung neuer thermo-mechanisch modifizierter Holzsubstrate aus einheitlichen Hölzern zur witterungsbeständigen Pulverlackbeschichtung

Zuwendungsempfänger:

Teilvorhaben 1: Institut für Holztechnologie Dresden gemeinnützige GmbH

Teilvorhaben 2: Technische Universität Dresden Institut für Stahl- und Holzbau

Förderkennzeichen:

Teilvorhaben 1: 22022317

Teilvorhaben 2: 22013718

Laufzeit:

01.03.2019 – 31.08.2022

Monat der Erstellung:

10/2022

Datum der Veröffentlichung (Versand an TIB): 11. April 2023

Gefördert durch:



**Bundesministerium
für Ernährung
und Landwirtschaft**

**aufgrund eines Beschlusses
des Deutschen Bundestages**

Das diesem Bericht zugrundeliegende Vorhaben wurde aufgrund eines Beschlusses des Deutschen Bundestages mit Mitteln des Bundesministeriums für Ernährung und Landwirtschaft (BMEL) über die Fachagentur Nachwachsende Rohstoffe e.V. (FNR) als Projekträger des BMEL für das Förderprogramm Nachwachsende Rohstoffe unterstützt. Die Verantwortung für den Inhalt dieser Veröffentlichung liegt bei der Autorenschaft

Inhalt

I. Kurzbericht.....	4
1 Aufgabenstellung	4
2 Planung und Ablauf des Vorhabens	5
3 Resümee der wesentlichen Ergebnisse	7
a) Arbeitspakete und Meilensteine.....	7
b) Zusammenfassung.....	10
II. Ausführliche Darstellung der Ergebnisse	13
1 Stand der Technik.....	13
1.1. Holz und Holzwerkstoffe	13
1.2. Herstellung von Holzwerkstoffen.....	16
1.3. Flüssigbeschichtungen für Holz im Außenbereich	19
1.4. Pulverlackierung von Holz und Holzwerkstoffen	20
1.5. Vorbehandlung von Holzwerkstoffen für die Pulverlackierung.....	24
2 Erzielte Ergebnisse.....	27
2.1 AP 1 – Auswahl und Charakterisierung der Rohstoffe (FS1 / FS2).....	27
2.2 AP 2 - Herstellung der Referenzmaterialien und Charakterisierung (FS1 / FS2).....	34
2.3 AP 3 – Technologieanpassung zur Herstellung der mHBS (FS 2)	40
2.4 AP 4 - Eignung der ionFl als Primer bei der Holzbeschichtung (FS 1)	45
2.5 AP 5 - Entwicklung neuer mHBS auf Basis schnellwachsender Hölzer (FS 2)	50
2.6 AP 6 bis AP 8 - Pulverlackbeschichtung der mHBS und deren Charakterisierung sowie Technologie- und Materialoptimierungen (FS1 / FS2).....	57
2.7 AP 9 - Technische und wirtschaftliche Bewertung (FS1 / FS2).....	88
2.8 AP 10 – Dokumentation und Berichterstattung.....	103
3 Verwertung.....	104
4 Erkenntnisse von Dritten	105

5 Veröffentlichungen	105
Anhang.....	106
Teilvorhaben 1: „Witterungsbeständige Pulverbeschichtungen auf Holz“	106
1. Ziel und Gegenstand des Teilvorhabens	106
2. Bearbeitete Arbeitspakete.....	106
3. Wesentliche Ergebnisse des Teilvorhabens	108
Teilvorhaben 2: „Neue modifizierte Holzsubstrate“.....	111
1. Ziel und Gegenstand des Teilvorhabens	111
2. Bearbeitete Arbeitspakete.....	111
3. Wesentliche Ergebnisse des Teilvorhabens	113
Literatur	116

I. Kurzbericht

1 Aufgabenstellung

Ziel des geplanten Vorhabens war es, ein neuartiges Verfahren zur Verbesserung der Witterungsbeständigkeit, Formbeständigkeit und Dauerhaftigkeit holzbasierter Substrate, die für Produkte in Außenanwendungen wie z. B. Fassadenelemente oder Spielgeräte zum Einsatz kommen, zu entwickeln. Realisiert werden sollte dies durch die Kombination zweier Lösungsansätze.

1. Die Entwicklung neuer **thermisch modifizierter Holzbasissubstrate** (mHBS) zur Erzielungverbesserter holzbasierter Substrate für die nachfolgende Beschichtung.
2. Die Entwicklung einer **witterungsbeständigen, umweltschonenden Beschichtung** für diese neuen mHBS auf Basis der **Pulvertechnologie**.

Für die **neuen mHBS** waren die geeigneten einheimischen schnell wachsenden Hölzer so zu verdichten und in Form von Einzellamellen zusammenzufügen, dass sie als plattenförmiger Holzwerkstoff oder später als 3-D-Form beschichtet werden konnten. Die Technologie des Verdichtens gestattet es z. B. **schnell wachsende einheimische Hölzer** wie die Pappel, die aufgrund ihrer Zellstruktur sonst wenig Verwendung finden, für dieses Vorgehen zu nutzen. Auch können vorhandene Laubhölzer wie Birke verarbeitet werden, da durch die Verwendung kleinformatigen Zuschnittes auch Holz mit geringerer Querschnittsgröße zur Verarbeitung gelangen kann. Damit trägt die thermo-mechanische Verdichtung, wie es der Ansatz der mHBS darstellte, zu einer effektiveren Holznutzung und einem naturnahen Waldbau bei. Im Rahmen des Vorhabens waren folgende Teilziele für die Herstellung der mHBS zu erreichen:

1. Positive Beeinflussung der Materialeigenschaften (Dichte, Porosität) des Holzes beim Verdichten und Herstellen der mHBS
2. Technologieoptimierung des Verdichtens der Hölzer zur Reduzierung des Quell- und Schwindvorganges
3. Der Klebstoff zur Verklebung der Lamellen darf keinen Einfluss auf die Beschichtung besitzen.
4. Geeignete Oberflächeneigenschaften für die nachfolgende Pulverlackbeschichtung der mHBS
5. Optimierung des Umformungsprozesses der mHBS

Die Beschichtung sollte durch Einsatz der **Pulvertechnologie** erfolgen. Pulverlacke gelten aufgrund ihrer Lösemittelfreiheit, dem reduzierten Gehalt an flüchtig organischen Verbindungen (VOC) und der Wiederverwertbarkeit von Pulverresten als umweltfreundliche Variante der funktionalen und dekorativen Beschichtung unterschiedlichster Werkstoffe und Produkte. Während im Möbelbereich die Pulverbeschichtung von MDF zum Stand der Technik gehört, gestaltet sich die Beschichtung von Holz noch immer als schwierig durch die im thermischen Vernetzungsprozess austretende Feuchtigkeit und infolgedessen der verringerten Beschichtungsgüte. Auch stellt der hohe elektrische Widerstand des Holzes für eine homogene elektrostatische Pulverlackapplikation eine Hürde dar.

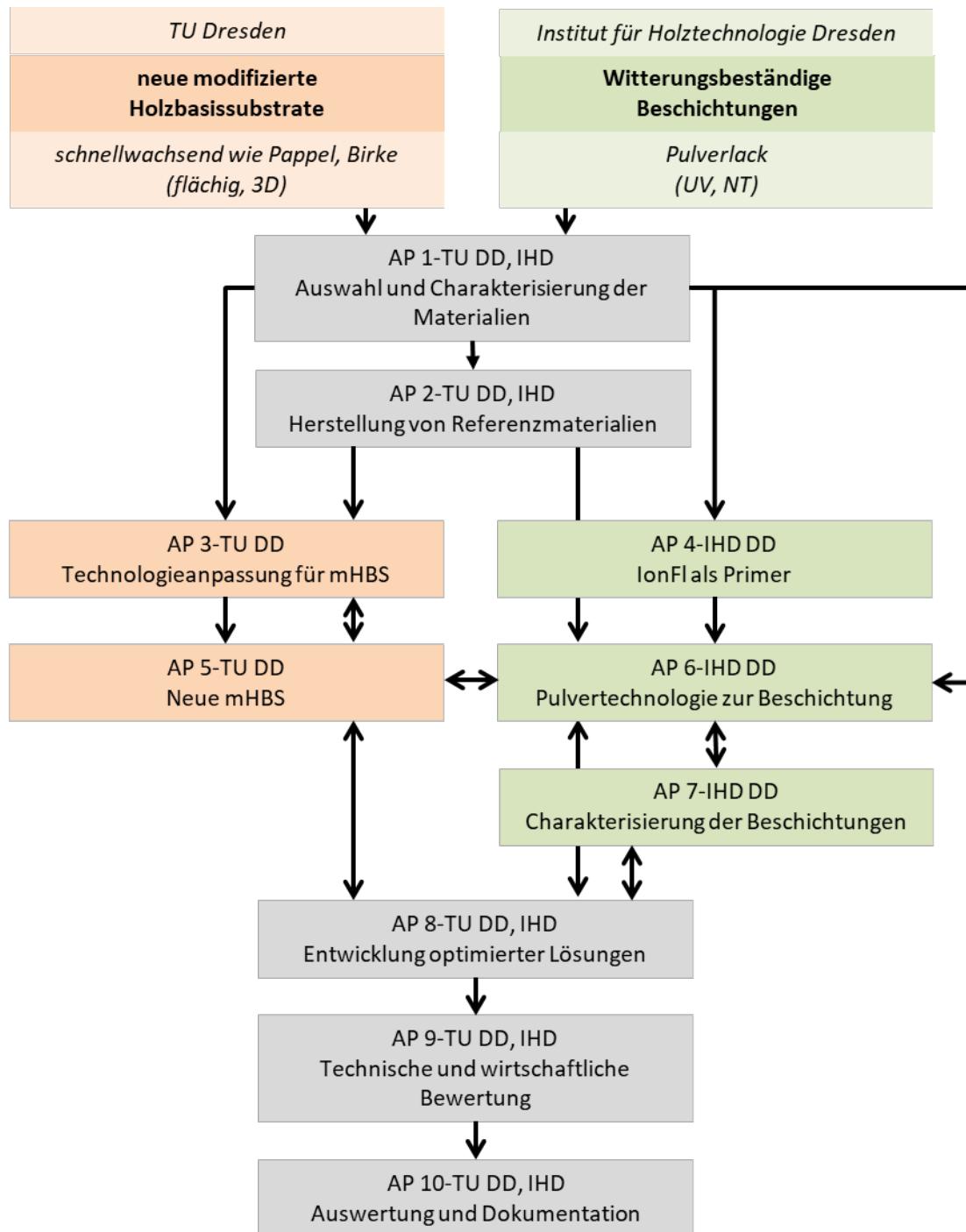
Teilziele für die Entwicklung der dauerhaften Pulverlackbeschichtungen auf Holz waren deshalb:

1. Vorbereitung der mHBS-Oberfläche für die Pulverlackierung durch Verbesserung der Leitfähigkeit bzw. Reduzierung des elektrischen Widerstandes ($R_o < 10^9 \Omega$) z. B. durch Einsatz ionischer Flüssigkeiten (ionFl) als Primer.
2. Die Präparation der mHBS mit ionFl darf die mHBS nicht verändern und die nachfolgende Beschichtung in ihren finalen Eigenschaften nicht beeinflussen.
3. Einsatz von Niedertemperatur- oder UV-Pulverlacken mit Einbrenntemperaturen unter 130°C.
4. Pulverlackschichten von 80 – 100 µm, die maximal 10 bis 15% über die Gesamtschicht im Auftrag schwanken dürfen und im Gitterschnitt (Haftfestigkeit, DIN EN ISO 2409 bzw. nach Rosenheimer RL) unter 2 liegen.

Pulverlackbeschichtungen auf mHBS, die diese Bedingungen erfüllen, waren dann weiteren Untersuchungen wie der Licht- und Witterungsbeständigkeit (mit Anforderung für Holzwerkstoffe (HPL) im Außenbereich gemäß EN 438-2 und 438-6) zu unterziehen.

2 Planung und Ablauf des Vorhabens

Die Erarbeitung der oben beschriebenen Teilziele sollte durch ein Ineinandergreifen der zu absolvierenden Arbeiten beider Partner, dem IHD (Forschungsstelle 1, FS1) und der TU Dresden (Forschungsstelle 2, FS2), erfolgen. So war es wichtig, zuerst die Basisdaten für Materialien und Technologien zu ermitteln, indem Referenzsubstrate beschichtet, erste modifizierte Holzsubstrate (mHBS) hergestellt und für die zu nutzenden Materialien die relevanten Parameter ermittelt wurden. Als Holz wurden Pappel und Birke, da schnellwachsend, und Buche sowie Fichte in erste Untersuchungsschritte einbezogen. Zur Pulverlackierung lagen aus einer Recherche fast 20 NT- und UV-Pulverlacke vor, die nach Datenauswertung auf 12 Produkte reduziert wurden. Diese wurden in ersten Beschichtungen auf Musterblechen und Referenzsubstraten wie z. B einer Referenz-MDF, Lärche oder Acocoya bewertet und deren weiterer Einsatz fallweise entschieden. Sowohl die technologischen Entwicklungen und Optimierungen beim Verdichten als auch die für das Pulverlackieren ab AP 4 fanden in steter Zusammenarbeit und in engen Absprachen zwischen beiden Forschungspartnern statt. So lagen nach dem Verdichten von Pappel, Birke, Fichte und Buche die Materialien vor. Da bereits Lärche als Referenz beim Pulverlackieren problematisch war, verhinderte der Harzaustritt der verdichteten Fichte die Pulverlackannahme. Die Buche hingegen verfärbte ich durch den Temperatureinfluss beim Verdichten zu stark. Deshalb erfolgten alle Entwicklungsschritte im Projektverlauf mit den schnellwachsenden Hölzern Pappel und Birke. Nach Optimierungsschritten sollte ein Demonstrator, d. h. ein beschichtetes neues Holzsubstrat hergestellt werden. Zu diesem Zweck wurden zusätzlich für beide Technologien, Verdichten und Pulverlackieren, Industrieversuche bei den begleitenden Industriepartnern durchgeführt. Final erfolgte dann die Bewertung dieser Versuche.



Die beiden fachlichen Schwerpunkte erforderten die fachübergreifende Zusammenarbeit der beiden Forschungseinrichtungen, dem IHD und der TU Dresden. Letztere hat seit vielen Jahren Kompetenzen aufgebaut, um eine spezielle Verpresstechnologie für das Reduzieren von Porenvolumen bei Holz anwenden zu können. Dieses Know-how sollte genutzt werden, um die neuen, für Außenanwendungen geeigneten, Holzsubstrate herzustellen. Das IHD besitzt seit vielen Jahren das Know-how in verschiedenen Beschichtungs- und Vernetzungsverfahren, dazu gehört auch die Pulverlack-applikation. IHD führte bereits verschiedene Forschungsarbeiten auf diesem Gebiet durch, so dass sowohl die Potenziale als auch die Risiken bei Anwendungen der Pulverlackierung bekannt sind. Die

Entwicklungsarbeiten mit ionischen Flüssigkeiten als Primer, der Einsatz der UV- oder Elektronenstrahlen (ES)-Technologie bei der Pulververnetzung sollten in Kombination mit den neuen Holzsubstraten Produkte für Außenanwendungen tauglich machen. Während der Projektbearbeitung fanden zwischen beiden Forschungsstellen Projektabstimmungen aller 2 Monate statt. Die überwiegende Laufzeit des Projektes war begleitet von Einschränkungen durch die Corona-Pandemie. Die Meetings wurden teilweise online durchgeführt, so dass auch mit den Industriepartnern in bilateralen Absprachen oder in den stattgefundenen 3 großen Projektmeetings fachliche Fortschritte dargelegt und Optimierungen gemeinschaftlich festgelegt werden konnten. Besonders hervorzuheben sind die Industrieversuche, die bei mehreren Partnern in dieser Zeit stattfanden. Trotz der durch die Pandemie aufgetretenen personellen Engpässe und auch Schwierigkeiten bei Materialbereitstellungen fanden die zusätzlichen Versuche bei den Industriepartnern statt, die die Ergebnisse in den Laboren der Forschungseinrichtungen bestätigen konnten.

3 Resümee der wesentlichen Ergebnisse

a) Arbeitspakete und Meilensteine

Arbeitspakete (AP) (lt. Planung im Antrag)	Bearbeitungszeitraum (lt. Balkenplan im Antrag)	Zielerreichung
AP 1 Auswahl und analytische Charakterisierung erforderlicher Rohstoffe	03/2019 bis 05/2019	Es wurden die Basismaterialien für die zu verdichtenden Holzsubstrate ausgewählt, dies betraf Birke, Pappel, Buche und in einigen Fällen Fichte. Für die Verklebung der verdichteten Hölzer wurden Klebstoffe ausgewählt. Hier kamen die Klebstoffe Phenolharz, PVAC 2K; PUR 1K in Betracht. Pulverlacke, zur Beschichtung von Referenzmaterialien und mHBS, wurden recherchiert und beschafft (12 Pulverlacke, NT und UV) sowie deren Eigenschaften zusammengetragen, teilweise bestimmt bzw. auch erste Beschichtungen vorgenommen. Die ionischen Flüssigkeiten ionFl wurden anhand ihrer Leitfähigkeit und Löslichkeit (bevorzugt in Wasser) ausgewählt. Für die Beschichtung der Referenzen in AP 2 wurden die Substrate ausgewählt. Das Arbeitspaket wurde wie geplant abgeschlossen.
AP 2 Herstellung von Referenzmaterialien und Charakterisierung	05/2019 bis 09/2019	Die Referenzsubstrate wurden beschichtet. Hierfür erfolgte zum einen die Auswahl von 4 Flüssiglacken und auch der Einsatz von 3 Pulverlacken. Die Beschichtungen wurden appliziert und in einem zweistufigen Verfahren verschiedenen charakterisierenden Prüfmethoden unterzogen, die als Vergleich zu den später zu beschichtenden mHBS herangezogen wurden. Das Arbeitspaket wurde wie geplant abgeschlossen.
AP 3 Technologieanpassung zur Herstellung der mHBS	06/2019 bis 10/2019	Mit Festlegung der Versuchsparameter wurden die Temperaturen zur thermischen Behandlung sowie geringe und starke Verdichtungen von 20% bis 70% vorge-

Arbeitspakete (AP) (lt. Planung im Antrag)	Bearbeitungszeitraum (lt. Balkenplan im Antrag)	Zielerreichung
		<p>sehen. Es wurde ein Press- und Abkühlungsregime entwickelt, um das Rückverformung zu reduzieren. Die Versuchsergebnisse der Festigkeiten für das Einzelmaterial lagen im Rahmen der Erwartungen und korrelierten mit der Dichte. Nach der Technologieanpassung erfolgte die Holzauswahl zu Gunsten von Pappel und Birke.</p> <p>Das Arbeitspaket wurde wie geplant abgeschlossen.</p>
AP 4 Untersuchungen zur Eignung ionFL als Primer	07/2019 bis 11/2019	<p>Es erfolgten die Untersuchungen zur geeigneten Applikation der ionFL auf Holzsubstrate unter Variation von Sprühabstand, Druck und Zeit, zur Nutzung verschiedener Lösemittel, der Vorgehensweise bei Trocknung der ionFL, der erzielbaren Oberflächenwiederstände sowie deren Langzeitstabilität. Die Applikation der ionFL auf mHBS wurde optimiert und zwei ionFL schienen besser geeignet. Ein Aufquellen der Fasern fand statt.</p> <p>Das Arbeitspaket wurde wie geplant abgeschlossen.</p>
AP 5 Entwicklung neuer mHBS auf Basis schnellwachsender Hölzer	11/2019 bis 08/2020	<p>Für die Herstellung geeigneter mHBS fand die Klebstoffauswahl anhand Untersuchungen statt. Die Herstellung eines möglichst homogenen Dichteprofiles unter Vermeidung lokaler Oberflächenverdichtung wurde durch Optimierung von Prozessparametern gesteuert. Dabei wurden insbesondere unterschiedliche Dichteprofile und Modifikationsdicken von Pappel und Birke, der eher sehr leichten und damit anspruchsvolleren Hölzer, untersucht. Neben der Beeinflussung des Porenvolumens erfolgte durch die Variation thermischer Prozessparameter die Reduzierung der hygrophoben Eigenschaften. Es wurde eine Vorgehensweise zum post-Treatment zur Reduzierung des Rückverformung erarbeitet.</p> <p>Das Arbeitspaket wurde wie geplant abgeschlossen.</p>
AP 6 Einsatz der Pulvertechnologie zur Beschichtung der mHBS	03/2020 bis 01/2021	<p>Die Pulverbeschichtung wurden mit den ausgewählten Pulverlacken unter Variation der Konditionierungsbedingungen für die mHBS und der technologischen Bedingungen beim Pulverbeschichten realisiert. Dabei waren mHBS verschiedener Porenvolumina einzusetzen.</p> <p>Während der Bearbeitung zeigten sich Haftungsprobleme der Pulverlackschichten. Offenbar resultierten sie aus in den Beschichtungen identifizierten Verblasungen und dem sehr inhomogenen Schichtauftrag. Diese Fehler ließen sich folgend reduzieren z. B. durch gezielten Mehrschichtauftrag oder Pulverlackauftrag mit Gegen-corona.</p> <p>Das Arbeitspaket wurde wie geplant abgeschlossen.</p>
AP 7 Charakterisierung der beschichteten Materialien	03/2020 bis 08/2021	<p>Beide Arbeitspakete sind nicht voneinander zu trennen. Bei den Optimierungen konnten die Ursachen der Schichtinhomogenitäten aufgeklärt und teilweise behoben werden. Unter Beachtung des Faserverlaufes bei Verklebung der Paneele und dem post-treatment nach Verdichtung wurden Verformungen während der Pulverlackvernetzung weitestgehend vermieden. Gegenko-</p>
AP 8 Entwicklung optimierter Lösungen für Technologie und Material	06/2020 bis 02/2022	

Arbeitspakete (AP) (lt. Planung im Antrag)	Bearbeitungszeitraum (lt. Balkenplan im Antrag)	Zielerreichung
		<p>rona bei der Pulverlackbeschichtung vermeid Kanteneffekte und in diesem Bereich Verblasungen, Zweischichtauftrag von NT-Pulverlack (Primer und Decklack) oder Vorvernetzen (Angelieren) von UV-Pulverlack und dessen Deckbeschichtung zeigten gute Endergebnisse. Das Erhöhen der Leitfähigkeit durch Leitprimer (Formulierungen mit Additiven) oder ionFl war nicht geeignet für eine gute Schichtqualität. Die Vernetzung mit Elektronenstrahlen schien die Schichtperformance anzuheben, hier eher bei Birke.</p> <p>Das Arbeitspaket wurde wie geplant abgeschlossen.</p>
AP 9 Technische und wirtschaftliche Bewertung	03/2022 bis 05/2022	<p>Die Prozesskosten zur Herstellung von mHBS und 3D-Formkörpern werden dominiert durch den Schritt der thermo-mechanischen Verdichtung. Die Verdichtung, die Herstellung von Paneelen und deren Umformung benötigt die industrielle Umsetzung als Massenprodukt, um wirtschaftlich dargestellt werden zu können. Die prinzipielle Machbarkeit an kleineren Probekörpern wurde nachgewiesen und ist mit dem vorhandenen technischen Equipment umsetzbar.</p> <p>Die Pulverlackierung insbesondere von dem geeigneten NT-Pulverlack fand erfolgreich im Industrievorversuch statt. Die beschichteten flächigen Demonstratoren lieferten gute Ergebnisse im Hinblick auf Schichthaftung und Farbstabilität nach Bewitterung. Die mechanische Beständigkeit war noch nicht gegeben. Die 3D-Formate ließen sich nur außen mit Pulverlack beschichten, innen wurden sie mit Flüssiglack versehen. Die Beschichtung durch Pulverlackierung nimmt an den Gesamtkosten beim Arbeiten mit mHBS ca. 20 % ein.</p> <p>Das Arbeitspaket wurde wie geplant abgeschlossen.</p>
AP 10 Dokumentation und Prüfung der Patentierbarkeit	06/2022 bis 08/2022	<p>Es wurde kein Schutzrecht erworben. Die Ergebnisse wurden entsprechend zusammengefasst.</p> <p>Das Arbeitspaket wurde wie geplant abgeschlossen.</p>

Meilensteine (M) (lt. Planung im Antrag)	Fälligkeit (lt. Balkenplan im Antrag)	Zielerreichung
M 1 Schaffung der Rohstoff- und Technologiebasis	11/2019	<p>Das Ziel, eine Materialbasis für das Projekt zu schaffen, deren Eigenschaften charakterisiert wurden, wurde durch die Bearbeitung der Arbeitspakete (AP) 1, 2, 3 und 5 erreicht.</p>
M 2 / M3 Produkt und Technologieentwicklung Teil 1/2	04/2020 und 09/2021	<p>Für die mHBS wurden die Parameter optimiert, Variationen von Verdichtung und pre-treatment durchgeführt sowie auch in der Verklebung der Paneele (Faserrichtung), um die Schichtinhomogenitäten und auch Verformungen zu reduzieren. Buche, als nicht schnellwachsendes etwas härteres Holz, ließ sich nur mit höherem Aufwand (Presszeit, Temperatur) bearbeiten und wurde aufgrund starker Verfärbungen nicht fortgeführt. Für Pappel und Birke konnte der Prozess bis zum mHBS optimiert</p>

Meilensteine (M) (lt. Planung im Antrag)	Fälligkeit (lt. Balkenplan im Antrag)	Zielerreichung
		<p>werden.</p> <p>Der Einsatz der ionFl wurde in AP 4 erarbeitet, ein Optimum für die Applikation ermittelt. Die ionFl wurden auch bis AP 8 (Optimierung) noch untersucht, das Aufquellen der Holzfasern erwies sich jedoch als nicht vermeidbar. Es wurden andere Primer eingesetzt. Durch die Ursachenauflärung bei fehlerhaften Beschichtungen ließen sich der Prozess der Pulverlackapplikation bis zur -vernetzung optimieren. Alle Parameter wurden wie geplant für die Herstellung des Demonstrators zusammengefasst und sowohl in den Forschungsstellen als auch für Industrieviersecke in M4 herangezogen.</p> <p>Die Ziele für M2 und M3 wurden wie geplant erreicht.</p>
M4 Demonstrator	08/2022	<p>Es wurden Platten und 3D-Formen (Rohre) als Demonstratoren in den Laboren der Forschungsstellen hergestellt bzw. beschichtet. Platten wurden ebenfalls bei den Industriepartnern als Demonstrator hergestellt und beschichtet. Die Wirtschaftlichkeit der Prozesse wurde bewertet. Für eine verbesserte Außenbeständigkeit müssen das Quell- und Schwindungsverhalten noch besser beherrscht werden. Schutzrechte wurden nicht angemeldet.</p> <p>Das Ziel der Herstellung von Demonstratoren wurde in M4 erreicht.</p>

b) Zusammenfassung

Im Verbundvorhaben wurden in Zusammenarbeit der Verbundpartner IHD und TU Dresden neue Holzsubstrate mit reduziertem Porenvolumen entwickelt und dafür geeignete Pulverlackbeschichtungen evaluiert.

Ziel des Teilverhabens der TU Dresden war es, die neuen holzbasierten Substrate durch Einsatz einheimischer schnellwachsender Hölzer für die anschließende Beschichtung durch das IHD zur Verfügung zu stellen.

Als schnellwachsende Hölzer wurden nach ersten Schritten Birke und Pappel als Optimum ausgewählt. Die Herstellung der modifizierten Substrate erfolgte zunächst mit 40 % Verdichtung und wurde dann auf Grund geringerer Welligkeit und Inhomogenitäten in der Dichtevertteilung bei 20 % Verdichtung eingestellt. Um eine Reduzierung der Rückverformung zu erreichen, wurden thermische pre- und post-Prozesse entwickelt. Hierbei stellten sich Temperaturen von über 220 °C bei kurzzeitiger Einwirkdauer von 120 s als vorteilhaft heraus. Eine Reduzierung der Rückverformung wurde an modifizierten Holzsubstraten (Platten) durch die Intensivierung einer nachträglichen Be-dampfung erreicht. Problematisch war die Verringerung der mechanischen Festigkeiten unter zu-

nehmender Temperatureinwirkung von bis zu 20 %. An 3D-Formkörpern ließ sich teilweise eine Verbesserung der Rückverformung unter zu Hilfenahme von Fixierungsvorrichtungen erreichen. Hier wurde gegenüber der vollständigen Rückverformung (100%) eine Reduzierung um 15% erreicht.

Im Ergebnis wurden dem IHD schrittweise optimierte Holzsubstrate durch die TU DD übergeben. Das Ziel des IHD-Teilvorhabens war dann, die speziell verdichteten Substrate mit Pulverlacken zu beschichten, um sie für den Außeneinsatz witterungsbeständig auszustatten. Dazu erfolgte zuerst die Eignungsbewertung einer Vielzahl an NT-Pulverlacken und mehrerer UV-Pulverlacke. Das dabei erarbeitete technologische Know-how wurde für die Untersuchungen der Konditionierung oder für vorbereitende Schritte zur verbesserten Pulverlackannahme genutzt. Verschiedene Primer wie z. B. Leitprimer (Formulierungen mit leitfähigen Additiven), spezielle ionische Flüssigkeiten oder auch primernde Pulverlacke (Pulverlack-Primer) wurden untersucht. Eine spezielle ionische Flüssigkeit wurde herausgearbeitet, die nach der Optimierung deren Konzentration und Applikationsverfahren den Oberflächenwiderstand des Holzsubstrates auf 10^7 - $10^8 \Omega$ herabsetzte und diesbezüglich gute Voraussetzungen für eine anschließende Pulverlackapplikation lieferte. Eine Pulverlack-Primerschicht erwies sich für den nachfolgenden Decklack in Hinblick auf die gesamte Schichtperformance verglichen mit einem Leitfähigkeitsprimer als besser geeignet. Der Pulverlack-Primer ist ein Pulverlack, der als Grundierung genutzt wird und auf den nachfolgenden Decklack abgestimmt ist und damit zur besseren Beschichtbarkeit führt.

Die in ihrem Porenvolumen um 20 % reduzierten Holzpaneele wurden mit 1K PUR- oder Phenolharz-Klebstoff zu Substraten verklebt, die auf die thermischen Prozessstufen des Einbrennens oder Vernetzens von Pulverlack nicht negativ reagierten. Bei Pulverlack-Schichtdicken von 80 bis 100 μm zeichneten sich die Klebefugen jedoch häufig ab, die Schichthomogenität war in diesen Bereichen ungenügend. Die 2-fach-Pulverlackierung eines NT-Pulverlackes mit Primer- und Decklack erwies sich diesbezüglich als gut geeignet, wobei die Grundierung in vergleichbarer Schichtdicke erfolgte. Die Reduzierung des Porenvolumens des Holzes (bis 50%) verhinderte nicht vollständig Ausgasungen bzw. Verblasungen beim Einbrennen bzw. Vernetzen des Pulverlackes. Trotz der wirkenden Temperaturen bei der Verdichtung des Holzes traten später noch Holzinhaltsstoffe aus. Zu schnelles Vernetzen z. B. der UV-Pulverlacke verhinderte das Austreten solcher Gase, die sich als Verblasungen in den Beschichtungen zeigten. Ein weiterer Effekt kam zusätzlich hinzu. Der Pulverlack wurde auf der Oberfläche nicht gleichmäßig angenommen, Unterschiede in der Pulverlack-Schichtdicke führten zu Verblasungen durch z. B. Überhitzung. Ursachen für die Schichtinhomogenitäten waren u. a. ungleichmäßige Porengrößen an der Substratoberfläche, wodurch die Feuchteannahme bei Konditionierung oder die Beschichtbarkeit mit Leitprimern auch nur ungleichmäßig erfolgen konnte. Parameter- und Technologieoptimierungen sowie das zweischichtige Lackieren führten zu verbesserten Beschichtungen auf Birke und Pappel.

Für die Untersuchungen mit UV-Pulverlacken kamen Systeme ohne und mit Pigment zum Einsatz. Sowohl LED-UV als auch Breitband-UV vernetzten die einschichtig aufgetragenen Pulverlacke zu schnell, so dass aufsteigende Ausgasungen nicht mehr austreten konnten. Sichtbar wurde dieser Effekt über die gesamte Fläche und insbesondere bei Klarlacken. Das Vorvernetzen (Angelieren) einer ersten Schicht mit nachfolgend applizierter und durchvernetzter Deckschicht verbesserte die Qualität dieser Beschichtungen. Die Vernetzung der UV-Pulverlacke mit Elektronenstrahlen lieferte qualitativ bessere Beschichtungen als bei Einsatz von UV-Strahlung, da keine zusätzliche Erwärmung während der Vernetzung zu weiteren Verblasungen oder Ausgasungen führten.

Industrieversuche fanden sowohl im Verdichten des Holzes als auch dem Beschichten statt. Die Umsetzung der Ergebnisse zur Herstellung modifizierter Holzsubstrate in Industrieversuchen konnte mit guten Ergebnissen durchgeführt werden. Hinsichtlich Materialeffizienz und Wirtschaftlichkeit bedarf es jedoch des Einsatzes anderer Technologien wie z. B. der Erwärmung des Holzsubstrates im kurzwelligen Bereich oder der kontinuierlichen Verdichtung mit abgestimmten Heiz-, Press- und Kühlbereichen, analog zur Herstellung von Holzwerkstoffen (ContiRoll etc.). Der NT-Pulverlack mit speziellem Primer ließ sich dann im industriellen Versuch mit den besten Ergebnissen auf den neuen Plattensubstraten applizieren. Die optimierten Pulverlack-Beschichtungen mit dem NT-Pulverlack lieferten besonders für Birke gute Ergebnisse. Die avisierte Schichthaftung von GT = 2 wurde sowohl bei den flächigen Substraten als auch den 3D-Formen mit sehr guter Haftung (GT = 0 – 1, trocken und nass) unterschritten. Die in den Industrieversuchen beschichteten mHBS lieferten in der künstlichen Bewitterung kaum Glanzverluste und waren farbmetrisch stabil. Das Quellen und Schwinden konnten jedoch nicht verhindert werden, so dass eindringende Feuchte die Schichten und das Material negativ beeinflusste. Die mechanische Stabilität (Kratzbeständigkeit) dieser Beschichtungen war noch nicht gegeben.

Zusammenfassend lässt sich resümieren, dass auch einheimische schnellwachsende Hölzer mit Pulverlack beschichtet werden können. Der Prozess der Verdichtung und vor allem das anschließende Konfektionieren und Verkleben einzelner Paneele zum mHBS führt zu Schwankungen des Porenvolumens an der zu beschichtenden Oberfläche. Daraus resultieren Beschichtungsfehler, die mit Material- und technologischem Aufwand beherrscht werden können. UV-vernetzbare Pulverlacke lassen sich besser mit Elektronenstrahlen durchhärten. Für Außenanwendungen sind aktuell jedoch eher NT-Pulverlacke als UV-vernetzbare Pulverlacke geeignet. Für eine praxistaugliche Anwendung der neuen Holzsubstrate sind die Quell- und Schwindprozesse und die mechanische Beständigkeit der Beschichtungen weiter zu verbessern.

II. Ausführliche Darstellung der Ergebnisse

1 Stand der Technik

1.1. Holz und Holzwerkstoffe

Holz

Im Folgenden wird nur auf die verwendeten schnellwachsenden einheimischen Hölzer eingegangen, die sich nach den Referenzuntersuchungen als zur Weiterführung geeignet erwiesen. Dies betraf das Holz der Pappel und der Birke.

Pappel

Es existieren weltweit etwa 35 primäre Arten der Gattung *Populus*, wovon in Europa und Nordamerika vorrangig die Silber- und Schwarzpappel (*Populus alba / nigra* L.) sowie einige Hybriden holzwirtschaftliche Bedeutung besitzen. Die Holztypen unterscheiden sich jedoch nur geringfügig in den technischen Eigenschaften. Pappel zeichnet sich durch weiches und helles, weißliches oder schwach rötlichbraunes bis bräunliches, zerstreutporiges Wachstum von homogener Struktur aus. Bei den primären Pappelarten und den Hybriden ist das helle Splintholz deutlich vom gelblich- bis rötlich braunen Kernholz abgesetzt. Die Zuwachszonengrenzen sind nur schwach durch ein schmales marginales Parenchymband markiert. Die Längsflächen sind nur dezent gefladert (tangential) bzw. gestreift (radial).



Abbildung 1: Pappel (*Populus sp.*) Querschnitt 12-fach (links) und Radialschnitt (1:1)

Schwind- und Quellwerte liegen im mittleren Bereich und ergeben ein befriedigendes bis gutes Stehvermögen. Die natürliche wie auch die technische Trocknung sind weitgehend unproblematisch, da das Holz nur wenig zum Werfen und Reißen neigt. Wegen der hohen Anfangsfeuchte wird jedoch eine langsame Trocknung empfohlen. Natürliche Dauerhaftigkeit (DIN-EN 350-2) von Pappel ist nicht gegen Befall durch Holz zerstörende Pilze sowie Insekten gegeben.

Pappelholz ist vielseitig einsetzbar und wird derzeit überwiegend zu Schälfernieren für Sperrholz, Verpackungen (Kisten, Spankörbe und -schachteln) und Zündhölzer verarbeitet. Größere Mengen gehen auch in die Herstellung von Zellstoff und diversen Plattenwerkstoffen (Faserplatten, Spanplatten, OSB; u. a.). Vollholz wird für Außenverkleidungen sowie besondere Produkte wie z. B. Möbel und im Saunabau verwendet.

Die Beschichtung von Pappelholz ist mit den gängigen Beschichtungsstoffen unproblematisch und kann bei entsprechendem Vor- und Zwischenschliff durchgeführt werden. Der stellenweise Faserrichtungswechsel zeigt lediglich bei einer direkten Wasserlackbeschichtung eine hohe Rauigkeit durch das Aufrichten der Fasern auf. Der Einfluss der großen zerstreut porig angeordneten Gefäße ist eher unproblematisch.

Folgende Materialkennwerte sind durchschnittlich an Pappelholz ($u=12\%$) anzutreffen:

- Rohdichte lufttrocken $0,40\text{--}0,45\text{--}0,56 \text{ g/cm}^3$
- Druckfestigkeit $28\text{--}34 \text{ N/mm}^2$
- Zugfestigkeit $64\text{--}76 \text{ N/mm}^2$
- Scherfestigkeit $5,0\text{--}7,2 \text{ N/mm}^2$
- Biegefestigkeit $47\text{--}59 \text{ N/mm}^2$
- Elastizitätsmodul (Biegung) $6.800\text{--}8.800 \text{ N/mm}^2$
- Härte (BRINELL) \perp zur Faser $10\text{--}15 \text{ N/mm}^2$
- Differentielles Schwindmaß (radial / tangential) $0,12\text{--}0,19 \% / 0,25\text{--}0,31 \%$
- Natürliche Dauerhaftigkeit (DIN-EN 350-2) Klasse 5 (nicht dauerhaft)

Birke

Etwa 60 Arten der Gattung *Betula* sind in den nördlichen Waldgebieten Asiens, Europas und Amerikas verbreitet und werden größtenteils zu Furnier und Sperrholz, aber auch als Massivholz zur Herstellung von Möbeln eingesetzt.



Abbildung 2: Birke (*Betula sp.*) Querschnitt 12-fach (links) und Radialschnitt (1:1)

Die Birkenhölzer sind strukturell sehr ähnlich und es scheint kaum Abweichungen bei Farbe und Dichte zu geben. Die meisten Arten bilden grundsätzlich nur blass-gelblich- bis rötlich-weißes Splintholz aus. Die Poren sind zerstreut angeordnet, fein bis mittelgroß, auf glatten Querschnitten als helle Punkte und auf Längsflächen als sehr feine Rillen noch erkennbar. Holzstrahlen sind fein und auch

als Spiegel das Holzbild nicht beeinflussend. Parenchym-Bänder finden sich vereinzelt, zusammen mit einer sehr schmalen, dunkleren Spätholz-Zone bilden sie feine Fladern, die das Holzbild beleben.

Unten sind die Eigenschaften von *B. pendula* und *B. pubescens* aufgeführt. Die Eigenschaften der anderen Birken variieren in der Regel entsprechend der Dichte.:

▪ Rohdichte lufttrocken	0,51–0,65–0,83 g/cm ³
▪ Druckfestigkeit	43–60 N/mm ²
▪ Biegefestigkeit	120–147 N/mm ²
▪ Elastizitätsmodul (Biegung)	14.500–16.500 N/mm ²
▪ Härte (BRINELL) ⊥ zur Faser	21–34 N/mm ²
▪ Differentielles Schwindmass (radial / tang)	0,18–0,24% / 0,26–0,31%
▪ Natürliche Dauerhaftigkeit (DIN-EN 350-2)	Klasse 5

Alle Birkenhölzer lassen sich in der Regel sowohl manuell als auch maschinell gut und sauber mit von der Dichte abhängigem Kraftaufwand verarbeiten. Das Holz ist leicht zu schälen, messern, profilieren, schnitzen und lässt sich generell gut biegen. Unsachgemäßes Dämpfen kann zu Verfärbungen führen. Nägel und Schrauben halten gut, die Verleimbarkeit ist dagegen teilweise schwierig. Die Oberflächen-Behandlung ist unproblematisch, lediglich Polyesterlacke trocknen gelegentlich verzögert. Die Trocknung sollte langsam und vorsichtig erfolgen da das Holz deutlich zum Reißen und Werfen neigt. Natürliche Dauerhaftigkeit (DIN-EN 350-2) von Birkenholz ist nur von geringer natürlicher Dauerhaftigkeit und in die Dauerhaftigkeitsklasse 5 eingestuft.

Der größte Teil der Birkenhölzer wird zu Schälfurnieren und weiter zu Sperrholz verarbeitet. Aber auch Messerfurniere werden von der Möbelindustrie vielfach nachgefragt. Für die Massivholz-Verwendung werden die schweren Birken besonders für Kleinmöbel, Möbelteile, Gestühl, Parkett, Spielzeug, Teile von Tasteninstrumenten, eingesetzt. Die leichten und meist hellen Hölzer werden für Küchengeräte, Streichhölzer, medizinische Spatel, Löffel, Spulen und Lebensmittelkisten massiv verwendet.

Holzwerkstoffe

Holzwerkstoffe (HWS) sind Materialien, die aus zerkleinertem Holz und/oder Holzfasern bestehen. Je nach Größe der Holzpartikel, der Technologie (Parameter) und der Zusatzstoffe sind die HWS in verschiedene Produkte unterteilt:

Furnierwerkstoffe – geringere Dicken, Beschichtungen mit Melaminharz, Linoleum und anderen Materialien sind möglich.

Holzspanwerkstoffe – Holzspäne mit Kunstharzleimen und Zusätzen unter Wärme gepresst, breite Anwendung (Spanplatte, Strangpressplatte, Spanholzformteile)

Holzfaserwerkstoffe – enthalten Holz, Sägenebenprodukte, holzfaserhaltige Pflanzen (Flachs, Raps), Nassverfahren: Holzfaserdämmplatte (HDF), die Mittelharte Faserplatte (MB) und die Harte Faserplatte (HB oder HFH), Trockenverfahren: Mitteldichte Faserplatte (MDF), Hochdichte Faserplatte (HDF)

Verbundwerkstoffe – verschiedene Holzpartikel, Kombination mit Kunststoffen, Beton oder Papier; gängig sind *Wood Polymer Composites*, Leichtbauplatten und Kunstharzpressholz.

1.2. Herstellung von Holzwerkstoffen

MDF-Herstellung

In der Holzwerkstoffindustrie werden seit Jahrzehnten Platten aus thermo-mechanisch aufbereiteten, mit duroplastischen Harzen beaufschlagten und gestreuten Fasern (Refinerfasern oder MDF-Holzfasern) hergestellt, die als Faserplatten mit niedriger Dichte (LDF [Low Density Fibreboard], < 650 kg/m³), mittlerer Dichte (MDF [Middle Density Fibreboard, Mitteldichte Faserplatte], 650 – 850 kg/m³) und hoher Dichte (HDF [High Density Fibreboard], > 850 kg/m³) bekannt sind. Der Nachteil besteht darin, dass die duroplastischen Bindemittel im Regelfall aus Harnstoff und/oder Melaminharzen bestehen, die mit Formaldehyd, welches als krebserregend eingestuft ist, vernetzt werden. Auch wenn ausgehärtete moderne Harzsysteme so gut wie kein Formaldehyd emittieren, wird der Verzicht auf Formaldehyd enthaltende Harze bevorzugt. Weiterhin sind LDF/MDF diffusionsoffen gegenüber Gasen, u.a. auch Wasserdampf, sie quellen (in Abhängigkeit der eingesetzten Bindemittel) in feuchter Umgebung und verlieren drastisch an Festigkeit bei Wasserkontakt (in Abhängigkeit der eingesetzten Bindemittel). Auch sie sind also nur sehr eingeschränkt tauglich, um im Außenbereich eingesetzt zu werden.

Vollholzwerkstoffe und ihre Modifizierungen

Vollholzwerkstoffe - basieren auf Massivholzelementen (vor allem Bretter oder Stäbchen), die in bestimmter Art und Weise geschichtet werden. Durch Schnittrichtung, Schichtaufbau, Art der Verbindung und Qualität des verwendeten Holzes werden die Festigkeitseigenschaften des Werkstoffes beeinflusst. Die in diesem Vorhaben zum Einsatz kommenden **mHBS** entsprechen am ehesten einem **Vollholzwerkstoff**.

Prinzip der Herstellung der mHBS

Zum prinzipiellen Vorgehen bei der Herstellung der mHBS ist festzustellen, dass sich Hölzer mit Hilfe thermo-hygromechanischer oder thermo-mechanischer Prozesse, das heißt unter Einfluss von Wärme, Feuchte und Druck (bzw. Biegung oder Zug), strukturell verändern lassen [1].

Eine Variante ist die Herstellung von sog. Pressholz bei dem das Holz quer zur Faser unter Wärmeeinwirkung von über 80 °C verdichtet wird [2]. Dabei kann eine möglichst homogene Verdichtung des Gesamtquerschnitts erzielt werden, aber auch durch gezielte Erhitzung einzelner Bereiche nur eines Teilquerschnitts. Letzteres wird z. B. für die Oberflächenverdichtung verwendet, bei der bis in

einer Tiefe von nur wenigen Millimetern verdichtet wird [3]. Das Ziel ist dabei u. a. die Erhöhung der Oberflächenhärte und des Abrasionswiderstandes bei möglichst hoher Materialausnutzung. Die Oberflächenverdichtung könnte aber auch gezielt zur Verringerung des Porenraums der zur Pulverlackbeschichtung vorgesehenen Fläche genutzt werden. Dies ist ein Ansatz, der so in der Literatur noch nicht beschrieben ist.

Es ist bekannt, dass die Verdichtung ohne zusätzliche Maßnahmen einer „Rückverformung“ (Hysterese, Rückerinnerung) unterliegt, die insbesondere durch Feuchtezutritt begünstigt wird und bei Beschichtungen zu Rissen führt. Es existieren verschiedene Fixierungsprozesse, u.a. die Heißdampfbehandlung [4] und die Hitzebehandlung [5; 6], die die Rückverformung verhindern oder effizient verringern können. Hitzebehandlung, die unter die Kategorie der thermischen Modifizierung fallen und in der Regel zur Erhöhung der Dimensionsstabilität und Dauerhaftigkeit eingesetzt werden [7], sind insbesondere bei einer Temperatur über 200 °C effektiv. Aufgrund hoher Temperaturen geht die Hitzebehandlung jedoch mit einer Verschlechterung der mechanischen Eigenschaften und einer Holzverdunklung einher.

Eine technische Möglichkeit besteht in der gezielten Rückverformung quer zur Faser des verdichten, nicht fixierten Holzes und die Nutzung der entstandenen Dehnungsreserven zur Umformung für die Herstellung von Formteilen. In *Abbildung 3* ist die prinzipielle Herstellung von verdichteter und umformbarer mHBS dargestellt. Dabei wird zunächst durch Verdichtung eine Dehnungsreserve in Arbeitsrichtung Vollholz geschaffen, welche durch Auftrennen in der angestrebten Paneeldicke, 90°-Drehung zur Verlagerung der Dehnungsreserve in Paneelebene und anschließender Verklebung, umgesetzt wird. Der folgende Umformungsprozess selbst geschieht wieder unter der Einwirkung von Wärme und wahlweise Feuchte. Die Platten werden erhitzt und bei Bedarf in einer Feuchtekammer bedampft, sodass die Zellwände erneut aufweichen und das Material geformt werden kann, ohne, dass es zu kritischen Dehnungsüberschreitungen kommt, die bei unverdichtetem Holz schnell zum Bruch führen würden. Die einfachste Variante eines solchen Formholzprofils ist das Rohr. Bisher wurden hauptsächlich Rohre mit einem Durchmesser von 32 cm und einer Wandstärke von circa 2 cm hergestellt [8; 9; 10; 11]. Grundsätzlich sind aber beliebige Querschnittsabmessungen und verschiedenste Formen möglich. Vor allem das zweidimensionale Umformverfahren erweitert das mögliche Anwendungsspektrum solcher Elemente [12]. Insgesamt ist auf Grund verbleibender Dehnungsreserven auch in den rückgeformten Bereichen von geringeren Porenvolumen als im unverdichteten Ausgangsmaterial auszugehen.

Holzmodifizierung

Holz kann durch verschiedene Vorgehensweisen (technisch, biologisch oder chemisch) modifiziert werden. Eine Möglichkeit ist, Holz thermisch (TMT) zu behandeln. Dadurch wird die Feuchtigkeit reduziert, was zu einer Verminderung des Pilzbefalls führt. Dem positiven Aspekt steht die Absenkung der Dichte entgegen, Festigkeiten werden geringer. Die Beschichtbarkeit dieser Hölzer ist

schwierig. Die Eignung der ionFl als Basis zur Verbesserung der Pulverlackierung wurde im Rahmen des Projektes getestet. Zusätzliche chemische Möglichkeiten der Holzmodifizierung sind Verfahren zur Erhöhung der Dauerhaftigkeit wie z. B.

- die Acetylierung mit Essigsäureanhydrid (accoya®/tricoya®),
- die Furfurylierung mit Furfurylalkohol (Kebony®),
- die Methyloltränkung (belmadur®) oder
- die Wachstränkung (Dauerholz®).

Bei den genannten Produkten werden zusätzliche Stoffe eingebracht. Sie unterliegen in der Folge einer Veränderung ihres chemischen Verhaltens, welches die Aufbringung und Haftung einer Pulverlackbeschichtung beeinflussen kann. Für die Untersuchungen im Vorhaben wurde zum Vergleich z. B. das Produkt accoya der Fa. Medite als Referenz mit herangezogen.

Neben der Senkung der Ausgleichfeuchtigkeit, der Veränderung der Farbigkeit und des Geruchs und hoher Herstellungskosten können wie z.B. bei Verwendung von accetyliertem Holz der Einsatz resisterter Verbindungsmittel notwendig werden. Thermo-mechanisch verdichtetes mHBS ist frei von Zusatzstoffen und erreicht seine veränderten Eigenschaften vorrangig durch Dichteerhöhung.

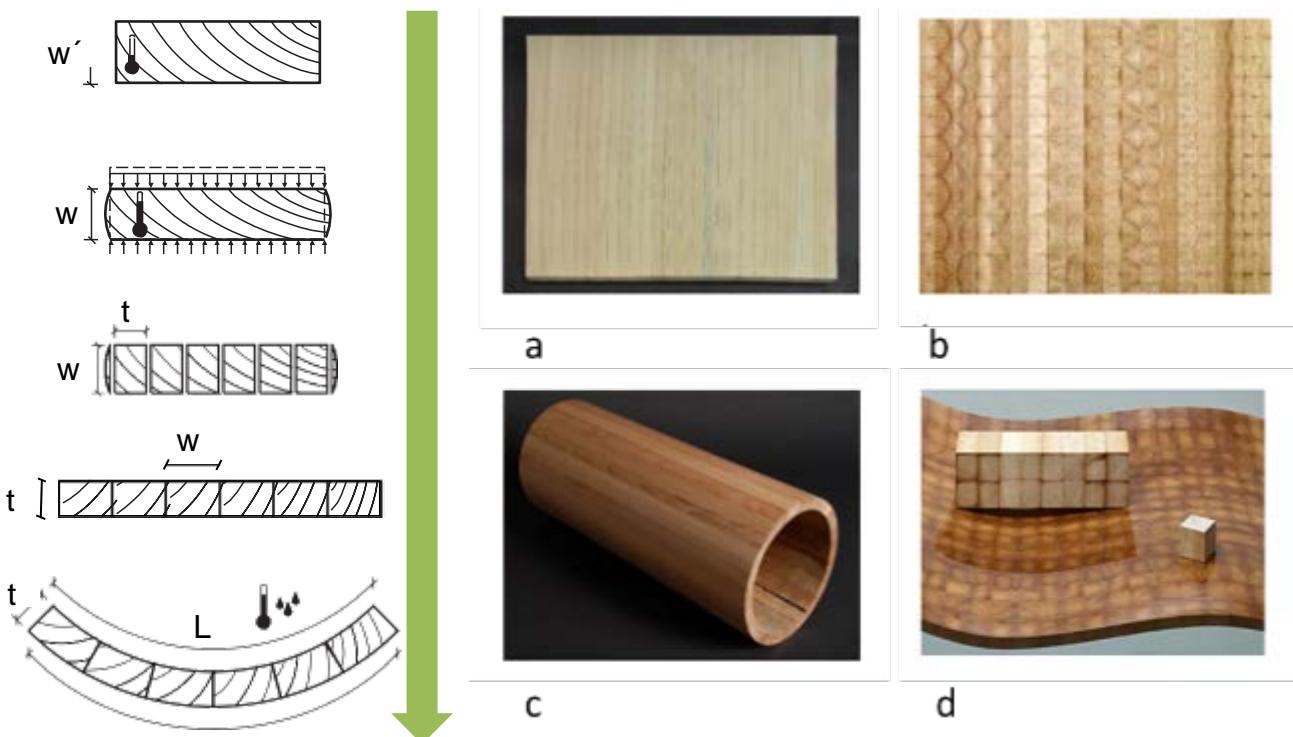


Abbildung 3: Prinzipdarstellung der Verdichtung und Umformung (links) von einaxial verdichten Massivholzplatten vor der Umformung um die Faserlängssachse (a) und biaxial verdichten Hirnholzplatten (b), nach der Umformung (c, d)

1.3. Flüssigbeschichtungen für Holz im Außenbereich

Allgemein

Der Werkstoff Holz hat einige Besonderheiten, die bei der Verwendung als Baumaterial berücksichtigt werden müssen. Nachteilige Eigenschaften bzw. stattfindende Prozesse sind [13]:

- Zerstörung und Abbau von Holz durch Pilze, Insekten und Mikroorganismen,
- Hygroskopizität, d. h. Aufnahme bzw. Abgabe von Feuchtigkeit und infolgedessen Quellung bzw. Schwindung,
- Brennbarkeit.

Bauliche Maßnahmen (*konstruktiver Holzschutz*) dienen an erster Stelle der Reduzierung der **Feuchtebelastung** und dem schnellen Abführen von Wasser (z. B. weiter Dachüberstand, horizontale Flächen mit Ablaufschrägen). Zur Unterstützung der baulichen Schutzmaßnahmen sind oftmals noch Holzschutzmittel (*chemischer Holzschutz*) erforderlich, um einer Schädigung durch holzzerstörende Insekten oder Pilze vorzubeugen. [13; 14]

Beim **physikalischen Holzschutz** im Außenbereich finden Lasuren, Wachse oder filmbildende Beschichtungssysteme Einsatz. Aufgrund der VOC-Richtlinie 2004/42/EG zur Begrenzung der Emission flüchtiger organischer Verbindungen kommen zunehmend wasserbasierte Systeme bei den Flüssigbeschichtungen zum Einsatz. [15] Wasserlacke sind dispergierte Systeme, in denen ein Großteil der organischen Lösemittel durch Wasser substituiert ist. Sie sind daher geruchsarm und emittieren einen Bruchteil an Lösemitteln in die Umwelt. Erkauft wird dies allerdings mit einem **höheren Energieaufwand** für die Trocknung und **erhöhtem Schleifaufwand durch Quellung der Holzfasern**. Für solche Beschichtungen werden vorrangig Acrylpolymeren als Emulsionsharz eingesetzt, da sie eine hohe Farbbeständigkeit bieten und ausreichende Beständigkeit bei Außenbewitterung aufweisen.

Viele Lacke, die speziell für Holz konzipiert sind (z.B. Wetterschutzfarben oder Ventillacke für Fenster), sind zäh-elastisch eingestellt. Damit können sie in einem gewissen Rahmen den Quell- und Schwindbewegungen des Holzes folgen. Sie zeigen eine verringerte Rissbildung und verzögerte Ablösung vom Untergrund. Es ist jedoch eine große Zahl an Universal-Lacken für den Außenbereich zu finden, die für Holz eine zu geringe Elastizität besitzen. Sie reißen schneller und lösen sich schollenweise ab. Umwelteinflüsse verursachen deren zusätzliche Versprödung.

Holzbeschichtungen erfüllen eine Reihe von Funktionen, wobei im Außenbereich der Schutz vor **Feuchtigkeit, UV-Licht und Pilzbefall** im Vordergrund stehen. Neben der Holzart muss auch der Einsatz des Bauteiles entsprechend der normativen Anwendungsstufen für die Auswahl einer geeigneten Beschichtung und des Beschichtungsaufbaus berücksichtigt werden.

Der Markt für industriellen Holzbeschichtungen lag 2021 bei ca. 2,9 Mio Tonnen (ca. 3 Mio Liter), coronabedingt auf dem Niveau des Jahres 2019. Der Wert wird auf ca. 11 Mrd. EUR taxiert. Betrachtet man den gesamten Lackmarkt, so haben Holzlacke einen Anteil von ca. 7 %. Dabei dominieren

nach wie vor lösemittelhaltige Varianten, wasserbasierte Systeme nehmen jedoch zu. Global führen mit 46 % 2K-PUR-Lacke das Ranking an, gefolgt von 12 % Nitrocelluloselacken und 10% strahlenvernetzbaren Lacken. Treiber für wasserbasierte Systeme werden die steigenden Kosten für Lösemittel sein. Umweltfreundliche Lösungen werden immer häufiger nachgefragt. [16]

Technologie und Systeme zur Flüssigbeschichtung

Flüssigbeschichtung bestehen in der Regel aus einem Bindemittel wie z. B. Kunstharz, einer anteiligen Feststoffkomponente wie Füll- oder Farbstoffe sowie Funktionsadditive wie Tenside, UV-Absorber oder Mattierungsmittel.

Die Lacksysteme werden häufig mehreren Prozessschritten und Schichten aufgetragen. Prozessablauf und Wirtschaftlichkeit werden dabei durch die langen und energieintensiven Trocknungszeiten begrenzt.

Es gibt eine Vielzahl an Produkten, die im Sprüh-, Walz-, Rakel- oder Gießauftrag appliziert werden können. Nicht oder begrenzt maßhaltige Bauteile erfordern eine geringere Schichtdicke, der Anspruch nach Maßhaltigkeit fordert hingegen ca. 3-4 Schichten, um z. B. vor Feuchte (flüssig und gasförmig) zu schützen. Basis für funktionierende Beschichtungen sind gute und stabile Substrate [13]. Ein solcher Mehrschichtauftrag beginnt häufig mit einer Grundierung, zwischen den Einzelschichten sind Zwischenschlüsse ein übliches Vorgehen, um Haftungen zu verbessern. Für den Außenbereich werden in der Regel hohe Schichtaufträge erforderlich (weit über 100 µm). Folgende Lacke seien an dieser Stelle genannt:

- Öl-Lacke und Farben – Lösemittelhaltig, aber gutwitterungsbeständig
- Polyester-Lacke – gering lichtbeständig, nicht witterungsstabil (Schlagfestigkeit)
- SH-Lacke – eingeschränkte Lichtechnik, nicht witterungsstabil
- PU-Lacke – gute Lichtbeständigkeit
- Hygrolacke – Wasserdampfempfindlich, geringe Witterungsbeständigkeit.

1.4. Pulverlackierung von Holz und Holzwerkstoffen

Allgemein

Pulverlackbeschichtungen erfüllen je nach ihrer chemischen Zusammensetzung höchste Ansprüche an Chemikalien- und Wetterbeständigkeit, sowie optische Qualität und sind äußerst widerstandsfähig gegenüber mechanischen Beanspruchungen [17, 18]. Wegen der unbestreitbaren Vorteile wie

- Lösemittelfreiheit,
- einer allseitigen Beschichtung mit hohem Auftragswirkungsgrad,
- der effizienten Verarbeitbarkeit und
- guten Automatisierungsmöglichkeiten

hat sich die elektrostatische Pulverlackierung schnell entwickelt. Auch ein Vorteil gegenüber Lösungsmittelbasierten Systemen ist die kürzere Vernetzungszeit im Ofen und die durch die schnelle Endhärtung unmittelbare Belastbarkeit des Lackes. [19] Dieser enge Zeitraum für die Vernetzung erfordert gerade für sensitive Substrate wie HWS einen hohen Optimierungsbedarf für ein optimales Beschichtungsergebnis. D. h. der Pulverlack muss im Ofen eine gewisse „**Offenzeit**“ haben, um z. B. bei holzbasierten Produkten aber auch Metallen austretende Gase abtransportieren zu lassen. Ein technologisches Problem ist das des kosten- und energieintensiven Einbrennens der Pulverlacke bei üblichen Temperaturen über 150°C bis 200°C. Zur Verringerung der Kosten und zur Verbesserung der Ökobilanz gibt es Entwicklungen in Richtung Niedrigtemperatur (NT)-Pulverlacke, die bei Temperaturen von 125°C bis 150°C aufschmelzen, jedoch verbunden mit Einbrennzeiten bis 15 min. Für empfindliche Produkte sind diese **Ofenzeiten bei den Temperaturen** kritisch, da Ausgasungen flüchtiger Bestandteile aus dem Werkstoffinneren die Beschichtungsqualität hinsichtlich optischer Eigenschaften (Blasen, Nadelstiche) und mechanischer Eigenschaften (insbes. Lackhaftung) auf dem Substrat negativ beeinflussen. Aufgrund des Pulverlack-Herstellungsprozesses, bei dem die Rohstoffe verschiedenen mechanischen Bearbeitungen wie Extrusion und Vermahlen unterliegen, die wiederum mit einem Wärmeeintrag (bis ca. 110°C) einhergehen [20], sind der Reduzierung der Vernetzungstemperaturen Grenzen gesetzt. Bei Vernetzungstemperaturen unter 110°C besteht die Gefahr, dass es vor der eigentlichen Vernetzung zur beginnenden Filmbildung kommt oder die Lagerstabilität solch hochreaktiver Systeme eher eingeschränkt ist. Diese Kenntnisse sind für eine Prozessgestaltung wichtig.

Heute werden mit dieser umweltfreundlichen, ressourcenschonenden und rationellen Beschichtungstechnologie z. B. HWS wie MDF für den Inneneinsatz effizient lackiert. Konsequente Anwendungen im Außeneinsatz werden immer noch behindert durch das Quellen von HWS und Holz, in dessen Folge auch diese Beschichtungen dann qualitative Einbußen (Haftung, Risse) erfahren.

Technologie der Pulverlackierung

Der Beschichtungsstoff wird als trockenes Pulver elektrostatisch auf die Werkstückoberfläche gesprüht. Das am häufigsten in der Praxis umgesetzte Pulverlackbeschichtungsverfahren arbeitet mit Pulversprühpistolen, in denen der pulverförmige Beschichtungsstoff mit oder ohne Luft (*airless*) gefördert wird und sowohl mit Korona als auch mittels Reibung (Tribo) elektrostatisch aufgeladen werden kann. Man unterscheidet die Pulverlackapplikation wie folgt:

- Elektrostatisches Pulversprühen: Stückgutbeschichtungen mit < 5 m/min,
- MSC Powder Cloud-Verfahren: sehr selten eingesetzt, beschichtet wird auf bis zu 1650 mm breiten Metallbändern bei 2 m/s mit rotierenden Bürsten, sehr hoher Koronastrom, kein Einsatz bei HWS
- Magnetbürstenverfahren: für sehr dünne homogene Substrate, bis 1 m/s, für HWS nicht realisierbar

- **Elektrostatisches Wirbelbadverfahren:** Substrat wird über Fluidisierbecken mit Pulver beschichtet.

Das nicht auf der Werkstückoberfläche anhaftende Pulver wird abgesaugt und zu einem Abscheider gefördert. Das abgeschiedene Pulver wird häufig wieder eingesetzt. Die sich nach dem Abscheiden ausbildende Pulverlackschicht haftet auf Grund elektrischer Kräfte, bis sie anschließend durch Erwärmung aufschmilzt und zu einem homogenen Film verläuft. Die folgende Vernetzung der Pulverlacke kann je nach System thermisch durch Wärme oder photochemisch durch energiereiche Strahlung (z. B. UV-Strahlen) erfolgen. Unmittelbar nach dem Abkühlen sind die Überzüge fest und voll belastbar. Für die thermischen Prozesse des Aufschmelzens von Pulverlack auf MDF werden vorzugsweise Infrarot (IR-) Strahlersysteme in Verbindung mit konvektiver Wärme eingesetzt. Dabei kommen sowohl elektrische als auch gaskatalytische IR-Strahler zu Anwendung [21; 22; 23].

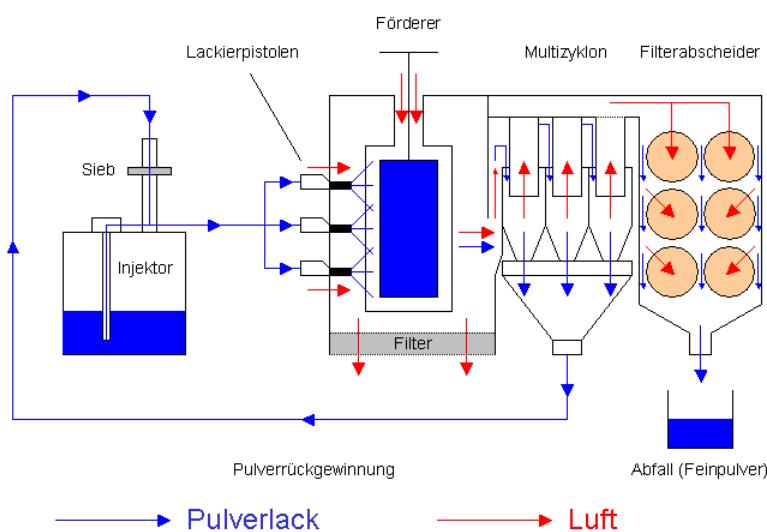


Abbildung 4: Schema der industriellen Pulverlackierung [24]

Lacksysteme zur Pulverlackierung

Pulverlacke sind praktisch lösemittelfrei. Holz zählt zu den temperatursensitiven Werkstoffen, für die Pulverlacke mit niedrigen Schmelz- und Vernetzungstemperaturen (sogenannte *LowBake-* oder NT-Pulverlacke) besonders in Frage kommen. Insbesondere lange Einbrennzeiten bei vergleichsweisen hohen Temperaturen (150°C) führen durch Ausgasen von Holzinhaltsstoffen und Wasser zu Störungen, die sich in Haftungsproblemen oder als Blasenbildung auf der lackierten Oberfläche zeigen [25, 13; 26]. NT-Pulverlacke arbeiten aufgrund ihrer niedrigen Einbrennzeiten energieeffizienter. Im Allgemeinen bestehen Pulverlacke aus

- Bindemitteln (Harz und Härter) wie z. B. Epoxide EP, Polyester PE und deren Gemische EP/PE, Polyurethan PU oder Acrylat Ac,
- Pigmenten (Farbstoffen),
- Füllstoffen (Extender) und Additiven. [27]

Die Filmbildung der Pulverlacke erfolgt über einen Schmelzprozess. In der ersten Phase sollte die Viskosität zum verbesserten Verlauf stark reduziert werden. Der Härtet ist zur Einleitung der Vernetzungsreaktion erforderlich. Die zusätzlichen Füllstoffe beeinflussen Eigenschaften wie Verlauf, Abdeckung, Glanz, Chemikalienbeständigkeit, Dichte. [28]

Pulverlacke werden in zwei Hauptgruppen eingeteilt, die auf den Eigenschaften des verwendeten Harzes basieren: thermoplastische und duroplastische Pulverbeschichtungssysteme. Unter den duroplastischen Pulverlacken haben **PU-Pulverlacke** gute Eigenschaften wie Witterungsbeständigkeit und sind unter dem Aspekt eine gute Wahl für Außenanwendungen. Aktuellere Forschungsarbeiten zeigten, dass der Einsatz von Polysiloxan in PU-Pulverbeschichtungen zur verbesserten thermischen Stabilität, mechanischen Festigkeit und chemischen Beständigkeit der Beschichtung führt. [29] **EP-Pulverlacke** zeichnen sich z. B. durch eine gute Chemikalienbeständigkeit und eine hervorragende Benetzung aus. Solche Systeme können als Basisschicht Einsatz finden. Der Einsatz im Außenbereich fordert jedoch auch eine hohe UV-Beständigkeit, was diese Systeme nicht bieten. Epoxy-NT-Pulverlacke können auch bereits bei 120°C arbeiten. Auch **PE-Pulverlacke** werden angeboten, die im Vergleich zu Epoxy-Systemen eine verbesserte Witterungsbeständigkeit besitzen. In diesem Zusammenhang wird heute auch von einem **grünen Produkt** gesprochen. Spezielle Polyesterarten (auch mit Epoxiden) lassen sich bei Einbrenntemperaturen von 140 bis 160°C handhaben und werden auf wärmeempfindlichen Untergründen wie MDF, HDF, Gipskarton appliziert. [30] Das in [31] benannte Pulverlack-Einschichtsystem der IGP Pulverlacktechnik AG hat sich für den Einsatz im Innenbereich bewährt und ist auch als witterungsfeste Variante für Außenanwendungen auf außen-tauglichen HWS einsetzbar. Es wird von Einbrenntemperaturen bei 130°C gesprochen.

UV-Pulverlacke

Die **UV-Technologie** wird im Rahmen dieses Projektes eingesetzt, da UV-Lacke einige Vorteile mit sich bringen. Neben der verbesserten chemischen und mechanischen Beständigkeit solcher Oberflächen gestattet die UV-Technologie eine energiesparende chemische Vernetzung. Der Anteil der Wärmestrahlung (IR) im Strahlungsspektrum herkömmlicher Breitband-Emitter beträgt 75 % und kann noch für die Härtung genutzt werden. Ein Vergleich heute eingesetzter UV-Emitter zeigt die folgende Tabelle.

Tabelle 1 : Stand der Technik eingesetzter UV-Emitter zur UV-Vernetzung

	Elektroden	Mikrowelle	Excimer	LED
UV-Strahler	Quecksilberlampen, spezielle Reflektoren	Quecksilberlampen, spezielle Reflektoren	Gaslaser ohne Quecksilber	Diode (Halbleiterelement)
	Bogenentladung unter Druck	Anregung durch Hochfrequenzwellen	Laser regt Atome des Excimer-Moleküls an	durch Stromfluss Anregung
Wellenlängen	Wellenlängen beeinflussbar mit Dotierung		Emittieren monochromatisches Licht	
	260-450 nm		172, 222, 248, 235, 282, 308, 351 nm	diskret (10 nm Schrittweite (365 - 450nm))
Betriebsstunden [h]	500-2.000	6.000-8.000		
	Schaltvorgänge beeinflussen Lebensdauer		unbegrenzte Schaltvorgänge	
Bestrahlung	Strahlungsverluste, Inhomogenitäten, Leistungsabnahme	3-5 mal besser als Elektroden	keine Verluste	keine Verluste und Inhomogenitäten
Wärme	75% Wärmestrahlung	40% Wärmestrahlung	keine Wärmestrahlung	
Energiekosten	Reduzierung um 30% (vs konventionell)	vergleichbar mit Elektroden	vergleichbar mit Elektroden	Reduzierung bis zu 60% (zu Elektroden)

UV-Pulverlacke sind nur wenige Produkte verfügbar, obwohl die UV-Technologie die Chance auf Energieeinsparung und schnellere Prozesse (von 2-3 m/min auf 8-10 m/min) böte. Solche z. B. PU-basierte Systeme bieten wiederum eine gute UV-Beständigkeit. Vorteil ist, dass die Vernetzung wesentlich schneller abläuft (im Sekundenbereich) und somit eine Überhitzung der Substrate verhindert werden könnte [19]. Eine neue Forschungsarbeit spricht von einem UV-Pulverlack auf Basis natürlicher Rohstoffe. Es werden Poly(limonencarbonat)e (PLCs), die aus Orangenöl und Kohlendioxid gewonnen werden, als UV-härtbare (Pulver-) Beschichtungsbindemitteln eingesetzt. Die UV-gehärtete Pulverbeschichtung zeigte hervorragende Eigenschaften wie hohe Transparenz, gute Acetonbeständigkeit und gute Härte und könnte zukünftig eine gute Alternative zu den herkömmlichen Pulverlacken darstellen. [32]

1.5. Vorbehandlung von Holzwerkstoffen für die Pulverlackierung

Allgemein

Zum einen bietet die Pulverlackbeschichtung eine umweltschonende Alternative zur zeit-, energie- und materialintensiven Flüssiglackierung, um auch witterungsbeständige Beschichtungen im Außenbereich vorliegen zu haben. Zum anderen liefert Holz gleichzeitig ungünstige Voraussetzungen dafür:

- **hoher elektrischer Oberflächenwiderstand** R_o , der das elektrostatische Beschichten erschwert,
- **Holzinhaltsstoffe und -feuchte** können ab Temperaturen von ca. 70 °C austreten und das qualitativ einwandfreie Aufschmelzen/Vernetzen von Pulverlackschichten erschweren und
- das **Haften der Beschichtung** verhindern.

Außerdem können Quell- und Schwindprozesse des Holzes die Beschichtung beanspruchen und für qualitative Einbußen ursächlich sein. Um Pulverlacke auf Holzwerkstoffe applizieren zu können, geht man verschiedene Wege:

1. Konditionieren der HWS bei erhöhter Feuchte z. B. 20 °C / 65 % rF.
2. Temperiern der HWS unmittelbar vor Pulverlackapplikation.
3. Einsatz von Leitprimern (Formulierungen mit speziellen Additiven).

Außerdem können für die Pulverlackbeschichtung von HWS wie MDF, die z. B. im Möbelbereich Anwendung finden, spezielle MDF-Produkte wie die MDF MBP-L E1 der Fa. Egger Einsatz finden, die einen halogenfreien Leitfähigkeitszusatz enthält.

Für Holz und die im Projektrahmen avisierte Lösung eines neuen naturbasierten HWS sollte in diesem Fall eine dem oben genannten Punkt 3 vergleichbare Möglichkeit untersucht werden. Eine interessante Alternative für eine Vorbehandlung stellen nämlich ionische Flüssigkeiten (ionFL) dar.

Eigenschaften und Einsatz ionFL

IonFL sind organische Salze mit einem sehr niedrigen Schmelzpunkt <100 °C. Typische Anionen von ionFL sind z. B. Aminosäuren oder Lactat und typische Kationen sind z. B. Ammoniumverbindungen wie Cholin oder Aminosäureester bzw. Imidazoliumderivate.

Aufgrund der teilweise organischen Molekülstruktur der Kat- und Anionen gibt es eine Vielzahl an Möglichkeiten für ionFL. Die geringen Schmelztemperaturen bewirken, dass eine Vielzahl ionFL schon bei Raumtemperatur flüssig sind. Heute erfolgt ihr Einsatz u. a. in Anwendungen als Lösemittel, als Elektrolyt für Lithiumionenbatterien, in der Polymerchemie, für organische Synthesen oder auch zur Stabilisierung von Nanopartikeln.

Auswahl der ionFL mit Bezug zur Projektzielstellung

Einige ionFL besitzen eine hohe Wasserlöslichkeit. Dies beruht auf der Möglichkeit, dass die ionFL durch ihren ionischen Charakter in Verbindung mit der hohen Polarität des Molekülgerüsts optimal mit Wassermolekülen und damit auch mit austretendem Wasserdampf z. B. aus HWS interagieren können. Weiterhin können zwischen den Wasserstoffatomen im Wasser und den Sauerstoffatomen im Anion der ionFL Wasserstoffbrückenbindungen ausgebildet werden. Darüber hinaus ist bekannt, dass die ionFL die für die Pulverbeschichtung notwendige Leitfähigkeit mitbringen und damit die Leitfähigkeit des Substrates erhöhen (vgl. Leitfähigkeit Trinkwasser 0,5 mS/cm [33]). Untersucht werden sollte im Rahmen des Projektes ebenfalls der Einsatz einer wasserunlöslichen ionFL, die noch immer leitfähig ist, jedoch mglw. als eine Art Barriere gegenüber austretender Feuchtigkeit aus dem Holz wirken könnte. Eine mögliche ionische Flüssigkeit, welche den genannten Anforderungen entspricht, ist in der folgenden Tabelle zu sehen.

Tabelle 2: Wasserunlösliche ionFl auf Basis des Imidazolium-Kations

Verbindung	Struktur	Wasserlöslichkeit	Schmelzpunkt [°C]	Leitfähigkeit (25 °C) [mS/cm]
1-Ethyl-3-methyliimidazolium-bis(trifluoromethylsulfonyl)imid	 <chem>CN(C)C1=CC=C2C=C1[N+]([CH3])C2[CF3]2SO2C(F)(F)C(F)2</chem>	nahezu unlöslich	-17	6,63

Die wichtigsten Vorteile und damit Auswahlkriterien für die ionFl waren:

- niedriger Dampfdruck = keine Neigung zum Ausgasen und damit negative Beeinflussung der darauf applizierten Beschichtungen oder negativer Einfluss auf die Verklebung der verdichtenen Paneele zu mHBS,
- hohe thermische Stabilität = keine Zersetzung bei Wärmeeintrag z. B. im Prozess des Pulveraufschmelzens und -vernetzens und somit keine negative Beeinflussung der Schichteigenschaften,
- ihre teilweise vorhandene Hygroskopie = Fähigkeit zum Binden austretenden Wassers aus dem Holzsubstrat oder als Dampfsperre für austretende Gase und damit keine Beeinflussung von Schichteigenschaften (Haftung),
- salztypische Leitfähigkeit = Verbesserung der Pulverapplikation (Homogenität) auf holzbasier-ten Substraten, Wirkung als Primer.

2 Erzielte Ergebnisse

2.1 AP 1 – Auswahl und Charakterisierung der Rohstoffe (FS1 / FS2)

Holzauswahl bzw. Auswahl der Referenzsubstrate

Die ausgewählten Hölzer Pappel (Po), Buche (Be) und Birke (Bi) wurden in ihren wichtigen Parametern charakterisiert, um diese Basisdaten für die weiteren Entwicklungsarbeiten nutzen zu können.

Zur Auswahl kamen

- zerstreut porige Holzarten mit geringer Rohdichte (Po) und
- höherer Rohdichte (Be, Bi) mit homogener holzanatomischer Struktur.

Nadelhölzer fanden für die finale Lösung keine Beachtung, da die Ergebnisse der Vorversuche und bisherigen Erfahrungen damit qualitative Einschränkungen bei der Pulverbeschichtung und thermo-hydro-mechanischen Verdichtung aufzeigten. Um ein vollständiges Bild zur Beschichtung und Modifizierung zu erhalten, wurde trotzdem Fichte als einheimisches Nadelholz hinzugezogen. Neben den in der folgenden Tabelle zusammengefassten Festigkeitsdaten wurden außerdem topografische Kennwerte und die Oberflächenwiderstände bestimmt, letzterer stets aktuell vor den Beschichtungsversuchen, da dieser Parameter von der Materialfeuchte abhängt. Es erfolgte die Messung der Holzfeuchtigkeit (u) nach der Darrmethode (DIN EN 322) sowie Messungen der Rohdichte (DIN 52182) und des Porenanteiles mit einer photogrammetrischen Flächenbestimmung. Querzug- und Biegefestigkeit an kleinformatigen Holzproben wurden nach EN 319 und DIN EN 310 zusammen mit den mHBS als Referenzproben durchgeführt. Die Ermittlung des Quellverhaltens (Dickenquellung, EN 317 bzw. DIN 52184) wurde optisch während der Wasserlagerung und der Darrtrocknung erfasst und in den AP 2, 3 und 5 fortgeführt.

Tabelle 3 : Ausgewählte Referenzparameter der Hölzer für die Herstellung von mHBS

		Pappel (Po)		Birke (Bi)		Buche (Be)	
Feuchtigkeit		8%	15%	8%	15%	8%	15%
Dichte (DIN 52182)	kg/m ³	424	455	612	654	669	707
Porenanteil	%	73		59		55	
Festigkeiten							
• Zugfestigkeit							
parallel (DIN 52188)	N/mm	77	81	230	221	126	114
senkrecht (ASTM143)	N/mm ²	3	2	7	8	10	11
• Druckfestigkeit							
parallel (DIN 52185)	N/mm ²	35	32	48	42	55	52
senkrecht (DIN 52192)	N/mm ²	4	3	11	11	12	11
• Härte (HB senkrecht)	N/mm ²	12	11	35	33	31	30
• Biegefestigkeit (DIN 52186)	N/mm ²	57	61	138	144	110	119
• Quellmaß tan/rad/par*	%	8,9 / 3,4 / 0,3		11,2 / 5,5 / 0,4		13,4 / 6,2 / 0,5	

Holzsubstrate, die mit Pulverlack oder auch später mit Flüssiglacken als Referenzbeschichtungen zum Vergleich versehen werden sollten, wurden entsprechend des Standes der Technik ausgewählt. Für Beschichtungen (insbesondere mit Pulverlack) wird in den entsprechenden Datenblättern der Pulverlackhersteller häufig eine Referenz-MDF der Fa. Egger angesprochen (MDF Ref), die hier genutzt wurde. Zur weiteren Auswahl standen Fichte (Fi) und Lärche (Lä) sowie Buche. Accoya (Acc),

ein modifiziertes Holz (acetyliert), wurde gewählt, da es aufgrund der Modifizierung eine verbesserte biologische Beständigkeit aufweist. Pappel wurde wegen des geringen Oberflächenwiderstandes auch als Referenz eingesetzt. In der folgenden Tabelle sind die charakteristischen Eigenschaften wie Holzfeuchte, Oberflächenwiderstand (Dielektrische Methode), topografische Kennwerte (Perthometer, Welligkeitsparameter (DIN EN ISO 4287)) sowie die Oberflächenenergie / Kontaktwinkel (DC 10 der Fa. Dataphysics) aufgeführt. Es sind hier nur die Daten der nachfolgend pulverlackierten Referenzen angegeben. Fichte, Buche, Pappel und Birke wurden parallel bereits verdichtet und aufgrund starken Harzaustrittes sowie starker Verfärbungen war die Fortführung von Fichte und Buche nicht sinnvoll. Die nächste Tabelle zeigt eine Momentaufnahme der genannten Parameter, die aufgrund ihrer Konditionierung oder Vorbehandlung (weiteres Schleifen) von diesen Daten abweichen konnten.

Tabelle 4 : Ausgewählte Parameter der Referenzsubstrate zur Pulverlackierung

Parameter	Substrat				
	MDF-Ref	Acc	Pa	Bi	La
Oberflächenwiderstand Ro [Ω], 23°/50% reiLF	4,3E10 ¹⁰	5,4E10 ¹¹	8,8E10 ⁹	1,5E10 ¹¹	1,3E10 ⁸
Materialfeucht [%] dielektrische Messung WS 5 (23°/50% reiLF)	7,6	5,6	9,2	6,9	7,7
Oberflächenenergie [mJ/m ²]	31,5	42,7	47,9	50,6	57,3
Topografie z. B.	Sa	5,3	7,5	13,9	12,7
	Sz	72,9	16,9	351	408
					382

Auswahl der Klebstoffe für die Verklebung der verdichteten Paneele zu mHBS

Der Einsatz der Klebstoffe ist für die Verbindung einzelner verdichteter Paneele notwendig, um flächige Substrate für die Pulverlackierung zu erzeugen. Bei der Auswahl der Klebstoffe war darauf zu achten, dass eine sich anschließende Beschichtung mit Pulverlack bis ca. 140°C ablaufen kann und eine Elastizität vorliegt, um im späteren Verlauf auch 3D-Objekte (Rohre) aus den mHBS umformen zu können. Es war das Ziel, durch Einsatz von Niedertemperatur-Pulverlacken oder strahlenvernetzenden Pulverlacken im Aufschmelzen unter den 140°C (Aufschmelzen, Härteln) zu liegen, jedoch sollte die Verklebung den Prozesstemperaturen und -zeiten Stand halten. Für die Untersuchungen wurden folgende Klebstoffe ausgewählt:

- Phenolharz **PF Res** - Resorcinharz (wässrig mit Spirituszusatz) mit Feststoffgehalt FG 55 – 59%
Produkt Bakelite PF 0283 HL / Härtter PF 0182
- 2 K PVAc-Dispersionskleber **2K-PVAc** - Copolymer mit Isocyanat
- Produkt nolax C36.3000 - 1 K PUR-Klebstoff **1K-PUR**
Produkt nolax C41.4512

Zur Überprüfung ihrer Temperaturbeständigkeit wurden die Rohstoffe als Schicht auf Holz (Po; Bi) aufgetragen und nach Trocknung, unter Berücksichtigung der dafür relevanten Informationen aus den technischen Datenblättern, im IR-Kanal Temperaturen von 100°C, 130°C und 150°C bei einer Haltezeit von jeweils 8 min ausgesetzt. Die nachfolgende Tabelle visualisiert die Ergebnisse am Beispiel des Substrates Pappel. Der Evaluierung wurde zusätzlich eine mikroskopische Bewertung vorgestellt.

Tabelle 5 : Thermische Stabilität der Klebstoffe am Beispiel des Substrates Pappel (Po), grün-keine Änderung, gelb-Harzaustritt führt zu Verblasungen, aber Kleber bleibt stabil, rot-Kleber zeigt Änderungen

Klebstoff	Substrat mit Kleber	100°C	130°C	150°C
PF Res				
1K-PUR				
2K-PVAc				

Die Untersuchungen führten zu dem Schluss, dass für weitere Verklebungen die Klebstoffe 1K-PUR bzw. 2 K-PVAc eher geeignet schienen als das Phenolharz. Aufgrund der besseren Handhabbarkeit starteten die Arbeiten mit dem 1K-PUR-Klebstoff.

Auswahl der Pulverlacke

Die Auswahl thermisch (Niedertemperatur NT) und strahlenvernetzbarer (UV) Pulverlacke erfolgte prinzipiell nach Aufschmelz-/Vernetzungstemperatur und der Einsetzbarkeit im Außenbereich. Ziel war, 140°C nicht zu überschreiten. Unter dem Gesichtspunkt, dass Holzbestandteile bereits ab ca. 70°C ausgasen und bei höheren Temperaturen auch Harze austreten, war die Temperatur, gekoppelt an die Verweilzeit eines der Hauptausschlusskriterien. Die Recherche (20 Pulverlacke unter 140°C) nach geeigneten Produkten wurde fortlaufend über die Projektlaufzeit durchgeführt. So dass nach den anfänglich in die Untersuchungen einbezogenen 9 Pulverlacken (davon 2 Pulverlack-Primer) weitere 3 Pulverlacke hinzugezogen wurden. Die Pulverlackbasis waren verschiedene Bindemittel: Epoxidharze (EP), Polyester (PES), Hybridsysteme beider (EP/PES) oder Acrylate (Ac). Die nächste Tabelle 6 fasst alle Pulverlacke zusammen, die im Verlauf des Projektes in Untersuchungen einbezogen wurden.

Tabelle 6 : Ausgewählte Pulverlacke für die Untersuchungen im Projektverlauf

Produktcode	Beschreibung	Einbrennen Temperatur [°C]	Einbrennen Zeit [min]	Schicht-dicke [µm]	Bemerkung
A-NT-PES	Außerbereich auf temperatursensitiven Substraten, Einschichtverfahren	125 °C 130 °C	5-9 3-7	80-120	
B-NT-EP/PES	Vorrangig für Innenanwendung auf MDF, Decklack, Einschichtverfahren	140	8	80-100	
B-UV clear01-PES/AW	Außerbereich, klare Einschichtbeschichtung	90-130 °C, 120 W/cm²; 2000-4000 mJ/cm² bei UVW bei 395-445 nm		80-120	Sonderanfertigung ^a
B-UV-PES/AW	Primer für MDF, OSB, Überbeschichten mit Pulver- oder Flüssiglack	90-130 °C, 120 W/cm²; 2000-4000 mJ/cm² bei UVW bei 395-445 nm		80-120	
B-UV clear02-PES/AW	Innenbereich, klare Einschichtbeschichtung	90-130 °C, 120 W/cm²; 4000-6000 mJ/cm² bei UVW bei 395-445 nm		80-120	nur für erste Versuche
B-UV weiß02i	Innenbereich, mit TiO ₂	90-130 °C, 120 W/cm²; 2000-4000 mJ/cm² bei UVW bei 395-445 nm		80-100	
B-UV clear02i	Innenbereich	90-130 °C, 120 W/cm²; 2000-4000 mJ/cm² bei UVW bei 395-445 nm		80-100	
C-T-PES	Wetter- und lichtbeständig	140		60-80	Empfehlung
C-T-EP/PES	Innenbereich, eher kein Holz	140	10-15	50-80	Empfehlung
E-NT-EP	Außenanwendung, Primer, härter allein nicht	135	3	90-130	Fuß-Muster
E-NT-AV3	Außenanwendung, Decklack	140	8-10	80-120	Fuß-Muster
F-NT-EP/PES	Innenbereich, Primer, sehr flexibel	140	5	80-120	Empfehlung
F-NT-PES	Außerbereich, für geprägte MDF, gute Lich- und Wetterbeständigkeit	130	2-3	80-120	
G-UV-PES	für MDF	2000-4000 mJ/cm² bei UV-Ga, LED möglich		keine Angabe	
H-EP	Innenbereich, diffusionsoffen	150	12-18	60-80	als Vergleich

Zu Beginn wurden 9 Produkte (verschiedene Bindemittel und Vernetzungstechnologien) in ihrem Verhalten bei der Applikation und dem Vernetzen untersucht, um die Vielfalt der vorliegenden Varianten auf die geeigneten Produkte zu reduzieren. Dabei erfolgte Pulverapplikation unter elektrostatischem Auftrag mit einer MS-Tribo-Pulversprühpistole bzw. einer MS Corona-Handpistole CP-2100. Zuerst wurde das Applikationsverhalten unter Berücksichtigung der Fluidisierbarkeit, des Aufladeverhaltens, der Schichtbildung auf Musterblechen und des Aufschmelzverhaltens bewertet. Für das Aufschmelzen und Vernetzen kam ein Durchlaufofen (ContiLine LAB der Fa. IBT) zum Einsatz. Charakteristische technische Informationen dazu sind:

- 3 IR-Zonen, Übergangszone, 2 UV-Zonen
 - kurzwellig, mittelwellig IR, STIR-Strahler (C-Form)
 - UV-Ga-, UV-Hg-Strahler
- Geschwindigkeiten bei hängendem Transport
 - $0,5 - 10 \text{ m min}^{-1}$ (rotierend 5 U min^{-1})

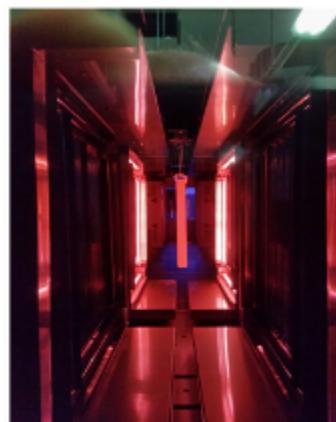
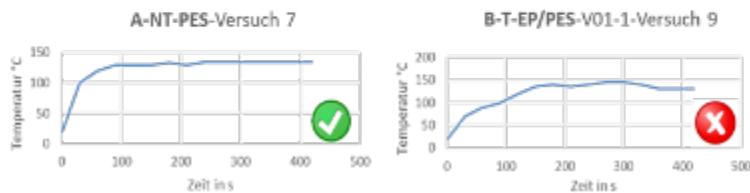


Abbildung 5: Ofenkurven geeigneter Pulverlack (links), nicht geeigneter Pulverlack (mittig) und Durchlaufkanal ContiLine LAB (rechts)

Die als geeignet resultierenden Pulverlacke (siehe Tabelle 7) wurden dann nach weiterer Applikation in ihrer Vernetzung (Methylethylketon (MEK)-Schnelltest nach Empfehlung eines Transferpartners) und der Haftung (Gitterschnitt GT nach DIN EN ISO 2409) bewertet. Anzumerken ist zu den Untersuchungen der Beschichtungen, dass

- der **MEK-Test** nur als Hilfsmittel zur Bewertung der Vernetzung herangezogen wurde. Dabei wird eine Wattepad mit MEK getränkt und vergleichbar über die Beschichtung bewegt (20 s). Problematisch sind PES-Lacke, denn hier wird man die Beschichtung stets Anlösen, bei PU oder EP funktioniert der Test. So stellte die Bewertung (1(schlecht) bis 4 (gut)) nur einen groben Anhaltspunkt dar.
- der **GT** mit der ZCT 2160 Zehntner – Gitterschnitt -Schablone (Schnittabstand 2 mm) bzw. mit dem Mehrschneidengerät (C3000) erfolgte. Lose Partikel wurden mit dem Tesa 4331 (50 mm breit) entfernt. Danach fand die visuelle Benotung (0 (gut) bis 5 (schlecht)) statt. Neben dem Trockengitterschnitt erfolgte im späteren Verlauf auch die Bewertung des Nassgitterschnittes (Gitterschnitt wird vor Bewertung für 2 h mit nassem Tuch belegt).

Aus diesen Ergebnissen resultierten folgend zuerst 6 Produkte (Tabelle 7, Status „grün“), die in weiteren Versuchen auf den Referenzsubstraten bzw. den neuen mHBS zum Einsatz gelangten.

Tabelle 7 : Ausgewählte Pulverlacke für die weiteren Beschichtungen

Produktcode	Schichtdicke [µm]	Haftfestigkeit GT	MEK (Beurteilung nach DIN 68861)	Status
A-NT-PES	105	0	4	●
B-NT-EP/PES	84	0	3	●
B-UV clear01-PES/AY	86	0	3	●
B-UVP-PES/AY	102	1	3	●
B-UV clear02-PES/AY	82	1	2	●
C-T-PES	65	1	3	■
C-T-EP/PES	89	1	3	■
E-NT-EP	104	0	4	●
E-NT-AY3	132	1	3	●

Auswahl der ionFl für den Einsatz als Primer

IonFl besitzen Vorteile, die sich beim Einsatz als Primer vorteilhaft auswirken konnten:

- teilweise hohe thermische Stabilität, so dass keine Zersetzung bei Wärmeeintrag stattfindet,
- vorhandene Hygroskopie, die theoretisch die Möglichkeit bietet, austretendes Wasser aus dem Holzsubstrat zu binden oder als Dampfsperre für austretende Gase zu funktionieren,
- die salztypische Leitfähigkeit, die zur Reduzierung des Oberflächenwiderstandes R_o führt und so die Pulverapplikation positiv beeinflussen müsste.

Anhand Leitfähigkeit und Löslichkeit erfolgte die Auswahl der genannten Produkte der Fa. Iolitec. Die ionFl EMIF kam im späteren Projektverlauf hinzu.

Untersuchungen fanden im Rahmen dieses Arbeitspaketes zum **Eindringverhalten** der ionFl in die Oberfläche der Holzsubstrate statt. Wichtig war, dass die ionFl nachweislich auf der Oberfläche haf-ten blieben, um dort zu einer verbesserten Leitfähigkeit beizutragen. Geringe Mengen (5 bis 10 ml) ionFl wurden auf den Referenzsubstraten versprüht (siehe AP 4). Nach deren Lufttrocknung erfolgte die IR-spektroskopische Messung. Zu diesem Zweck wurde ein FT-IR-Spektrometer Nicolet iS10 (Thermo Fisher) mit ATR-Aufsatz genutzt. Die ATR-Technologie (attenuated total reflection) bietet im Vergleich zur IR-Transmissionstechnik den Vorteil, dass Oberflächenuntersuchungen an festen oder flüssigen Proben ohne großen präparativen Aufwand durchgeführt werden können.

Tabelle 8 : Ausgewählte ionFl für die Untersuchungen im Projektverlauf

Produkt	Produktcode	Struktur	Charakteristik
1-Ethyl-3-methyl-imidazoliummethan-sulfonat (A)	EMIS W	<chem>C8H14N2O3S</chem> 	wasserlöslich Schmelzpunkt < 25°C Leitfähigkeit bei 25°C = 3,7 mS/cm
1-Ethyl-3-methyl-imidazolium trifluoromethan-sulfonat (A)	EMIT W	<chem>C8H11F3N2O3S</chem> 	wasserlöslich Schmelzpunkt = -9°C Leitfähigkeit bei 25°C = 9,2 mS/cm
1-Ethyl-3-methyl-imidazolium dicyanamide (A)	EMID W	<chem>C8H11N5</chem> 	wasserlöslich Schmelzpunkt = -21°C Leitfähigkeit bei 25°C = 25,3 mS/cm
1-Ethyl-3-methyl-imidazolium-bis(trifluoromethyl-sulfonyl)-imid (K)	EMIB	<chem>C8H11F3N3O4S2</chem> 	wasserunlöslich Schmelzpunkt = -17°C Leitfähigkeit bei 25°C = 6,6 mS/cm
1-Ethyl-3-methyl-imidazolium-bis(fluorosulfonyl)imide	EMIF	<chem>C8H11F2N3O4S2</chem> 	nicht mischbar mit Wasser, Aceton löslich Schmelzpunkt = -13°C Leitfähigkeit bei 25°C = 1,99 mS/cm

Alle ionFl ließen sich auf der MDF Ref, dem Referenzsubstrat, spektroskopisch nachweisen. Spektrenaufnahmen in z-Richtung (Plattenquerschnitt) zeigten jedoch auch, dass teilweise ein starkes Wegschlagen der ionFl in das Substrat stattfand. In diesen Fällen (EMIS W und EMID W) waren die spektroskopischen Indizien für die ionFl auf der Oberfläche wesentlich schwächer identifizierbar (siehe Abbildung 6). Alle Oberflächenwiderstände R_o lagen unter $1 \times 10^{10} \Omega$, so dass diese ionFl in weiteren Untersuchungen eingesetzt wurde.

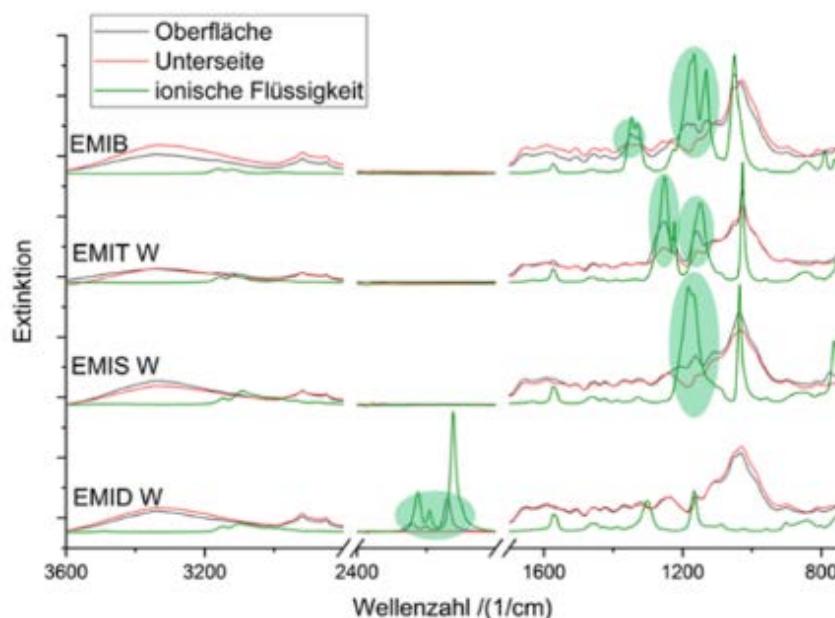


Abbildung 6: IR-Spektrenvergleich von ionFl, unbeschichteten MDF-Ref (Unterseite) sowie mit ionFl beschichteten MDF-Ref (Oberseite)

2.2 AP 2 - Herstellung der Referenzmaterialien und Charakterisierung (FS1 / FS2)

Flüssigbeschichtung der Referenzsubstrate

Als Referenz wurden die in AP 1 ausgewählten Substrate MDF-Ref, Ac und La beschichtet. Zusätzlich erfolgte jeweils die Beschichtung des für die mHBS-Entwicklung überwiegend genutzten Holzes Pappe (Po). Zur Referenzbeschichtung wurden die Substrate mit **Flüssigbeschichtungen** versehen. Zu diesem Zweck erfolgte eine Recherche nach Lacken, die bereits im Außenbereich eingesetzt werden. Die Auswahl der verwendeten Lacks ist in der nächsten Tabelle zusammengefasst.

Tabelle 9 : Ausgewählte Lacks für die Flüssigbeschichtungen als Referenz

Code	Chemie	Eigenschaften	Bemerkungen
U-Alk	1K modifiziertes Urethan-Alkyd	wasserbeständig oberhalb Wasserlinie, gut Chemikalien-, Stoß-, Schlagbeständig,	Nassschichtdicke 70-80 µm; Lösungsmittelhaltig! Staubtrocken 1 h; Trocken 24 h
Alk	Alkydharz	Weißlack, hoch diffusionfähig, Wetterbeständig, als Grund-, Zwischen- und Schlussbeschichtung	Trocken nach 6-7 h, Trocken 24 h
Spez	spezielle Harze	farblos, für Überholungs-, Zwischen- und Schlussanstrich, Vergilbungssarm, Wetterfest, Hochelastisch, mit UV-Blocker,	Verdünnung mit Wasser Trocken 1 h, Überstreichbar nach 4 h
PU	2 K Polyurethan	klar, wasserbeständig, Chemikalien-, Stoß, Schlagbeständig, UV-schützend	Nassschichtdicke 70-80 µm, Lösungsmittelhaltig! Staubtrocken 2 h; Trocken 24 h

Die Beschichtungen erfolgten in Anlehnung an die Angaben in den technischen Datenblättern der ausgewählten Lacks. Die applizierten Schichtstärken lagen wesentlich höher als vorgegeben, ließen sich jedoch auch nach mehrfacher Wiederholung nicht unter 100 µm Trockenschichtdicke bringen. Nach Applikation erfolgte in einem **ersten Schritt** die Charakterisierung der Haftfestigkeit (Gitterschnitt), der Wasseraufnahme (DIN EN 927-5), der Schichthärte (Nanoindentation). Nur die erfolgreichen Proben sollten dann Prüfungen wie Abrieb (DIN EN 15185 / DIN 68861-2 Taber Abraser) oder Kratzbeanspruchung (DIN EN 15185 Verfahren B / DIN 68861-4) erfahren. Die daraus besten Proben wurden dann Lichtechnheitsuntersuchungen (EN 15187) und der künstlichen Bewitterung (DIN 16474-2) zugeführt.

Nanoindentation

Zur Quantifizierung von vernetzungs- oder witterungsbedingter Versprödung bzw. zur Differenzierung von Beschichtungsmaterialien eignen sich gut Indentationsverfahren. Dieses Messverfahren wurde nach Beschichtung und auch nach Bewitterung angewandt, um mögliche Schichtveränderungen zu bewerten. Auf Basis der Messung von Kraft und Weg während des elastisch / plastischen Kontaktes eines harten Prüfkörpers (Indenter) mit der Probe erfolgt die Auswertung u. a. der Härte oder E-Module von Materialien. Die Messungen erfolgten mit dem Nanoindenter ZHN der Fa. Zwick.

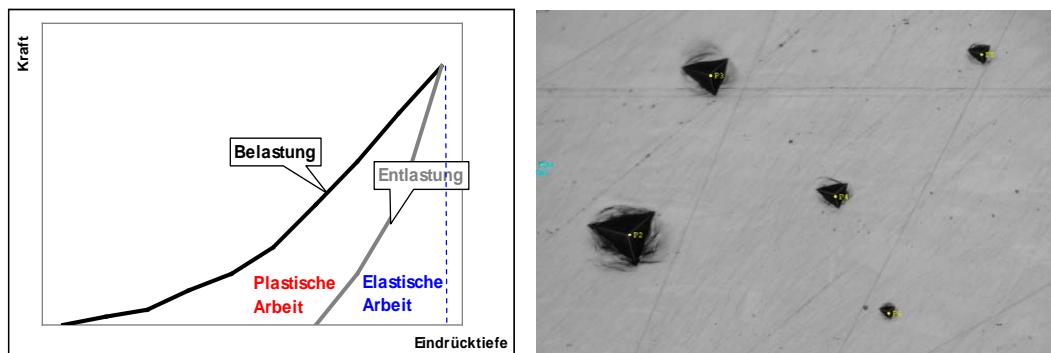


Abbildung 7: Kraft-Weg-Diagramm (links) mit Belastungs- und Entlastungsanteil und Indenter-Eindrücke nach Messung mit Berkovich-Indenter (rechts)

Die nächste Tabelle fasst ausgewählte Prüfdaten aus dem ersten Prüfschritt zusammen. Für die Entscheidungsfindung, welche der Probekörper im nächsten Schritt der künstlichen Bewitterung auszusetzen waren, wurden dann der Gitterschnitt sowie die Wasseraufnahme beurteilt. Die Härte wurde als zusätzlicher Parameter für die stabile Vernetzung der Schicht herangezogen.

Tabelle 10 : Prüfdaten des ersten Untersuchungsschrittes nach Applikation der verschiedenen Flüssiglacke auf die Referenzholzsubstrate (Status grün und gelb in nächste Untersuchungen)

Substrat	Lack	Schicht-	Haftfestig-	Wasserauf-	Nanoindentation			Status
		stärke	keit		Härte [Mpa]	Eindringtiefe [μm]	E-Modul [Gpa]	
		μm	GT (0-5)	[g/m ²] (25 g/m ²)				
MDF-Ref	U-Alk	137	0	30,2	1,9	15,2	0,1	●
MDF-Ref	Alk	205	1	38,3	3,8	11,3	0,1	■
MDF-Ref	Spez	129	4	118,4	7,2	8,0	0,3	■
MDF-Ref	PU	183	0	30,5	1,6	16,3	0,3	●
Ac	U-Alk	138	1	33,8	1,9	15,0	0,2	●
Ac	Alk	235	4	34,5	3,6	11,8	0,1	■
Ac	Spez	119	0	81,9	6,8	8,3	0,3	■
Ac	PU	145	0	35,9	1,7	10,1	0,2	■
La	U-Alk	176	2	33,9	1,3	12,7	0,1	■
La	Alk	185	4	37,9	3,6	11,9	0,1	■
La	Spez	146	0	97,7	4,4	5,6	0,2	■
La	PU	216	0	36,1	2,4	11,0	0,2	■
Po	U-Alk	176	0	34,4	1,8	15,5	0,1	●
Po	Alk	185	2	34,7	3,5	12,0	0,1	■
Po	Spez	146	0	75,6	6,5	8,5	0,2	■
Po	PU	216	0	33,3	3,2	12,0	0,3	●

Die Abbildung 8 vergleicht ausgewählte Flüssigbeschichtungen.

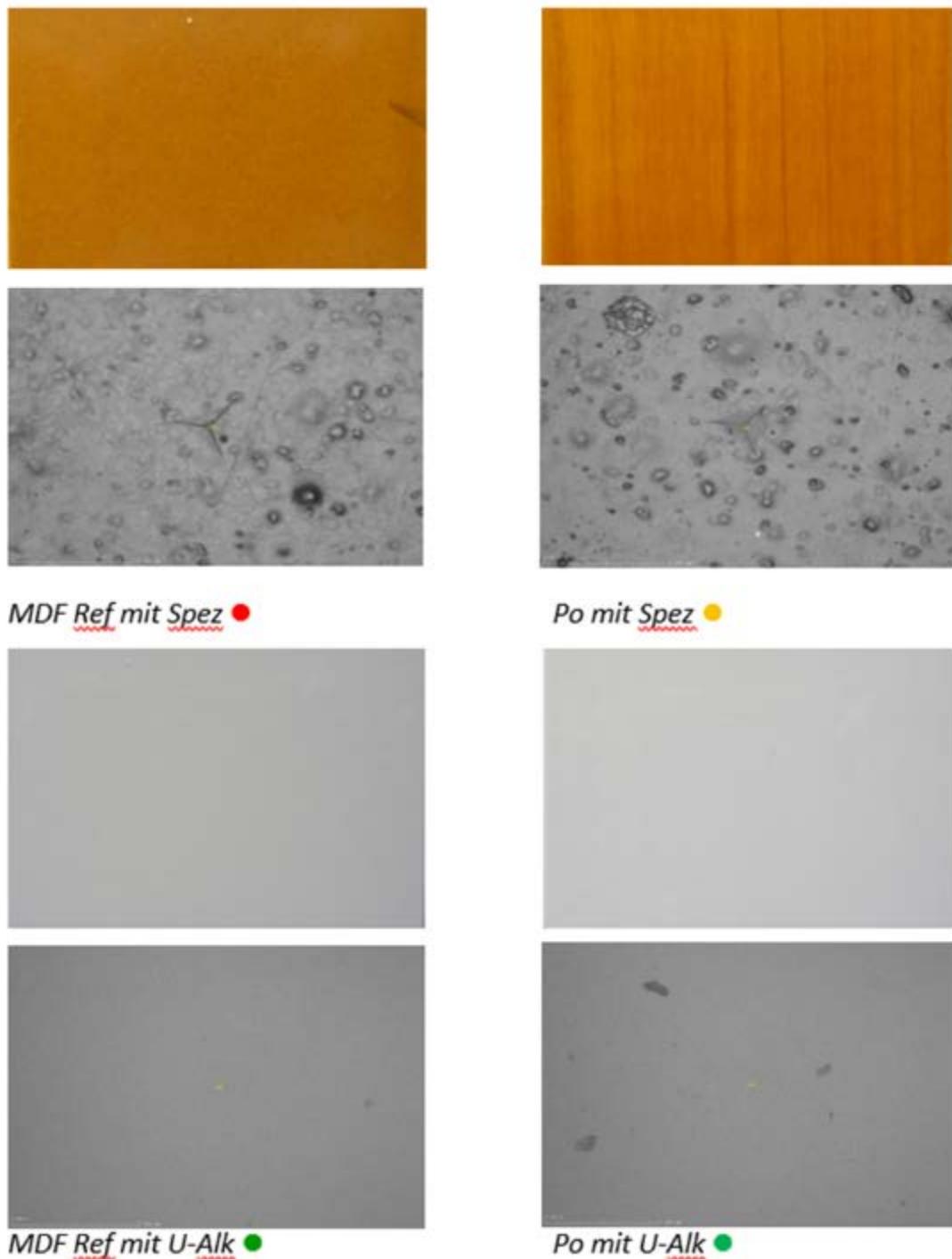


Abbildung 8: Flüssigbeschichtungen jeweils beschichtete Probe (oben) und mikroskopische Aufnahme nach Indentierung (unten)

Die Beschichtungen mit dem Produkt *Spez* zeigten sich nach mikroskopischer Bewertung in ihrer Substratbenetzung als eher inhomogen, dies war unabhängig vom gewählten Substrat und dessen Oberflächenenergie. Diese Inhomogenitäten waren folgend Schwachstellen bei der Wasserlagerung. Alle Muster mit diesen Beschichtungen nahmen mindestens die 3-fache Menge an Wasser im Vergleich zum Grenzwert von 25 g/m^2 auf. Deren Schichthärten lagen jedoch im Vergleich zu den

anderen Beschichtungen im Mittel doppelt so hoch. Für die weiteren Untersuchungen eigneten sich diese Muster nicht. Die außerdem als „gut“ bewertete Proben wurden dann auf ihre **Mikrokratzbeständigkeit** und ihre **Abriebfestigkeit** geprüft. Die beiden Urethan-Lacke (1K ca. 130 µm und 2K ca. 150 µm) lieferten die besten Resultate, d. h. genügten den dafür höchsten Ansprüchen an eine Beschichtung. Aus diesem Grund wurden folgend diese Beschichtungen auf den Referenzsubstraten auf ihre **Lichtechtheit** untersucht. Nach 50 h UV-Bestrahlung lieferten beide Beschichtungen noch Werte von über 4 (Graumaßstab), ab 170 h traf dies jedoch nur noch auf das 2K-PU System zu. Die parallel stattfindende **künstliche Bewitterung** bestätigte diese Erkenntnisse dann ab 500 h. D. h. für Vergleiche einer Flüssigbeschichtung mit einem besten Pulverlack sollte die 2K-PU-Formulierung auch auf mHBS appliziert werden.

Pulverbeschichtung von Referenzsubstraten

Das trockene Pulver wird elektrostatisch auf die Substratoberfläche gesprüht, dazu werden Pulverpistolen eingesetzt und das Pulver mit Korona oder durch Reibung (Tribo) elektrostatisch aufgeladen. Die Substratfeuchte sollte zwischen 5 und 15% liegen und der Oberflächenwiderstand R_o unter $10^9 \Omega$. Das mit diesen Voraussetzungen auf die Oberfläche des Substrates gesprühte Pulver haftet und kann dem Prozess des Aufschmelzens und des Vernetzens zugeführt werden.

Das **Aufschmelzen** und anschließende **Vernetzen** erfolgte an der ContiLine LAB-Anlage. Folgende Strahler sind in Reihenfolge und Typ des Einsatzes beliebig kombinierbar:

- KIR-Zone: 11 kurzwellige Strahler
- SIR-Zone: 9 schnelle mittelwellige Strahler
- STIR-Zone: 9 selektive mittelwellige Strahler
- UV-Hg-Zone: 4 Quecksilber-Strahler
- UV-Ga-Zone: 4 Gallium-dotierte Quecksilber-Strahler

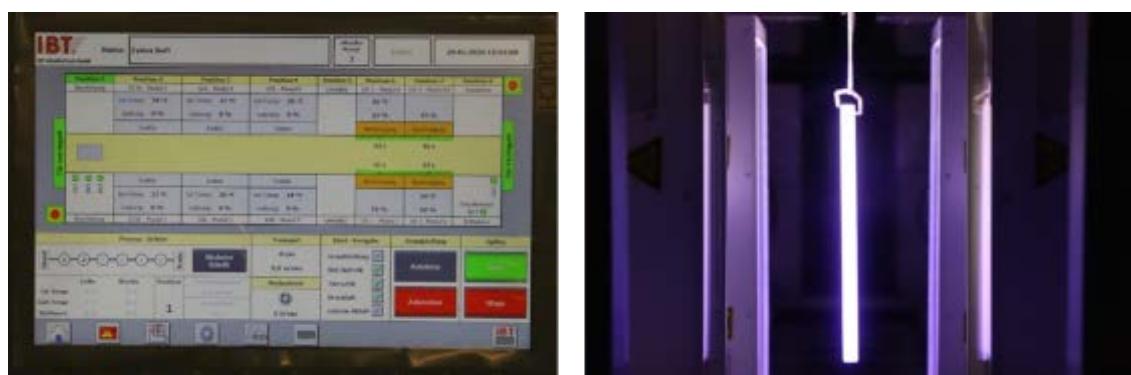


Abbildung 9: ContiLine LAB; Bedienoberfläche (links) und UV-Kanal (rechts)

Vor jeder Pulverlackapplikation der hier aufgeführten Referenzsubstrate erfolgten die Messungen der Feuchte und des R_o :

■ MDF-Ref	8-17% Feuchte	$3,8 \cdot 10^8 - 2,8 \cdot 10^{11} \Omega$
■ Acc	5-6% Feuchte	$5,4 \cdot 10^{11} \Omega$
■ La	14% Feuchte	$1,3 \cdot 10^8 \Omega$
■ Po	13% Feuchte	$9,5 \cdot 10^9 \Omega$

Die Substratfeuchten, ausgenommen für Acc, lagen im geforderten Bereich. Bei den Oberflächenwiderständen waren die Ausgangswerte alle eher grenzwertig, bei Acc lag auch dieser Wert über $10^9 \Omega$. Es erfolgten die Pulverbeschichtungen mit den Pulverlacken A-NT-PES, B-UVP-PES/AY mit B-NT-EP/PES sowie B-UV_clear01-PES/AY, die später zum Vergleich mit den Beschichtungen auf mHBS herangezogen werden sollten.

Die Pulverapplikation (elektrostatischer Auftrag) sowie das Aufschmelzen und Vernetzen (Ofenkurve) musste für jedes Substrat und jeden Pulverlack in mehreren Schritten eingestellt werden. Zur Ermittlung der technischen Parameter wurden variiert für

- Aufschmelzen: Aufheizzeit / -temperatur, verwendete IR-Strahler, Verweilzeit
- Vernetzen: Transportgeschwindigkeit, IR- oder UV-Strahler, UV-Dosis.

Die UV-Lacke B-UVP-PES/AY mit B-NT-EP/PES sowie B-UV clear01-PES/AY mussten in diesem Prozess der Untersuchungen schrittweise getestet werden. Hier war es zuerst das Ziel, den durch den Pulverlackhersteller offerierten Temperaturbereich des Aufschmelzens (90 bis 130°C) eher an der unteren Temperaturgrenze zu nutzen, um Ausgasungsprozesse des Holzes, die die Schichtqualität negativ beeinflussen würden, nicht zu forcieren. Dies erwies sich als nicht realisierbar. Sehr gute Beschichtungsergebnisse für **B-UV clear01-PES/AY** lieferten die in der nächsten Tabelle zusammengefassten Bedingungen.

Tabelle 11 : Pulverlackierung mit B-UV clear01-PES/AY auf verschiedenen Referenzsubstraten und der resultierende Status der Beschichtungen (grün – sehr gut, gelb – minimale Fehler)

Substrat	Aufheizen		Aufschmelzen/Halten			Vernetzen			Schicht [µm]	Status
	[s]	[s]	[°C]	Strahler	Strahler	[mJ/m²]	[m/min]			
MDF-Ref	60	240	130/100	STIR/SIR	Hg/Ga	4.200	3	125	●	
Acc*	60	240	130/100	STIR/SIR	Hg/Ga	4.200	3	60	○	
Po	60	180	130/100	STIR/SIR	Hg/Ga	4.200	3	95	○	

* thermische Vorbehandlung bei 80°C

Während bei Acc das Pulver sehr schlecht haftete und deshalb das Substrat thermisch vorbehandelt wurde, zeigte das Substrat Po aufgrund seiner offenporigen Struktur und der langen Fasern Probleme bei der Beschichtung. Hier waren Schichtdefekte z. B. durch austretendes Harz sofort offensichtlich. Diese Probleme schlügen sich auch in den geringeren Schichtstärken wieder, wobei das Substrat Po noch im Zielbereich von 80 bis 120 µm lag. Auf der MDF-Ref waren auch die Beschichtungen im Kantenbereich gut, die Schichthomogenität gegeben. Ein vergleichbares Bild lieferte der Einsatz des Pulverlackes A-NT-PES, wobei dessen Applikation einfacher schien. Trotz den genannten

Beschichtungsproblemen lagen alle GT-Werte bei 0 bzw. 0 – 1, sowie Ergebnisse beim MEK-Test bei 2 – 3. Dies entsprach guten Schichthaftungen bzw. -vernetzungen.

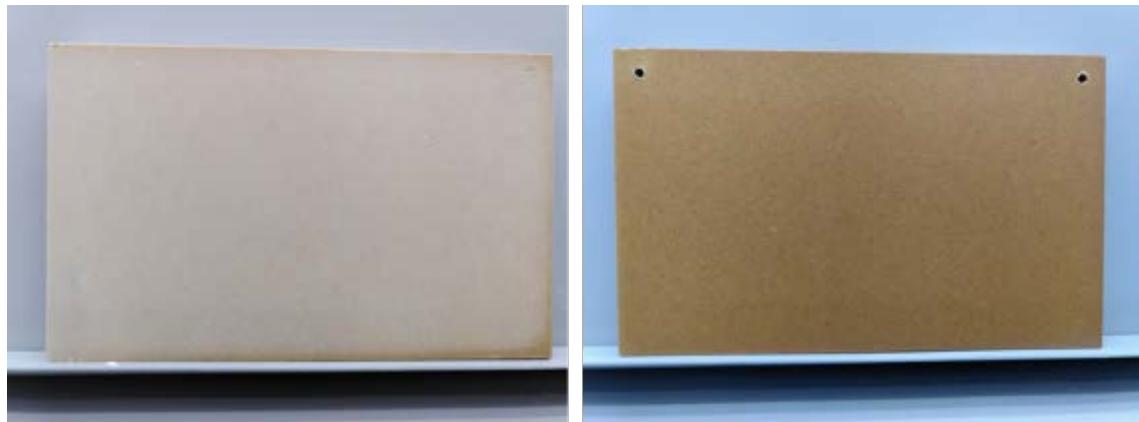


Abbildung 10: Referenzsubstrate pulverbeschichtet (Beispiel B-UV clear01-PES/AY auf MDF-Ref, links - nicht aufgeschmolzen (90°C), rechts - aufgeschmolzen (130°C))

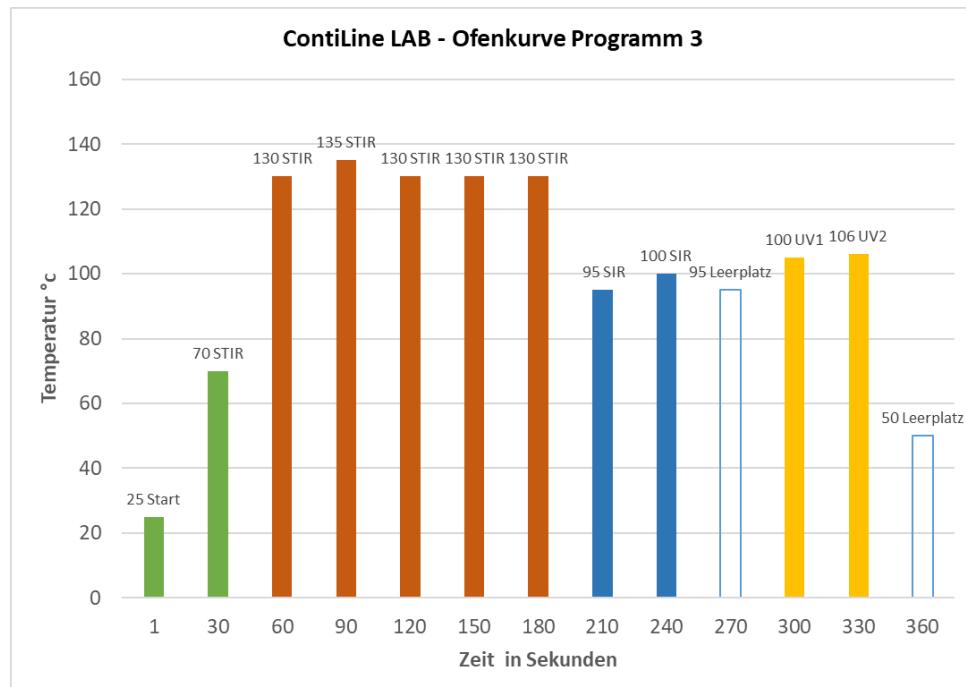


Abbildung 11: Ofenkurve für das Aufschmelzen des Pulverlackes an einem Beispiel B-UV clear01-PES/AY

Die Beschichtung auf dem Substrat Acc erfüllte die Anforderungen an die Kratzbeständigkeit und die Abriebbeanspruchung nicht. Ursächlich war die mangelhafte Schichthomogenität sowie Beschichtungsdicke. Mit den besseren Beschichtungen auf MDF-Ref und Po erfolgte dann die künstliche Bewitterung. Alle Beschichtungen lieferten auch nach fast 2.000 h einen Graumaßstab von über 4,5 (Grenze = 4) und lagen in ihrem ΔE unter 0,5. Diese Ergebnisse dienten im späteren Projektverlauf als Vergleich.

Herstellung von mHBS - Referenzmaterialien

Parallel zu den Arbeiten der FS 1 erfolgten Auswahl, Zuschnitt und Formatierung der Holzsubstrate für die mHBS. Hierbei wurden zuerst die ausgewählten Materialien Po, Bi und zusätzlich Fichte nach Dichte und Porenvolumen, Wärmeleitung, Feuchtigkeit und Verklebbarkeit untersucht. Die Untersuchung der Wärmeleitung bzw. Erwärmung erfolgte im Zusammenhang mit der geplanten Anschaffung der Kohlefaser-IR-Strahler zur Probenerwärmung. Die Verklebung der Probekörper erfolgte sofort nach Herstellung der mHBS für die weiteren Untersuchungen des Klebstoffeinflusses bei Pulverbeschichtung. In den Versuchen wurden ebenfalls die Holzfeuchtigkeit nach DIN EN 322 und die Rohdichte nach DIN 52182 ermittelt. Aus dem Verhältnis der Reindichte zur Darrdichte konnte der Porenvolumenanteil abgeschätzt werden.



Abbildung 12: Probekörper Pappel, Birke und Fichte nach der Formatierung und Schmalflächenverklebung

2.3 AP 3 – Technologieanpassung zur Herstellung der mHBS (FS 2)

Herstellung verschiedener mHBS

Die zuvor in AP 1 erfolgte Auswahl, Beschaffung und Charakterisierung der Materialien wurde in AP 3 fortgesetzt. Weiterhin wurden die thermischen, thermo-mechanischen und thermo-hydro-mechanischen Modifizierungsparameter für die Arbeiten, welche zeitlich parallel zum AP 2 in den Forschungsstellen absolviert wurden, im AP 3 ausgeführt. In Tabelle 12 sind ausgewählte Modifizierungsparameter angegeben. Hierbei wurden zunächst die Parameter zur Herstellung unterschiedlich verdichteten Materials untersucht und mit Variation folgender Parameter durchgeführt:

- Verdichtungsgrad zur Erzeugung verschiedener Porenvolumina,
- Presstemperaturen zwischen 80°C und 160°C,
- Prozessgeschwindigkeiten zwischen 0,1 mm/min bis 1,0 mm/min.

Das Ausgangsporenvolumen wurde mit 100 % im darrtrockenen Zustand festgelegt. Die Variation des Porenvolumens erfolgte durch Auswahl der Holzart und durch den vorgesehenen Verdichtungsgrad. Nachfolgend wurden verschiedene post-treatments durch thermische Behandlung (160°C bis 200°C bei unterschiedlichen Einwirkzeiten 0; 40; 80 min) vorgesehen. An den Holzproben wurden verschiedene Festigkeitsprüfungen im Biege- und Querzugversuch nach EN 310 und EN 319 fortgeführt. Die Probenabmessungen wurden für die herzstellenden Platten mit 300 mm x 200 mm x Dicke gewählt. Für die Wahl der Probendicke war der Endzustand nach der thermischen Verdichtung ausschlaggebend.

Tabelle 12 : Parameter zur Verdichtung der ausgewählten Referenzhölzer

Holzart	Verdichtungs-geschwin-digkeit [mm/min]	Temperatur Holz [°C]	Feuchtigkeit Holz [%]	Verdichtung um [%] uniaxial	post-treatment
Pappel (<i>Populus nigra L.</i>)	10mm/min	75	8	20	Sattdampf
Birke (<i>Betula pendula Roth.</i>)	20mm/min	100	12	30	Hitze
Fichte (<i>Picea abies L.</i>)		125		50	160°C bis 200°C

Untersuchungen zum Temperaturverhalten / Wärmeaufnahme

Holz kann als Isolator bezeichnet werden. Die Wärmeleitung des porösen Werkstoffes erfolgt über Konvektion innerhalb der Zellen, jedoch zu einem erheblich größeren Teil durch Konduktion. Mit zunehmender Rohdichte erhöht sich infolgedessen die Wärmeleitfähigkeit [34]. Um Holz in industriellen Prozessen möglichst schnell zu erwärmen, werden vornehmlich Kontaktverfahren in der Heizpresse oder Anlagen mit hochfrequentem Feld eingesetzt. In Zusammenarbeit mit dem Projekt-partner Heraeus Noblelight GmbH und RPE Infratherm wurden Untersuchungen zur Erwärmung von Holz in Abhängigkeit der Dichte vorgenommen. Durch die Energieeinwirkung wurden auf der Oberfläche wesentlich höhere Temperaturen gemessen als im Inneren der Proben. Für eine schnelle und energetisch effiziente Erwärmung würden sich auch tief eindringende Medien wie Mikrowellenstrahlung eignen. Diese wurden jedoch aus praktischen Gründen in einer industriellen Umsetzung zunächst ausgeschlossen. Die Nutzung der Strahlungsplatten zur Erwärmung und Beibehaltung von gewünschten, konstanten Materialtemperaturen wurde erfolgreich untersucht.

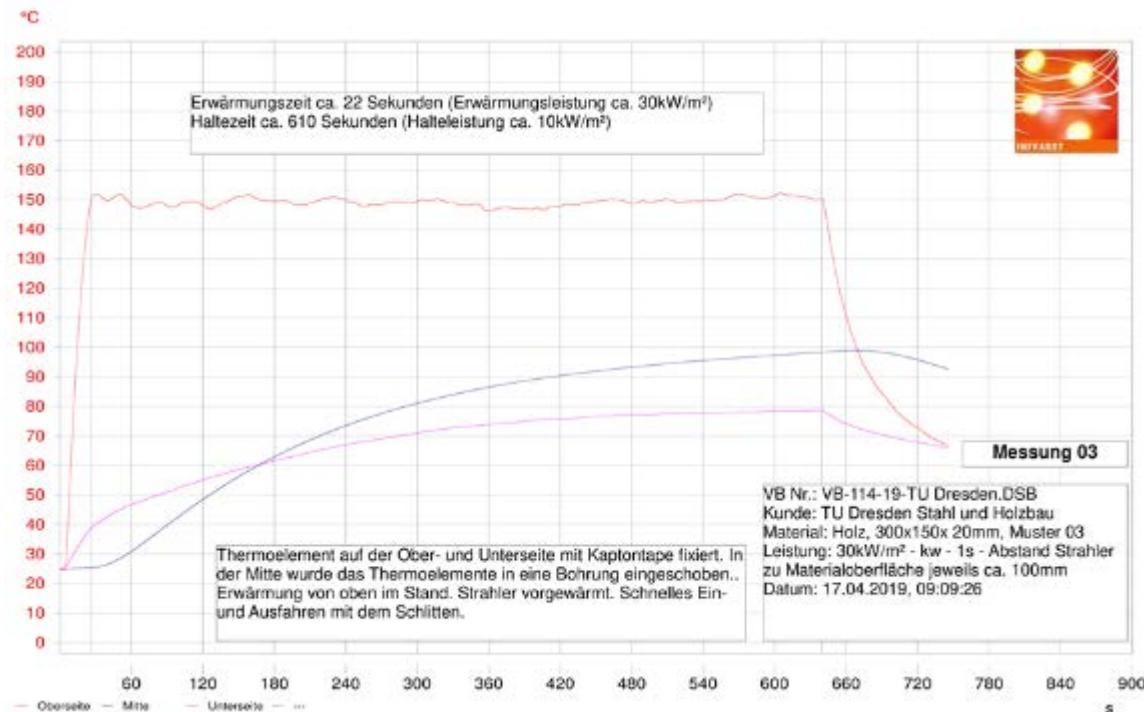


Abbildung 13: Erwärmungskurve am Beispiel einer Holzprobe

Untersuchungen zum Quellverhalten

Die Untersuchung des Quell-Schwind-Verhaltens (ASE – Anti - Swelling Efficiency) wurden an verdichteten Probekörpern (Po, Fi, Bi) von 50 x 50 x 60 mm mit 72 h Wasserlagerung und im Wechselklima darrtrocken/Wasserlagerung vorgenommen. Es musste festgestellt werden, dass weder die Verdichtungsgeschwindigkeit noch die Holzfeuchtigkeit erheblichen Einfluss auf das Quell- und Schwindverhalten der verdichteten Hölzer haben. Im Ergebnis führten hohe Verdichtungsgrade von 50% (führten zu hohen Rohdichten von über 1100kg/m³ und somit zu geringen Porenvolumen von unter 20%) zu einer verzögerten Rückverformung. In Abbildung 14 sind drei Probekörper unterschiedlicher Dichte (Ausgangsporenvolumen 88 %, 63 % und 71 % - von links nach rechts) vor der Verdichtung und während der Wasserlagerung mit signifikanten Unterschieden im Rückverformungsverhalten (Flächenzunahme) dargestellt. In Abbildung 15 ist die Flächenzunahme in Abhängigkeit des normierten Porenanteiles bezogen auf die Reindichte des Holzes nach der Trocknung erkennbar. Mit zunehmendem Porenanteil erreicht die Rückverformung nahezu den Ausgangszustand. Allerdings wurde nur eine geringe Reduzierung der Verformung durch Erhöhung der Dichte erreicht.

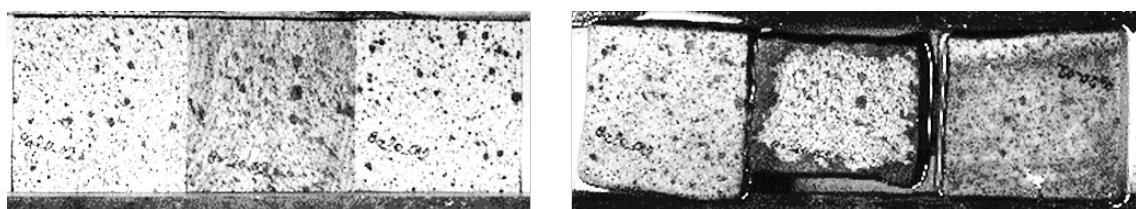


Abbildung 14 : Probekörper vor der Verdichtung (links) und nach 72 Stunden Wasserlagerung (rechts) zur Bestimmung der Rückverformung bzw. der Quellung und Schwindung mit sichtbarer Verzögerung

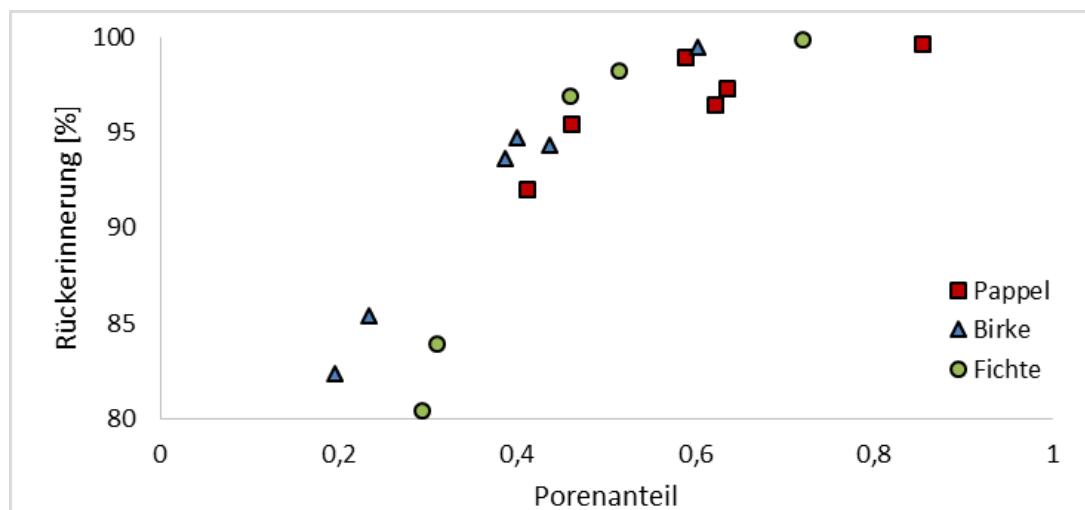


Abbildung 15: Rückverformung in Abhängigkeit des vorhandenen Porenvolumens nach der Verdichtung und Wasserlagerung der dargetrockneten Proben

Aus den Untersuchungen konnten die notwendigen technologischen Parameter zur Verdichtung ermittelt werden. Danach wurden der Verdichtungsgrad, die Behandlungstemperatur und die Behandlungszeit zur Herstellung der mHBS festgelegt. Prinzipiell können alle genannten Holzarten als mHBS hergestellt werden. Unterschiede in Dichteprofil und –verteilung ergaben hinsichtlich der erzielten Homogenität während der Verdichtung, insbesondere bei geringeren Verdichtungsgraden und mit Erreichen einer optimalen Verdichtungstemperatur im post-treatment. Die Einstellung des Pressdruckes erfolgte über die Vorgabe des Verdichtungsgrades und folgt im Allgemeinen der Zunahme der Rohdichte. In den Versuchen in AP 3 wurde als Zielgröße zunächst der Verdichtungsgrad bzw. die Zieldicke der Proben angestrebt, da anderenfalls ein vorgegebene Pressdruck zu unterschiedlichen Probedicken geführt hätte. Die in den Biegeversuchen erreichten Festigkeiten wiesen bei hoher Verdichtung, aber Temperaturen unterhalb 180°C, die höchsten Werte auf. Bei weiterer Temperaturerhöhung auf 200 °C und gleicher Behandlungszeit von 0, 40 und 80 Minuten verringerten sich die Biegefestigkeiten und das Quell-Schwindverhalten wie die nachfolgende Abbildung am Beispiel Pappel zeigt.

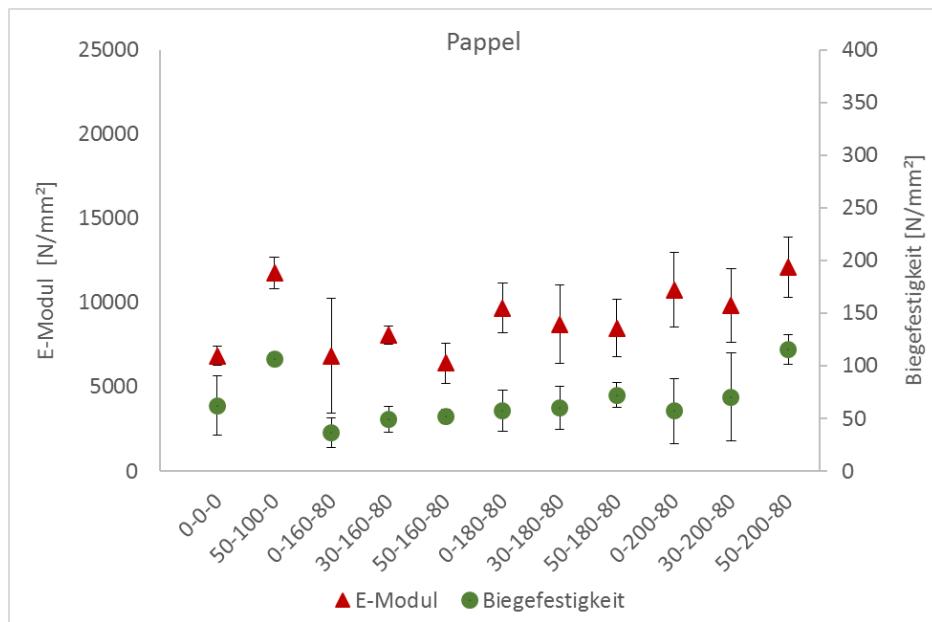


Abbildung 16: Biegefestigkeit bei steigenden Temperaturen und Verdichtung (Bsp. 50-100-0 Verdichtungsgrad-Temperatur-Behandlungszeit)

Fazit – Technologieanpassung mHBS

1. Die Auswahl der Hölzer erfolgte zu Gunsten von Birke nach Porenstruktur (zerstreut) und Porenanteil (59 %) und wurde durch Pappel (zerstreut; 73 %) ergänzt.
2. Hinsichtlich der Rückverformung zeigte Birke (50 % verdichtet; 200 °C) die geringste Rückverformung mit etwa 82 % neben Fichte mit 81 %.
3. Die Verdichtung (um 20/30/50%) führte zum Anstieg des Pressdruckes in Abhängigkeit der Zieldicke und zur Reduzierung des Porenvolumens und führte zur Erhöhung der mechanischen Kennwerte.
4. Temperaturen von 160 °C reduzierten den E-Modul (125 N/mm²) nicht bei unverdichteten Proben, jedoch sank die Biegefestigkeit bei Pappel um 22 %.
5. Insgesamt wurde nur eine geringe Reduzierung der Rückverformung gemessen, so dass weitere Optimierungen dazu folgten.
6. Bei verdichteter Pappel nahmen Festigkeit und Steifigkeit bei Temperaturerhöhung bis 200 °C leicht zu im Vergleich zur Referenzprobe.
7. Das Holzsubstrat Fichte wurde aufgrund hohen Harzaustrittes bei der Verdichtung sowie das Holzsubstrat Buche durch die starke Verfärbung nicht weiter zur folgenden Beschichtung genutzt.

2.4 AP 4 - Eignung der ionFl als Primer bei der Holzbeschichtung (FS 1)

Applikation der ionFl

IonFl sind sehr teuer. Dieser wirtschaftliche Aspekt und die Tatsache, dass das Auftragen von Flüssigkeiten die Holzfasern anquellen lassen, führten zu dem Schluss, möglichst geringe Auftragsmengen im Sprühverfahren zu applizieren. Dazu wurden verschiedene Aggregate getestet, der Einsatz einer Airbrush-Pistole unter Variation von Abstand und Druck näher untersucht. Mit der gewählten Airbrush-Pistole konnte die Tropfengröße so eingestellt werden, dass das Sprühbild homogen war.

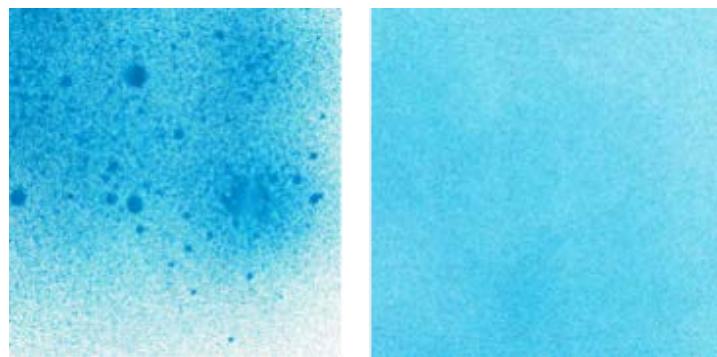


Abbildung 17: Sprühbilder wässriger Flüssigkeiten bei Oberflächenapplikation (30 cm Abstand, links Sprühapplikation ohne Airbrush, rechts Sprühapplikation mit Airbrush)

Unter Beachtung von Sprühdauer, Abstand und Druck wurde das Applizieren der ionFl auf Holzoberflächen optimiert. Zu einem besonders homogenen Sprühbild führten die Parameter **1,5 bar, 10 s und 30 cm Abstand**. Dabei war es irrelevant, welches der Referenzsubstrate dafür eingesetzt wurde.

Oberflächenstabilität der ionFl

Der Einsatz der ionFl verfolgte die Ziele, zum einen die **Leitfähigkeit** der Holzoberflächen zu erhöhen, um die Pulverhaftung und dessen homogenen Auftrag zu verbessern und zum anderen aus dem Holz mglw. austretende Feuchtigkeit (-OH) zu binden, um Schichtdefekte bzw. -enthaftungen zu vermeiden. Zu diesem Zweck waren die in AP1 ausgewählten ionFl in ihrer Wirkung weiter zu untersuchen, d. h. die Zusammenhänge zwischen Konzentration/Wirkung und Langzeitstabilität des Oberflächenwiderstandes Ro zu ermitteln. Die nächste Tabelle zeigt die stufenweise Versuchsdurchführung. Das Applizieren der verschiedenen ionFl erfolgte homogen. Wurde **Wasser als Lösemittel** eingesetzt, so erwies sich die Trocknung bei 7,8 kW und einer Geschwindigkeit von 5 m/min im IR-Kanal als geeignet, d. h. das Anquellen der Holzfasern ließ sich minimal halten. Die Trocknung erfolgte bei Raumtemperatur oder unter IR-Strahlung (Tabelle 13) bis zur Massekonstanz.

Tabelle 13 : Versuchsdurchführung mit ionFl

Stufe	Substrate	Auftrag	Trocknung
0	MDF Ref, Acc, La	Wasser und IPA	RT und IR-Kanal
1	MDF Ref	EMID W in versch. Konzentrationen und Mengen	RT und IR-Kanal
2	MDF Ref, Acc, La	EMID W	Beste Bedingungen aus 1
3	MDF Ref, Acc, La	weitere ionFl	Beste Bedingungen aus 1

IPA – Isopropanol

RT – Raumtemperatur

Festzustellen war:

- die 20 %ige Konzentration an ionFl bei einer Sprühdauer von 5 s führte zur Reduzierung des R_o um bis zu 5 Zehnerpotenzen **auf 10^5 - $10^6 \Omega$** .
- alle ionFl (EMIS W, EMID W, EMIT W, EMIB) zeigten auf allen Referenzsubstraten nach Applikation einen in diesem Maße gesenkten Oberflächenwiderstand.
- allein bei **EMIT W** blieb selbst nach 3 Wochen Lagerung bei 23°C/50 % rF der R_o von **$10^6 \Omega$** erhalten. Alle anderen ionFl stiegen wöchentlich mindestens um eine Zehnerpotenz an.
- die Holzfeuchte stieg teilweise sprungartig an, was für das hygrokopische Verhalten der ionFl sprach. Da jedoch diese nur als Primer eingesetzt werden sollten, eine anschließende Pulverlackapplikation stattfand, schien diese Tatsache nicht gewichtig.

Die nächste Abbildung visualisiert die Detailergebnisse am Beispiel der ionFl EMIT W.

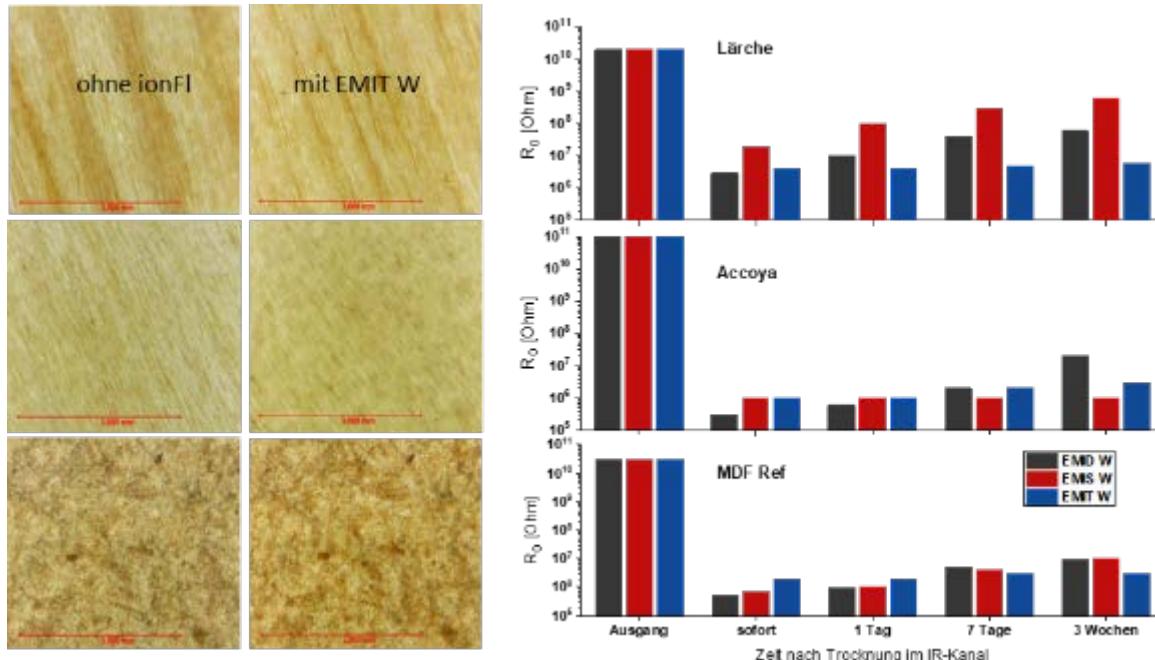


Abbildung 18: Verhalten der ionFl EMIT W auf verschiedenen Referenzsubstraten

Aus den Untersuchungen wurden folgende Hypothesen abgeleitet:

- IonFl sind hygrokopisch und können Hydroxylgruppen binden. Dieser Vorgang erhöht jedoch die Mobilität der ionFl. Sie migrieren eher in das Holzinnere. Daraus resultiert wiederum der Anstieg des R_o .
- Das Auftragen der ionFl verändert minimal die Holzfarbe.

3. IPA als Lösemittel eignet sich nicht, da die sofortige Verdunstung bei RT nur zum ungleichmäßigen Verteilen der ionFl auf der Substratoberfläche führte.

Zusätzlich erfolgte außerdem die Untersuchung des Trägermediums **Butanol**. Butanol gestattete das gleichmäßige Applizieren der ionFl bei schnellstmöglicher Verdunstung bei RT. Auch bei diesen Untersuchungen lagen die R_0 bei **EMIT W** sehr stabil im Bereich von 10^6 bis $10^7 \Omega$. Für **EMIB**, welches nicht wasserlöslich ist, konnte Butanol mit 10% Aceton als Trägermedium Anwendung finden. Die erzielten R_0 waren sehr stabil, jedoch konnten sie nicht so stark abgesenkt werden, wie bei den ionFl EMIS W, EMID W und EMIT W. Zudem war eine starke Substratabhängigkeit gegeben.

Verhalten von Klebstoffen und ionFl

Klebstoffe werden zum Zusammenfügen der verdichteten Paneele für verschiedene Formate der mHBS benötigt. Neben einer Temperaturlast, die während des Aufschmelzens und Vernetzens der Pulverlacke auf die Klebfugen wirkt, könnten die ionFl bei Temperaturbelastung und unter Einfluss von Feuchtigkeit die Klebstoffe angreifen. Die nächsten Untersuchungen sollten dieser Annahme nachgehen.

Die Untersuchungen dafür erfolgten an Klebstoffsichten, die auf Po nativ und verdichtet Po aufgetragen wurden. Untersucht wurden **EMIT / EMID** in **Wasser** oder **Butanol**, welche auf 1K PUR bzw. PF Res aufgesprührt wurden. Es wurden Trocknungstemperaturen von 130 °C bzw. 150 °C und Belastungszeiten von 8 min, als typische maximal anzustrebende Verweilzeiten bei herkömmlichen Pulverlacken, betrachtet. Zusammenfassendes Fazit war:

- der R_0 wurde durch das Auftragen auf den Klebstoff ebenfalls abgesenkt, um 2 bis 4 Zehnerpotenzen,
- die Wärmebelastung führte auf der Schicht und auch nicht in der Klebefuge zu sichtbaren Veränderungen des Klebstoffes und die mechanische Stabilität der Klebefugen wurde ebenfalls nicht negativ beeinflusst.

Charakterisierung der Oberflächen mit ionFl

Die Beschichtbarkeit von Substraten/Oberflächen und die resultierenden Schichtqualitäten werden einerseits durch die Oberflächenqualität (Topografie) und andererseits die Oberflächenenergie OFE (hier den polaren Anteil) beeinflusst

Die **3D-Rauheitsmessungen** zur Charakterisierung der Oberflächen wurden mit dem Messgerät MicroCAD von der Firma GF-Messtechnik anhand der Methode der Streifenlichtprojektion durchgeführt. Dabei werden unter einem definierten Triangulationswinkel mit einem Projektor Streifen auf die Oberfläche des Messobjektes projiziert. Die perspektivischen Deformationen werden mit einer CCD-Kamera aufgenommen und anhand der Lage der Streifen und des Grauwertes der einzelnen Bildpunkte wird ein Höhenbild des Messobjektes berechnet. Es wurden folgende Geräteparameter verwendet:

- Messfläche: 12,52 mm x 9,52 mm
- Vertikale Auflösung: 1 µm
- Horizontale Auflösung: 8 µm
- Anzahl Einzelmessungen: 15

Wichtige Welligkeitsparameter wie Sa, Sq oder Sz wiesen vor und nach Behandlung der Oberflächen mit ionFl nur geringe Änderungen vor. Einzig für die Referenz Ac verdoppelten sich nach Einsatz der ionFl diese Parameter.

Die **Oberflächenenergie OFE** eines Festkörpers bzw. die Oberflächenspannung OFS einer Flüssigkeit geben darüber Auskunft, ob auf der einen Seite eine Benetzung des Festkörpers mit der betreffenden Flüssigkeit möglich ist und auf der anderen Seite eine Haftung zwischen Flüssigkeit/Lack und Substrat zu erwarten ist. Je höher die OFE des Substrats, desto besser ist im Allgemeinen das Benetzungsverhalten mit chemisch verschiedenen Flüssigkeiten. Im Idealfall ist die OFE des Substrats größer/ gleich der OFS der Flüssigkeit, da dann eine nahezu vollständige Benetzung erfolgt. Eine Differenzierung der OFE in disperse und polare Anteile ermöglicht des Weiteren eine Bewertung der zu erwartenden Haftung. Für eine gute Haftung sollten sich beide Materialien, also Substrat und ausgehärtete Lackschicht möglichst ähnlich sein.

Die Oberflächenenergien wurden mit dem Randwinkelmessgerät der Fa. Dataphysics (OCA 10) durch Analyse der Kontaktwinkel einer polaren Flüssigkeit (Wasser) und einer unpolaren Referenzflüssigkeit (Diiodmethan) mit der jeweiligen Oberfläche und anschließender Berechnung der Oberflächenenergie über den Ansatz nach Owens-Wendt-Rabel-Kaelble gemessen. Die Kontaktwinkel wurden für jede Flüssigkeit zehnfach bestimmt und der arithmetische Mittelwert berechnet. Das Fazit aus den Ergebnissen war:

- natives Holz wie **La**
Kontaktwinkel H₂O wird durch ionFl reduziert, OFE-Steigerung (pol. Anteil)
- behandelte HWS wie **MDF Ref**
Kontaktwinkel H₂O wird durch ionFl reduziert, OFE-Steigerung (pol. Anteil)
- behandelte „HWS“ wie **Acc**
Kontaktwinkel H₂O erhöht, OFE geringer (pol. Anteil niedriger)

Diese Ergebnisse zeigten, dass Acc prinzipiell schlechter beschichtbar sein musste, obwohl die Voraussetzung eines niedrigeren R₀ erfüllt war.

Pulverbeschichtbarkeit von mit ionFl behandelten Referenzsubstraten

Es erfolgte der Auftrag der ionFl **EMIT W** mit Trägermedium Wasser und auch Butanol. Als Referenzsubstrate wurden MDF Ref, Acc, La und Po herangezogen. Der unmittelbar vor Pulverlackapplikation

gemessene R_o lag im Mittel bei $10^8 \Omega$ und damit höher als in den Applikationsvorversuchen mit den ionFl. Prinzipiell bei der Pulverlackapplikation der Referenzsubstrate auftretende Probleme, wie die insbesondere bei Po störende Längsfasern-Aufrichtung oder der für La typische Harzaustritt, ließen sich auch durch den Primerauftrag nicht beheben. Dies konnte auch nicht erwartet werden. Allerdings ließ sich bereits zu diesem Zeitpunkt nachweisen, dass der acetylierte und etwas dichtere HWS Acc ohne ionFl nicht pulverbeschichtet werden kann und nach Einsatz der ionFl EMIT W die Pulverapplikation (mit Inhomogenitäten am Rand) möglich war (siehe Abbildung 19).



Abbildung 19: Vergleich der Pulverlackhaftung auf Referenz Accoya ohne ionFl (links) und mit ionFl (rechts)

Der inhomogene Auftrag resultierte aus einem ungleichmäßigen Auftrag der ionFl. Dieser Arbeitsschritt war noch nicht optimiert. Deutlich war an diesen Versuchen ebenso, dass dem Auftragsverfahren der ionFl und der Ermittlung der erforderlichen Applikationsmenge noch mehr Augenmerk geschenkt werden muss. Scheinbar ist die Menge an ionFl zur Sicherstellung der Pulverapplikation für jedes Substrat anzupassen. Im weiteren Verlauf wurde die Applikation der ionFl optimiert und wurde folgend stets absolviert mit 20 %igen Lösungen, im Walzenauftrag (Applikationszeit 5 s) und bei 80 °C für 4 min konvektiv getrocknet.

Verfärbung bei Einsatz von ionFl

Für diese Untersuchungen wurden mHBS (20 % reduziertes Porenvolumen) von Po und Bi eingesetzt. Die ionFl EMIT W und EMID W hatten in den anderen Untersuchungen positiv abgeschlossen und wurden deshalb in die nächsten Versuche involviert. Die ionFl EMIF wurde auf Anraten des Projektbegleiters als Neuentwicklung hinzugenommen. Die nächste Abbildung verdeutlicht das Ergebnis. Nur EMIT W lieferte ΔE mit Werten um ca. 1, die bereits grenzwertig waren, denkt man an den Einsatz z. B. eines transparenten Pulverlackes.

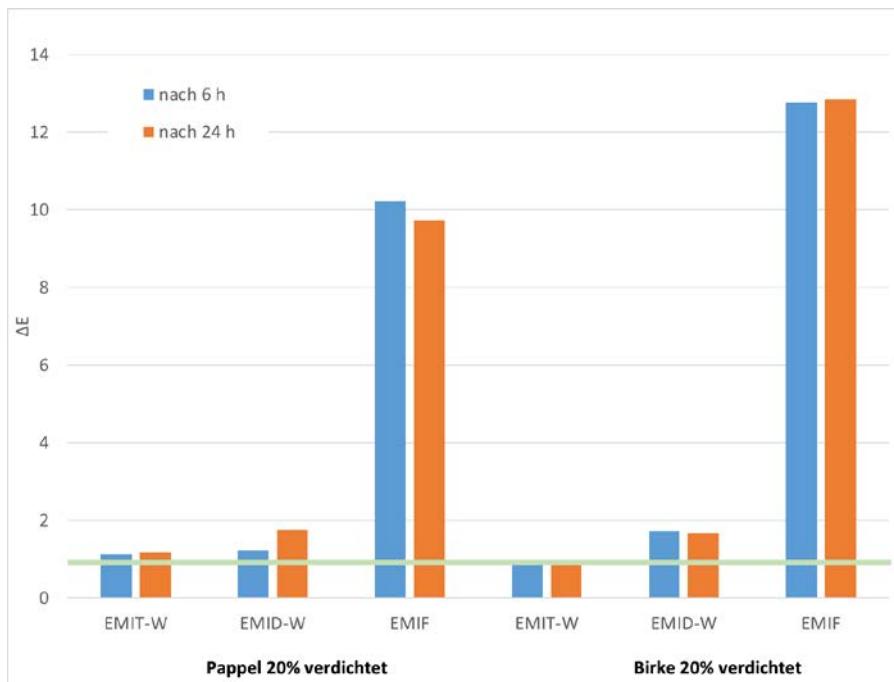


Abbildung 20: Vergleich der Verfärbung anhand des Wertes ΔE nach Applikation der ionFl EMIT W, EMID W und EMIF

Fazit – Einsatz ionFl

1. Die Applikation der ionFl ist mit einer 20 %igen Lösung durchzuführen, im Walzenauftrag (Applikationszeit 5 s) und bei 80°C für 4 min konvektiv zu trocknen.
2. Die ionFl EMIT W und EMID W erschienen für einen weiteren Einsatz als besonders geeignet, da bei EMIT W der Oberflächenwiderstand auch über längere Zeit stabil niedrig blieb und EMID W scheinbar die Holzfaser geringer beanspruchte.
3. Die topografischen Parameter Sa, Sz und Sq werden durch den Einsatz von ionFl nicht signifikant beeinflusst.
4. Nur EMIT W scheint als Primer für eine transparente Pulverlackschicht geeignet.

2.5 AP 5 - Entwicklung neuer mHBS auf Basis schnellwachsender Hölzer (FS 2)

Die Arbeiten im AP 5 wurden in Abstimmung und kontinuierlicher Rückkopplung der Ergebnisse der Pulverlackbeschichtung fortgesetzt und dienten der Untersuchung verschiedener Modifikationsvarianten (Intensität, Einwirkzeit, Geschwindigkeit usw.) von Pappel und Birke sowie der Herstellung und Optimierung der Platten zur Verbesserung der Funktionseigenschaften. Eine Verknüpfung des AP 5 mit den AP 6 bis AP 8 wurde durch die Untersuchungen der FS 1 und FS 2 und der daraus resultierenden iterativen Materialherstellung vorgegeben. Dabei wurde das Ausgangsmaterial selbst als auch die nachfolgend hergestellten Paneele und deren Verklebung untersucht und für die Pulverbeschichtung bewertet. Teilweise gestalteten sich die Klebstoffverbindungen auf Grund der

hohen Feuchtigkeits- und Temperaturbeanspruchung während der Fixierung, Behandlung mit ionischen Flüssigkeiten und nachfolgenden Pulverbeschichtung als problematisch, insbesondere hinsichtlich der Festigkeiten und auch in Teilen bei der Pulverlackannahme (Abschnitt ab S. 66). Inhomogene Materialparameter der Probekörper führten zunächst zu inakzeptablen Beschichtungsqualitäten, welche durch Modifikation der Prozess- und Materialparameter so verändert wurden, dass in Hinblick auf eine gleichmäßige Beschichtung Fortschritte erreicht wurden. In den Untersuchungen wurden Messungen zum Porenvolumenanteil an der Materialoberfläche und über den Querschnitt vorgenommen, welche durch die Veränderung des Verdichtungsgrades eintraten. Im Ergebnis erfolgte die Festlegung und Umsetzung von zwei Verdichtungsgraden (20 %, 50 %), welche die elektrische Leitfähigkeit, Oberflächenrauigkeit und Wärmeleitfähigkeit beeinflussen. Entsprechend dem Versuchsplan wurden vier verschiedene Prozessregime (siehe Beispiel Abbildung 21) mit dem Ziel einer homogenen Dichteausbildung über den Querschnitt entwickelt.

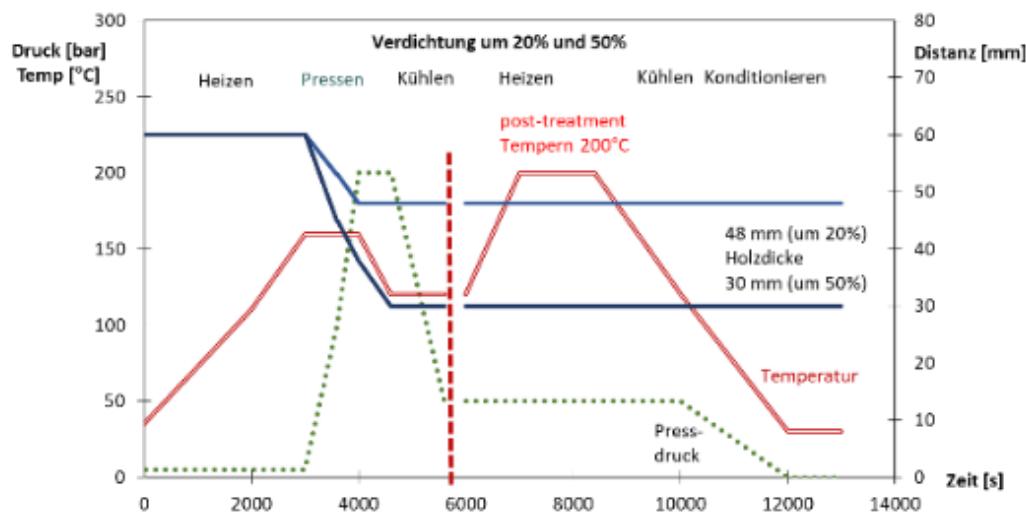


Abbildung 21: Prozessdiagramm thermo-mechanische Verdichtung (20 %, 50 %) mit anschließenden post-treatment an Pappelholz mit 60mm Ausgangsdicke und erhöhter Pressenschließgeschwindigkeit

In den Versuchen wurde Pappel mit einer durchschnittlichen Dichte von 335 kg/m^3 eingesetzt. Nach der thermo-mechanischen Modifikation wurden Dichten von 405 kg/m^3 bzw. 560 kg/m^3 ermittelt. Zusätzlich wurde die Schließgeschwindigkeit der Presse erhöht. Die Verkürzung der Aufheizzeit verringerte die Austrocknung der Holzproben. Das Ziel einer Verbesserung der Beschichtungseigenschaften konnte durch die oben genannten Parameteränderungen teilweise erreicht werden. Ein niedriger Verdichtungsgrad von 20 % führt zu geringen Änderungen in der Holzstruktur. Im Gegensatz zu einer hohen Verdichtung wird die Porenstruktur nur geringfügig geschlossen und der Feuchtigkeits- und Wärmetransport weniger gegenüber nativem Holz beeinflusst. Abbildung 22 zeigt verdichtetes Ausgangsmaterial vor der Plattenherstellung mit Inhomogenitäten in Dichte und Holzfasserrichtung. Nach dem Auftrennen der Probekörper zu Einzellamellen erfolgte eine Kennzeichnung und Erfassung der Eigenschaften zur Rückverfolgung der Beschichtungsergebnisse. In Abbildung 23 sind modifizierte Platten mit 20 % Verdichtung dargestellt.



Abbildung 22: Probekörper aus Pappel vor (links) und nach der Plattenherstellung (rechts) mit unterschiedlicher Verdichtung, Kennzeichnung der Einzellamellen jeder Platte zur Bestimmung von Kennwerten an Besäumabschnitten (ca. 100 mm)



Abbildung 23: Platten-Probekörper 300 x 200 x 20 mm³ aus Pappel, Birke (quergerichtet), 1K PUR-verklebt mit 20 % Verdichtung bei 140°C und längsgerichtet (rechts)

Herstellung der Paneele und Platten mit prozessabhängigen Parametern

In Abstimmung mit der FS 1 wurden Untersuchungen zur Herstellung von mHBS an jeweils 2 Varianten vorgenommen. Dabei wurde das vorrangige Ziel einer Unterdrückung der Rückverformung mittels thermischer Modifikation durch Integration von Fixierungsprozessen in den Versuchsplan aufgenommen. Hierbei wurde während der Verdichtung mit Prozesstemperaturen von 140 °C bis 200 °C an den Probekörpern gearbeitet. Es wurde eine Erhöhung der Formstabilität zwischen 15 % und 70 % während des Vergleiches in Quell und Schwindversuchen festgestellt. Die Bewertung der Rückverformung wurde durch Wasserlagerung (25 °C) an Probekörpern von 20 x 20 x 10 mm³ (L x B x D) über eine Zeit von 10 min an 20 % verdichteten Probekörpern durchgeführt. Dabei wurde bei steigender Behandlungstemperatur im pre-treatment von 140 °C bis 200 °C eine Längenzunahme von 69,5 % bis 23,7 % ermittelt. Wurde in den Versuchen Holz mit 50 % Verdichtung eingesetzt,

reduzierte sich die Längenzunahme auf knapp 15 %. Es wurde deutlich, dass mit Erhöhung der Behandlungszeit und des Verdichtungsgrades eine Reduzierung der Rückverformung erreicht werden konnte. Es wurde jedoch auch sichtbar, dass die Untersuchungsparameter Zeit- und Wassertemperatur die Rückerinnungsgeschwindigkeit beeinflussen.

Die Herstellung von Plattenprobekörpern erfolgte aus Birke und Pappel mit Rohdichten von 602 kg/m^3 und 335 kg/m^3 . Ein post-treatment zur Fixierung der Zellstruktur erwies sich als vorteilhaft durch die bestehende Lagerung des Werkstückes in der Presse oder durch eine nachgeordnete Dampfbehandlung (Heißdampfttemperatur von 125°C an der Düse). Dazu wurden verdichtete Paneele im eingespannten Zustand über 120 min in der Heizpresse oder in der Dampfkammer belassen, um auftretende Spannungen durch die plastische Verformung der Zellstruktur (Faltung während der Verdichtung) zu verringern. Ein vergleichbarer Effekt trat während der Plastifizierung und der Herstellung von 3D-Holzprofilen ein.

Eine **Fixierung bzw. Verringerung der Rückverformung** bei gleichzeitiger Verringerung des Porenvolumens der verdichteten mHBS stellt eine wesentliche Voraussetzung für die nachfolgenden Prozessschritte dar. Die Herstellung der mHBS gliederte sich nach dem Modifizierungsprozess daher in die Schritte:

1. Auswahl der Probekörper,
2. Verdichtung der Probekörper,
3. Post-treatment der Probekörper,
4. Formatierung,
5. Verklebung, Kalibrierung und Probennahme für Untersuchungen.

Neben der Variation thermischer Prozessparameter zur Reduzierung der hygrophobischen Eigenschaften erfolgten mikroskopische Messungen zur Beeinflussung des Porenvolumens.



Abbildung 24: Birke radial unverdichtet (links), Pappel unverdichtet (mittig) mit horizontaler PUR-Klebstofffuge bei 20 % Verdichtung (rechts, 20-fach)

Abbildung 24 zeigt die Zellstruktur von Birke radial und Pappel quer. Die 20 % Verdichtung ist deutlich an den teilweise geschlossenen Poren zu erkennen. Die Untersuchungen erfolgten über die Vermessung der Porenfläche von verdichteten und unverdichteten Proben und zeigten, dass mit steigendem Verdichtungsgrad der Porenanteil am Gesamtvolumen signifikant um über 50 % abnimmt. Eine Erhöhung der Dichte führte auf der anderen Seite zu Änderungen der Oberflächenbeschaffenheit (Feuchteannahmevermögen). In Folge daraus resultierte ein schlechteres Pulverannahmevermögen. In Abbildung 25 ist das gemessene Verhältnis zwischen der Rückverformung in Beziehung zum Porenvolumen aufgezeigt.

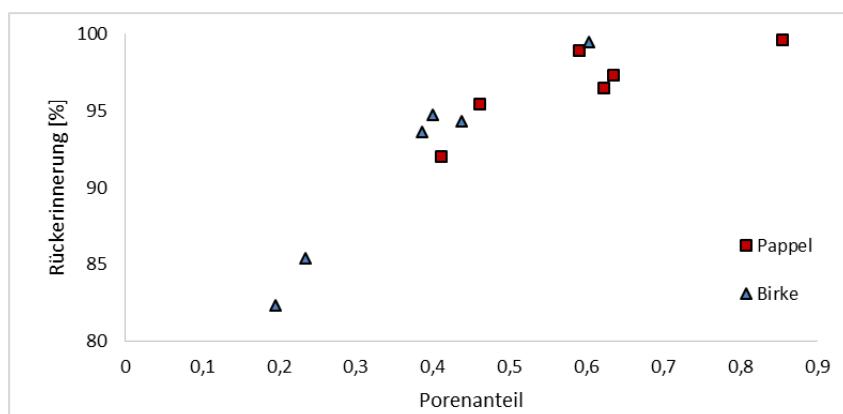


Abbildung 25: Normiertes Verhältnis der Rückverformung von verdichteten (20 %, 50 %) Proben im Verhältnis zum Porenanteil

Zum Zwecke der **Erhöhung der Formstabilität** wurden im Projektrahmen IR-Carbon -Strahler (Abbildung 26) eingesetzt und für ein post-Treatment zur Reduzierung der Rückverformung genutzt. Es wurden Temperaturen von 120 °C bis 180 °C an der Oberfläche aufgebracht, wobei der Temperaturverlauf bei 2,5 mm, 5 mm und 10 mm innerhalb der Platte (Plattenmitte) bei unterschiedlicher Behandlungsdauer (30 bis 240 min) gemessen wurde.

Es wurde mit der Entwicklung und Anpassung der Technologie zur Herstellung der mHBS festgestellt, dass die Substrate eine starke Reaktion auf thermische Einflüsse zeigten. Die nachträgliche Temperaturbeaufschlagung führte bei den stark verdichteten Platten (50 %) zu höheren Verformungen als bei weniger verdichtete Platten (20 %). Der Pressdruck wurde durch das Verdichten auf eine vorgegebene Dicke soweit erhöht bis die Zielgröße erreicht wurde. Der Pressdruck wurde bei Pappel (bei einer Dichte 467kg/m³) bei 20% und 50% Verdichtung mit 5,6N/mm² bzw. 8,6N/mm² erfasst. Birke mit deutlich höherer Ausgangsdichte erreichte bereits bei um 20% Verdichtung einen Druck von 7,7N/mm² bzw. von 11,9N/mm². Untersuchungen zum Temperaturverlauf zeigten ein starkes Temperaturgefälle über den Querschnitt. Ein erfolgtes Tempern bei 80°C brachte auch keine wesentlichen Verbesserungen bei den nachfolgenden Behandlungen mit ionischen Flüssigkeiten und der Pulverbeschichtung. Des Weiteren wurden die Einzellamellen nach Jahrringlage in der Platte sortiert (eher radial, eher tangential oder gemischt). Es waren jedoch keine eindeutig aus diesen Untersuchungen resultierenden positiven Effekte zu verzeichnen. Tendenziell schien die Verklebung

radial/tangential eher zu geringeren Verformungen zu führen (siehe Abbildung 29) als der Einsatz von Paneelen einer Vorzugsrichtung der Jahrringlage.

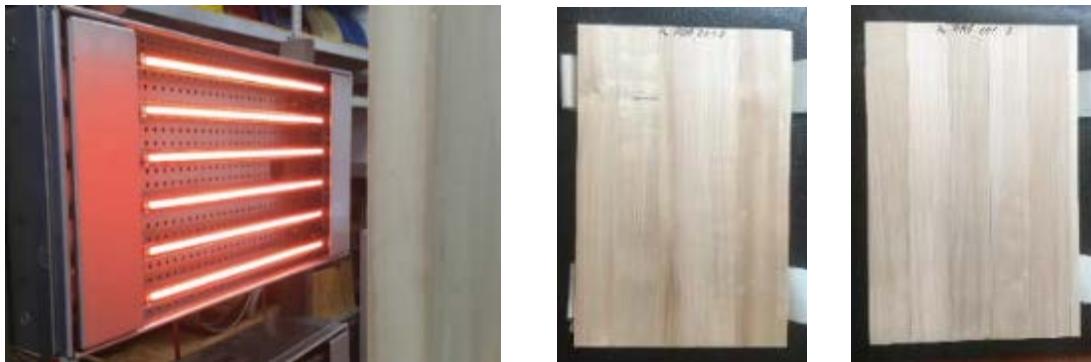


Abbildung 26: IR-Carbon-Strahler während des Temperns einer Pappelholzplatte bei 160°C Oberflächentemperatur (links) und Plattenproben mit 1K PUR- und PF Res-Verklebung nach dem Tempern (mittig, rechts)

Resultierend wurde eine Optimierung des Dichteprofils und der Rückverformung erreicht. Es wurde zu drei Treatmentvarianten durchgeführt:

- während der Verdichtung mit bis zu 160 °C,
- nach der Paneelherstellung mit bis zu 220 °C
- und ebenfalls mit Heißdampf von 125 °C.

Unter dem Blickwinkel der Effizienz sind kurze Einwirkzeiten und hohe Temperaturen (möglichst als sich wiederholender Impuls) am vorteilhaftesten zur Spannungsreduzierung durch Relaxation. Ebenso wurden in den Versuchen Presstemperaturen von 160 °C und hohe Schließgeschwindigkeiten der Presse als vorteilhaft ermittelt. Dabei wurde das Dichteprofil gleichmäßiger und die Rückverformung war geringer. Ein nachgeschaltetes Tempern bei 220 °C und 3 min Haltezeit brachte jedoch insgesamt nur geringe Verbesserungen, so dass hinsichtlich des zu erwartenden Nutzens der Einsatz des Temperns nach Abschluss der Versuche erneut bewertet werden musste. Die Erhöhung der Formstabilität war durch post-treatment (Bedampfung, Beschichtung) anzustreben.

Herstellung von 3D-Hohlprofilen

Pulverlackbeschichtungen sollten ebenfalls an 3D-Hohlprofilen untersucht werden. Hierzu wurden Pappelholzplatten mit PUR-Verklebung und einer 20 % -igen Verdichtung zur Umformung hergestellt. Die Plattengeometrie betrug 300 x 420 x 20 mm³. Die Herstellung erfolgte als Rohrprofil mit 150 mm Außendurchmesser.



Abbildung 27: Pappelplatte vor der Dampfbehandlung (links), während der Plastifizierung in der Ge- senkpresse (mittig) und als Formholzprofil (rechts)

Fazit – Entwicklung neuer mHBS

1. Der Fokus zur Herstellung solcher modifizierten Paneele wurde auf holzanatomische Eigenschaften (Zerstreutporigkeit, Verdichtung in radialer Jahrringrichtung und Anordnung der Paneele mit wechselnder Jahrringlage) gelegt.
2. Die Herstellung der mHBS erfolgte mit dem Pressregime 140 °C und 30 min sowie 140 °C und 240 min.
3. Die Formstabilität der mHBS erhöht sich bei höheren Temperaturen und längeren Presszeiten. Es traten frühzeitig Relaxationen im Holzgefüge und Verformungen der mHBS infolge der inneren Spannungen auf.
4. Im Ergebnis der Verringerung des Verdichtungsgrades reduzierten sich die Dichteschwankungen im mHBS (Paneele-Ausgangsmaterial, vorrangige Herstellung aus Pappel mit 20 % Verdichtung).
5. Während des Formungsprozesses wurden Verdichtungsspannungen vorzugsweise vollständig durch lange Presszeiten abgebaut. Für die Herstellung von mHBS liegt der Fokus weiter auf hohen Materialdehnungen (mind. 20 %) für die Umformung und geringen Dehnungen (max. 8 %) für die Beschichtung. Die Umsetzung der Vorgaben erfolgt durch pre- und post-Prozesse (thermisch, hygro-mechanisch).
6. Pappel eignete sich gut zur fehlerfreien Umformung von Hohlprofilen mit engen Radien bei großer Wandstärke (20 mm).
7. Formstabilität liegt nicht in der Rundheit der Elemente und ist für die Beschichtung unerheblich.

2.6 AP 6 bis AP 8 - Pulverlackbeschichtung der mHBS und deren Charakterisierung sowie Technologie- und Materialoptimierungen (FS1 / FS2)

Die Arbeiten in den AP 6, 7 und 8 können nicht strikt voneinander getrennt werden. Vielmehr ist es ein Ineinandergreifen von Abläufen und resultierenden Optimierungsschritten. Sowohl das Charakterisieren/Optimieren der mHBS als auch des Beschichtungsvorganges fanden fortlaufend statt. Für einen verbesserten Lesefluss wurden bestimmte Schritte zusammengefasst bzw. nicht chronologisch aufgeführt.

Optimierung von Technologie und Material der mHBS

Allgemein

Neben der Untersuchung unterschiedlicher Holzfeuchten (6 %; 12 %; 18 %) wurde die Anordnung der Faserrichtung in der Plattenebene zwischen radial, tangential und diagonal bzw. ungeordnet vorgenommen. Die Herstellung der Holzsubstrate selbst wurde hinsichtlich der technologischen Parameter parallel zu den Beschichtungs- und Umformversuchen sowie der Formung von 3D-Hohlprofilen fortgeführt. Ebenso erfolgten Untersuchen zur Verbesserung der Substraterwärmung durch IR-Carbon-Strahler (Einteilung in drei Leistungsstufen - 50/80/100% - und Einwirkungszeiten von 2min bis 30min), um einen erhöhten Energietransport in das Platteninnere zu erreichen. Insgesamt wurden drei Energiesysteme eingesetzt:

- konventionelle Erwärmung über Kontakt in der Heizpresse Typ ERMAFA,
- Erwärmung mit Mikrowellen Typ Püschnner MWGED 8525 und
- Erwärmung mit IR-Carbon-Strahlen Typ Heraeus Noblelight MX 300/612.

Im Ergebnis konnte eine Veränderung der Oberflächenstruktur festgestellt werden, welche durch partiell einsetzende Depolymerisation bei über 180°C Oberflächentemperatur auftrat. Der Einfluss der Faserrichtung auf die Veränderung des Kontaktwinkels wurde bei der Herstellung von mHBS berücksichtigt. Weiterhin erfolgte die Herstellung von Probenmaterial aus Po und Bi und deren Paneele für weitere Beschichtungsversuche in dessen Optimierungsverlauf Anpassungen der Herstellungsparameter stattfanden.

Ein Upscaling der Herstellungstechnologie „Verdichten“ an Abmessungen von 500 x 1000 x 50 mm wurde nach der Materialauswertung als positiv bewertet und führte zur industriellen Vorstufe für die Herstellung von mHBS mit dem Industriepartner Deutsche Holzveredlung GmbH & Co.KG, Kirchhundem. Kleinformatige Paneele wurden zu 3D-Formkörpern genutzt, wobei die oben genannten Parameter den Erfordernissen angepasst wurden. Für die Beschichtungen und Versuche zur Formstabilität wurden Probekörper mit 150 mm Durchmesser bei 20 mm Wandstärke und 300 mm Länge umgesetzt. Gegenüber den zuvor hergestellten 3D-Formkörpern zeichneten sich diese durch eine homogenere Dehnungsverteilung über den Querschnitt aus, da sowohl die Ausgangsdicke des Ma-

terials als auch die Faserrichtung / Jahrringrichtung bei der Paneelherstellung berücksichtigt wurden. Es erfolgten Messungen zur Formstabilität, wobei eine Verbesserung der Dimensions- und Formstabilität an den 3D-Prüfkörpern festgestellt werden konnte. Aus den Ergebnissen wurden folgende Haupthandlungsfelder abgeleitet:

- Herstellung gleichmäßiger, reproduzierbarer Paneele, mHBS und 3D-Formkörper,
- Ermittlung der Materialkennwerte der Paneele und mHBS,
- Optimierung der Herstellungstechnologie und Verbesserung der Materialeigenschaften für die nachfolgende Beschichtung,
- Verbesserung des Energietransportes in das Paneelinnere,
- Überführung und Upscaling für Demonstrator und industrielle Anwendung.

Herstellung von mHBS und Paneele mit gerichteter Jahrringlage und 3D-Formkörpern

Zunächst wurden „standardisierte“ Paneele aus Birken- und Pappelholz zur Beschichtungsversuche hergestellt. Aus verschiedenen Überlegungen zur Verbesserung der Beschichtung und Verringerung der Ausgasung während der Pulverapplikation sowie Reduzierung der Verformung wurde Paneele mit gerichteter Jahrringlage (tangential-tangential / radial - radial) hergestellt. Dies bedeutete im Einzelnen eine Vorsortierung (Dichte, Faserrichtung) der Rohware Pappel und Birke sowie eine Überarbeitung des Zuschnittes hinsichtlich der vorhandenen Jahrringlage. Die Verdichtung erfolgte in der Ein-Etagen-Heizpresse bei 140°C Plattentemperatur über den Zeitraum von 240 min. Hierzu wurde die zuvor optimierten Parameter der Aufheiz-, Verdichtungs- und Abkühlphase bei hoher Presstemperatur (140°C) und langer Prozesszeit (240min), Abbildung 21, gewählt. Eine Verkürzung der Verdichtungsprozesse bei gleichzeitiger Verlängerung der Materialverweilzeit, wurde durch folgende Parameter erreicht:

- Vorheizen mit Mikrowellen (800 W, 180 s)
- Höhere Heizplattentemperatur in der Presse (160°C)
- Reduzierung der Aufheiz- und Verdichtungsphase, bei gleichzeitiger Streckung der Verweilzeit zum Spannungsabbau.

Dabei wurden zunächst Versuche in der Herstellung durch **Vorsortierung** des Rohholzes bzw. der Aufteilung der modifizierten Paneele vorgenommen. Die Sortierung der Jahrringlage führte bei der Verdichtung zu verschiedenen Zonen der Verformung, da innerhalb des Pressgutes die Jahrringlage über den Querschnitt variiert (Abbildung 28). Schlussfolgernd werden die radial verdichteten Jahrringlagen vorrangig im Frühholz über den gesamten Querschnitt verformt, in den tangential verdichteten Zonen erfolgt jedoch meist ein unregelmäßiges Ausknicken der Spätholzzellen in den Frühholzbereich hinein, wohingegen in diagonal gerichteten Jahrringbereichen ein Schubversagen im 45° Winkel erfolgt.

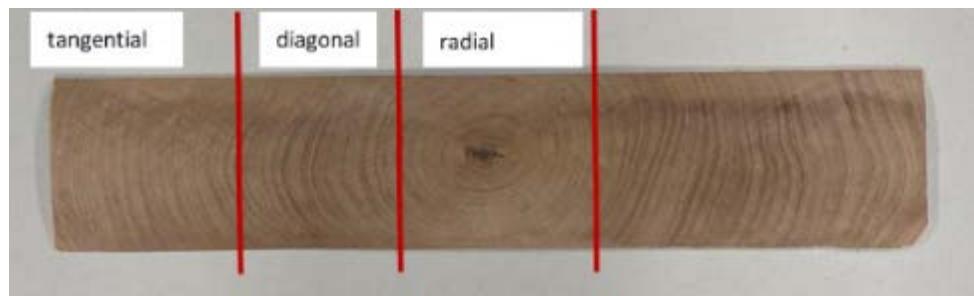


Abbildung 28: Birkenholz mit den Jahrringrichtungen vor der Verdichtung

Nach dem Verdichtungsvorgang wurden die Substrate in der späteren Paneeldicke aufgetrennt und für eine Verklebung der Paneele entsprechend vorsortiert (Abbildung 29). Die Verklebung erfolgte nach dem Auftrennen mit PF Res, um eine eintretende Rückverformung, auf Grund der Reduzierung der Verdichtungsspannung, zu begrenzen.



Abbildung 29: Jahrringanordnung in der verklebten Paneele (verdichtet) und schematisch (links-tangential tan; mittig: radial-rad, rechts: radial-tangential-rad/tan)

Im Zuge der Herstellung von mHBS mit gerichteter Jahrringlage wurden weitere **3D-Formkörper** aus Pappelholz hergestellt. Die Probekörper mit einem Durchmesser von 15 cm aus der ersten Charge zeichneten sich durch erhebliche Abweichungen in der Rundheit aus. Daher wurde für die Herstellung weiterer 3D-Formkörper eine Erhöhung des Verdichtungsgrades von 20 auf 40 % bei gleichzeitiger Verlängerung der Plastifizierungszeit auf 60 min im Heißdampf gewählt. Der Vorteil dieser Behandlung ist eine gleichmäßigere Durchwärmung über den gesamten Querschnitt der Paneele. Ebenso wird durch die Erhöhte Verdichtung ein höheres Zugdehnungsvermögen für die Umformung erreicht, welches durch eine verlängerte Plastifizierungszeit allerdings durch ein verstärktes Rückverformung wiederum reduziert wird. Die eingebrachte Dehnung durch die Verdichtung wurde durch die einzelnen Bearbeitungsschritte (Hobeln) und Plastifizierung um durchschnittlich 50 % reduziert, so dass für die Umformung der Paneele zirka 25-30 % Dehnbarkeit zur Verfügung stand. Gleichzeitig verringerte sich die Lamellenbreite auf 25 mm. Um die Materialkennwerte für die Umformung zu ermitteln, wurde an den Platten ein Längsstreifen abgetrennt, so dass je 3D-Probekörper ein Panel mit den Ausgangsmaterial als Referenz vorhanden war. Die Umformung erfolgte in zweiteiligen Vorrichtungen mittels Gesenkbiegen mit Kern (Abbildung 27). Nach der Umformung wurden die Probekörper konditioniert und in Trockenformen bis zur Ausgleichfeuchte gelagert sowie in der Schlussfuge verklebt. Im Anschluss wurde die Probengeometrie erfasst und Messungen zur Formstabilität vorgenommen.

Untersuchungen zur Optimierung der Formstabilität für die mHBS-Paneele

Für den Einsatz von 3D-Körpern und deren Nutzung im Außeneinsatz wurde die Formstabilität bzw. die begrenzten Verformungen und Materialdehnungen als Voraussetzung für eine langzeitige Funktionalität der Pulverbeschichtung angesehen. Neben den ebenen Paneelen wurde 3D-Formkörper mit einem Durchmesser von 150 mm, 20 mm Wandstärke und 50 mm Länge bei künstlicher Bewitterung untersucht.

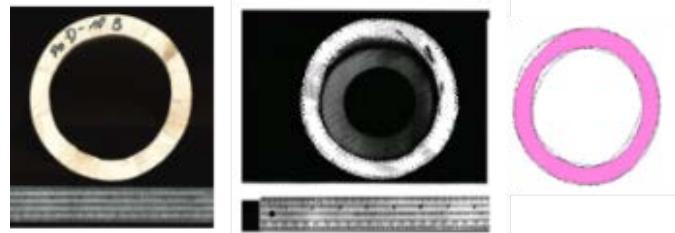


Abbildung 30: Pappelpaneel zu 3D-Formkörper umgeformt (links), Vermessung des idealen Probenquerschnittes und Ermittlung der Formabweichung (Mitte) von der „Rundheit“ als Bezugsgröße der sich überdeckenden Flächen (rechts)

Es erfolgte die Vermessung der 3D-Formkörper und ein Vergleich mit dem Ideal-3D-Körper (A0) und der Abweichung nach Lagerung im Normalklima (20 °C/65 % rF), in feuchtem Klima (20 °C/ 85 % rF) sowie nach 24 Stunden Lagerung bei 20°C und 45% rF. Dazu wurde ein Pappelprobekörper bei 180°C über 120 s getempert. Im Ergebnis betrug die prozentuale Abweichung der Formstabilität (vollständige Flächenüberdeckung beträgt 100 %) zwischen den getemperten, unbeschichteten 3D-Körpern und der Referenzprobe 23 % (Abbildung 31).

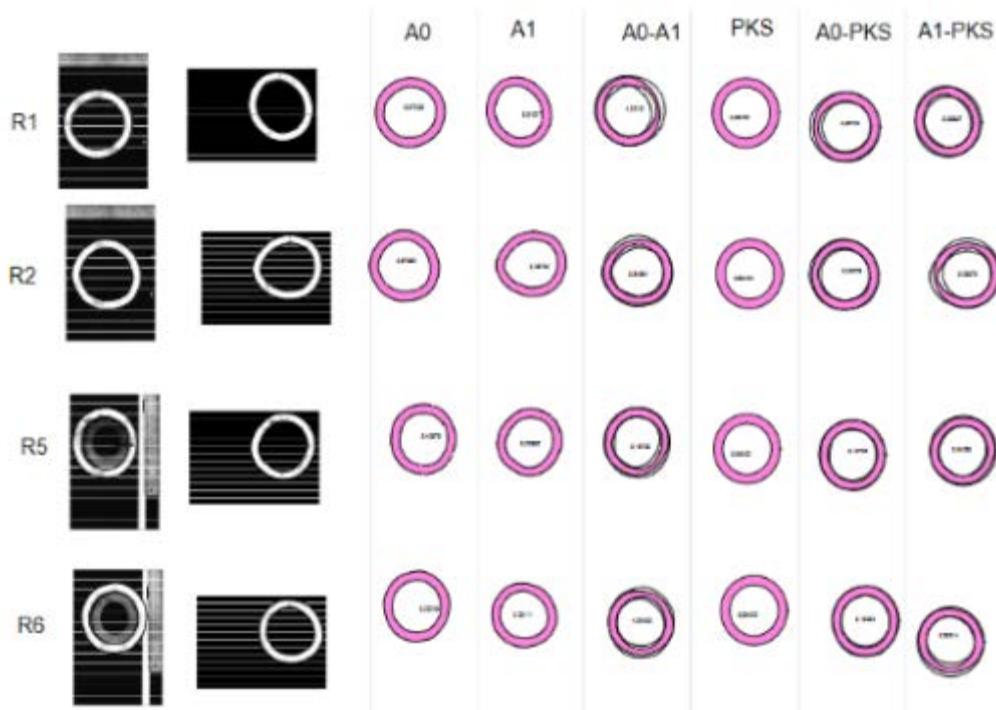


Abbildung 31: Ermittlung der Formstabilität am Beispiel der sattdampfbehandelten 3D-Formholzkörper

Die festgestellte geringe Formstabilität sollte nach Beschichtungsversuchen weiter verbessert werden. Dafür wurden weitere Versuche – zunächst am ebenen Paneel – vorgesehen und durchgeführt. Für die Folgeversuche wurden 3D-Formkörper hergestellt, welche nach der Umformung unter nochmaliger Sattdampfbehandlung, jedoch in einer Trockenform, für 4 h gelagert wurden. In der Literatur wurde der positive Einfluss einer Sattdampfbehandlung von verdichtetem Holz bereits beschrieben. Die Bewertung dieser modifizierten Proben entsprach den Erwartungen einer merklich verbesserten Formstabilität. Die Abweichung der Form vom Referenzprobekörper betrug 13 %.

Fazit – Optimierung Paneelaufbau / Formstabilität

1. Die Herstellung des Plattenmaterials erfolgte bei 140 °C und 240 min, einer Verdichtungsgeschwindigkeit von 1 mm/min.
2. Die Herstellung der mHBS mit ausgewählter Jahrringrichtung führte zu einem erheblich höheren Herstellungsaufwand und hohem Holzverschnitt.
3. Die Porenhomogenität bei der Verdichtung wurde verbessert (Schwankungen der Dichteverteilung um im Mittel 34 % verringert) sowie die Welligkeit (DIN EN ISO 4728) um 26 % reduziert.
4. 3D-Formkörper weisen hohe Inhomogenitäten und Restspannungen auf.
5. Die hygro-thermische Behandlung mit Sattdampf von verdichteten Paneelen führte zu Verformungen, eine Zwangsform (Außenring) war erforderlich.
6. Ein post-Treatment mit dem IR-Strahler erfolgte bei 180 °C und 120 s.
7. Erweiterte Optimierungsmaßnahmen durch 4 h Sattdampfbehandlung verringerten die Formabweichung vom Referenzprobekörper auf 13 %.

Verbesserung der Herstellungstechnologie und des Energietransportes

Zur Verbesserung des Energie- und Wärmetransportes in das Innere der Paneele war zu beachten:

1. die Klebefuge mit PF Res und
2. die gleichmäßige Erwärmung der Paneele über den Querschnitt ohne weitere Verfärbung.



Abbildung 32: Paneele (links) während des post-treatments zur Veränderung der Zellstruktur und der chemischen Eigenschaften (Hygrophobierungsfähigkeit), sowie zum Abbau der inneren Spannungen, Zellstruktur Pappel (rechts) mit gelösten Zellfibrillen (rechts unten)

Die Probenherstellung und Optimierung der mHBS und deren Paneelen stand somit in einem ständigen Spannungsfeld zwischen Verdichtung und Rückverformung, Umformung und Formstabilität, Holzfeuchtigkeit und Oberflächenwiderstand, Inhomogenität und Prozessführung. Durch folgende pre- und post-Prozesse wurde eine Verbesserung der Materialparameter angestrebt:

- kurzzeitige Senkung der Holzfeuchtigkeit unter 8 %
- nachfolgende Impuls-Dampfbehandlung mit Wechseltrocknung
- Verlängerung der thermo-mechanischen Prozesse auf 8 h und Intervallpressen (Entlastung/Belastung)
- IR-Erwärmung zum Ausgasen der mHBS

Die kurzzeitige Reduzierung der Holzfeuchtigkeit wurde nach Lagerung bei 20 °C/65 % rF über 24 h und dem Trockenofen bei 80°C über 2 h Verweildauer durchgeführt. Hierfür waren die modifizierten Paneele und die 3D-Formkörper (wie in Abbildung 31) hinsichtlich ihrer Formänderung vor und nach der Klimabeanspruchung zu vermessen. Im Ergebnis konnten gegenüber den Referenzkörpern jedoch keine Unterschiede festgestellt werden, so dass keine weiteren Versuche mit diesem Verfahren vorgenommen wurden. Einen weiteren Optimierungsprozess stellte die Impuls-Dampfbehandlung mit Wechseltrocknung dar. Hierzu wurde die Paneele bzw. ein Paneelestreifen zuvor vermessen und anschließend in einer Kammer so gelagert, dass der einschließende Sattdampf über 2 min und mit 125°C die gesamte Probe umspülte. Dabei wurde die Prozesszeit mit 120 s bewusst kurzgehalten, um die Bildung von Kondensat auf der Oberfläche zu unterbinden. Der eindringende Dampf wurde bis zu einer Tiefe von 3 bis 4 mm in die Holzoberfläche beobachtet. Dabei konnte eine unterschiedliche Wasseraufnahme in Abhängigkeit der Dichte- bzw. der Verdichtungsverhältnisse festgestellt werden. Die kurze Einwirkzeit der Feuchtigkeit führte dazu, dass ein Kern von zirka 12 mm in der Paneelemitte nicht beeinflusst wurde und eine vollständige Rückverformung unterbunden wurde. Nach der Dampfbefeuchtung wurde die Paneele im Trockenofen bei 45 °C mit Umluft für 120 min und anschließend bei 120 °C über 10 min getrocknet. Im Ergebnis wurden jedoch Plattenkrümmungen von 15 mm pro 200 mm Kantenlänge festgestellt, so dass angenommen wurde, dass die vorhandene Feuchtigkeit in Richtung Paneelemitte und Paneeleoberfläche wanderte, jedoch nicht vollständig verdunstet. Die Versuche wurden mit diesen Parametervorgaben nicht weiter fortgeführt.

Aus der Literatur zur Herstellung hochverdichteter Holzsubstrate kann entnommen werden, dass die Kompaktheit des Materials durch zyklisches Be- und Entlasten gesteigert werden kann. Unter Bezugnahme auf diesen Sachverhalt wurde ein weiteres Pressregime von 8 Stunden bei 140 °C entwickelt, in dessen Verlauf eine Lastreduzierung von 90 % für 120 s erfolgte. Der Vorgang wurde fünfmal hintereinander nach jeweils 60 min wiederholt. Aus den so hergestellten verdichteten Paneele wurden mHBS verklebt. Diese wurden analog den ASE-Versuchen an Paneele aus Pappel

durchgeführt. Im Ergebnis wurde nach drei Prüfzyklen (Trocknung und Wasserlagerung) eine deutliche Zunahme der Länge um 15 % festgestellt, welche im Rückverformungsverhalten (der Flächenzunahme analog Abbildung 14) noch über dem zugelassenen Wert von 8 % lag. Weiterhin wurde ein höherer Verdichtungsgrad aus der zyklischen Verdichtung erreicht, welcher jedoch durch einen höheren Herstellungsaufwand erkauft wurden. Im Ergebnis wurden die Vorteile des Verfahrens gegenüber dem Mehraufwand als unzureichend bewertet und auf thermische Prozesse fokussiert.

Hierzu wurden Versuche mit IR-Carbon-Strahlern durchgeführt, da diese neben der konventionellen Kontakterwärmung erheblich schonendere und schnellere Wärmetransportzeiten bei geringerer Materialbelastung ermöglichen. Dazu wurden je 6 Paneele mit zweimal 6 x 800 W beidseitig bestrahlt. Zur Reduzierung der Oberflächentemperatur wurde jeweils die Strahlerleistung von 100 % um je 10 % reduziert. In den Versuchen erwiesen sich zwischen Pappel- und Birkenholz kaum Unterschiede hinsichtlich des Wärmetransports über den Querschnitt der Paneele. Andererseits wurde eine deutlich geringere Oberflächentemperatur über die im Strahler sitzenden Pyrometer gegenüber der Pt-100 Messung aufgezeichnet. Die Ursachen hierfür sind vielfältig in der Reflexion, der Messposition, der Genauigkeit usw. zu finden, aber letztendlich wurden die intern angebrachten Messdrähte zur Temperatur erfassung verwendet, um Daten über den Querschnitt im Abstand zur Oberfläche von 2,5 mm, 5 mm und 10 mm (Paneelemitte) zu erfassen. In Abbildung 33 sind die Paneeleoberflächen bei 180 °C Oberflächentemperatur unter Kontakt- und Strahlungserwärmung dargestellt. Neben den Nachteilen der direkten Erwärmung über Kontakt (vollständiger Pressflächenkontakt, langsamer Energietransport) treten teilweise unerwünschte Oberflächenveränderungen in der Rauigkeit, Dichte und Färbung auf. Ein weiterer Nachteil liegt in der Verdampfung oder plötzlichen Entspannung der Restfeuchte bei über 100 °C, was durch Strahlungserwärmung besser gesteuert werden kann.



Abbildung 33: Paneel mit 180°C Prozesstemperatur durch Kontakt (links) und Strahlung (rechts) erwärmt

In den Versuchen wurden drei Leistungsstufen als zielführend eingeordnet:

- 50 % für die langsame homogenere Erwärmung des Holzsubstrates bei gleichzeitiger Reduzierung der Oberflächentemperatur und Abschwächung der Depolymerisation,

- 80 % für die Erwärmung an stark reflektierenden Hölzern bei höheren Temperaturdifferenzen über den Querschnitt und auftretenden Verfärbungen,
- 100 % für eine intensive Oberflächenerwärmung bei hohen Temperaturdifferenzen über den Querschnitt.

In Abbildung 34 ist ein Verlauf des Erwärmungsvorganges an einer Pappel-mHBS dargestellt. Zum Beleg des Wärmetransportes wurden drei Messstellen unter der Oberfläche (2,5 mm, 5 mm, 10 mm) dokumentiert. Die Erwärmung erfolgte durch die IR-Carbon-Strahler mit einer Leistungsabgabe von 9,6 kW unter einer prozentualen Leistung von 80 %, 65 %, 50 % und 45 %. Deutlich ist der steile Anstieg der Oberflächentemperatur auf der Vorder- und Rückseite der Paneele (0 und 20 mm) zu erkennen, in dessen Folge die weiter innen liegenden Messpunkte kontinuierlich und zeitverzögert folgen. Dabei wurde nach 8, 16 und 18 min die Leistungsabgabe so verringert, dass sich über den gesamten Querschnitt nach zirka 15 min eine Temperatur von 200°C einstellte. In dem Temperaturbereich finden bereits Strukturveränderungen statt.

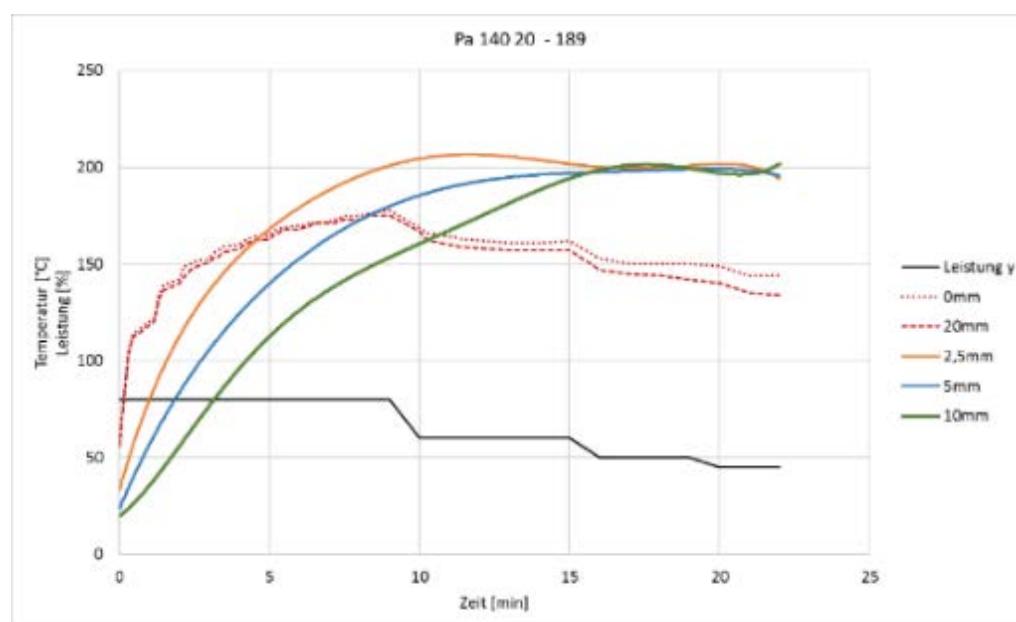


Abbildung 34: Temperaturverlauf bis 200°C an einem Paneel bei stufenweiser Leistungsreduzierung

Weitere Prozessszenarien (Abbildung 35) wurden hinsichtlich der zu erreichenden Oberflächentemperatur und der Wärmeleitung ins Innere der Paneele bei 25 min Einwirkungszeit durchgeführt. Die Einwirkung hoher Energie und somit von Temperaturen von 220 °C (nach 8 min) führten neben ungleichmäßigen Verfärbungen der Oberfläche bereits zu Verformungen der Gesamtpaneele. Die erheblichen Temperaturdifferenzen von zirka 100 °C zwischen Paneeleoberfläche und Paneelemitte (10 mm) führten zu Querdehnungen und Verformungen von zirka 8 %, bezogen auf die Probenbreite. Ein Versagen der Klebefuge trat nicht ein.

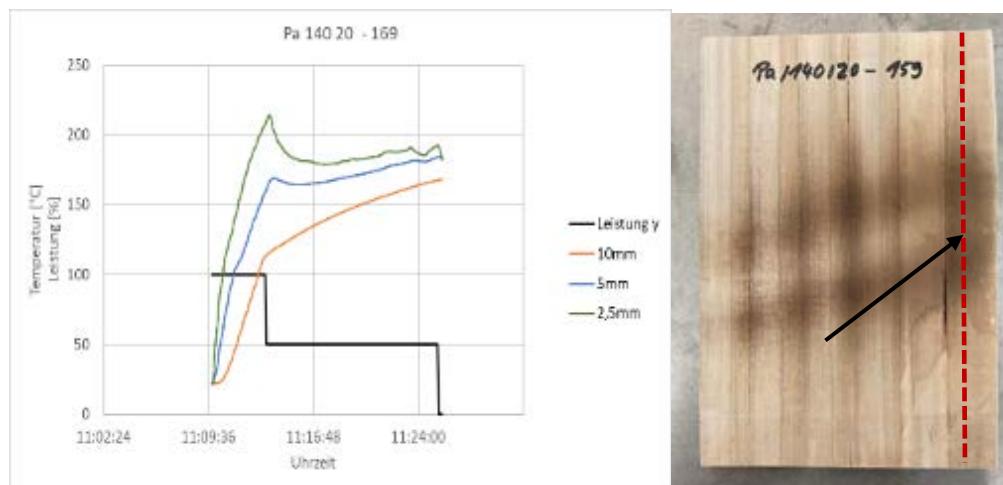


Abbildung 35: Temperaturverlauf und Leistungsabgabe (Reduzierung von 100 % auf 50 % nach 210 s), sowie mHBS nach der Bestrahlung (Krümmung am seitlichen Rand (Pfeil))

Auf Grund der starken Veränderung des Materials wurden Versuche mit reduzierter Energieintensität an Pappel und Birke durchgeführt. Abbildung 36 zeigt das Paneelemuster der Holzart Pappel mit 50 % Energieintensität und 30 min Einwirkungszeit. Neben geringeren Verfärbungen wurden keine Dimensionsänderungen festgestellt. Die Verweilzeit für das Erreichen von 180 °C im inneren der Paneele verdoppelte sich auf zirka 30 min. Im Vergleich mit Birke (Abbildung 37) wurde ein ähnliches Verhalten, trotz fast doppelter Rohdichte, festgestellt. Allerdings verringerte sich die Temperaturdifferenz innerhalb der Paneele während der Einwirkung und konvergierte gegen 180 °C. Ebenso wurde festgestellt, dass sich die Klebefuge veränderte. Dieses Phänomen konnte auch nicht in der gesonderten Untersuchung der Klebefuge eindeutig geklärt werden. Verformungen und Krümmungen der Paneele bei Oberflächentemperaturen bis 180 °C waren nicht zu erkennen.

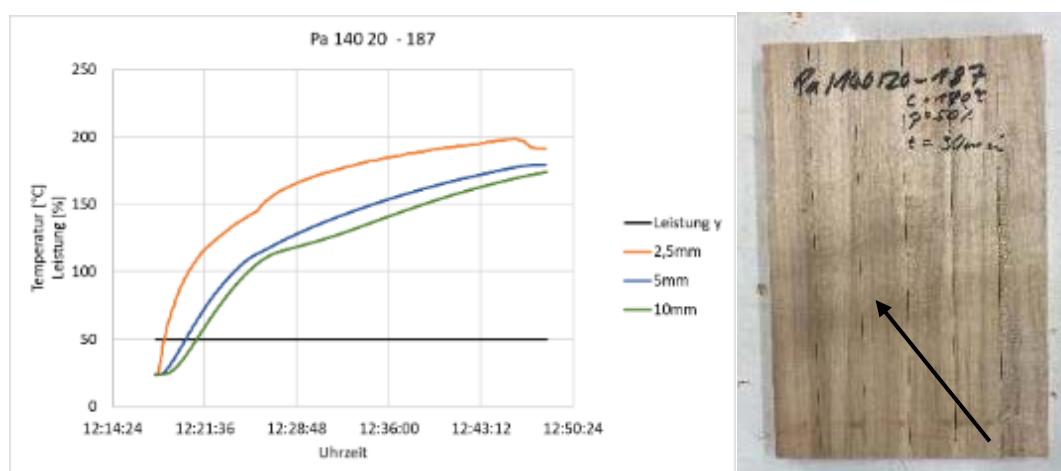


Abbildung 36: Temperaturverlauf bei 50 % Leistungsabgabe innerhalb der Pappelpaneele während 30 min Einwirkungsdauer, Geringe streifenförmige Färbung über die Plattenoberfläche (Pfeil)

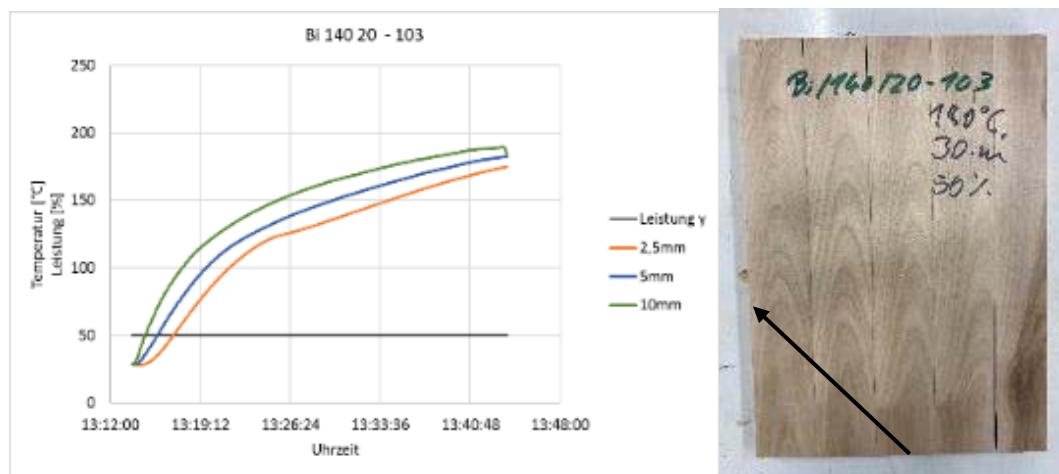


Abbildung 37: Temperaturverlauf bei 50 % Leistungsabgabe innerhalb der Birkenpaneele während 30 min Einwirkungsdauer, Geringe streifenförmige Färbung über die Plattenoberfläche (Pfeil)

Die nähere Untersuchung der **Klebefuge** wurde an Pappel- und Birkenholzpaneele vor und nach der thermischen Behandlung vorgenommen. Trotz vergleichbarer Auftragsmenge (200 g/m^2) wiesen eine Vielzahl der Paneele nach der thermischen Behandlung ein Strichlinienmuster (Abbildung 38) auf. Als mögliche Ursache des genannten Erscheinungsbildes wurden ein „Aufquellen“ des duroplastischen Phenolharzes oder unregelmäßige Bearbeitungsspuren während des Fertigungsprozesses vermutet.

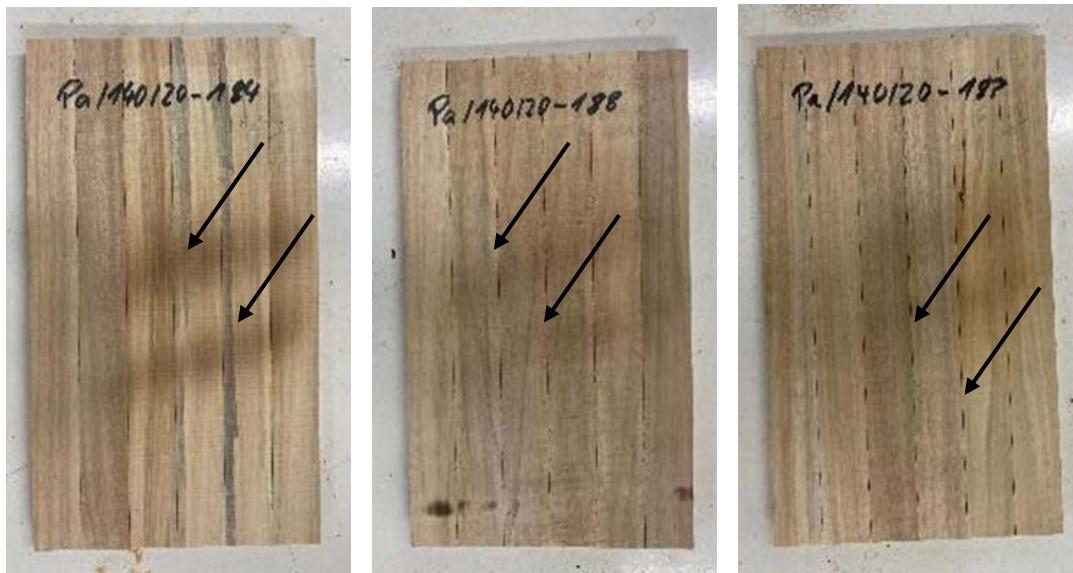


Abbildung 38: Muster der Klebstofffuge nach der thermischen Behandlung bei 180°C an Pappel

Mikroskopische Untersuchungen zur Ausbildung der Klebefuge lieferten hinsichtlich Penetration und homogener Verteilung der Klebstoffmenge / Pressdruck keine Anhaltspunkte. Pappelpaneelle wies jedoch insgesamt eine etwas dickere Klebefuge als Birke mit höherer Dichte und Oberflächenhärte auf (Abbildung 39). Ein Vergleich der Klebfugendicke erfolgte mittels Reflexions-Negativ-Bestimmung.



Abbildung 39: Klebefuge von Pappel (links) und Birke (mitte), sowie Reflexions-Negativ der Klebefuge (Pfeil)

Der Einsatz von Strahlungswärme zur **Verkürzung der Prozesszeiten** wurde positiv eingeschätzt. Aus dem Vergleich zwischen konventioneller Kontakterwärmung und der Verwendung von IR-Carbon-Strahlern resultierte die Reduzierung der Aufheizzeit des Pressgutes um zirka 50 %. Allerdings muss die Intensität der Strahlung vom Substrat und deren Anforderungen an eine gleichmäßige Verteilung über den Querschnitt und die Probenfläche definiert werden. Die thermische Beanspruchung der dunklen Phenolharz-Klebefuge war weiter zu betrachten, da hier eine erhöhte Absorption der Strahlungsenergie vorlag.

Zusammenfassend ist festzustellen, dass der Einsatz von pre- und post-Prozessen zur Energieübertragung für die Dimensionsstabilisierung und zur Reduzierung des Quell- Schwindverhaltens durch die Verfahren der thermischen Strahlung (IR-Strahler), die Kontaktübertragung während der Verdichtung oder die Übertragung mit Hilfe von Heißdampf in unterschiedlichen Betrachtungsweisen Vorteile auswiesen. So wird mit Hilfe der **IR-Strahler** einerseits berührungslos und andererseits flächengenau eine schnelle Erhitzung der mHBS erreicht. Die Strahlung dringt hierbei relativ gleichmäßig in die tiefer liegenden Holzstrukturen vor und führt zur Veränderung der chemischen Zusammensetzung der Einzelkomponenten und in dessen Folge zur Reduzierung der OH-Gruppen. Dies gewährleistet einerseits den Abbau innerer Spannungen durch die Verdichtung des Materials und führt andererseits zu einer reduzierten Feuchtigkeitsaufnahme. Der Prozess kann Oberflächennah und in tieferen Strukturen zum Einsatz kommen. Insgesamt können kurze Prozesszeiten erreicht werden. Die reduzierte Feuchtigkeitsaufnahme schien jedoch bei der Beschichtung eher hinderlich. Die Verwendung von **Heißdampf** mit hohem Feuchtigkeitsgehalt führt zum schnellen Masse- und Energietransport in die Holzstruktur. Die Nutzung von Wasserdampf und Wärmeenergie ist ein gebräuchliches Instrument zum Transport von Wärmeenergie bei der Herstellung von Holzwerkstoffen bei gleichzeitigem Spannungsabbau im Werkstoff. Es ist somit sehr effizient, jedoch mit einer Erhöhung der Feuchtigkeit in der Struktur verbunden. Dies kann eine nachfolgende Trocknung erfordern. Ebenso treten Verformungen und Rückverformungen im Material auf, so dass mit einer Fixierungsvorrichtung gearbeitet werden musste. Hier ergibt sich eine Einschränkung in der Effizienz, so dass die Nutzung von Strahlungsenergie der Heißdampfbehandlung vorgezogen werden muss.

Fazit – Energietransport

1. IR-Carbon-Strahler trugen zum Spannungsabbau durch Oberflächenerwärmung bei.
2. Die IR-Strahlung dringt schnell und tief in das Holz ein, bis 5 mm.
3. Das zeitliche Reduzieren der Strahlungsenergie von 100 % auf 50 % führte zur Reduzierung der Verfärbungen und Verringerung des Energieeinsatzes. Die maximale Oberflächentemperatur sollte 220 °C betragen.
4. Spannungsrelaxation erfolgte ab 150 °C bis 220 °C Oberflächentemperatur, danach trat erhöhte Materialversprödung ein.
5. Der Einsatz von Pappel ist gegenüber Birke (Verfärbungen) zu bevorzugen.
6. Kurzes Nachtempern bei 220 °C verringerte die Rückverformung um 5 - 10 %
7. Der Energietransport mit Wasserdampf führt zu kürzeren Prozesszeiten aber auch zu erhöhtem Aufwand hinsichtlich der Fixierungsvorrichtung.
8. IR-Wärmestrahlung ist als Nachbehandlung der Behandlung mit Heißdampf vorzuziehen.

Untersuchungen zur Optimierung des Klebstoffes für die mHBS

Der zuerst ausgewählte 1K PUR-Kleber schien bei einer Zeit von 8 min und 100/130 °C eher geeignet zu sein als das Phenolharz PF Res. Die Markierung der Klebefugen nach Beschichtung, die unabhängig vom Pulverlacktyp, auftraten, erforderten nochmals Optimierungen hierzu. Bei den eingesetzten Pulverlacken lag die Prozesszeit unter 8 min. D. h. der sich in anderen Prozessen mit Holzwerkstoffen bewährte PF Res sollte auf seine Eignung (Beschichtbarkeit) untersucht werden. Initial erfolgten hier vergleichende Untersuchungen der Kontaktwinkel, die z. B. ein Indiz für eine schlechtere Feuchteannahme und folglich schlechtere Pulverannahme sein können. Die Ergebnisse dazu zeigt vergleichend die folgende Tabelle sowie die beiden Abbildungen.

Tabelle 14 : Kontaktwinkel CA (Mittelwert av, Minimum min, Maximum max) auf mHBS Po mit 20% Porenverdichtung und Verklebung der Paneele mit 1 K PUR und PF-Res-Kleber

Material	CA [°] av	CA [°] min	CA [°] max
Po 20% 1K PUR	86,6 (81,9)	70,7 (74,4)	103,0 (93,9)
Po 20% PF Res	91,2 (94,5)	76,7 (88,6)	103,3 (100,6)

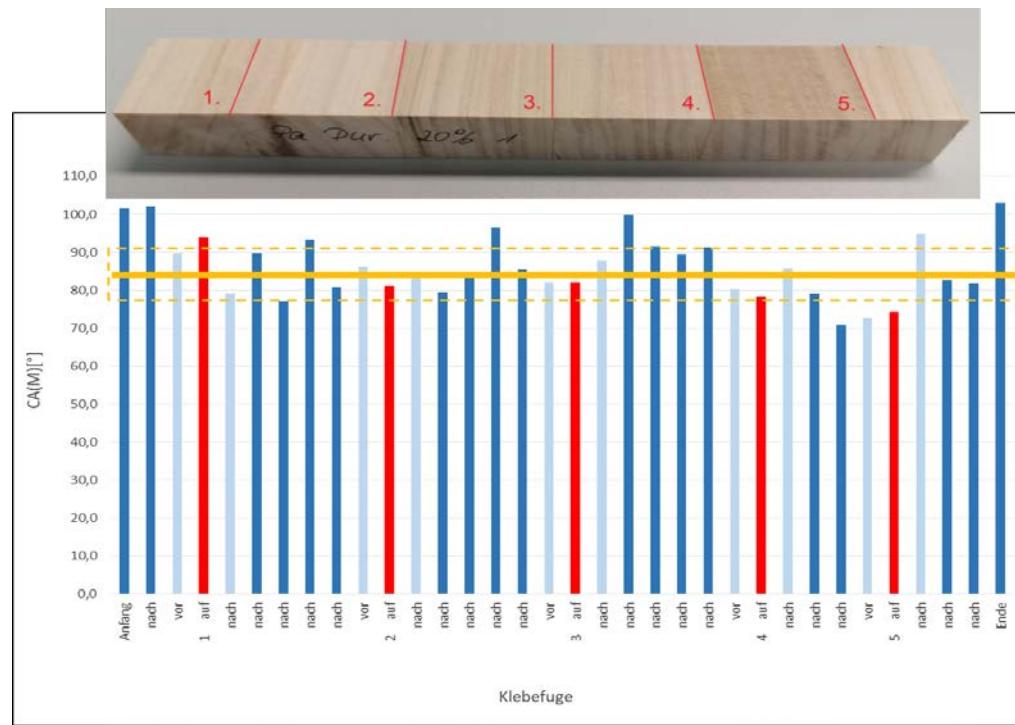


Abbildung 40: Kontaktwinkel (CA)-Verlauf über die Substratbreite (Po , 20 % verdichtet), Paneele verklebt mit 1K PUR-Kleber

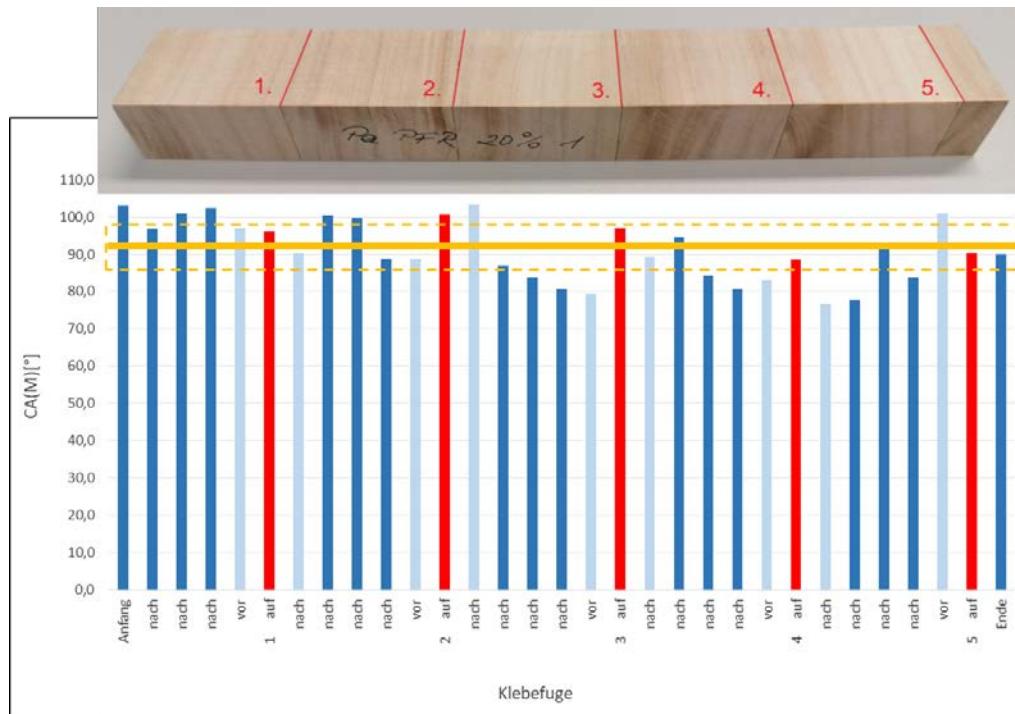


Abbildung 41: Kontaktwinkel (CA)-Verlauf über die Substratbreite (Po , 20 % verdichtet), Paneele verklebt mit PF Res-Kleber

Die Daten zeigen, dass im Mittel die Kontaktwinkel bei PF Res etwas höher lagen, bei Untersuchungen der Pulverlackannahme jedoch keine signifikanten Unterschiede zum 1K-PUR-Kleber auftraten.

Fazit – Klebstoff für mHBS

Die weiteren Pulverbeschichtungen wurden mit Substraten durchgeführt, deren Paneele mit PF-Res-Kleber verbunden sind. Positiver Nebeneffekt waren scheinbar reduzierte Spannungen, die sich auch positiv auf die Deformation (geringer) der mHBS auswirkten.

Optimierung der Pulverlackbeschichtung

Die zuerst größere Auswahl an NT-Pulverlacken wurde in Versuchen anhand ihrer Applizierbarkeit, des Einstellens von Prozesstemperaturen und der Schichteigenschaften auf 4 Produkte und 2 Primer reduziert. Der Pulverlack F, ein Polyester, wurde im späteren Verlauf mit hinzugezogen. Der Hersteller dieses Pulverlackes war auf die Projektarbeiten aufmerksam geworden und stellte diesen NT-Lack für die Forschungsarbeiten zur Verfügung. Mit diesen Pulverlacken (Tabelle 1) fanden folgend die Beschichtungen auf mHBS aus Pappel (Po) und Birke (Bi) statt. Als Substrate wurden zuerst die um 20 % verdichteten mHBS herangezogen, später auch mit 50 % verdichtetem Porenvolumen.

Einfluss von Klimalagerung und Pulverbeschichtung bei mHBS

Bei der Probenpräparation holzbasierter Produkte für die Pulverlackierung waren die vorbereitenden Schritte der Klimatisierung ebenso wichtig wie die eigentliche Beschichtung. Ziel war es, durch konditionierende Maßnahmen einen Oberflächenwiderstand R_o von ca. $10^8 \Omega$ zu erreichen. Folgende Konditionierungen wurden untersucht:

- Tempern der Substrate bei 80 °C
 - ein häufig gewählter Weg zur Verbesserung der elektrostatischen Aufladung
- Feuchtlagerung bei 20 °C/65 % rF
 - ein häufig genutztes Klima zur Erzeugung einer gleichmäßigen Feuchtigkeit an der Oberfläche des Substrates
- Lagerung bei ca. 20-23 °C/ 50 – 60 % rF
 - Raumbedingungen

Die Pulverapplikation mit Corona- oder Triboauftrag zielte auf eine homogene Pulverlackapplikation mit entsprechender Zielschichtdicke von 80 - 120 µm. Aus den Beschichtungsversuchen (hier am Beispiel des Pulverlackes A zusammengefasst) waren folgende Schlüsse zu ziehen:

- Das **Tempern** der mHBS erwies sich als ungeeignet. Der R_o lag bei $10^{11} \Omega$, die aufgetragenen Schichten waren sehr inhomogen. Die Zielschichtdicken wurden nicht erreicht. Die Haftfestigkeit GT lag trotzdem bei sehr guten 0 bis 1.

- Die **Feuchtlagerung** der mHBS resultierte in einer verbesserten Beschichtbarkeit, was sich auch in höheren Schichtdicken zeigte. Trotzdem ließen sich Inhomogenitäten nicht vermeiden. Die Haftfestigkeit war mit 0 bis 1 vergleichbar mit denen beim Tempern. **Der R_o lag bei $10^{10} \Omega$ und damit unerwartet zu hoch.**
- Das Konditionieren bei **Raumbedingungen** lieferte ebenso einen R_o von $10^{10} \Omega$ und damit erwartet keine günstigeren Bedingungen für den Pulverlackauftrag. Die Resultate des GT von 0 bis 1 bei den applizierten inhomogenen Schichten führten zu keinem anderen Erkenntnisgewinn.

Die Ergebnisse der verschiedenen Konditionierungen offenbarten, dass die mHBS20 mit Oberflächenfeuchten zwischen im Mittel 8 bis 9 % im Zielbereich lagen und bessere Beschichtungsergebnisse hätten erwarten lassen.

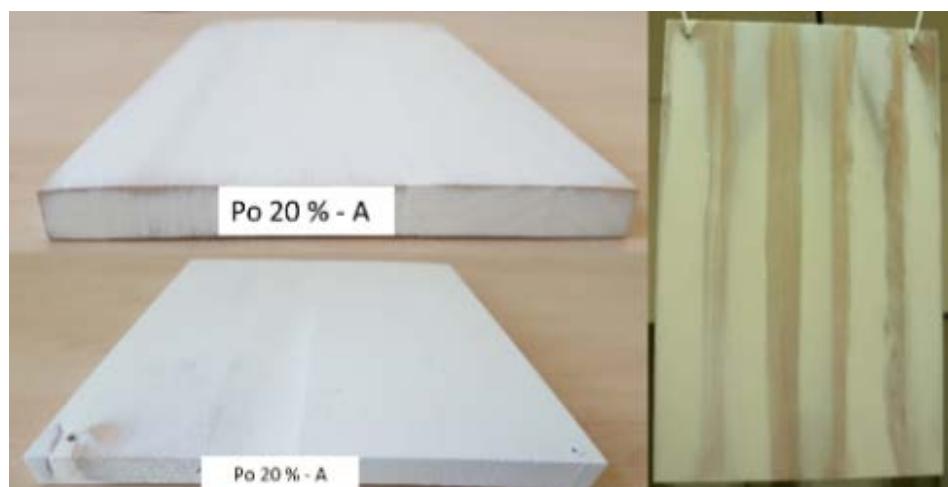


Abbildung 42: Pulverlack A auf mHBS20-Po nach Tempern (oben links), nach Feuchtlagerung (unten links) und nach Lagerung bei Raumbedingungen (rechts)

Die Schichtinhomogenitäten zeigten sich in allen Vorgehensweisen, waren in einigen Fällen etwas ausgeprägter als z. B. bei Raumbedingungen. Die Fehler traten vermehrt an den Klebenähten (1K PUR) zwischen den Paneelen auf. Ein eindeutiger Rückschluss auf die Präparation der Substrate war daraus nicht zu ziehen. Vielmehr waren die Ursachen zu ergründen für

- der in Teilen **starken Verformung** der Substrate während des Transports durch den thermischen Aufschmelz- und Trocknungs-/Vernetzungsprozess sowie
- die sehr **schlechte Pulverannahme** an den Klebefugen.

Ursachensuche für die Verformung und schlechte Beschichtbarkeit der mHBS

Die Vermutung war, dass die Spannungen in den Paneelen durch das **Verdichten** (radial, tangential) und Unterschiede im Verdichtungsprofil (x-y und z) zu Verformungen bei Temperatureinfluss führen. Die **Verklebung** der Paneele zur mHBS trägt außerdem zu Spannungen und damit den Verformungen bei.

Bereits im AP 5 bei der Entwicklung und Anpassung der Technologie zur Herstellung der mHBS wurde festgestellt, dass die Substrate eine starke Reaktion auf thermische Einflüsse zeigten. Eine spätere Verformung der mHBS-Platten z. B. zu einem 3D-Rohr sollte das spätere Projektziel sein, um zukünftige Anwendungen zu realisieren. Jedoch sollte eine Verformung eher gezielt beeinflusst werden können und nicht unbeherrschbar stattfinden. Neben verfahrenstechnischen Parametern bei der Herstellung der mHBS erfolgte die Einflussnahme auf die Verformung der mHBS durch die gezielte Auswahl der zu verklebenden verdichteten Paneele nach Jahrringlage - eher radial, eher tangential oder gemischt. Ein Zusammenhang dieser Vorgehensweise mit der resultierenden Verformung war jedoch nicht stringent. Tendenziell schien die Verklebung radial/tangential eher zu geringeren Verformungen zu führen (siehe Abbildung 41) als der Einsatz von Paneelen einer Vorzugsrichtung der Jahrringlage.



Abbildung 43: Paneele verklebt zu mHBS tangential/radial (links) mit eher geringerer Deformation und tangentialem Verlauf der Jahresringe (rechts) mit stärkerer Verformung

Die aus der Verdichtung jeder Einzelpaneel und deren Verklebung zu einem mHBS-Substrat resultierenden Unterschiede im Verdichtungsprofil wurden durch die **Messung des Rohdichteprofils** belegt. Die nächste Abbildung zeigt, dass sich die Rohdichten an der Oberfläche unterschieden, und zwar innerhalb der Einzelpaneelle und auch zwischen den Paneeelen eines mHBS. Solche Effekte resultierten vermutlich darin, dass

- die **Feuchteannahme** an der Oberfläche sehr unterschiedlich war. Daraus folgten Unterschiede im Oberflächenwiderstand und letztlich in der Pulverlackannahme.
→ **Schichtinhomogenitäten**
- die **Wärmeleitfähigkeit** des Substrates nicht gleichmäßig ist, die applizierten Pulverlacke dadurch unterschiedlich aufschmelzen und vernetzen.
→ **Schichtinhomogenitäten und Fehler in den Beschichtungen.**

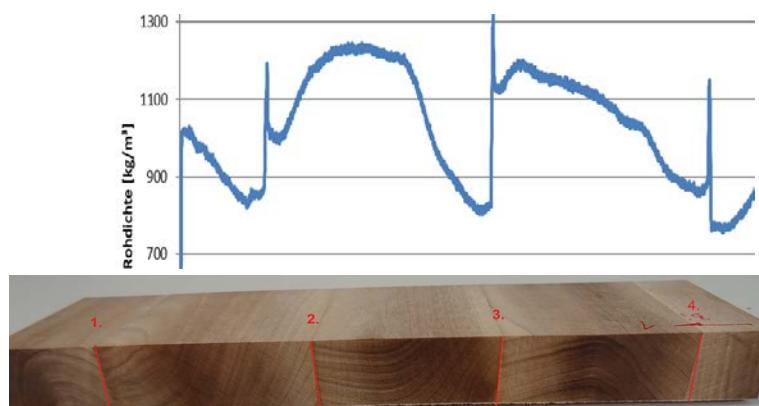


Abbildung 44: Rohdichteprofile an der Oberfläche über die Einzelpaneele des mHBS (Bi)

Ein weiterer Nachweis für die aus den Inhomogenitäten der Oberflächen der mHBS-Substrate resultierenden Schwierigkeiten bei der Pulverlackbeschichtung erfolgte durch die Kontaktwinkelmessung auf dem mHBS (Abbildung 45). Je höher der **Kontaktwinkel** ist, umso schlechter ist z. B. die Benetzbarkeit mit Flüssigkeiten, es liegen eher hydrophobe Eigenschaften vor. Diese Benetzbarkeit spielte zum einen eine Rolle, wenn bei der Konditionierung **Luftfeuchtigkeit** angenommen werden sollte und musste auch beachtet werden bei der Beschichtung mit ionFl. Für die Untersuchungen wurde ein Kontaktwinkelmessgerät der Firma Dataphysics (OCA 10) genutzt, wobei zur Kontaktwinkelmessung Wasser eingesetzt und jeweils ein Tropfenvolumen von ca. 2 µl auf der markierten Messstrecke abgesetzt wurde.

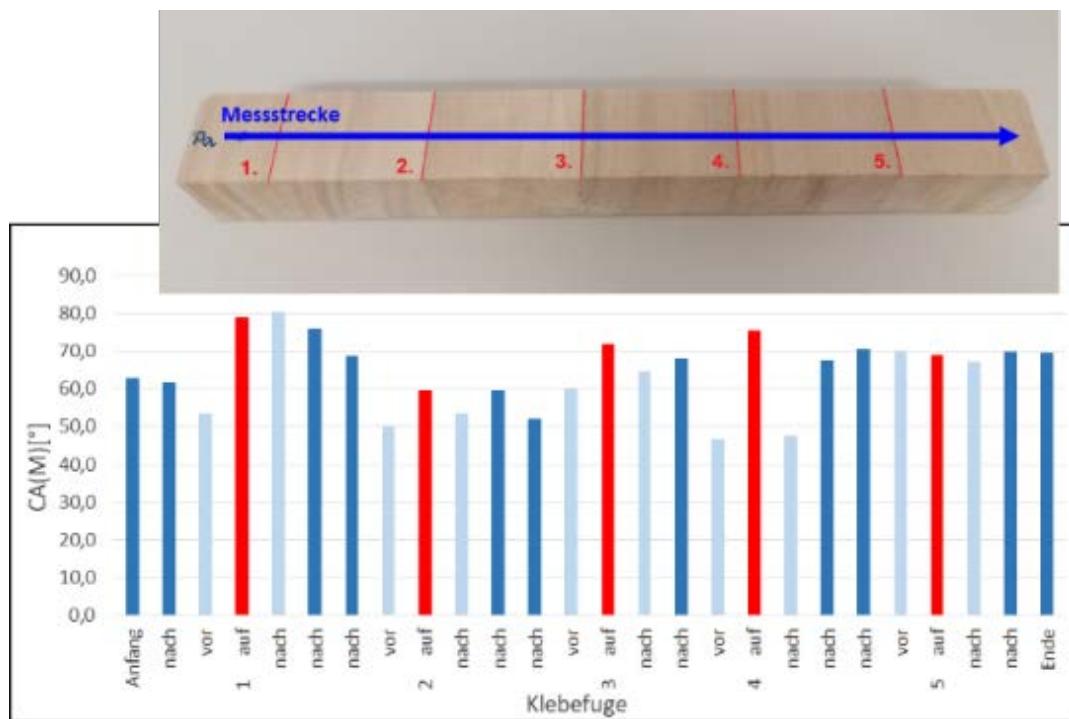


Abbildung 45: Kontaktwinkel auf dem mHBS (Pappel, von links nach rechts)

Die Abbildung 45 zeigt, dass die Klebestellen allein nicht für eine schlechtere Benetzung standen, sondern durchaus auch innerhalb der Einzelpaneelen höhere Kontaktwinkel (70 bis 80°) vorlagen. Diese Tatsache belegt nicht nur die Unterschiede in der Verdichtung, sondern spricht auch für die resultierenden Inhomogenitäten in den Pulverlackschichten. Verformung und schlechtere Beschichtbarkeit folgten daraus.

Auch die durch die **Unterschiede in der Verdichtung** bedingten Schwankungen der **Wärmeleitfähigkeit** im Substrat wurden in Untersuchungen belegt. Dazu wurden NiCrNi-Temperatursensoren auf der Oberfläche eines mHBS platziert und die Temperaturverläufe bei Wärmestrahlung mit einem IR-Flächenstrahler (1,35 kW, Mittelwelle) aufgezeichnet. Als Temperaturregime wurde ein Verlauf gewählt, welcher dem Prozess des Tempern-Aufschmelzen-Vernetzens bei der Pulverlackbeschichtung entsprechen könnte (Abbildung 46). Die Messergebnisse verdeutlichen, dass sich das

Erreichen der Solltemperatur (schwarzer Kurvenverlauf) von den sich tatsächlich einstellenden Temperaturen unterschied, vom Ort der Messung auf der Paneele (Mitte, Rand) und auf dem mHBS-Substrat (Mitte, Rand).

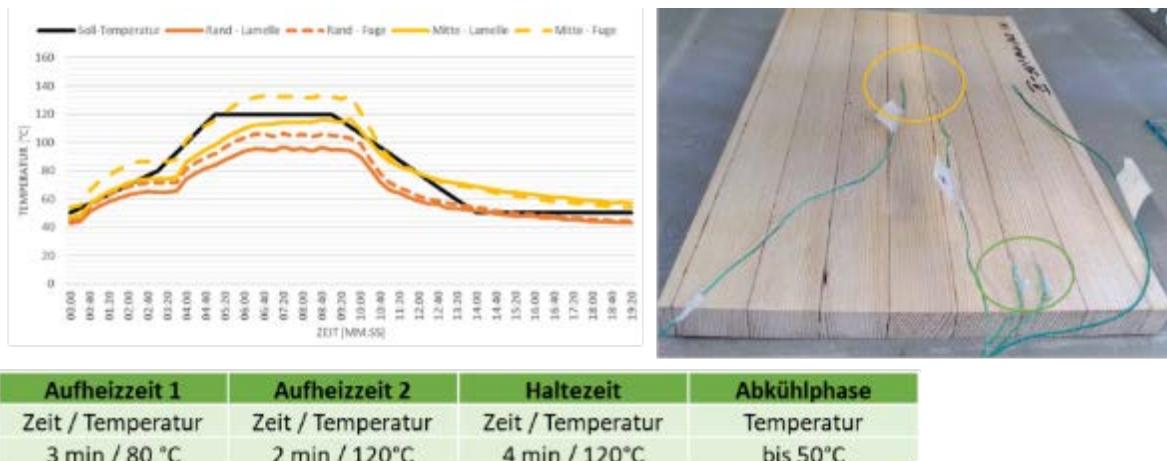


Abbildung 46: Oberflächentemperatur über die Zeit in Anlehnung an eine Ofenkurve beim Prozess der Pulverlackierung

Fazit – Ursachen schlechter Pulverlackannahme und Verformungen bei mHBS

1. Die **Verformung** des mHBS bei thermischem Einfluss war ein Resultat mehrerer Effekte. Die Unterschiede in der Verdichtung führten zu Unterschieden in der Wärmeleitfähigkeit. Es kann vermutet werden, dass sich Temperaturgradienten bildeten, die in Spannungen resultierten. Spannungen durch Unterschiede in der Jahrringlage und durch die Verklebungen schienen eher untergeordnet. In Summe führten alle drei Effekte zu Verformungen.
2. Die Inhomogenitäten in der Verdichtung zeigten sich in Unterschieden der Kontaktwinkel auf der Oberfläche der mHBS. Damit fand die Konditionierung (Feuchteaufnahme) unterschiedlich statt, so dass die Oberflächenwiderstände differierten und die **schlechte Pulverlackannahme** eine Konsequenz war. Die differierende Wärmeleitfähigkeit war zudem hinderlich beim Aufschmelzen des Pulverlackes.

Untersuchungen zur Reduzierung des Ausgasens von Holzinhaltsstoffen

Im Prozess der Pulverlackierung von Holz und Holzwerkstoffen stellen Ausgasungen durch austretende Feuchtigkeit und Holzinhaltsstoffe ein wesentliches Problem dar. Entgegenwirken kann man durch die Wahl harzärmerer Holzsorten und dem Einsatz von NT-Lacken. Auch die Auswahl der geeigneten Wärmestrahler (STIR eher als IR-Carbon-Strahler) kann helfen. Diese Aspekte wurden für die Beschichtung der mHBS beachtet. Der Faserverlauf in den Paneelen spielt dabei mglw. auch eine Rolle. Gemeint sind hier, in welche Faserrichtung die Verdichtung stattfindet und wie die Paneele dann verklebt werden. So wurde bei der Substratherstellung der Faserverlauf berücksichtigt (siehe

Optimierung der mHBS im Abschnitt 2.1.6). Hypothese war, dass bei eher radial angeordneten Fasern die Ausgasungen, die die Schichtqualität herabsetzen, reduziert werden können. So wurde bei der Verklebung der verdichteten Einzelpaneele darauf geachtet, überwiegend tangential, radial oder radial / tangential angeordneter Faserstrukturen miteinander zu verbinden und selbige zu beschichten

Es wurden die Lacke B-UVclear01, F-NT-PES sowie H-EP (diffusionsoffen) eingesetzt. Der Lack H ist für Beschichtungen auf metallischen Substraten einzusetzen. Aufgrund seiner stofflichen Zusammensetzung ist er diffusionsoffen, d. h. sollte Ausgasungen besser abführen können. Deshalb wurde er zum Vergleich herangezogen, gleichwohl seine Prozesstemperatur über 130 °C liegt.

In allen Beschichtungen zeichneten sich Markierungen der Klebefugen ab. Trotz Schichtdicken von 120 µm und mehr waren bei **Lack H** geringere Ausgasungen zu verzeichnen als bei den beiden anderen Lacken. D. h. die Möglichkeit, die austretenden Gase abzuführen schien wichtig. Bei **Lack B** traten in allen Fällen starke Verblasungen (Mikroblasen) bis hin zu Lackenthaftungen auf. Hier war zu vermuten, dass die Vernetzung zu schnell stattfindet, Gase nicht mehr abgeführt werden konnten. **Lack F** zeigte geringe Ausgasungen. Der vergleichsweise Einsatz von ionFl führte wieder zur Verschlechterung der Schichtqualitäten (Faserquellung).

Die eher radial angeordneten Fasern zeigten in Summe die schlechtesten Ergebnisse, was zu erwarten war. Hier traten auch noch leichte Substratverformungen auf. Die tangential oder wechselseitig radial/tangential angeordneten Paneelen führten jedoch auch nicht zur Vermeidung der Ausgasungen.



Abbildung 47: Pulverlackierte Substrate mit links: Lack B, radtan, starken Ausgasungen, mittig: Lack H, rad, nur oben links vereinzelte Verblasungen, rechts: Lack F, radtan, gerinere kleine Ausgasungen

Fazit – Reduzierung Ausgasungen

Die Faserausrichtung der Paneele spielte für die Qualität der Beschichtungen eine untergeordnete Rolle. Ein zu schneller Vernetzungsvorgang, wie er bei dem UV-Pulverlack B stattfand, erschien eher als Hauptursache für die resultierenden sehr starken Verblasungen bzw. Haftungsproblemen. Anzustreben war deshalb, mit Vorgelierung der ersten Schicht zu arbeiten, um das zu schnelle „Abdichten“ der Oberfläche zu verhindern. Ein zweischichtiger Auftrag der Pulverlacke schien günstig.

Optimierung der Technologie für die Pulverlackapplikation

Während die FS 2 weitere Optimierungen für die mHBS-Herstellung absolvierte (siehe vorangegangenen Abschnitte in AP6 bis AP 8), wurde der Prozess der Pulverlackapplikation ebenfalls weiter verbessert. Zu diesem Zweck konnten verschiedene technische Möglichkeiten genutzt werden. Zum einen konnte mit **Gegenfeldelektroden** gearbeitet werden. In diesem Fall wird versucht, Ladungen durch Aufladung der Rückseite (entgegengesetzter Polarität) zu kompensieren. Die Aufladung erfolgte über eine Korona-Entladung von einem rückseitig gegenüber der Spritzpistole angeordneten Stab mit Nadelelektroden, die an eine Gleichspannung mit entgegengesetzter Polarität zur Sprühpistolenspannung angeschlossen waren. So war nur eine **einseitige Beschichtung** möglich.

Eine weitere technische Möglichkeit stellte die Option **Gegenkorona** dar. Zur Anwendung gelangen hier zwei gegenüberliegende Pistolen mit entgegengesetzter Polarität zur Applikation des Pulverlackes. Aufgrund der Anziehung entgegengesetzter Ladungen scheiden sich die Pulverpartikel auf dem Werkstoff ab und bleiben darauf haften (Abbildung 48).

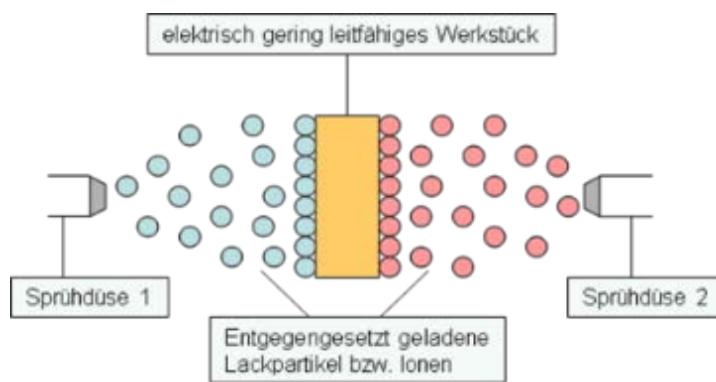


Abbildung 48: Schema der Pulverlackapplikation bei Gegenkorona

Das Arbeiten mit der Gegenfeldelektrode ließ eine verbesserte Pulverlackapplikation zu. Allerdings, da nur einseitig möglich, führten die anschließenden Aufschmelz- und Trocknungsprozesse zu teilweise stärkeren Verformungen. Diese resultierten auch aus den Spannungen, die dann durch das Vernetzen der einseitig aufgetragenen Beschichtung entstanden (Abbildung 49).



Abbildung 49: Pulverlackauftrag im Gegenfeld (links oben), Aufschmelzen im IR-Kanal (rechts oben) und aufgeschmolzener Pulverprimer (Lack E) auf mHBS Po mit Deformation und Rissen an Klebestelle

Die mit der Super-Corona-Pistole PG1 applizierten Pulverlacke sollten bessere Resultate als im Gegenfeld vorweisen, da die Aufladung höher und die Abscheidung dadurch verbessert war. Vorteile bei Anwendung dieses Verfahrens sind das Vermeiden von Fehlern beim Beschichten gerade im Randbereich (Bilderrahmeneffekte) von holzbasierten Substraten. Während sich der Pulverlack A applizieren ließ, konnte bei dem Lack B keine Fluidisierung erreicht werden, d. h. ein Auftrag fand nicht statt. Für den Lack E ließen sich sowohl der Primer als auch der Decklack auftragen, wobei letzterer in zu geringer Schichtdicke vorlag. Trotzdem konnte mit diesem Verfahren eine Verbesserung der Haftfestigkeit für mHBS Po und Bi erreicht werden (GT 0 bis 1).

Fazit – Optimierung Pulverlacktechnologie

Die Pulverlackapplikation ließ sich durch Anlegen eines Gegenfeldes oder Nutzen von Gegenkorona prinzipiell verbessern. Die Schichthomogenität verbesserte sich geringfügig, jedoch ließen sich die avisierten Zielauftragsmengen von 80 bis 120 µm nicht immer erreichen. Allein durch technologische Anpassungen ließen sich die bestehenden Probleme nicht beheben.

Verbesserung der Pulverlackapplikation durch das Primern der mHBS

Einsatz des Leitprimers

Das Nutzen von Leitprimern (hier Formulierungen mit leitfähigen Additiven), um das Pulverbeschichten auf holzbasierten, nicht leitfähigen Substraten, zu verbessern, ist bekannt, wird jedoch nicht häufig genutzt. Vielmehr wird z. B. die auch als Standard-Referenz am Markt genutzte MDF-Ref, auf die sich Pulverlackhersteller u. a. in ihren Empfehlungen in TDB beziehen, als Substrat für Innenanwendungen herangezogen. Diese MDF ist mit einem halogenfreien Leitfähigkeitszusatz ausgestattet, der den Oberflächenwiderstand herabsetzt. Ein Leitprimer wurde im Rahmen des Projektes von einem Projektbegleiter zur Verfügung gestellt. Die stoffliche Basis ist eine „leitfähige Salzlösung“, die nicht genauer beschrieben wurde. Dieser **Leitprimer** wurde vor der Pulverbeschichtung aufgetragen. Dadurch wurde der zumindest **R_o auf 10^8 - $10^9 \Omega$** herabgesetzt.

Die sich anschließende Beschichtung mit Pulverlack wurde mit den Pulverlacken A, E und F mit guten Ergebnissen durchgeführt. Die Auftragsmengen waren noch zu gering, jedoch verbesserten sich die Homogenitäten der Schichten und damit auch die Haftfestigkeit. Die folgende Abbildung zeigt, dass noch keine deckende Beschichtung des Lackes E vorliegt, jedoch trotzdem die Haftfestigkeit gewährleistet ist. Problematisch in der Lackannahme waren die Klebestellen.



Abbildung 50: Pulverlackauftrag Lack E (Leitprimer und Decklack) auf mHBS (Po) mit ca. 50-60 µm nach Leitprimer (links) und nach Prüfung der Haftfestigkeit GT=0 (rechts)

Einsatz von ionFl

Der Einsatz der **ionFl** sollte prinzipiell zu vergleichbaren Ergebnissen wie mit dem Leitprimer führen. Vorteil des Einsatzes der **ionFl** ist, dass im AP 4 das Produkt mit der besten Langzeitstabilität für den Ro ausgewählt sowie die beste Konzentration einer wasserbasierten Lösung mit der **ionFl** in ihrer Handhabung (Auftrag und Trocknung) ermittelt wurde. Zur Applikation kam **EMIT W als 20 %ige** Lösung zum Einsatz. Im Walzverfahren erfolgte deren Auftrag und anschließend trockneten die Substrate bei Raumbedingungen. Positive Effekte im Vergleich zum Leitprimer waren:

- Der Ro lag zwischen **10⁷-10⁹ Ω**.
- Die Schichtdicken der Pulverlacke lagen in den Zielbereichen 80 - 120 µm.
- Zur Pulverapplikation kam die Automatik-Corona-Pistole zum Einsatz. Die Schichthomogenität war besonders gut bei den Pulverlacken B und F, wobei Birke besser abschnitt als Pappel.

Nachfolgend sind in der Abbildung 51 im Vergleich die Ergebnisse der Pulverlackbeschichtung ohne **ionFl** und mit **ionFl** als Primer gezeigt. Im rechten Teil der Abbildung mit Pulverlack F, alle anderen mit Pulverlack A. Der Pulverlack F ist außerdem auf mHBS (Po) appliziert, das schwierigere Substrat im Hinblick auf Schichthomogenität und Substratstabilität (Verformung).



Abbildung 51: Pulverlackauftrag ohne **ionFl** nach den jeweiligen Konditionierungen mit Lack A auf mHBS (Bi) und mit Lack F auf mHBS (Po, rechts)

Das Nutzen der **ionFl**, insbesondere EMID W, schien demnach vorteilhaft. Aufgrund der **Faserquelle**, die die Pulverlackschichten qualitativ herabsetzten, waren Überlegungen zur Optimierung der Trocknung nach Applikation der **ionFl** anzustellen sowie eine weitere **ionFl** einzusetzen, die nicht in Wasser, sondern Lösemittel gelöst wurde. Letzteres sollte nach Applikation schneller abdampfen und so das Faserquellen verhindern. Eingesetzt wurde für diese Untersuchungen EMIF.

Das sofortige konvektive Trocknen bei 80 °C nach Auftrag von EMID W bzw. EMIT W sowie der Einsatz von EMIF (mit Aceton) führten erwartungsgemäß zum Absenken des Oberflächenwiderstandes Ro unter den Mindestwert von **10⁸ Ω**, jedoch traten gerade in den Frühholzbereichen der verdichteten Paneele weiterhin Faserquellungen auf, wenn auch etwas verminder. Mit EMIF wurden selbst nach 24 h noch verminderte Oberflächenwiderstände gemessen.

Nachteilig war hier die Verfärbung der Oberfläche. Bei weiterer Nutzung von ionFl sollte EMID W ein Kompromiss sein (geringerer Ro und geringe Verfärbung) und sollte nach Trockenschrank-Trocknung unmittelbar beschichtet werden. Die Faserquellung stellte trotzdem ein Problem dar.

Einsatz von Primern speziell für Lack F

Der Pulverlack F ist ein Hybridmaterial, d. h. besteht in diesem Fall aus Epoxidharz und Polyester. Dieser Lack ist für Außenanwendungen auf MDF prinzipiell gut geeignet. Auch bei den Untersuchungen auf mHBS traten mit diesem Lack die geringsten Fehler auf. Untersucht werden sollte, inwieweit ein auf dieses Produkt abgestimmter Pulverlack-Primer (F-NTP-EP/PES), dies ist ein Pulverlack (siehe Tabelle 7), der das Beschichtungsergebnis verbessern konnte. Außerdem wurde ein als Leitlösung PF bezeichneter Leitprimer untersucht, der zwischen zwei Schichten appliziert werden muss. Folgendes Vorgehen wurde gewählt:

Schritt 1: Pulverlack (Polyester)-Primer mit Lack F

Schritt 2: Lack F

Schritt 3: ionFl EMID W und Lack F

Schritt 4: Lack F mit Leitlösung PF und zweiter Schicht Lack F

Es wurde eine Gesamtschichtdicke von mind. 120 µm bei zweischichtiger Applikation erreicht (siehe Abbildung 53). Die auch visuell besten Resultate verzeichneten jeweils die zwei Pulverlackschichten (Schritt 1 und Schritt 4), wobei sich in Schritt 1 der Zwischenschliff und ein folgender Heißauftrag des Pulverlackes auf dem Pulverlackprimer als am besten (GT=0) erwies. Mit GT = 1 lagen die Beschichtungen aus Schritt 4 jedoch auch noch im Zielbereich (GT = 2).

Fazit – Optimierung Pulverlackapplikation I - Primer

Entsprechend des zu erzielenden Ro von unter $10^9 \Omega$ ist der Einsatz von ionFl (hier EMID W) dem eines anderen Leitprimers vorzuziehen. Das Aufquellen der Holzfasern bei Einsatz ionFl ließ sich jedoch trotz Optimierung der Trocknung nicht verhindern. Die Oberflächenqualität war dadurch schlecht.

Auf die jeweiligen Pulverlacke speziell abgestimmte Pulverlack-Primer (hier Lack F), die als Grundierung in vergleichbaren Schichtdicken aufgetragen wurden, führten dann zu verbesserten Beschichtungsqualitäten. Die Grundierung erleichterte den Decklack-Auftrag.

Sowohl ein Temperiern der mHBS bei ca. 60 °C vor der Pulverlackapplikation als auch der Einsatz geeigneter Pulverlack-Primer für einen Zweischichtauftrag sollten bei der Pulverlackapplikation der mHBS Anwendung finden.



Abbildung 52: Pulverlack F auf Pulverlack-Primer auf mHBS (Po); (Schritt 1)



Abbildung 53: Zweischichtige Applikation von Pulverlack F mit Zwischenschicht eines Leitprimers auf mHBS (Po); (Schritt 4)

Optimierung der Pulverlackapplikation für UV-Pulverlacke

Als UV-Pulverlacke (für Außenanwendungen) wurden für holzbasierte Substrate von den Industriepartnern der **Lack B**, ein Polyester-Acrylat-Lack, der mittels Breitbandstrahler (Elektroden) vernetzt wird, sowie **Lack G**, ein Polyester-basierter Lack, der mit UV-LED oder Elektronen vernetzt wird. Der Lack G wurde zusätzlich seit Mitte des Jahres 2021 hinzugezogen, da dieser Industriepartner sein Produkt mit zur Verfügung stellen wollte. Außerdem hatte der Hersteller des

Lackes B Lieferengpässe für das mit Projektbeginn vereinbarte Produkt. Aus diesem Grund stellte er dann ein vergleichbares Lacksystem, allerdings für Innenanwendungen, zur Verfügung.

UV-Lack B

In ersten Untersuchungen mit dem Lack B-UVclear01 (Klarlack) wurde festgestellt, dass bei Nutzung der Strahler Hg/Ga starke Ausgasungen beim Beschichten/Vernetzen von mHBS Po auftraten. Aus diesem Grund wurde in weiteren Untersuchungen

- der Einfluss der IR-Strahler zum Aufschmelzen des Lackes und
- der Einsatz der UV-Emitter untersucht.

Zum Aufschmelzen kamen SIR- oder Carbon-Strahler zum Einsatz. Beide Strahlertypen arbeiten im mittelwelligen Bereich, allerdings besitzt der Carbon-Strahler eine höhere Intensität. In keinem Fall konnten die Ausgasungen vermieden werden. Außerdem wurde die UV-Dosis zum Vernetzen (mind. 2000 mJ/cm² (bei 120 W/cm²)) mit den LED-Emittern (365 nm, 395 nm) nicht erreicht werden. Die sich ergebende schlechtere Vernetzung der Schichten zeigte sich in einer verminderten Haftfestigkeit (GT = 1-2).

Die Beschichtungen, bei denen der **SIR-Strahler** zum Aufschmelzen, der Ga-Emitter (Zieldosis wurde erreicht) zum Vernetzen genutzt wurden, lieferten die besten Ergebnisse (GT = 0).

Basierend auf diesen Erkenntnissen wurde der Einsatz des pigmentierten Lackes (B-UV weiß02i) untersucht. Pigmente tragen eher zu einer porösen Schichtstruktur bei und diese Tatsache sollte sich positiv auf das Abführen austretender Gase auswirken sowie die Vernetzung verzögern. Der Pulverlack wurde ein- oder zweischichtig appliziert, nur mit Ga-Strahler vernetzt oder die Basisschicht vorvernetzt und folgend mit der Decklackschicht mit dem Ga-Strahler durchvernetzt:

- der pigmentierte Lack zeigte keine Ausgasungen. Die zweischichtige Applikation führte jedoch zu schlecht haftenden Deckschichten (GT = 2-5). Eine Ursache war mglw. eine zu hohe Dosis (> 3500 mJ/cm²) für die applizierten Schichtdicken (unter 130 µm), (Abbildungen 54, 55)
- der Klarlack haftete sehr gut (GT = 0) auf dem Substrat, mit ein- und auch zweischichtigem Auftrag. Hier traten geringe bis mittlere Verblasungen im Randbereich der Substratoberflächen auf (Abbildung 56).

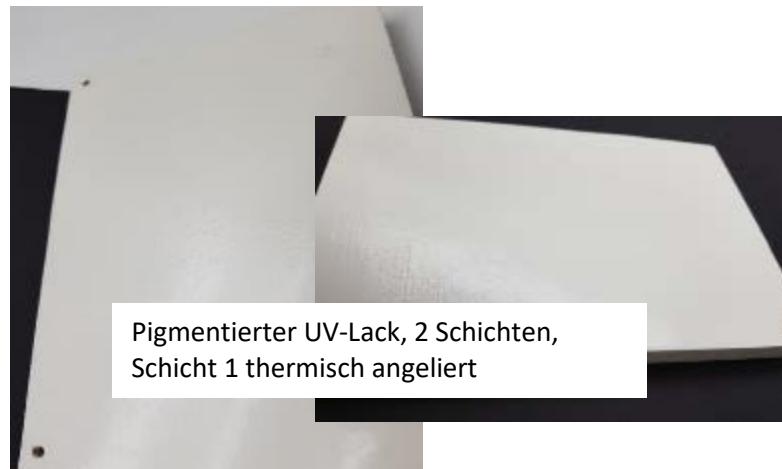


Abbildung 54: Pigmentierter UV-Lack B, 2-schichtige Applikation, Schicht 2 geringe Haftung, GT = 5

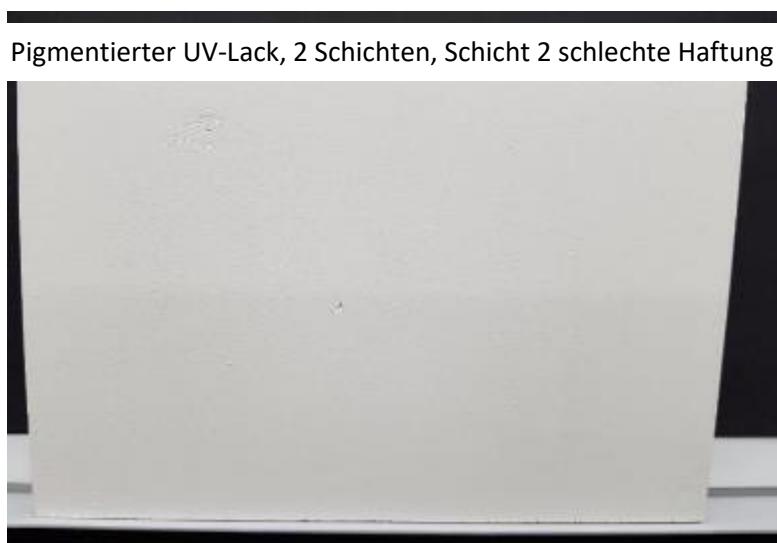


Abbildung 55: Pigmentierter UV-Lack B, 2-schichtiger Auftrag, Schicht 1 thermisch angeliert, GT = 2



Abbildung 56: UV-Klarlack B mit 2-schichtiger Applikation, GT = 0

Lack G

Die technischen Parameter zum Beschichten wurden schrittweise erarbeitet, da vom Hersteller dafür nur Anhaltspunkte benannt wurden. Auch gab es keine Zielgröße für die Schichtdicke. Die Versuche erfolgten vergleichbar zum Lack B. Es fand ein einschichtiger Auftrag auf Po (native) statt, auf MDF-Ref sowie mHBS Po, um diesen neuen Lack besser einordnen zu können. Die Zieldosis von über 2000 mJ/cm² konnte nur mit Einsatz des Ga-Strahlers erreicht werden, hierfür schienen jedoch die aufgetragenen Schichten mit ca. 70 µm zu gering zu sein. Die Überhärtung resultierte in einer schlechten Schichthaftung (GT = 2). Die beste Haftung (GT = 1) schien mit UV-LED (395 nm) zu erfolgen (Abbildung 57). Hierbei lag nur die Hälfte der genannten Dosis vor, was ausreichend für diese Schichtdicken schien. Verblasungen waren in geringem Maße an den Klebefugen der Paneele der mHBS zu sehen. Die Pulverannahme auf mHBS war für UV-Lack G schlechter als bei Lack B.



Abbildung 57: Pigmentierter UV-Lack G, einschichtige Applikation, Vernetzung UV-LED, GT = 1

Fazit – Optimierung Pulverlackapplikation II – UV Lack

Der UV-Lack B zeigte seine besten Ergebnisse im zweischichtigen Auftrag mit dem thermischen Vorvernetzen der Basisschicht. Es ist darauf zu achten, die Dosis nicht zu hoch einzustellen, da dies mglw. die Haftung der Deckschicht negativ beeinflusst (durch zu starke Vernetzung). Der Lack G schnitt schlechter als Lack B ab.

Für den **Lack B-UV clear01** war eine Schichtdicke von 90 – 100 µm zu realisieren, Erwärmung / Aufschmelzen in 240 s bei 100 °C/130°C mit STIR und mit einer UV-Dosis von 3000 mJ/m² zu vernetzen. Als Substratholz erwies sich Birke als besser geeignet.

Optimierung der Pulverlackapplikation von UV-Pulverlacken durch Elektronenstrahlen-Vernetzung

Die Polymerisation mit Elektronenstrahlen (ES) erfolgt, wie bei der UV-Vernetzung, ebenfalls radikalisch. Die Elektronenstrahlen werden im Vakuum durch Erwärmung einer Glühkatode erzeugt, aus deren Metallverbund leicht bewegliche Elektronen emittiert und in Richtung Anode beschleunigt werden. Die Elektronen passieren ein meist 12 – 15 µm dünnes Metallfenster. Bei einer entsprechend kurzen Strecke bis zur beschichteten Oberfläche kann die Energie aufgebracht werden, um die Bindungsenergie von C=C-Doppelbindungen zu überwinden. Die ES-Vernetzung von Lacksystemen führt zu einer nicht thermischen, besonders schnellen, energieeffizienten Ausbildung des polymeren Netzwerks. Die Beschleunigungsspannung sollte zwischen 150 – 450 kV liegen. Die Vorteile dieser Technologie, hohe Schichtstärken auch mit Pigment bei weiterer Energieeinsparung besser vernetzen zu können, machen diese Technologie sehr interessant. Auch, weil Fotoinitiatoren nicht zwingend erforderlich sind. Deshalb sollten die UV-Pulverlacke auf ihre Eignung zur ES-Vernetzung untersucht werden.

ES-Vernetzung auf MDF Ref

Das für die ES-Vernetzung der UV-Pulverlacke erforderliche Vorgehen musste erarbeitet werden. Dazu wurde die MDF Ref im ersten Schritt herangezogen. Folgende Untersuchungen wurden absolviert:

- Einschichtiger Pulverlackauftrag **B-UVclear01** und Aufschmelzen mit Carbon-Strahler, ES-Vernetzen,
- Zweischichtiger Auftrag, Schicht 1 mit B-UVP-PES/AY mit geringer UV-Leistung vorvernetzen und Schicht 2 mit B-UVweiß02i applizieren; ES-Vernetzen.

Beide durchgeführte Untersuchungen führten bei einer Beschleunigungsspannung von 100 keV und einer Dosis von 130 kGy zu nicht haftenden Deckschichten (GT = 5, siehe Abbildung 58). Ursachen dafür konnten liegen in:

- Der zu geringen Beschleunigungsspannung, die nicht genügend Elektronen zum Initiieren der radikalischen Vernetzung in die Beschichtung transportiert; schlechte Vernetzung = schlechte Haftung.
- Heißauftrag (Substrat mit 80 °C) ist nicht ausreichend zum Aufschmelzen des Pulverlackes, d. h. die Polymerisation fand nur unvollständig statt; schlechte Vernetzung = schlechte Haftung.

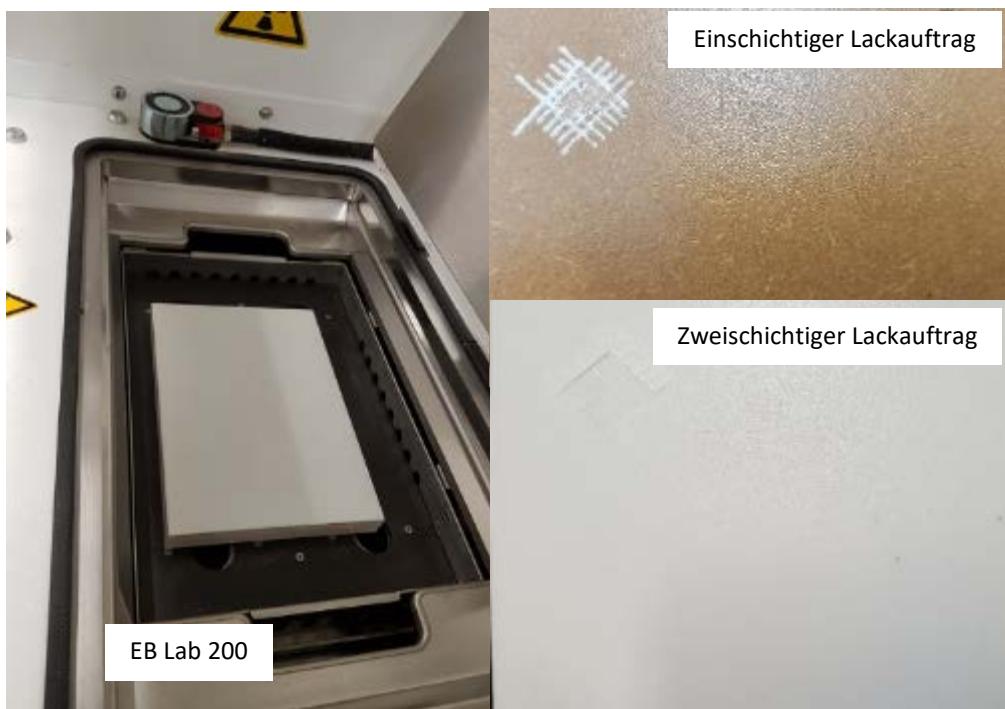


Abbildung 58: ES-Laboranlage (links), ein- bzw. zweischichtig ES-vernetzte Beschichtungen mit Pulverlack B-UV (clear01, weiß02i)

Die weitere Optimierung der technologischen ES-Bedingungen erfolgte ebenfalls auf MDF Ref mit B-UVclear01. Es erfolgten die Vernetzungen der aufgeschmolzenen Pulverlacke bei 150 keV und 70 kGy. Bei Schichtdicken zwischen 80 und 110 µm lagen sowohl trocken als auch nass sehr gute Haftfestigkeiten (GT = 0 – 1, Abbildung 59) vor.

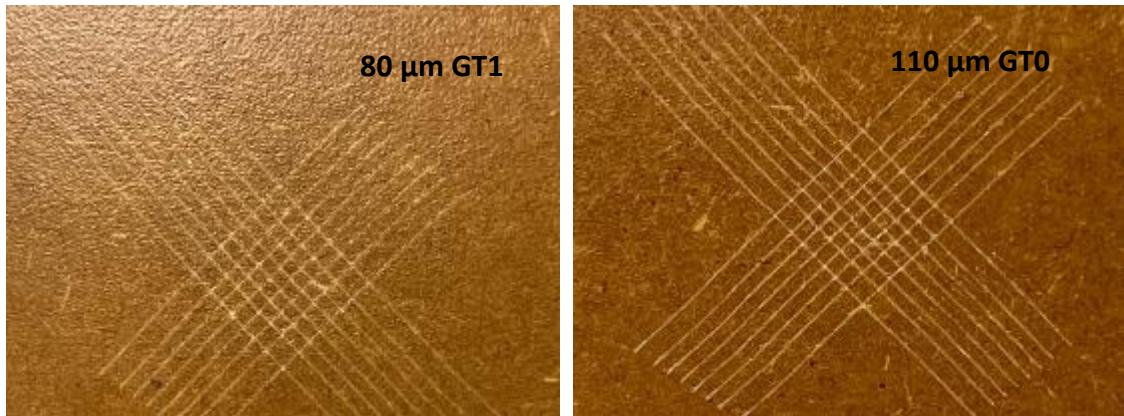


Abbildung 59: Gitterschnitt auf einschichtig ES-vernetzten Beschichtungen mit Pulverlack B-UV clear01

Abschließend erfolgte die Übertragung dieser Resultate auf verdichtete Birke (Vollholz). Zur Beschichtung wurden keine verdichteten Paneele als flächiges mHBS miteinander verbunden, sondern Vollhölzer der Abmaße 150 mm x 300 mm eingesetzt. Bei Schichtdicken von 80 – 100 µm konnten gute Haftfestigkeiten erreicht werden. Inhomogenitäten der Oberflächen gestatteten keine statistisch abgesicherten Aussagen zu den Parametern Abrieb und Kratzbeständigkeit. Aus den Untersuchungen dazu konnten tendenziell jedoch sehr gute Beständigkeiten gegen solche mechanischen Beanspruchungen abgeleitet werden.

Mit dem Pulverlack **G-UV-PES** wurde vergleichbar verfahren. Der Lack ließ sich sehr gut auf das verdichtete Vollholz applizieren und wies auch nach dem Vernetzen eine visuell gleichmäßige Oberfläche vor. Verblasungen traten auch in diesem Fall nicht auf. Bei Schichtdicken zwischen 80 - 100 µm hafteten die Beschichtungen jedoch schlecht (GT = 2), bei Einwirken von Feuchtigkeit quollen die Oberflächen auf.

Die ES-Vernetzung führte im Vergleich zur UV-Vernetzung zu visuell verbesserten Oberflächen. Aufgrund der technischen Gegebenheiten an der Laboranlage ließen sich auf den Substraten jedoch nur einseitig applizierte Schichten vernetzen.

Fazit – Optimierung Pulverlackapplikation III – UV Lack mit ES

Der UV-Lack B lieferte bei der **ES-Vernetzung** auf verdichtetem Vollholz bessere Ergebnisse in der Haftfestigkeit (trocken, nass) als Pulverlack G. Die verbesserte Vernetzung spiegelte sich auch in der verbesserten mechanischen Beständigkeit der Beschichtungen wider.

Prinzipiell schien die ES-Vernetzung die Schichtperformance anzuheben. Folgende Parameter erwiesen sich für eine Schicht von ca. 100 µm als geeignet: 240 s Aufwärm-/Aufschmelzen des Pulverlackes bei 100/130°C mit STIR, Vernetzen bei 150 keV, 100 kGy und 9 m/min. Als Substratholz erwies sich Birke als geeignet.

Optimierung der Pulverlackapplikation für die Lacks A-NT-PES sowie F-NT-PES

Die NT-Pulverlacke A-NT-PES sowie F-NT-PES wurden in ihren Applikationsbedingungen weiter optimiert, da alle bisherigen Untersuchungen noch Potenziale aufzeigten. Für beide Lacks wurde der Primer F-NTP-EP/PES für die Grundierung eingesetzt.

In den nächsten Schritten wurden unter Variation der Spannung (50-80 kV) bei der Pulverlackapplikation die Lacks entsprechend auf mHBS Bi oder mHBS Pa appliziert. Für die Applikation von **Lack A** erfolgte stets das Vorwärm der Platten auf 60 °C. Die Beschichtbarkeit war bei mHBS Bi besser als bei mHBS Pa, wobei in allen Fällen Randeffekte bzw. leichte Ausgasungen besonders an den Klebefugen auftraten. Die Schichthaftungen lagen sowohl für GT trocken als auch nass im avisierten Zielbereich von 2, variierten für beide Substrate zwischen GT = 0 bis 2. Im Vergleich war der **Lack F** besser zu beschichten. Hier fanden jeweils nach dem Primerauftrag das Erwärmen des Substrates auf 70 °C für eine verbesserte Deckbeschichtbarkeit statt. Bei Schichtdicken von 100 – 120 µm erwies sich das Substrat mHBS Bi eher als geeignet. Es traten nur vereinzelt geringste Ausgasungen im Bereich der Klebefugen auf. Die Schichthaftung wurde in diesen Fällen mit sehr gut, GT = 0 (trocken, nass) bewertet.

Fazit – Optimierung Pulverlackapplikation IV – NT-Lacke A und F

Der **Pulverlack F** wird mit seinem speziellen Primer am besten auf Birke appliziert.

Primer: 300 s, 140°C mit STIR Aufheizen/Aufschmelzen/Trocknen

Decklack: 240 s, 130°C mit STIR Aufheizen/Aufschmelzen/Trocknen

Bei ca. 100 – 110 µm Schichtdicke ließen sich sehr gute Ergebnisse in der Haftung (trocken, nass) ermitteln. Die mechanische Beständigkeit im Abrieb war hingegen nicht gegeben.

Der Pulverlack A war nicht zufriedenstellend auf die mHBS zu applizieren.

2.7 AP 9 - Technische und wirtschaftliche Bewertung (FS1 / FS2)

Inhalt dieses Arbeitspaketes war die Einschätzung der Wirtschaftlichkeit des Gesamtprozesses. Dazu gehörte die Herstellung der mHBS (Platte, 3 D-Substrat am Beispiel Rohr) sowie die Pulverlackbeschichtung.

Prozess der Herstellung der mHBS

Wirtschaftlichkeitsbetrachtungen unter dem Gesichtspunkt der Verdichtung zur Verbesserung der Beschichtbarkeit wurden in diesem Projekt und projektbegleitend mit den Unternehmen Deutsche Holzveredlung Schmeing GmbH&Co.KG vorgenommen. Weiterhin wurden normierte Materialgrundkosten für die Verwendung von Nadelholz und Laubholz, insbesondere von Pappel und Birke vorgenommen.

Der Prozess der Verdichtung ist abhängig vom technisch getrockneten Ausgangsmaterial „Schnitholz“ (Fichte/ Kiefer zirka 450 €/m³ = 100 % = 4,5; Buche 510 €/m³ = 100 % = 5,1; Birke 650 €/m³ = 100 % = 6,5; Pappel 480 €/m³ = 100 % = 4,8) in seiner Materialstärke und dem Verdichtungsgrad. So reduziert sich die Materialausbeute um den Verdichtungsprozentsatz (hier 20 % oder 40 %) bei einem Herstellungsaufwand von zirka 250 €/m³ und weiterhin um die allgemein üblichen Schnitt- und Bearbeitungsverluste von 15 %. Somit kann ein Materialeinsatz bei 0,8 Verdichtung und weiteren 0,15 Verarbeitungsverlust von zirka 1,4 ausgegangen werden. Weitere **Wirtschaftlichkeitsfaktoren** stellen neben dem **Verdichtungsprozess**, die **Herstellung der Paneele** und im Weiteren die Kosten zur **Herstellung von 3D-Formkörpern** dar. Zur Darstellung der einzelnen Arbeitsschritte sei folgender Ablauf der Produktionskette (Abbildung 60), bei möglicher Entnahme der Zwischenprodukte als verdichtetes mHBS oder als modifizierte Paneele oder als 3D-Formkörper, dargestellt. Grundlegende Schritte zur 3D-Formholzkörperherstellung sind in folgender Abbildung dargestellt:

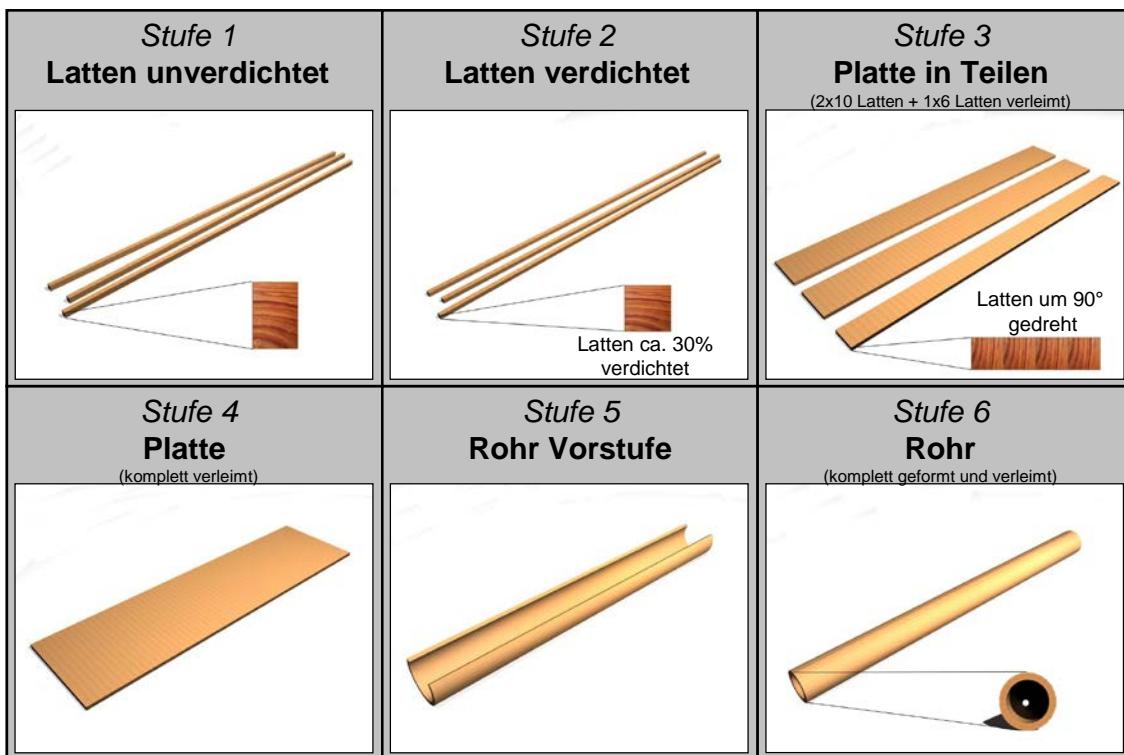


Abbildung 60: Prinzipielle Herstellungsweise von Formholzkörpern durch die Verdichtung von Massivholz

Prozess der Verdichtung

Nach der Beschaffung von Rund - bzw. Schnittholz und dessen Trocknung folgt der Schritt der Verdichtung. Dies geschieht durch Erhitzen, Pressen und Rückkühlen des Materials in einer Mehretagenpresse. Bei der Erwärmung des Holzes, außerhalb der Presse, sind außer Heizplatten auch andere anlagentechnische Umsetzungen wie Hochfrequenzverfahren oder Mikrowelle denkbar. Bei diesen Varianten ist jedoch der Einsatz von Heiß- oder Satt dampf erforderlich, um die nötige Feuchte in das Holz zu bringen.

Zur Herstellung einer mHBS-Paneele von 1,00 x 1,00 m² mit einer Dicke von 20 mm ist der Einsatz von zirka 0,03 m³ Holz, inklusive 20 % Verdichtung und 15 % Bearbeitungsverlust (Hobeln, Sägen, Kalibrieren, Formatsägen) notwendig. Weiterhin ist das Material zu Erhitzen sowie entsprechend festgelegter post-treatment-Schritte eine thermische oder hygro-thermische Modifikation anzuschließen. Die Herstellungskosten zur Beschaffung für eine Standardplatte von einem Quadratmeter Pappel, 20 % Verdichtung, 20 mm Dicke, Verklebung mit 1K PUR (1,20 €), Verdichtung (7,50 €) ergibt Materialkosten (672 € * 0,03 m³ plus 1K PUR 1,20 € plus 7,50 €) 28,86 €/m² bei zusätzlichen Arbeitskosten entsprechend Kostenkalkulation (SAB-Bericht 10072/1575) von 8,45 €.

Insgesamt muss die Betrachtung der wirtschaftlichen Herstellung von mHBS und Paneele unter dem Gesichtspunkt eines Standardproduktes geführt werden. Hierbei wurden ausgewählte Parameter für die Materialbeschaffung und Verdichtung betrachtet. Zusammen mit den Unternehmen

DEHONIT (ein Unternehmen zur traditionellen Fertigung von Kunstharzpressholz) wurde unter Nutzung der Verdichtung in einer Mehretagenpresse mit Kontakterwärmung (Abbildung 61) betrachtet.



Abbildung 61: Mehretagenheizpresse mit Pressgut

Dies ist insbesondere in Hinblick auf die Aufheizzeit (homogene Durchwärmung und Verweilzeit) problematisch, da andere Methoden des Wärmeenergietransfers (Mikrowelle, Hochfrequenz) zur Verfügung stehen und sich im Projekt auch als besser geeignet herausgestellt haben. Neuere Entwicklungen gestatten ebenfalls die kontinuierliche Erwärmung von Holzwerkstoffen im Durchlaufverfahren, welche bei entsprechender Entwicklungstätigkeit die Entwicklung einer kontinuierlichen Verdichtungsanlage technisch umsetzbar erscheinen lassen. So wurde an der Universität in Schwerden eine Pilotanlage (Abbildung 62) vorgestellt, deren Produktionsgeschwindigkeit eine deutliche Reduktion der Verweilzeiten bei gleichzeitiger Steuerung der Verdichtungsparameter, erwarten lässt. So beträgt die Erhitzung von einer Anfangstemperatur von 20°C auf eine mittlere Endtemperatur von 120 °C im konventionellen Verfahren in Abhängigkeit der Dicke des Materials zwischen 45 min und 90 min, während mit Strahlungsenergie die Zeiten um 95 % reduziert werden können.

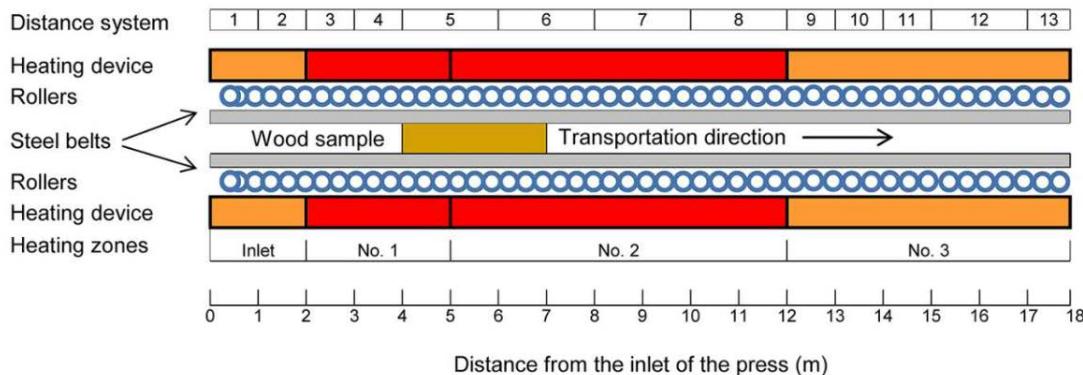


Abbildung 62: Schematische Seitenansicht der kontinuierlichen Presse [35]

Prozess der Plattenherstellung

Im Anschluss an die Verdichtung erfolgt ein Zuschneiden und Konfektionieren des verpressten Holzes für die nachfolgende Verleimung zu Platten. Zuvor wird das verdichtete Holz dickengehobelt, zugeschnitten und so ausgerichtet, dass die Fasern eine gleichförmige Ausrichtung aufweisen. Vorteilhaft ist es, das Schnittholz bereits in der Mehretagenpresse zu sortieren.

In folgender Abbildung 63 ist der Prozess der Plattenherstellung aus Rund- bzw. Schnittholz dargestellt.

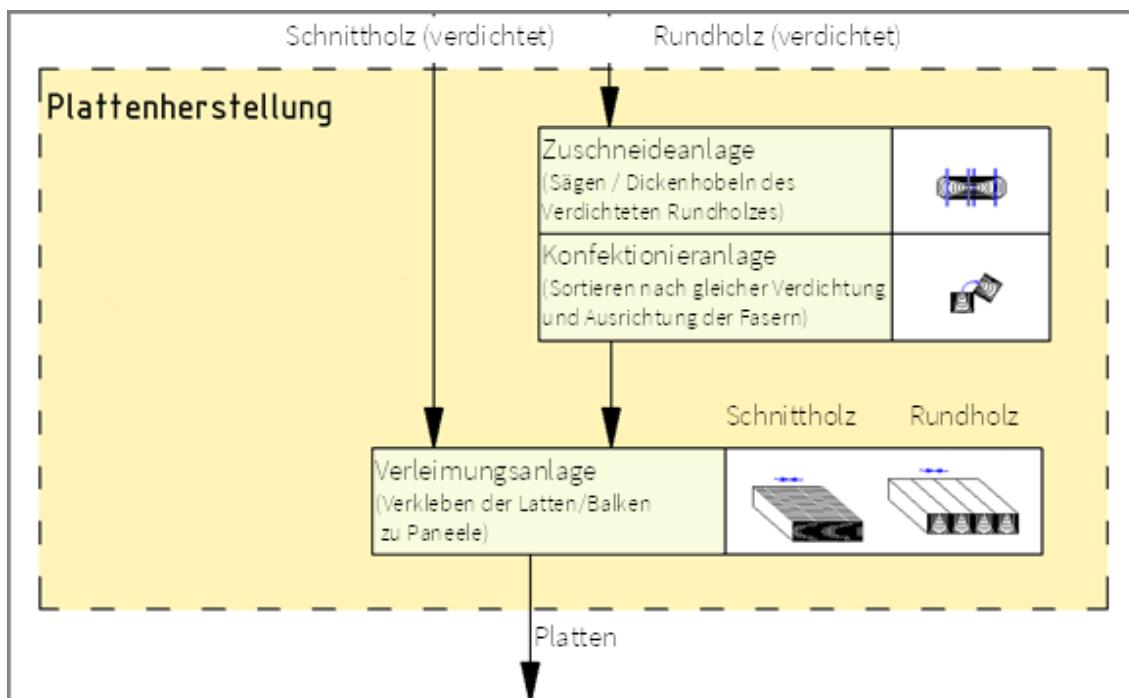


Abbildung 63: Schematische der Zwischenschritt der Paneelherstellung

Nach Entnahme und Formatierung des verdichteten Holzes werden die Einzellamellen 90° um die Längsachse gedreht, einseitig beleimt und so gefügt, dass die Verklebung in Plattenebene erfolgt. Der Prozess der Stabverklebung zu Massivholzplatten ist in der Holzindustrie gut etabliert und benötigt für die Herstellung von modifizierter Paneele lediglich einige geringfügige Anpassungen, um in die industrielle Produktion überführt zu werden. Die betrifft neben der Vermeidung des Rückverformung der Einzellamellen insbesondere einen erhöhten Pressdruck während der Verklebung. Für die Verklebung selbst können bereits in der Holzverarbeitung genutzte Klebstoffe eingesetzt werden. Hier bestehen Unterschiede in der Farbe (PF Res, bräunliche Klebefuge; 1K PUR helle Fuge, MUF-hell, jedoch nur bedingt wasserbeständig) und in den Verarbeitungsparametern. Insbesondere für einen anschließenden Umformprozess zur 3D-Formkörperherstellung ist eine Wasserbeständigkeit vorauszusetzen. Die Verklebung selbst kann im Pressrahmen mit Druckzylindern oder industriellen Spannbetten unter Nutzung von Strahlungsenergie (Hochfrequenz) erfolgen.

Für ein Standard-mHBS (Paneele) wurde ein Klebstoffauftrag von z. B. 1K PUR 250 g/m² gewählt, welches bei 38 Leisten und einem Meter Fugenlänge etwa 190 g Klebstoff (3,80 €) beträgt. Die verdichteten Leisten wurden gekennzeichnet, um die Verdichtungsrichtung zum Fügen zur Paneele (Abbildung 64) in Plattenebene positioniert ist. Die nachfolgenden Prozessschritte entsprechen der Herstellung (Paneele auf die angestrebte Dicke hobeln, 90° Drehen, Beleimen, Verdichten, Dickenhobeln, Formatieren) von konventionellen Einlagenmassivholzplatten. Wirtschaftlich betrachtet kann die Herstellung von Paneele als bekannt vorausgesetzt werden. Die Nutzung von verdichtetem Holz erfordert jedoch eine zeitnahe Verarbeitung der Einzellamellen sowie gleichbleibende klimatische Bedingungen während der Lagerung, um Formänderungen durch Rückverformung zu vermeiden.

Zur Herstellung der einzelnen Probeplatten aus vorrangig Birke und Pappel konnten handwerkliche Maschinen der Tischlerei der FS 2 eingesetzt werden. Die zur Verfügung gestellten Plattenformate gingen über die Herstellung erster Versuchsmuster hinaus und erreichten mit Abmessungen von 300 x 200 x 20 mm³ bereits fertigungstechnische Dimensionen, welche eine wirtschaftliche und technologische Abschätzung vorindustrieller Fertigung zuließ. Hierbei konnte eindeutig die Problematik der Zuordnung der Verdichtungsrichtung von Einzellamellen in der Plattenebene identifiziert werden. Weiterhin ist die Vermeidung von Wärmeeintrag während des Auftrennens zu Einzellamellen - um planparallele Oberflächen für deren Verklebung zu gewährleisten – notwendig, aber auch um einen Plattenverzug in der Ebene der Probenplatte entgegenzuwirken. Die Verklebung hingegen mit feuchtebeständigen 1K PUR oder PF Res stellte besondere Anforderungen, damit die notwendigen Fugenfestigkeiten erreicht werden konnten.



Abbildung 64: Kennzeichnung der Verdichtungsrichtung (Pfeil) der Einzellamellen (links), formatierte verdichtete Birkenholzpaneele (rechts)

Prozess der Umformung zum 3D-Formkörper

Der Umformungsprozess zur Herstellung von 3D-Formkörpern konnte hinsichtlich Wirtschaftlichkeit mit der Herstellung aus einem massiven Vollquerschnitt oder der Formgebung und Fügen von Einzellamellen verglichen werden. Gegenüber dem spanenden Verfahren standen zunächst die Vorteile der Materialeinsparung durch Biegung entgegen.

Zunächst musste die verleimte Platte für das Biegen auf eine innere Temperatur von ca. 95 °C und eine Holzfeuchte von ca. 20 % gebracht werden. Um dies zu erreichen, ist eine direkte Bedampfung der Platte unter kontrollierter Atmosphäre zu gewährleisten. Die Erwärmungs- und Befeuchtungsgeschwindigkeit im Holz beträgt $1 \text{ mm} \cdot \text{min}^{-1}$, so dass ca. 20 min für diesen Prozess gerechnet werden müssen. Hierfür standen an der FS2 entsprechende Gesenkbiegevorrichtungen zur Verfügung. Der energetische Aufwand für die notwendige Bereitstellung der Wärmeenergie betrug pro Standard-paneele zirka 5 KWh bei Bedampfung mit Heißdampf.



Abbildung 65: Prinzip der Holzumformung durch Gesenkbiegen (schematisch)

Das eigentliche Biegen erfolgte in einer Umformanlage durch Gesenkbiegen mit Innenkern (Abbildung 65). Nach Positionierung der Paneele wird der Umformprozess mit einer Prozesszeit von ca. 3,3 min pro 3D-Formkörper durchgeführt. Da die Wärmekapazität der modifizierten Paneele für die Dauer des Umformprozesses ausreichend groß ist, wird keine Wärmezufuhr benötigt. Entsprechende großtechnische Umformanlagen sind für das Gesenkbiegen von Metallen seit Jahren im Einsatz. Diese Anlagen (Abbildung 66) besitzen im Gegensatz zur manuellen Umformeinrichtung eine entsprechende Heiz- und Kühlmöglichkeit.



Abbildung 66: Produktionsanlage für eine großtechnische Herstellung von Formkörpern aus Metall (links; Foto Thyssen/Krupp); manuelle 3D-Formkörpervorrichtung mit Holzwerkstück (rechts)

Die 3D-Formkörper werden diskontinuierlich aus einzelnen Platten in separaten Arbeitsschritten hergestellt werden. Gegenüber kontinuierlich erzeugten Formkörpern fällt das Keilzinken und eine Verleimung der Paneele in Längsrichtung weg. Die Heißdampfanlage kann beim diskontinuierlichen Verfahren ebenso um einen Autoklav ergänzt werden. Dadurch wird es möglich, Hitze und Feuchte unter Druck in die Paneele einzubringen und somit den Plastifizierungsvorgang zu beschleunigen. Nach der Umformung wurden die Formkörper zur Trocknung mechanisch fixiert. Weiterhin kann eine Dampfbehandlung nach [36] zur Reduzierung der auftretenden Biegespannungen durchgeführt werden. Ist das Profil getrocknet und abgekühlt, kann es auf verschiedene Weise veredelt werden.

Allerdings wurde auf Grund der Beschichtungsversuche an ebener Paneele, der Problematik der Innenbeschichtung und der Probekörpergröße im Labormaßstab (max. Außendurchmesser 150 mm) im Durchlaufofen (Aufschmelzen, Härten), das Hauptaugenmerk auf eine prinzipielle Erzeugung von 3D-Formkörpern gelegt. Eigenschaften der Formstabilität wurden, wie beschrieben, geprüft und mit hygro-thermischer und thermischer Applikation optimiert, jedoch hinsichtlich der Wirtschaftlichkeit keine weiteren Maßnahmen unternommen. Es konnte davon ausgegangen werden, dass die Herstellung von 3D-Formkörpern mit großem Durchmesser (< 250 mm) und Wandstärken ab 20 mm aufwärts die Wirtschaftlichkeit gegenüber herkömmlichen Produkten erhöht.

Fazit – Prozesskosten für mHBS

Die Prozesskosten zur Herstellung von mHBS und 3D-Formkörpern werden dominiert durch den Schritt der thermo-mechanischen Verdichtung von 7,50 €/m² und dem erhöhten Materialeinsatz, da der Verdichtungsprozess das Materialvolumen reduziert.

Andererseits werden durch die Verdichtung erhöhte Dehnungsreserven geschaffen, welche es ermöglichen, die mHBS umzuformen und 3D-Formkörper herzustellen. Alternativ würde ein erhöhter Materialverlust durch konventionelle Massivholzbearbeitung (Sägen, Bohren, Fräsen) auftreten.

Die Verdichtung, Herstellung von Paneele und deren Umformung benötigt die industrielle Umsetzung als Massenprodukt, um wirtschaftlich dargestellt werden zu können. Die prinzipielle Machbarkeit an kleineren Probekörpern wurde nachgewiesen und ist mit dem vorhandenen technischen Equipment umsetzbar.

Die Herstellung von kleinen 3D-Formkörpern mit 150 mm Durchmesser führte zu Unstetigkeiten in der Rundheit und mäßiger Formstabilität, verursacht durch eine geringe Ausformung und dem Vorhandensein innerer Restbiegespannungen.

Prozess der Pulverlackierung

Wirtschaftlich betrachtet stellt die Beschichtung im Gesamtprozess nur einen geringeren Anteil an den Gesamtkosten dar. Für deren Bewertung waren noch 3 Schritte zu betrachten:

1. Pulverlackieren der 3D-Formkörpern,
2. Untersuchungen zur Reparierbarkeit beschädigter Beschichtungen,
3. Durchführung von Industrievorversuchen zur Untersuchung der Übertrag der gewonnenen Erkenntnisse zur Pulverlackierung der mHBS.

Pulverlackieren von 3D - Formkörpern

Ziel war es, die Verformbarkeit der flächigen mHBS zu nutzen, um z. B. 3D-Formkörper (Rohr) herzustellen (Anwendungen z. B. im Außenbereich). Aus diesem Grund erfolgten Pulverlackapplikationen auch an solchen Formkörpern (siehe Abbildung 67).



Abbildung 67: Oberfläche (links) der zu beschichtenden Formkörper (Po), Deformation durch Verformung der Paneelenstruktur (mittig), Formkörper mit stabilisierendem Distanzring (rechts)

Für den Einsatz im Außenbereich musste der Formkörper außen und auch innen beschichtet werden. Der Pulverlackauftrag ist im Innendurchmesser schwierig. Untersucht wurde die Eignung eines thermisch aushärtbaren NT-Pulverlackes. Es wurden die Lacke A und F für die Pulverlackierung gewählt, auch wenn sich der Lack A bereits für die flächigen Substrate als nicht optimal erwies.

Beide Lacke ließen sich applizieren, wenn auch die Zielschichtdicken für Lack F überschritten (200 µm) bzw. für Lack A unterschritten (75 µm) wurden. Trotzdem wurde in beiden Fällen die Beschichtbarkeit als gut bewertet und eine Haftfestigkeit von GT = 1 ermittelt. Der Innendurchmesser wurde ebenfalls gepulvert. Hier kam es erwartungsgemäß in beiden Fällen zu starken Inhomogenitäten. (siehe Abbildung 68)



Abbildung 68: Rotierende Durchfahrt des Formkörpers durch den Durchlaufofen (links), Pulverlackapplikation auf den Formkörper (außen-mittig, innen – rechts)

Über den Zeitraum der Freibewitterung (8 Monate) musste festgestellt werden, dass die Formkörper in allen Fällen an den Klebenähten Risse bekamen und sich so die Feuchtigkeit ausbreiten konnte und sich Schimmelbefall ausbreiten konnte. Dadurch waren die Farb- und Glanzänderungen schwerer bewertbar. Der Lack F schnitt diesbezüglich besser ab. Hier gab es kaum Glanzänderungen, jedoch lag die Farbänderung deutlich wahrnehmbar bei einem $\Delta E > 2,5$. Vermutet wurde ein Einfluss durch den Schimmelbefall des Holzes. Auch wiesen die Beschichtungen durch das Reißen der Formkörper ebenfalls Risse auf.

Durch die Optimierungsschritte für Material und Beschichtungen erfolgten weitere Beschichtungen von 3D-Formkörpern mit Lack F. Dabei wurde zuerst der Pulverlack-Primer F-NTP-EP/PES appliziert und anschließend der Decklack F-NT-PES. Die Schichtdicken lagen zwischen 110 und 150 μm , ihre Haftfestigkeiten lagen mit GT = 1 im Zielbereich. Die Beständigkeit gegen Abrieb war nicht gewährleistet. Die nächste Abbildung zeigt den 3D-Formkörper (Pappel mit Primer und Decklack F). Aufgrund der Risse wurde die Freibewitterung nach 3 Monaten abgebrochen. Auch in diesen Fällen traten Schimmelbildungen auf, die auch die Farbänderungen stark beeinflussten ($\Delta E = 4,5$).

Im Vergleich erfolgte nochmals eine Lackierung von 3D-Formkörpern mit Flüssiglack (1K PUR), der am besten im AP 2 abgeschnitten hatte. In diesem Fall traten zu einem späteren Zeitpunkt Risse im Holz auf, die auch dann zur Beschädigung der Beschichtung führten. Die Schichthaftung lag bei GT = 1 und im Glanz traten keine signifikanten Änderungen nach 5 Monaten Freibewitterung auf. Die Farbänderungen lagen bei $\Delta E = 1,5$, avisiert war $\Delta E = 0,5$.



Abbildung 69: 3D-Formkörper pulverlackiert mit Primer und Decklack F auf Po



Abbildung 70: 3D-Formkörper mit Flüssiglack 1K-PUR auf Po

Fazit – Pulverlackierung von 3D-Formkörpern

Die 3D-Formkörper ließen sich sowohl mit Flüssiglack als auch Pulverlack (Lack F) beschichten. Die Haftfestigkeiten der Beschichtungen lagen mit GT=1 im avisierten Zielbereich.

Bei der Freibewitterung zeigten sich noch Defizite in der Formbeständigkeit und in der mikrobiellen Beständigkeit. Verformungen führten zu Materialrissen, in deren

Folge der Feuchteintritt auch in Beschichtungsdefekten resultierte. Die festgestellten Farbänderungen der Beschichtungen waren eine Folge der Witterung (UV) sowie des mikrobiellen Befalls (Schimmel). Zukünftig sollte eine Vorbehandlung zum Holzschutz stattfinden, um diesbezüglich die Produktstabilität positiv zu beeinflussen.

Reparierbarkeit beschädigter Schichten

Für einen Einsatz solcher Pulverlackschichten auf den neuen mHBS ist es wichtig, kleine Nutzungs schäden reparieren zu können. Solche Nutzungsschäden sind nach einem Vorgehen in mehreren Schritten zu absolvieren. Prinzipiell könnte mit Flüssiglack oder Pulverlack ausgebessert werden. In diesem Fall erfolgte die Ausbesserung mit Pulverlack.

Prinzipielles Vorgehen

Zum Ausbessern von Fehlstellen wird zwischen kleinen Schäden und flächigen Ausbesserung unterschieden. Bei **kleinen Kratzern** wird z. B. ein transparentes Bindemittel mit dem zu verarbeitenden Pulverlack zur individuellen Herstellung des Ausbesserungslackes zusammengebracht. Mit einem kleinen Pinsel wird dieses Gemisch dann auf die Fehlstelle aufgetragen. Eine andere Möglichkeit kann sein, einen im Farbton und Glanz abgestimmten lösemittelhaltigen 1K Ausbesserungslack mit Pinsel auf die Fehlstelle zu applizieren.

Auch bei Ausbesserungen **größerer Substratflächen** können 2 Wege gegangen werden. Bei der Reparatur mit Flüssiglack sollte auf die Zwischenhaftung beider Lacksysteme geachtet werden. Grundsätzlich ist hier ein Anschleifen und Reinigen der vorhandenen Pulverlackschicht erforderlich. Prinzipiell lassen sich pulverbeschichtete Oberflächen nach entsprechender Vorbehandlung mit einem 1K- oder 2K PUR-Flüssiglack überarbeiten. Dabei sollten entsprechende Haftprimer eingesetzt werden. Wird Pulverlack zur Schadensbehebung eingesetzt, sollten vorab Probelackierungen durchgeführt werden. Ein Anschleifen der nachzubeschichtenden Oberfläche ist erforderlich. Herausforderungen, die auftreten konnten, waren:

- Maskier- bzw. Abklebearbeiten der nicht zu beschichtenden Bauteilflächen,
- Wiederholen des Einbrennvorganges (Beschädigung des Substrates),
- hohe Gesamtschichtdicken (2 x Pulverlackschicht), Schichtunterschiede,
- 2 Applikationsbereiche (Handlackierung) erforderlich,
- Holz-/ Holzwerkstoffe sind nach einer vorhandenen Pulverbeschichtung selten elektrisch ableitfähig, d. h. der Pulverlackauftrag ist erschwert,
- Unterschiede im Glanzgrad können durch Verwendung unterschiedlicher Lackchargen und Oberflächenstrukturen entstehen,
- mit geeignetem Spachtel ausgebesserte Beschädigungen der Oberfläche markieren sich nach dem Einbrennvorgang.

Daraus ist ableitbar, dass eine nachfolgende Pulverlackierung auch verschiedene Risiken birgt.

Prinzipielles Vorgehen

Die Untersuchungen erfolgten an Beschichtungen mit den Pulverlacken A-NT-PES bzw. B-Uvclear02i. Diese Lacke waren auf mHBS Bi zu applizieren. Zur Überbeschichtung wurde der Lack A mit dem Lack F-NT-PES, der Lack B-UV-clear02i wurde mit demselben Lack überbeschichtet. Folgend ist das Vorgehen an einem Beispiel visualisiert. Die reparierten Pulverlackschichten wiesen eine gute Schichthaftung mit GT von 0 bis 1 auf.

Schleifen der beschädigten Oberfläche



Beschädigungen in einer geschliffenen Oberfläche



Ausbessern der Beschädigungen mit einem Spachtel (ungesättigtes Polyesterharz)



Mit Lack F-NT-PES nachbeschichtete Oberfläche

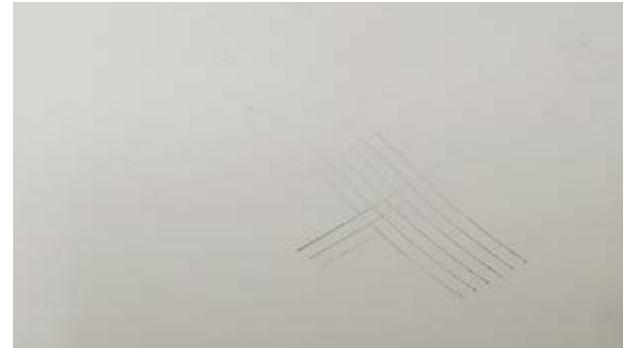


Abbildung 71: Reparatur von Beschädigungen in einer Pulverlackierten Substratoberfläche

Fazit – Reparatur beschädigter Pulverlackbeschichtungen

Es konnte der Nachweis erbracht werden, dass sich die Pulverlackbeschichtungen auch auf den mHBS ausbessern und nachbeschichten lassen. Problematisch sind die durch das Schleifen entstandenen Inhomogenitäten in der Gesamtbeschichtung. Es wird jedoch davon ausgegangen, dass ein solcher Vorgang in der Industrie besser beherrschbar ist.

Durchführung von Industrieversuchen

Die im Projektverlauf applizierten Pulverlacke, deren Ergebnisse sich als positiv herausgestellt haben, sollten bei den jeweiligen Pulverlackherstellern in den dort vorhandenen Anlagen verarbeitet werden. Die Hersteller der Lacke A-NT-PES und G-UV-PES (siehe Abbildung 72) führten die Beschichtungsversuche auf den mHBS (Po, Bi) durch, konnten jedoch keine homogenen Schichten auf den Substraten applizieren. Die beschichteten Substrate konnten deshalb keinen weiteren Untersuchungen unterzogen werden. Wie sich im Projektverlauf auch zeigte, ließ sich der Lack F-NT-PES mit seinem Primer F-NTP-EP/PES auch im Industrieversuch sehr gut auf die mHBS auftragen.



Abbildung 72: Pulverlack G-UV-PES auf mHBS Bi, markiert (gelb) sind einige Fehlstellen, die nur unzureichend bzw. nicht mit dem Pulverlack beschichtet waren

Pulverlackapplikation von Lack F

Die Substrate zur Beschichtung bewertete der Partner als „nicht optimal“, Hobelschläge, scharfe Kanten und Kratzer wurden vorab in einer Vorbearbeitung etwas verbessert. Unmittelbar vor der Beschichtung erfuhren alle Substrate eine einstündige Konditionierung bei 50 °C /50 % rF. Diese Temperierung sollte eine verbesserte Beschichtbarkeit mit Pulverlack ermöglichen. Zielschichtdicke war 50 µm pro Schicht.

Die Pulverlacke ließen sich gut und homogen auftragen, beim Einbrennen zeichneten sich die Leimfugen der Paneele nicht ab. Die minimalen Bläschenbildungen im Kantenbereich resultierten aus den Defiziten bei Handapplikation, die zu etwas höheren Schichtdicken im Kantenbereich führen können. Alle beschichteten Substrate konnten zur Untersuchung an die FS1 gegeben werden (siehe Abbildung 73).

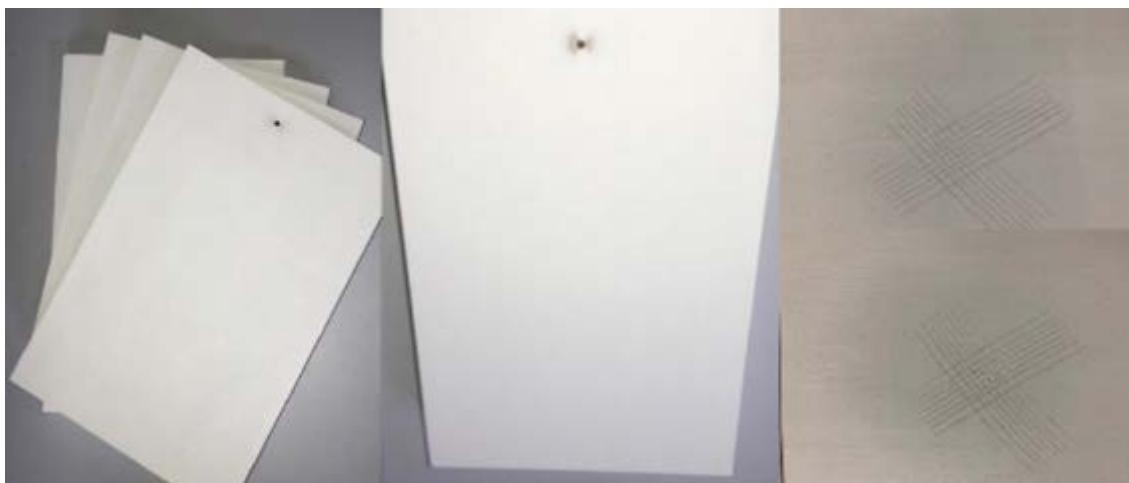


Abbildung 73: Pulverlack F-NTP-EP/PES mit F-NT-PES auf mHBS Bi (links, mittig), GT trocken = 0 (oben rechts) und GT nass = 1 (unten rechts)

Für die erfolgten Untersuchungen der Beschichtungen konnte resümiert werden:

- Die Haftfestigkeiten der Beschichtungen lagen sowohl trocken als auch nass zwischen 0 und 1 und damit im Zielbereich (0 bis 2) für solche Beschichtungen.
- Die Glanzänderungen nach Prüfung der Mikrokratzbeständigkeit (CEN/TS 16611:2016:08) lagen bei Verfahren A mit 15 bis 19 % in vertretbar geringen Größenordnungen. Das Kratzbild nach Verfahren B war jedoch als schlecht zu bewerten, was sich auch in den vorangegangenen Untersuchungen abzeichnete.
- Die Beschichtungen waren mit einem Wert > 6 als lichtbeständig einzustufen, nach DIN EN 15187:2006-10.
- Die künstliche Bewitterung erfolgte über 250 h (ca. 5 bis 7 Monate Freibewitterung in Mitteleuropa) nach DIN EN ISO 16474-2 (2014-03, volle Globalstrahlung). Es traten visuell und Farbmatisch (L^*a^*b) keine Unterschiede zur Referenz auf. Vereinzelt traten Lackrisse im Kantenbereich auf, die dem Quell- und Schwindvorgang der mHBS zuzuschreiben waren, aber auch dem inhomogeneren Lackauftrag. Die Beschichtungen selbst lösten sich dadurch jedoch nicht vom Untergrund ab (siehe Abbildung 74).



Abbildung 74: Pulverlack F-NTP-EP/PES mit F-NT-PES auf mHBS Bi nach künstlicher Bewitterung, Lackrisse im Kantenbereich

Fazit – Durchführung von Industrieversuchen

In Industrieversuchen wurden bei den Partnern 3 verschiedene Pulverlacke (2 NT-, 1-UV-Pulverlack) auf die mHBS appliziert. Es stellte sich heraus, dass die mHBS etwas schwieriger als andere Holzwerkstoffe zu beschichten waren. Nur der Lack F ließ sich in geeigneter Qualität applizieren, so dass die Beschichtungen auch untersucht werden konnten.

Bewertung der Wirtschaftlichkeit des Pulverlackauftrages

Metalle werden sowohl für den Innen- als auch Außeneinsatz pulverlackbeschichtet oder einbrennlackiert. Einbrennlacke (Silikonpolyester) werden in flüssiger Form elektrostatisch aufgespritzt und bei ca. 130 °C eingebrannt. Pulverlacke (PU-, Epoxid-, Polyesterpulver) werden trocken elektrostatisch aufgesprüht und dann bei 180–200 °C aufgeschmolzen und vernetzt. Für den Außeneinsatz fällt die Entscheidung der einzusetzenden Beschichtungstechnologie mit der Produktanwendung. Die Pulvertechnologie ist etwas kostengünstiger als die Einbrennlackierung, die Schichten sind homogener, dicker und auch an Kanten effektiv aufzutragen. Metalle zeigen jedoch temperaturabhängige Verformungen, die zu Schädigungen wenig flexibler Pulverlackbeschichtungen führen können. Gute Prozesssteuerungen, die auf die Lacke abgestimmt sind, optimierte Vorbehandlungen zur verbesserten Haftung und neuere Pulverlacksysteme haben jedoch gerade in diesem Punkt zur Verbesserung beigetragen. Pulverlacke für Metallbeschichtungen können zwischen 4 - 30 €/kg liegen. Im Mittel werden 0,2-0,3 kg/m² Pulver für die Beschichtung benötigt. Es wird mit einem Materialpreis von ca. 2,50 €/m² gerechnet. Schaut man sich die komplette Beschichtung an, so wird der Beschichtungspreis eher von den Vorbehandlungskosten (chemisch, mechanisch) bestimmt und beläuft sich in Summe auf 10 - 35 €/m² [23].

Der Einsatz von mHBS zur Pulverlackierung erforderte ebenfalls eine entsprechende Oberflächenbehandlung. Diese bestand aus Schleifen und evtl. vorbeschichten. Die untersuchten ionFl schienen für die mHBS eher ungeeignet, da trotz der Verdichtung des Holzes die Fasern anquollen. Eine moderate Aufwärmung (60 s) der mHBS auf 60 – 80 °C führte dann zur guten Beschichtbarkeit. Nach Primerauftrag erscheint ein Zwischenschliff als geeignet für den Decklackauftrag.

Ohne die Erhöhung der Energiekosten, mit denen ab 2023 zu rechnen ist, bewegten sich die Beschichtungskosten bei ca. 1,00 - 1,50 €/m², was industriell sicher noch optimiert werden muss und kann. Handlungsspielräume sind hier insbesondere in den Schichtdicken und der technologischen Abstimmung zu sehen. Der Energiebedarf z. B. ist weiter zu reduzieren, wenn man z. B. an den Einsatz der UV-LED anstatt der UV-Breitbandstrahler denkt.

Fazit – Prozesskosten für die Pulverlackierung

Die Beschichtung durch Pulverlackierung nimmt an den Gesamtkosten beim Arbeiten mit mHBS ca. 20 % ein. Mit 1,50 €/m² liegen die Materialkosten noch in einem zu optimierenden Bereich.

2.8 AP 10 – Dokumentation und Berichterstattung

Die Versuchsplanung und –durchführung sowie die Auswertung der Ergebnisse wurden laufend dokumentiert. Die Zwischenberichte sowie der Schlussbericht wurden erstellt.

3 Verwertung

a) Erfindungen/Schutzrechtsanmeldungen

Im Rahmen des Projektes wurden keine Erfindungen oder Schutzrechtsanmeldungen durchgeführt oder in Anspruch genommen.

b) Wirtschaftliche Erfolgsaussichten nach Projektende

Die wirtschaftlichen Aussichten sind in der jetzigen Situation schwierig abzuschätzen. Der verstärkte Trend zur Materialeffizienz, die Verknappung der Ressourcen und die Nutzung nachwachsender Rohstoffe lässt die Überführung einzelner technologischer Schritte aussichtsvoll scheinen. Sowohl im Bereich der thermomechanischen Verdichtung und Umformung als auch der Holzmodifizierung selbst werden verstärkte Forschungsaktivitäten im In- und Ausland festgestellt. Ziel ist, nachwachsende Rohstoffe wirtschaftlich so zu modifizieren, dass deren vorteilhafte Eigenschaften industriell genutzt werden können. Die Technologie zur Erhöhung der Dauerhaftigkeit (Pulverbeschichtung), Festigkeit, Umformung und Verbesserung der Formstabilität (mHBS) von Holzsubstraten stellt für die nutzenden Unternehmen ein Alleinstellungsmerkmal dar, deren Vermarktung im regionalen und überregionalen Gebiet einen Wettbewerbsvorsprung bedeuten. Einsatzbereiche mit hohem Reproduktionsvolumen oder Stückzahlen im Bereich nachwachsender Rohstoffe können sowohl von der Pulvertechnologie als auch den veränderten Holzeigenschaften profitieren. Dies kann die Bereiche Fahrzeugtechnik und Innenausbau insbesondere betreffen.

c) Wissenschaftliche und/oder technische Erfolgsaussichten nach Projektende

Die Erfolgsaussichten einer wirtschaftlichen Verwertung gehen eng einher mit der Publikation der wissenschaftlichen und technischen Projektergebnisse. Aufgrund der Sars-Cov2/COVID 19-Situation über die gesamte Projektlaufzeit waren zuvor geplante Teilnahmen an Veranstaltungen nicht möglich. So konnten weder die Posterpräsentationen analog noch die Ausstellung von Demonstratoren stattfinden.

Im Rahmen der ECWM 2021/22 in Nancy wurde die Veränderung und Umformung von modifiziertem Holz vorgestellt. Hier konnte ein verstärktes Interesse aus Forschung und Industrie gegenüber den angewendeten Verfahren festgestellt werden.

Im Rahmen der WCTE 2021 (World Conference of Timber Engineering) in Chile wurde ein Beitrag erfolgreich eingereicht und präsentiert (Development of thermo-mechanical bended wood across the grain: process, properties and protection by powder coating; Wehsener, J et al.; Proceedings of World Conference on Timber Engineering 2021, Herausgeber: Ugarte, J., Calil, C. Aufsatznummer: WPC0209).

Im Rahmen eines Forschungsaufenthaltes wurde in Guatemala City ein Vortrag vor der Handelskammer zur Modifizierung und Beschichtung von Holz gehalten. Hierbei bestand überwiegendes Interesse an der industriellen Weiterentwicklung des Holzschutzes in der baulichen Anwendung, aber

auch die wissenschaftliche Weiterentwicklung bekannter Technologien der Holzmodifizierung wurden angesprochen bzw. werden zwischen der Universität Guatemala City und der FS 2 vertieft. Ebenso wurde auf Grund der Forschungskompetenz jeweils ein Gastwissenschaftler aus China und der Türkei mit der Weiterentwicklung der untersuchten Technologien und dem möglichen Aufbau einer wissenschaftlichen Zusammenarbeit beauftragt.

Aufgrund des bisher im Projekt weiter ausgebauten Wissens zur Pulverlackapplikation auf thermisch empfindlichen Holzsubstraten sowie des Einsatzes von UV-Pulverlacken wurden im Jahr 2021 Gespräche mit möglichen Partnern in weiteren Forschungsvorhaben geführt. Ein weiteres FuE-Vorhaben wurde im Jahr 2022 geplant. Aufgrund einer Veröffentlichung der Ergebnisse zur Pulverlackierung von Holzsubstraten in „Besser Lackieren“ (Ausgabe 18-2022) fanden bereits einige Gespräche statt, die insbesondere das weitere Arbeiten mit UV-Pulverlacken betreffen.

d) Wissenschaftliche und wirtschaftliche Anschlussfähigkeit

Zum derzeitigen Stand der Bearbeitung wird eingeschätzt, dass es mit Sicherheit weitere Transferprojekte geben wird, mit denen der vielfältige Ansatz des Projektes auf Einzelbedürfnisse ausgewählter Produzenten zugeschnitten werden könnte. Dies trifft insbesondere die Entwicklung bestimmter Pulver-Primerlacke und Pulver-Decklacke, die bei niedrigeren Temperaturen vollständig aufgeschmolzen werden können. Dazu finden aktuell Vorversuche mit neuen Technologien zum schonenden Aufschmelzen von Pulverlacken statt, um temperatursensitive Substrate zu nutzen.

Im Rahmen eines weiteren industriellen Forschungsprojektes konnte die Entwicklung verbesserter mechanischer Eigenschaften durch Holzmodifizierung mit einem KMU für die Herstellung und Umsetzung von kunststoffbasierten Kartensystemen auf die Umstellung zu nachwachsenden Rohstoffen vorangetrieben werden. Hier wird von einem Technologiereifelevel TRL 3 ausgegangen. Die Umsetzung wird im mittelfristigen Bereich von 3 Jahren angesehen. Insbesondere Erdölbasierte Grundstoffe sollen im genannten Projekt durch holzeigene Stoffe vollständig ersetzt werden, so dass bereits ein Zulieferer des KMU-Interesse angemeldet hat und weiter eingebunden werden kann.

4 Erkenntnisse von Dritten

Es gibt keine Erkenntnisse von Dritten.

5 Veröffentlichungen

Wehsener J., Eggert O., Hartig J., Dand J., Haller P.: Development of thermo-mechanical bended wood across the grain: process, properties and protection by powder coating, WCTE 2021, Santiago de Chile, Chile, 2021

Wehsener J., Bremer M., Hamann F., Haller P., Fischjer S.: Bending test of delignified and densified poplar, ECWM 10, Nancy, France 2021

Schulz P., Kleber L.: Witterungsbeständige Pulverlackierung von Holz, Besser Lackieren 18-2022

Anhang

Teilvorhaben 1: „Witterungsbeständige Pulverbeschichtungen auf Holz“

1. Ziel und Gegenstand des Teilvorhabens

Ziel des Teilvorhabens des IHD war eine mechanisch und gegenüber der Witterung beständige Beschichtung für die neuartig zu entwickelnden modifizierten Holzsubstrate mHBS auf Basis schnellwachsender einheimischer Hölzer (Po, Bi) zu erarbeiten. Der Einsatz von Holz für Außenanwendungen erfordert eine entsprechende Oberflächenbehandlung. Noch immer geschieht dies überwiegend durch aufwändig aufgebrachte Beschichtungen mit flüssigen Lacksystemen in meist mehreren Prozessschritten. Eine ökologisch und gesundheitlich unbedenkliche Alternative ist das elektrostatische Pulverlackieren, die im Vorhaben auf den neuen Substraten anzuwenden war.

2. Bearbeitete Arbeitspakete

AP 1 – Auswahl und Charakterisierung erforderlicher Rohstoffe

Es waren die Holzsubstrate gemeinsam mit der FS 2 auszuwählen, die für die Erzeugung der mHBS genutzt werden sollten. Außerdem wurden durch die FS1 die für die Referenzbeschichtungen im AP2 zu nutzenden Referenzsubstrate wie z. B. MDF Ref oder Acc beschafft. Nach einer Recherche lagen für die weiteren Arbeiten verschiedene Pulverlacke, Flüssiglacke und ionFl vor. Alle Materialien wurden, soweit die Daten nicht durch die Zulieferer zur Verfügung gestellt werden konnten, charakterisiert. Im Ergebnis lagen alle erforderlichen Materialien mit deren Charakteristika zur Durchführung der ersten Arbeiten bis AP 6 vor.

Das AP 1 wurde abgeschlossen.

AP 2 – Herstellung von Referenzmaterialien und Charakterisierung

Die ausgewählten Referenzmaterialien, zu denen Holzwerkstoffe und auch natives Holz gehörten, wurden mit einigen ausgewählten Pulverlacken und auch mit Flüssiglacken beschichtet. Zur Vernetzung der applizierten UV-Beschichtungen erfolgte wie geplant die Anschaffung des „Modularen UV-Strahlers und Leistungssteuerung“ der Fa. IBT GmbH. Um die Temperaturen kontrollieren zu können wurde ein „Messsatz zur Temperaturkontrolle“ der Fa. Ahlborn angeschafft. Es wurden die erarbeiteten Beschichtungen charakterisiert und die Basisdaten als Anhaltspunkte zur Orientierung für die weiteren Schritte genutzt. Zur Charakterisierung wurde für die vor-Ort-Bestimmung der Kontaktwinkel die Gerätetechnik „PCA 100M“ der Fa. Dataphysics angeschafft.

Alle Anschaffungen wurden über den gesamten Projektzeitraum genutzt.

Das AP 2 wurde abgeschlossen.

AP 4 – Untersuchungen zur Eignung ionFl als Primer

Die Untersuchungen mit den ionFl umfassten die Erarbeitung deren Applikation, die Untersuchung des Trocknungsverhaltens, den Nachweis des Absenkens des Ro sowie dessen Stabilität. Außerdem war der Einfluss der ionFl auf die Klebstoffe und auf die Pulverlackapplikation zu bewerten. Als Ergebnis lag eine ionFl zur weiteren Verwendung vor.

Das AP 4 wurde abgeschlossen.

AP 6 – Einsatz der Pulvertechnologie zur Beschichtung der mHBS

In diesem Arbeitspaket erfolgte die Pulverlackierung der neuen mHBS. Zu diesem Zweck wurden verschiedene Lacke eingesetzt, die sich auch bei der Beschichtung der Referenzen als positiv erwiesen haben. Im weiteren Projektverlauf wurden außerdem mindestens 3 weitere Pulverlacke mit hinzugezogen. Es wurden verschiedene Konditionierungen untersucht, ohne und mit Primer gearbeitet, die Applikationsparameter und auch die Einbrennbedingungen variiert. Problemen im Ergebnis wurde mit speziellen Untersuchungen der Materialien und Beschichtungen auf den Grund gegangen. Daraus resultierten besondere Verklebungen der Paneele zu mHBS und deren Beschichtungen.

Das AP 6 wurde abgeschlossen.

AP 7 – Charakterisierung der beschichteten Materialien

Die Beschichtungen aus dem AP 6 wurden mit verschiedenen Prüfmethoden untersucht, um weitere Schritte zu planen. Durch visuelle und Schichtdickenbewertungen ließen sich technologischer Optimierungsbedarf erkennen, weitere analytische Untersuchungen offenbarten u. a. Anpassungsbedarfe in der Erzeugung der neuen mHBS. U. A. erfolgte der Einsatz des Nanoindenters. Zur Fixierung der speziellen größeren Proben mussten „Materialien zur Modifizierung des Probenhalters“ von der Fa. Asmec beschafft werden, um diese Untersuchungen durchführen zu können. Resultierend aus allen Ergebnissen wurden geeignete Pulverlacke gefunden, um im nächsten Schritt zu optimieren.

Das AP 7 wurde abgeschlossen.

AP 8 – Entwicklung optimierter Lösungen für Technologie und Material

Die Arbeiten in diesem Arbeitspaket waren eng verbunden mit denen der beiden Vorangegangenen. So erfolgten Untersuchungen zur Temperaturverteilung auf den mHBS-Substraten, verschiedene Konditionierungen bzw. präparative Variationen vor der Pulverlackapplikation, der Einsatz diffusionsoffener Pulverlacke, Vergleiche unterschiedlicher Technologien bei der Applikation der bis dahin besten Pulverlacke sowie Optimierungen der Einbrenn- bzw. Vernetzungsbedingungen der Pulverlackschichten auf den diversen mHBS. So ließen sich 3 Pulverlacke als gut beschichtbar evaluieren.

Das AP 8 wurde abgeschlossen.

AP 9 – Technische und wirtschaftliche Bewertung

Die technische Bewertung der Pulverlackapplikation erfolgte nach der Beschichtung der 3D-Formkörper und Durchführung der Industrieversuche mit den neuen mHBS. Außerdem fanden die Untersuchungen zum Reparaturverhalten von Beschädigungen der Pulverlackschichten statt. Diese 3 Schritte ließen eine technische Beurteilung der Pulverlackierung der mHBS zu. Die wirtschaftliche Bewertung ließ sich nur orientierend durchführen, da die Industriepartner keine Daten der Prozesse zurarbeiten konnten. Da die Pulverlackierung in diesem Prozess einen geringen Beitrag zu den Kosten lieferte, waren diese Orientierungen ausreichend.

Das AP 9 wurde abgeschlossen.

AP 10 – Dokumentation und Berichterstattung

Die Versuchsplanung und –durchführung sowie die Auswertung der Ergebnisse wurden laufend dokumentiert. Die Zwischenberichte sowie der Schlussbericht wurden erstellt.

AP 10 wurde abgeschlossen.

3. Wesentliche Ergebnisse des Teilvorhabens

Die folgenden wesentlichen Ergebnisse waren zu verzeichnen:

- Eine Vielzahl an NT-Pulverlacken und mehrere UV-Pulverlacke wurden im Hinblick auf ihre Eignung zur Beschichtung von nativem Holz, MDF sowie den neuen mHBS bewertet. Das wissenschaftliche und technisch/technologische Know-how wurde erweitert.
- Zur verbesserten Pulverlackapplikation wurden verschiedene Primer wie z. B. Leitprimer (Formulierungen mit speziellen Additiven), ionFl oder auch Pulverlack-Primer untersucht. Die **ionFl EMID W** reduzierte, optimiert in Konzentration und Applikationsverfahren, den Oberflächenwiderstand auf 10^7 - $10^8 \Omega$ und lieferte diesbezüglich die besten Voraussetzungen für eine anschließende Pulverlackapplikation. Eine **Pulverlack-Primerschicht** erwies sich für den nachfolgenden Decklack für die gesamte Schichtperformance jedoch eher als optimal.
- Die untersuchten **ionFl** führen zum Aufquellen der Holzfasern und damit zu Inhomogenitäten im Beschichtungsergebnis auf den neuen Holzsubstraten.
- Die in ihrem Porenvolumen um 20 % reduzierten Holzpaneele wurden mit 1K PUR- oder Phenolharz-**Klebstoff** zu beschichtbaren Substraten verklebt. Diese Klebstoffe reagierten nicht nachteilig auf die thermischen Prozessstufen des Einbrennens oder Vernetzens von Pulverlack. Bei Schichtdicken von 80 bis 100 µm zeichneten sich die Klebefugen häufig ab, die Schichthomogenität war in diesen Bereichen ungenügend. Die 2 fach-Pulverlackierung eines NT-Pulverlackes, bestehend aus Primer- und Decklack, erwies sich diesbezüglich als gut geeignet.
- Die Reduzierung des Porenvolumens des Holzes verhinderte **Ausgasungen bzw. Verblasungen** beim Einbrennen bzw. Vernetzen des Pulverlackes nicht vollständig. Trotz der wirkenden Temperaturen bei der Verdichtung des Holzes traten später noch Holzinhaltsstoffe aus. Das nach

Jahrringlage (tangential) bevorzugte Verkleben der Paneele zu den zu beschichtenden neuen mHBS wirkte nicht verbessernd auf diesen Effekt. Ursachen des Ausgasens bzw. der Verblasungen in den Beschichtungen ließen sich finden.:

- Zu **schnelles Vernetzen** z. B. des UV-Pulverlackes verhinderte das Austreten solcher Gase, die sich als Verblasungen in den Beschichtungen zeigten.
- Der Pulverlack wurde auf der Oberfläche nicht gleichmäßig angenommen. Unterschiede in der Schichtdicke führten dann zu Verblasungen durch z. B. Überhitzung. Ursachen für solche **Schichtinhomogenitäten** waren ungleichmäßige Porengrößen an der Substratoberfläche, nachgewiesen durch Unterschiede im Kontaktwinkel bzw. der Wärmeverteilung an der Oberfläche. Mglw. kam es auch zu einem Kollabieren der Strukturen durch den sehr hohen Pressdruck bei Herstellung der Substrate. Diese Tatsache würde ebenfalls zu Porengrößenunterschieden führen. So fand die Feuchteannahme bei Konditionierung oder die Beschichtbarkeit mit Leitprimern auch nur ungleichmäßig statt. Auch die Klebefugen zwischen den Paneele verhielten sich in der Pulverlackannahme anders als das Substrat selbst.
- Diffusionsoffener Pulverlack ließ den gasförmigen Inhaltsstoffen Zeit zum Austreten. Auch das **zweischichtige Lackieren** mit dem geeigneten Primer-Pulverlack führte zu verbesserten Beschichtungen. Das Applizieren des Pulverlackes mit Gegenelektrode verbesserte nochmals die Beschichtungsqualität, da hierdurch Kanteneffekte reduziert wurden.
- Für die Untersuchungen der **UV-Pulverlacke** kamen Systeme ohne und mit Pigment zum Einsatz. Sowohl LED-UV als auch Breitband-UV (Hg, Ga) vernetzten die einschichtig aufgetragenen Pulverlacke zu schnell, so dass aufsteigende Ausgasungen nicht mehr austreten konnten. Sichtbar wurde dieser Effekt über die gesamte Fläche und insbesondere bei Klarlacken durch Mikroblasen. Das **Vorvernetzen** (Angelieren) einer ersten Schicht mit nachfolgend applizierter und durchvernetzter Deckschicht verbesserte die Qualität dieser Beschichtungen.
- Die Vernetzung der UV-Pulverlacke mit **Elektronenstrahlen** lieferte qualitativ bessere Beschichtungen als bei Einsatz von UV-Strahlung, da keine zusätzliche Erwärmung während der Vernetzung zu weiteren Verblasungen oder Ausgasungen führten.
- Im **Industrievorschlag** ließ sich der NT-Pulverlack mit seinem Pulverlack-Primer ebenfalls zweischichtig mit den besten Ergebnissen auf neuen mHBS applizieren.
- Die final **optimierten Pulverlack-Beschichtungen** mit dem NT-Pulverlack auf den neuen mHBS lieferten besonders für Birke gute Ergebnisse. Die Ziel-Schichthaftung von GT = 2 wurde sowohl bei den flächigen Substraten als auch den 3 D-Formen mit sehr guten GT = 0 bis 1 (trocken und nass) unterschritten. Die in den Industrievorschlägen beschichteten mHBS zeigten in der künstlichen Bewitterung (ca. 5 bis 7 Monate Freibewitterung) kaum Glanzverluste und waren farbmetrisch stabil. Das Quellen und Schwinden konnte jedoch nicht verhindert werden, so dass eindringende Feuchte die Schichten und das Material negativ beeinflusste. Die mechanische Stabilität (Kratzbeständigkeit) dieser Beschichtungen war noch nicht gegeben.

Zusammenfassend lässt sich zum Prozess der Pulverlackierung resümieren, dass auch einheimische schnellwachsende Hölzer beschichtet werden können. Der Prozess der Verdichtung und vor allem das anschließende Konfektionieren und Verkleben einzelner Paneele zum mHBS führt zu Schwankungen des Porenvolumens an der zu beschichtenden Oberfläche. Daraus resultieren letztlich Beschichtungsfehler, die mit Material- und technologischem Aufwand beherrscht werden können. UV-vernetzbare Pulverlacke lassen sich besser mit Elektronenstrahlen durchhärten. Für Außenanwendungen sind aktuell jedoch eher NT-Pulverlacke als UV-vernetzbare Pulverlacke geeignet. Für eine praxistaugliche Anwendung der neuen Holzsubstrate sind die Quell- und Schwindprozesse und die mechanische Beständigkeit der Beschichtungen weiter zu verbessern.

Teilvorhaben 2: „Neue modifizierte Holzsubstrate“

1. Ziel und Gegenstand des Teilvorhabens

Das Ziel des durchgeführten Forschungsvorhabens war die Entwicklung eines neuartigen Holzsubstrates und dessen Herstellungsprozesses zur Verbesserung der Pulverbeschichtung für eine Erhöhung der Witterungs- und Formbeständigkeit und Dauerhaftigkeit für den Innen- und Außenbereich.

Zum Erreichen des Teilzieles der Entwicklung neuer modifizierter Holzsubstrate war es notwendig, Fragestellungen zum Verdichten schnellwachsender Hölzer wie Pappel zu klären, um vergleichbare Eigenschaften wie z. B. für Buche zu erreichen. Unter besonderer Beachtung der Behandlungstemperaturen und Prozessparameter beim Verdichten mussten die Auswirkungen auf die Dimensions- und Formstabilität abgeleitet werden, so dass die notwendigen Nutzungseigenschaften erreicht werden konnten. In diesem Zusammenhang wurde eine Optimierung der Holzmodifikationen durch thermische und thermo-hydro-mechanische Behandlung im Zusammenspiel mit dem Beschichtungssystem für die notwendigen Einsatzbedingungen erzielt und geprüft.

So orientierte sich der Einsatz von mHBS an der Anisotropie, Inhomogenität und Strukturabweichung auf mikro- und makroskopischer Ebene. Der gezielte Aufbau von mHBS stützte sich auf die Erkenntnis der Manipulierbarkeit der Materialien.

2. Bearbeitete Arbeitspakete

AP 1 – Auswahl und Charakterisierung erforderlicher Rohstoffe

Auf Grund eigener Untersuchungen und Erkenntnissen aus vorliegender Literatur wurden Holzsubstrate ausgewählt und für die Charakterisierung der Eigenschaften vorbereitet, geprüft und ausgewertet. Hierbei wurde das Laubholz Pappel und Birke, ebenso Buche auf Grund seiner weiten Verbreitung und guten Verarbeitungs- und Nutzungseigenschaften, sowie ebenso ein Nadelholz, Fichte, ausgewählt.

Weitere Auswahlkriterien bildeten die gegebenen Materialkennwerte Dichte, Holzstruktur, Porenvolumen, Holzinhaltsstoffe und beeinflussbare Materialkennwerte wie Holzfeuchte, Dichte und Festigkeiten (Querzugfestigkeit, Zugfestigkeit, Druckfestigkeiten). Sie stehen in engen Zusammenhang mit den prozessbezogenen Modifizierungen (thermisch, thermo-mechanisch, hydro-thermo-mechanisch).

Ebenso wurden die Klebstoffe für das Fügen von Einzelementen zum mHBS ausgewählt.

Der AP 1 wurde abgeschlossen.

AP 2 – Herstellung von Referenzmaterialien und Charakterisierung

Nach Auswahl der Basismaterialien wurden diese für die nachfolgenden Prozessschritte zugeschnitten und formatiert. Dies betraf die Hölzer Pappel, Birke, Buche und Fichte. Es wurden z. B. die Holzfeuchte, die Rohdichte und der Porenanteil bestimmt.

Für die nachfolgenden Modifizierungsprozesse wurde ein IR-Carbon-Strahler angeschafft und für die thermischen Modifizierungsprozesse vorbereitet. Ebenso wurden Verklebungen und Beschichtungen von Substraten durchgeführt. Verschiedene Substratvarianten und Paneelgeometrien wurden hergestellt. Die Bestimmung und Einordnung von Dichteprofilen mit und ohne thermo-hydro-mechanischer Modifizierung ausgewählter Substrate erfolgte.

Der AP 2 wurde abgeschlossen.

AP 3 – Technologieanpassung zur Herstellung der mHBS

Es erfolgte die Herstellung von mHBS für die anschließende Pulverlackbeschichtung, welche zuerst aus den verschiedenen Holzsortimenten vorgenommen wurde. Dazu wurden entsprechend der Vorgehensweise sowohl Variationen im Rohstoff Holz (Birke, Pappel, Buche mit z. B. Variation von Faserrichtung, Porenverteilung, Holzfeuchte) als auch den technologischen Parameter (Temperatur, Prozessgeschwindigkeit, Pressdruck, Porenvolumenreduzierung, Paneelenabmaße) berücksichtigt. Die Paneele für die mHBS wurden in den genannten Parametern hergestellt und deren Quellen und Schwinden bzw. ASE (Anti Swelling Efficiency) sowie in einigen mechanischen Eigenschaften und in der Dichteverteilung senkrecht zur Substratebene untersucht.

Der AP 3 wurde abgeschlossen.

AP 5 – Entwicklung neuer mHBS auf Basis schnellwachsender Hölzer

Im AP3 wurde die prinzipielle Verwendungsfähigkeit der mHBS untersucht, so dass aufbauend und in Abstimmung mit den Beschichtungsergebnissen der FS1 die Technologie der Herstellung angepasst wurde. Der Einfluss des Klebstoffes auf die Panelherstellung wurde untersucht. Es wurden über 200 Paneele in Pappel und Birke unterschiedlicher Prozessparameter erzeugt. Dies hieß, neben der Prüfung und Feststellung der bestehenden Merkmale, Optimierungsmaßnahmen hinsichtlich der Oberflächeneigenschaften der mHBS durchzuführen, so dass notwendige Funktionen zur Hafung ermöglicht und andererseits Oberflächenqualitäten zur Beschichtung (Rauigkeit, keine Störungen durch Klebstoff zwischen den Paneele) erreicht wurden. Es wurden thermische Modifizierungen an der Oberfläche zur Verringerung der inneren Spannungen vorgenommen. Strukturelle Veränderungen wurden in mikroskopischen Aufnahmen bei sehr hohen Temperaturen bewertet. Für die Herstellung von 3D-Formholzkörpern wurden entsprechende Vorrichtungen konzipiert, um eine Pulverbeschichtung im Durchlaufkanal hinsichtlich der zur Verfügung stehenden Geometrie von max. 150 mm Außendurchmesser zu gewährleisten. Die Formstabilität wurde untersucht.

Der AP 5 wurde abgeschlossen.

AP 8 – Entwicklung optimierter Lösungen für Technologie und Material

Es wurden weitere mHBS hergestellt bei gleichzeitiger Untersuchung der technologischen Verbesserungen hinsichtlich gleichmäßiger Erwärmung und homogener DichteVerteilung. Zusätzlich wurde ein Scale up vom Labor- auf einen industrienahen Maßstab vorbereitet. Hierbei entwickelte sich die Fertigung von mHBS durch ein kmU erfolgreich bis zu Längen von 2 m. Eine Anwendung solcher Abmaße wurde jedoch von den weiteren Beschichtungsanlagen limitiert.

Die fortgeführte Optimierung zur technologischen Anwendung von post-Prozessen wie der thermischen Behandlung der mHBS stellte ein erhebliches Optimierungspotenzial hinsichtlich wirtschaftlicher Prozessführung dar.

AP8 wurde abgeschlossen.

AP 9 – Technische und wirtschaftliche Bewertung

Es wurden die Prozesskosten zur Herstellung von mHBS und 3D-Formkörpern bewertet und hinsichtlich wirtschaftlicher / technischer Bedeutung betrachtet. Durch die zusätzlichen pre- und Postprozesse erhöhen sich die Kosten um 7,50€/m² bereits beim Verdichten, welche von einem erhöhten Materialeinsatz flankiert werden. Bei einer optimierten Prozessführung (Strahlungserwärmung) können zudem verbesserte wirtschaftliche Ergebnisse erreicht werden.

AP 9 ist abgeschlossen.

AP 10 – Dokumentation

Die Versuchsplanung und –durchführung sowie die Auswertung der Ergebnisse wurden laufend dokumentiert. Die Zwischenberichte sowie der Schlussbericht wurden erstellt.

AP 10 ist abgeschlossen.

3. Wesentliche Ergebnisse des Teilvorhabens

Im Projekt wurden die folgenden wesentlichen Ergebnisse erzielt:

- Für die thermo-mechanische **Verdichtung** wurden Hölzer aus Pappel, Birke, Buche und Fichte genutzt, welche trotz ihrer unterschiedlichen Porenverteilung einen schnellen Verdichtungsprozess zulassen. Bei Nadelholz stellt sich das Abscheren bei radial verlaufenden Jahrringen problematisch dar, da durch die großen Verformungsbewegungen (Dehnungen von mehr als 50 %) ein lokales Zellwandversagen eintritt. Deshalb und aufgrund des verstärkten Harzaustrittes, welches hinderlich für die Beschichtung ist, wurde Fichte nicht weiterverfolgt. Buche wurde zunächst ebenfalls für die Herstellung von mHBS genutzt, jedoch auf Grund starker Verfärbungen nicht weiter fortgeführt. Ähnlich wie bei Nadelholz verhält es sich mit dem Abscheren für die gewählten zerstreutporigen Laubhölzer, jedoch kann die Last scheinbar besser dissipiert

werden. Durch entsprechende Auswahl des Holzzuschnittes konnten auftretende Risse vermieden werden.

- Die thermo-mechanische Verdichtung lässt sich mit Laubhölzern geringer Rohdichte (Pappel: 350 bis 450kg/m³) gut durchführen.
- Die **Formstabilität** der mHBS erhöhte sich bei höheren Temperaturen und längeren Presszeiten. Es traten frühzeitig Relaxationen im Holzgefüge und Verformungen der mHBS infolge der inneren Spannungen auf.
- Bei Verringerung des Verdichtungsgrades z. B. von 50 % auf 20 % reduzieren sich die Dichteschwankungen im mHBS.
- Das **Verdichten** erfolgte in den Versuchen mit einer hydraulischen Presse bei 140 °C über 240 min mit einer Pressgeschwindigkeit von 1 mm*min⁻¹. Im Ergebnis konnte jedoch keine Verbesserung der Verdichtungsqualität durch eine reduzierte Rückverformung festgestellt werden. Die erhofften Veränderungen im Verdichtungsprofil und damit einhergehend in der Homogenisierung der DichteVerteilung konnten nur teilweise erreicht werden und rechtfertigen nur bedingt den erhöhten Aufwand längerer Presszeiten. Insgesamt wurden Presszeiten von der Erwärmung, Verdichtung, Rückkühlung von zirka 240 min erzielt. Die Möglichkeit einer deutlichen Verringerung der Aufheizphase unter Verwendung von Mikrowellen konnte an kleinen Probenkörpern festgestellt werden.
- Das Behandeln der verdichteten Hölzer mit **Heißdampf und IR-Strahlern** zeigte bei Birke (50 % verdichtet; 200°C) die geringste Rückverformung mit etwa 82 %, neben Fichte mit 81 % auf. Auch an Pappelholz ließ sich ein Rückgang der Anti-Swelling –Efficiency feststellen. Hierzu mussten umgeformte Hölzer jedoch fixiert werden, um die während des Wärme- oder Feuchtigkeitstreatments auftretenden inneren Spannungen abbauen zu können. Durch die Wärmebehandlung traten weitere Veränderungen auf:
 - Temperaturen von 160 °C reduzierten den E-Modul (125 N/mm²) nicht bei unverdichteten Proben, jedoch sinkt die Biegefestigkeit bei Pappel um 22 %.
 - Insgesamt wurde nur eine geringe Reduzierung der Rückverformung durch thermische Behandlung gemessen.
 - Bei verdichteter Pappel erhöhten sich Festigkeiten und Steifigkeiten mit Temperaturen bis 200 °C.

Die mHBS wurden aus Einzellamellen der modifizierten Paneele hergestellt. Unter Verwendung von Klebstoffen (1K PUR, PF Res) konnte eine dauerhafte Verklebung realisiert werden. Die mHBS erreichten ausreichend hohe Festigkeiten in der Klebefuge. Es stellte sich jedoch während der Arbeiten heraus, dass größere Wärmeeinträge während der Verarbeitung (Sägen/Schleifen) weitestgehend zu vermeiden sind, um keine Rückverformung auszulösen. Weiterhin ist eine rasche Verklebung nach dem Auftrennen in die Einzellamellen notwendig. Bei der **Herstellung der modifizierten Paneele** wurden folgende Ergebnisse erreicht:

- Die Herstellung muss holzanatomische Eigenschaften (Zerstreutporigkeit, Verdichtung in radialer Jahrringrichtung und Anordnung der Paneele mit wechselnder Jahrringlage) berücksichtigen.
- Die Herstellung dieser modifizierten Paneele mit ausgewählter Jahrringrichtung führte zu einem erheblich höheren Herstellungsaufwand und Holzverschnitt.
- In den Versuchen zur Verbesserung der Formstabilität an modifizierten Paneelen konnte durch verschiedene zusätzliche pre- und post-Prozesse eine Verbesserung der Eigenschaften erreicht werden.
- Eine Oberflächenerwärmung mit IR-Carbon-Strahlern führt zum Spannungsabbau. Die IR-Strahlung dringt schnell und tief in das Holz ein, bis 5 mm.
- Das zeitliche Reduzieren der Strahlungsenergie von 100 % auf 50 % reduziert die Verfärbung, positiver Nebeneffekt ist der geringere Energieeinsatz. Eine maximale Oberflächentemperatur von 220 °C bei bis zu 2 Minuten verringert die Reaktivität bei Feuchtigkeitsbeanspruchung. Kurzes Temperiern bei 220 °C führt zur Verringerung der Rückverformung um 5 bis 10 %.
- Eine Spannungsrelaxation erfolgt ab 150 °C bis 220 °C Oberflächentemperatur, danach kommt es zur Materialversprödung und einem schnelleren Abbau der Holzstruktur.
- Der Einsatz von Pappel ist gegenüber Birke (stärkerer Verfärbungen) zu bevorzugen.

Aus den mHBS wurden durch Umformung zylindrischen Hohlkörper (3D-Formkörper) hergestellt, wobei folgende Erkenntnisse gewonnen wurden:

- Während des Formungsprozesses werden Verdichtungsspannungen vorzugsweise vollständig durch lange Presszeiten abgebaut. Für die Umformung sollten die mHBS ein hohes Potenzial zur Materialdehnungen (mind. 20%) besitzen. Pappel eignet sich gut zur fehlerfreien Umformung in 3D-Formkörper mit engen Radien bei großer Wandstärke (20mm).
- Bei der Umformung sollten die Formkörper physikalisch fixiert werden, da eine hygro-thermische Behandlung mit Sattdampf zu Verformungen führt.
- Die 3D-Formkörper weisen hohe Inhomogenitäten und Restspannungen auf, welche durch thermische oder hygro-thermische post-Prozesse reduziert werden können.

Zusammenfassend lässt sich der Schluss ziehen, dass eine Reduzierung des Porenvolumens auch bei schnellwachsenden einheimischen Hölzern wie Pappel möglich ist und auch eine Umformung zu 3D-Formkörpern erfolgen kann, die sich auch im industriellen Maßstab nachweisen ließ. Die Verdichtung schafft erhöhte Dehnungsreserven, welche es ermöglichen, 3D-Formkörper herzustellen. Konventionelle Verfahren bedeuten einen erhöhten Materialverlust. Wichtig sind jedoch das pre- und post-Treatment, um die Rückverformung bei z. B. Witterungseinfluss gering zu halten. An dieser Stelle sind weitere technologische Entwicklungen bzw. Anpassungen erforderlich, um nachfolgenden Schritten wie einer Beschichtung noch bessere Ausgangsbedingungen zu bieten. Der Prozess der Verdichtung, die Herstellung solcher modifizierten Substrate und deren Umformung benötigt die industrielle Umsetzung als Massenprodukt, um wirtschaftlich dargestellt werden zu können.

Literatur

- [1] Navi, P.; Girardet, F.: Effects of Thermo-Hygro-Mechanical treatment on the structure and properties of wood, Holzforschung 54(3); 2000
- [2] Berzins, G. V.: Wood plasticization as a way of enhancing quality material substitution. Holztechnologie 1, 1972
- [3] Rautkari, L.: Surface modification of solid wood using different techniques, Aalto University, Dissertation, 2012
- [4] Inoue, M.; Norimoto, M.; Tanahashi, M.; Rowell, RM: Steam or Heat Fixation of Compressed, Wood. Journal of Wood and Fiber Science 25, 1993
- [5] Welzbacher, C.R.; Rapp A.O.; Wehsener, J.; Haller, P.: Dimensional stabilization of in industrial scale thermo-mechanically densified Norway spruce (*Picea abies* L. Karst) by heat treatments, Holz als Roh- und Werkstoff 66, 2008
- [6] Wehsener, J.; Haller, P.: Langzeituntersuchungen an verdichteter und thermisch behandelter Fichte. Holztechnologie 51 (3), 2010
- [7] Militz, H.: Heat treatment technologies in Europe: scientific back-ground and technological state-of art. In: Enhancing the durability of lumber and engineered wood products, ForestProductsSociety, Kissimmee, Orlando, USA, 2002, February 11–13
- [8] Heiduschke, A.; Haller, P.: Zum Tragverhalten gewickelter Formholzrohre unter axialem Druck, Der Bauingenieur, 84-2009
- [9] Haller, P.; Putzger, R.; Wehsener, J.; Hartig, J.: Formholzrohre – Stand der Technik, Bautechnik 90, 2013
- [10] Wehsener, J.; Werner, T.-E.; Hartig, J.; Haller, P.: Advancements for the structural application of fiber-reinforced moulded wooden tubes, Materials and joints in timber structures, RILEM 9: 2014a
- [11] Kutnar, A.; Sandberg, D.; Haller, P.: Compressed and moulded wood from processing to products – a review, Holzforschung, 69(7), 2015
- [12] Wehsener, J.; Weser, T.; Haller, P.; Diestel, O.; Cherif, C.: Textile reinforcement of multidimensional formable wood, Eur J Wood Prod 72 (4), 2014b
- [13] Prieto J., Keine J.: Holzbeschichtung: Chemie und Praxis (Farbe und Lack Edition), Vincentz Network Verlag, 2007
- [14] ADLER International GmbH: Physikalischer Holzschutz. (<https://www.adler-farbenmeister.com/magazin/holzschutz/physikalischer-holzschutz>; Stand: 30.09.2019)

-
- [15] Prieto J, Kiene J. Wood coatings: Chemistry and practice. European coatings library. Hannover: Vincentz; 2018
 - [16] Gagro, D.: Globaler Holzlacke-Marktübersicht; FARBE UND LACK, 04-2022
 - [17] NN.: Woodcoat Pulverbeschichten AG; 2011, CH, Ökoeffizienz-Analyse
 - [18] Verlaak, J.; Morris, D.: Life Cycle Assessment for Industrial Coatings Applied in MDF - Focused on three-dimensional objects. The Decorative Surfaces Conference, Miami; 2011
 - [19] Pietschmann, J.: Industrielle Pulverbeschichtung, JOT Fachbuch, 4. Überarbeitete Auflage, Springer Fachmedien Wiesbaden 2002, 2003, 2010, 2013
 - [20] interne Informationen eines Pulverlackherstellers
 - [21] Schulz, D.: Trends für die Lackierung von Holz und Holzwerkstoffen, HOB, 04-2016
 - [22] Produktbroschüren SAMATEC über <http://www.samatec.de/downloads/angebotsvarianten-samafloor-13-24qm.pdf> (07.07.2017)
 - [23] interne Informationen eines Beschichters
 - [24] <https://www.chemie-schule.de>
 - [25] N. N.: Lieber den Lack als Geld verpulvern – Pulverbeschichtung auf MDF, Schreiner Oberflächen, 20, 2016
 - [26] Kittel, H.: Lehrbuch der Lacke und Beschichtungen, Band 9, Verarbeiten von Lacken und Beschichtungsstoffen, Stuttgart, 2004
 - [27] Jochum, M.: Entwicklung eines kratzfesten, transparenten Pulverlackes, Dissertation 2014, Universität des Saarlandes
 - [28] Kismet, Y; Entwicklung eines Verfahrens für die Verwertung von Pulverlackrecyclaten, Kunststoff-Forschung, TU-Berlin, 2012
 - [29] Farshchi, N.; Gedan-Smolka, M.: Polyurethane Powder Coatings: A Review of Composition and Characterization, Ind. Eng. Chem. Res. 2020, 59
 - [30] Fink, D.; Minesso, A.: Grünere Pulver; Farbe und Lacke, 01-2020 Polyester mit niedriger Einbrenntemperatur
 - [31] N.N.: Niedrigtemperatur auch für draußen, mo Lackieren; 5-2019
 - [32] Chunliang, L. et al: Limonene-derived polycarbonates as biobased UV-curable (powder) coating resins; Progress in Organic Coatings, 2021-151, 106073
 - [33] Grundlagen zur Leitfähigkeitsmessung; Fachhochschule Südwestfalen; Zugriff 19.01.2018; <https://www4.fhswf.de/media/downloads>

-
- [34] Niemz, P.: Physik des Holzes und der Holzwerkstoffe, DRW Verlag, Leinfelden – Echter-dingen, 1993
 - [35] Sadatnezhad, S. H.; Khazaian, A.; Sandberg, D.; Tabarsa, T.: Continuous Surface Densification of Wood: A New Concept for Large-scale Industrial Processing, BioResources 12(2), 3122-3132.
 - [36] Inoue, M.; Normotoi, M.; Tanahashi, M.; Rowell, R. Steam or heat fixation of com-pressed wood. Wood Fiber Sci. 1993, 25, 224–235