



EcoCoat

Nachhaltige Pulverlacke für industrielle Anwendungen



29.05.2026

EcoCoat

Nachhaltige Pulverlacke für industrielle Anwendungen

**Abschlussbericht über ein durch die Deutsche
Bundesstiftung Umwelt (DBU) gefördertes Projekt**

Aktenzeichen	38560/01 – 21
Verfasser	Herr Marco Zierau Core Facility Microscopy and Materials Analysis (CMMA) Otto-von-Guericke-Universität Magdeburg
weitere Verfasser	Frau Monika Piorkowska iLF Magdeburg GmbH Frau Jana Schulz Ganzlin Beschichtungspulver GmbH

Magdeburg, Mai 2026

Inhaltsverzeichnis

Abbildungsverzeichnis	3
Tabellenverzeichnis.....	4
Begriffs- und Abkürzungsverzeichnis	5
Zusammenfassung.....	6
Einleitung.....	7
Hauptteil	11
1. Recherche und Versuchsplanung.....	11
1.1 Recherche von Rohstoffen	11
1.2 Recherche zu Prüf- und Analyseverfahren	13
2. Charakterisierung von EcoCoat-Komponenten	16
2.1 Morphologie, Aspektverhältnis, thermische Beständigkeit und Mischbarkeit..	16
3. Ökologische und sozioökonomische Ergebnisse	36
3.1 Sozioökonomie.....	36
3.2 Ökologie	39
Fazit und Ausblick.....	45
Quellen- und Literaturverzeichnis	49
Anhang	Fehler! Textmarke nicht definiert.

Abbildungsverzeichnis

- Abb. 1: REM-SE-Aufnahmen: Gelbpigment Sicopal Gelb L1100
- Abb. 2: REM-SE-Aufnahmen: Rosapigment Hostaperm Rosa E
- Abb. 3: REM-SE-Aufnahmen: Rotpigment Novoperm Rot HF3S 70
- Abb. 4: REM-SE-Aufnahmen: Grünpigment Heliogen Grün L8731
- Abb. 5: REM-SE-Aufnahmen: Blaupigment Sicopal Blau L6210
- Abb. 6: REM-SE-Aufnahmen: Gelbpigment Carotin
- Abb. 7: REM-SE-Aufnahmen: Gelbpigment Curcumin
- Abb. 8: REM-SE-Aufnahmen: Grünpigment Chlorophyllin
- Abb. 9: REM-SE-Aufnahmen: Braunpigment Lignin I
- Abb. 10: REM-SE-Aufnahmen: Braunpigment Lignin II
- Abb. 11: REM-SE-Aufnahmen: Braunpigment Lignin III
- Abb. 12: REM-SE-Aufnahmen: Braunpigment Lignin IV
- Abb. 13: REM-SE-Aufnahmen: Braunpigment Lignin V
- Abb. 14: REM-SE-Aufnahmen: Blaupigment Indigo
- Abb. 15: REM-SE-Aufnahmen: Schwarzpigment Ruß
- Abb. 16: REM-SE-Aufnahmen: Bindemittel rPET
- Abb. 17: Bestimmung der Partikelgrößenklassen von Chlorophyllin
- Abb. 18: Prüfung der thermischen Beständigkeit von Carotinpulver
- Abb. 19: Beschichtete Versuchsbleche mit verschiedenen Pigmentierungen
- Abb. 20: Farbvariationen an beschichteten Versuchsblechen
- Abb. 21: Haftungsverhalten im Anlieferungszustand
- Abb. 22: Bewertung nach 480 h Kondenswasserkonstantklima
- Abb. 23: Bewertung nach 240 h AASS-Test
- Abb. 24: Visueller Zustand nach UV-A-Belastung
- Abb. 25: Visueller Zustand nach Crockmeterprüfung mit 100 Doppelhüben
- Abb. 26: Visueller Zustand nach Tropfentest (Chemikalienbeständigkeit)
- Abb. 27: Zusammenfassung der wesentlichen Ergebnisse der Online-Befragung
- Abb. 28: Messeauftritt und Fachvorträge
- Abb. 29: Übersicht zu erzeugter Farbvielfalt und Applikation am Bauteil

Tabellenverzeichnis

Tab. 1: Auswahl der Materialien nach EcoCoat-Kriterien

Tab. 2: Auswahl etablierter Industriepigmente zum Vergleich

Tab. 3: Materialprüfversuche im Ausgangszustand

Tab. 4: Materialprüfversuche nach Auslagerungen

Tab. 5: Analysemethoden nach verschiedenen Versuchen

Tab. 6: Zusammenfassung der Ergebnisse zu 2.1

Tab. 7: Liste der eingesetzten Chemikalien

Tab. 8: Prüfergebnisse Ausgangszustand, nach Bewitterung/ Kondenswasserprüfung

Tab. 9: Prüfergebnisse für AASS-, Abrieb- und Medienprüfung

Tab. 10: Auflistung von Messen und Beiträgen in Fachzeitschriften

Tab. 11: EcoCoat-Pulverlacke

Begriffs- und Abkürzungsverzeichnis

CO ₂	-	Kohlenstoffdioxid
CO _{2e}	-	Kohlenstoffdioxidäquivalent
DBU	-	Deutsche Bundestiftung Umwelt
EcoCoat	-	Akronym für das Projektvorhaben „Nachhaltige Pulverlacke für industrielle Anwendungen“
PET	-	Polyethylenterephthalat
REM	-	Rasterelektronenmikroskop / -mikroskopie
rPET	-	Recyceltes Polyethylenterephthalat (PET)
SE	-	Sekundärelektronenkontrast
USD	-	US-Dollar (\$)
UV-A	-	langwellige ultraviolette Strahlung (320 – 400 nm)
UV-B	-	kurzwellige ultraviolette Strahlung (280 – 320 nm)
VdL	-	Verband der deutschen Lack- und Druckfarbenindustrie e.V.
VILF	-	Verband der Ingenieure des Lack- und Farbenfaches e.V.
VOC	-	Volatile Organic Compounds (flüchtige, organische Verbindungen)

Zusammenfassung

Das von der Deutschen Bundesstiftung Umwelt (DBU) geförderte Projektvorhaben „Nachhaltige Pulverlacke für industrielle Anwendungen“ (kurz: EcoCoat) sollte die Möglichkeit prüfen, Einzelbestandteile in Pulverlacken (Bindemittel, Füllstoffe, Pigmente und Additive) durch biologisch erzeugbare bzw. nachwachsende Rohstoffe oder recycelte Werkstoffe zu ersetzen. Weiterhin standen die Reduzierung der beim Einbrennprozess der Pulverlacke benötigten Energie durch eine Senkung der Einbrenntemperatur, sowie die Berücksichtigung von regionalen Verfügbarkeiten der Rohstoffe zur Reduktion von Transportwegen im Vordergrund des Projekts. Das unter dem **Aktenzeichen 38560/01 – 21** geförderte Projekt wurde von einem Konsortium, bestehend aus der iLF Magdeburg GmbH, der Ganzlin Beschichtungspulver GmbH und der CMMA der Otto-von-Guericke-Universität Magdeburg, durchgeführt.

Nach einer ausführlichen Recherche und Charakterisierung von infrage kommenden Ausgangsmaterialien (Morphologie, Mischbarkeit, thermische Stabilität) wurden erfolversprechende Rezepturen umgesetzt. Die anschließende Prüfung der Beschichtungen (u.a. Schichtdicke, Haftfestigkeit) erfolgte unter Anwendung industrieller Standards und wurde nach verschiedenen Bewitterungsversuchen zur Nachbildung von Einsatzszenarien (u.a. UV-Bestrahlung, Salzsprühnebeltest) fortgesetzt. Zur Potentialabschätzung der Umweltentlastung durch die Nutzung der neu entwickelten Beschichtungen wurden Stoff- und Energieströme bilanziert.

Von den mehr als 35 entwickelten und getesteten Pulverlackformulierungen durchliefen vier Basisformulierungen alle Untersuchungen erfolgreich und entsprechen industriellen Standards. Durch die Reduzierung der Einbrenntemperaturen bei der Applizierung der Pulverlacke konnten bis zu 30% Energie gespart werden [1]. Der CO₂-Fußabdruck einer Beschichtung kann durch die Nutzung einer EcoCoat-Formulierung um bis zu 70% reduziert werden. Bereits im Projektverlauf bestätigte eine Umfrage die Bereitschaft von Herstellern und Endkunden, ökologischere Pulverlacke anzubieten und zu verwenden.

Entwicklungspotential besteht in der Verbesserung der UV-Stabilität der neu entwickelten Pulverlacke, um auch für Außenanwendungen unter dem Einfluss von direktem Sonnenlicht Einsatzmöglichkeiten zu finden.

Einleitung

Pulverlacke werden industriell in vielen unterschiedlichen Bereichen eingesetzt. Mit dem Schutz von metallischen Oberflächen vor Korrosion steht dabei eine der Hauptfunktionen von Pulverbeschichtungen im Vordergrund. Neben dieser Basisanforderung haben Pulverlacke zusätzlich hohe Ansprüche in Bezug auf Design und Lebensdauer. Pulverbeschichtungen sollen optisch ansprechend und langlebig, sowie dauerhaft funktionell sein.

Im Jahr 2025 machten Pulverlacke laut Verband der deutschen Lack- und Druckfarbenindustrie e.V. (VdL) etwa 12% des Gesamtumsatzes der Branche aus und sind vor allem im Bereich Möbelindustrie, Architektur, Maschinenbau, Zäune und Geländer sowie bei Automobilzulieferteilen dominierend [2]. Auf der Jahrespressekonferenz des VdL 2025 wird ein Umsatzrückgang des Gesamtindustriezweigs um 1,4% im Vergleich zum Vorjahr beschrieben. Es zeigt sich eine deutliche Auswirkung der gesamtwirtschaftlichen Situation auf den Markt, die durch hohe Energiekosten und steigende Rohstoffpreise im Bereich erdölbasierter Produkte zusätzlich an Bedeutung gewinnt. Die Gründe hierfür liegen in einer sich neu ordnenden Weltwirtschaft und sich verändernden, globalen Handelsbeziehungen [3]. Das in der Folge dargelegte Vorhaben hat demnach mit den bei der Antragstellung beabsichtigten Schwerpunkten der Reduktion petrobasierter Komponenten, der Nutzung nachwachsender Rohstoffe und der Reduktion des Energiebedarfs für die Verarbeitung einen hochgradig relevanten Fokus gesetzt. Bemerkenswert ist zusätzlich, dass die in Deutschland sichtbaren Rückgänge nicht die Verhältnisse auf dem Weltmarkt spiegeln. Im Jahr 2025 liegt die geschätzte Marktgröße von Pulverbeschichtungen weltweit bei 16,12 Milliarden USD. Bis ins Jahr 2034 wird der Markt Schätzungen zufolge bis auf 27,45 Milliarden USD anwachsen. Vor allem der asiatisch-pazifische Raum ist hier als Wachstumstreiber zu sehen [4]. Innovationen sind demnach genau jetzt ein wichtiges Zeichen, um nicht den Anschluss an andere Nationen zu verlieren.

Der vergleichsweise geringe Weltmarktanteil von 15 – 20% an der Gesamtlackbranche ist neben höheren Rohstoffpreisen bei Pulverlacken dadurch bedingt, dass die Applikation von Pulverbeschichtungen technische Grenzen hat [5]. Verfahrensbedingt muss eine elektrostatische Aufladbarkeit des zu beschichtenden Bauteils vorliegen. Demnach kommen Kunststoffe, Hölzer oder Keramiken nur begrenzt in Frage. Es

haben sich jedoch zusätzliche Prozessschritte etabliert, die eine Beschichtbarkeit auch für nicht leitfähige Materialien ermöglichen. Auch Kunststoffe lassen sich somit mittlerweile pulverbeschichten, sofern sie bis zu einem gewissen Temperaturbereich thermisch stabil sind. Da sich weltweit strengere Umwelt- und Emissionsvorgaben bemerkbar machen, ist eine wachsende Bedeutung von Pulverlacken zu verzeichnen, da sie keine flüchtigen organischen Komponenten (VOCs – Volatile Organic Compounds) emittieren [5]. Das Verfahren birgt einige technische Anwendungsgrenzen bei der Beschichtung von Großbauteilen. Grundlegend ist die Umsatzbarkeit des Pulverbeschichtungsprozesses von der Kammergröße des Ofens, in welchem die Bauteile nach der Applikation des Pulverlacks aushärten, abhängig. Ein wesentlicher Unterschied gegenüber Nasslackierungen ist eine kompliziertere Ausgangslage bei Ausbesserungsvorgängen der Pulverbeschichtung nach Beschädigung, da kein einfacher Zusatzauftrag ohne Einbrennen möglich ist. Ähnliches gilt für Bauteile mit einem vorgesehenen Farbwechsel auf einer Oberfläche. Auch der Energieverbrauch des Einbrennvorgangs stellt im Marktgeschehen einen nachteiligen Punkt von Pulverlackierungen gegenüber einer Nasslackierung dar [6]. Technische Innovationen bieten trotz einer etablierten Technologie folglich die Möglichkeit der Erschließung weiterer Marktsegmente.

Das Thema der auf Erdöl basierenden Rohstoffe, die Rohstoffherkunft, die Rohstoffkosten, die Rohstoffzugänglichkeit und -verfügbarkeit sowie der verbundene CO₂-Fußabdruck, der innerhalb der Erzeugung, Produktion, Vertrieb und der Deponierung entsteht, bilden den Ausgangspunkt für das Forschungsvorhaben.

Eine Pulverlackierung besteht im Wesentlichen aus vier Komponenten: Bindemittel (Harz + Härter); Füllstoffe, Additive und Pigmente. Den größten Teil nehmen dabei mit 70 – 75% Bindemittel ein. Füllstoffe, Pigmente und Additive bilanzieren sich zu 25 – 30% [1, 7]. Das bedeutet, dass die Rezeptur eines Standard-Pulverlacks häufig einen Anteil von mehr als 90% petrochemisch erzeugter Produkte aufweist. Ein Ziel war daher die Prüfung einer möglichen Substitution von petrochemischen Komponenten durch nachwachsende, biologische erzeugbare oder recycelte Rohstoffe. Die Auswirkung auf ein CO₂-Äquivalent wäre allein durch die Wirkung eines natürlichen CO₂-Reduktionsprozesses, welchen die Rohstoffe auf dem Weg zur Nutzbarkeit bereits zurücklegen, signifikant. Das Hauptaugenmerk liegt daher auf möglichen Bestandteilen, die in ihrer Entstehung oder Erzeugung an einen Photo-

syntheseprozess gekoppelt sind. Die Materialien, die hierfür in Frage kommen sind Bestandteile von anderen Industriezweigen, wie der Zellstoffindustrie und der Agrar- und Landwirtschaft. Es galt daher im Forschungsprojekt darauf zu achten, dass keine Engpässe oder Interessenkonflikte hinsichtlich der Nahrungsmittelgrundversorgung entstehen.

Nicht nur das einzelne, finale Produkt kann sich dabei positiv auf die Nachhaltigkeit auswirken. Zusätzlich kann auch in der Prozesssteuerung eine Energieeinsparung erzielt werden. Der Niedrigtemperaturansatz ist eine mittlerweile häufiger zum Einsatz kommende Methode, um die Energiedichte bei der Einbrenndauer zu reduzieren. Üblicherweise liegt die Einbrenntemperatur für Pulverlacke, je nach Rezeptur, zwischen 160 °C und 220 °C. Im Forschungsvorhaben wurde daher zusätzlich die Prüfung der Möglichkeit einer verminderten Einbrenntemperatur unter Beibehaltung der Produktqualität für EcoCoat-Pulverlacke als wichtiger Entwicklungsfokus definiert. Die Aufgabenstellung, die in diesem Projekt adressiert war, bestand folglich in einer umfangreichen Recherche zu Rohstoffen, die zur Erreichung des Projektziels in Frage kommen, sowie der Auswahl geeigneter Prüf- und Charakterisierungsmethoden (vgl. **AP1** des Antrags). Nach der Auswahl geeigneter Materialien erfolgte eine umfassende Charakterisierung der Rohstoffe bis hin zur darauf basierenden, ersten Testreihe von EcoCoat-Formulierungen. Das segmentweise Austesten von Materialien in Kombination mit industrieetablierten Rohstoffen ist in diesem Fall sinnvoll und wurde umgesetzt. Zum Beispiel wurden EcoCoat-Pigmente mit Standardfassadenpolyestern verbunden um die grundsätzliche Mischbarkeit und das Vernetzungsverhalten zu testen. Nachdem geeignete Bindemittel, Füllstoffe und Pigmente in ersten Formulierungen zusammengebracht wurden, wurden mit den applizierten Pulverbeschichtungen erste mechanische Materialprüfungen durchgeführt.

Entscheidend für die gute Eignung einer Rezeptur als Pulverlack ist die Homogenität der Beschichtung. Diese wurde analytisch durch Untersuchungen mittels Licht- und Rasterelektronenmikroskopie (REM) sichergestellt. Nach dem Zusammenbringen der erfolgversprechendsten Bestandteile wurden EcoCoat-Rezepturen mit der Zielvorgabe von 90 - 95% Masseanteil an EcoCoat-Komponenten, mit und ohne Pigmentierung, umgesetzt (vgl. **AP2, AP3, AP7** des Antrags). Anschließend erfolgten mechanische Prüfungen, Untersuchungen zur Beständigkeit bei beschleunigter UV-Bewitterung sowie relevante Prüfungen für die anwendungsnahe Testung und

Charakterisierung von Oberflächen. Nach diesen Prüfungen wurde eine erneute analytische Bewertung der Oberfläche nach diversen Beanspruchungen mittels Lichtmikroskop und REM durchgeführt (vgl. **AP4**, **AP8**, **AP9**, **AP10** und **AP11** des Antrags). Im Anschluss an die Zusammentragung und Herausbildung von funktionierenden Pulverlackrezepturen wurde die mögliche Einsparung von Treibhausgasemissionen mittels einer Berechnung von CO₂-Äquivalenten abgeschätzt um den ökologischen Einfluss der Produkte zu einzuordnen (vgl. **AP6** des Antrags). Die Ergebnisse flossen zusätzlich in eine soziale und ökonomische Betrachtung ein. Dazu wurde eine Online-Umfrage durchgeführt. Ziel war es, die Wirkung, das Einsatzpotential und den Bedarf an nachhaltig produzierten und nachhaltig wirkenden Pulverlacksystemen direkt als Aussage aus der Branche zu extrahieren.

Die Ergebnisse aus dem Projektvorhaben sollen zeigen, wie für bereits nachhaltig funktionierende Pulverlacke auf Erdölbasis weiterhin ein hohes Potential an Innovation bestehen und insbesondere mit dem projekttechnologischen Ansatz die Unabhängigkeit von aktuell notwendigen Erdölprodukten weiter gefördert werden kann. Zudem macht das Projekt deutlich, wie vorteilhaft es ist, Materialien in einem Kreislaufprozess zu betrachten. Die im Projekt beteiligten Partner und Lieferanten von Teilkomponenten für einen EcoCoat-Pulverlack konnten bereits jeweilige Produktschnittmengen mit Industriezweigen identifizieren, die zuvor noch nicht erdacht worden sind. Bereits während des Projekts konnte durch Publikationen und Fachvorträge Aufmerksamkeit (vgl. **AP12** des Antrags) für das Thema geweckt werden. Konkrete erste Anfragen konnten erfolgreich als EcoCoat umgesetzt werden. Dadurch konnte bereits im Projektverlauf eine Anwendungsrelevanz nachgewiesen werden.

Hauptteil

1. Recherche und Versuchsplanung

1.1 Recherche von Rohstoffen

Bei der Recherche und Wahl geeigneter Materialien und Rohstoffe für das Erreichen des Projektziels wurden zwei Prioritäten für die Auswahl festgelegt. Die erste Priorität bestand in der Eigenschaft des biologischen Nachwachsens und einer biologischen Abbaubarkeit. Das heißt grundlegend, dass das Biomaterial durch die Beteiligung am Photosyntheseprozess bereits CO₂-reduzierend am Umweltkreislauf beteiligt war. Des Weiteren ist ein biologisch verträgliches Abbauverhalten von Vorteil um möglicherweise kostenintensive Recyclprozesse zu vermeiden bzw. auszuschließen. Diese priorisierte Maßgabe ist gültig für alle Komponenten eines Pulverlacks: Bindemittel, Füllstoffe, Pigmente und Additive. Als Basis für die Recherche diente eine Richtrezeptur, welche die ungefähren Verhältnisse der Einzelkomponenten berücksichtigte. Die nachfolgende Tabelle (Tab. 1) listet alle ausgewählten Rohstoffe und Materialien auf, die im Projekt zum Einsatz kamen.

Tab. 1: Auswahl der Materialien nach EcoCoat-Kriterien

Bezeichnung	Basisrohstoff	Funktion im Pulverlack	visuelle Erscheinung	biologisch	recycelt
Curcumin	Kurkumawurzel	Pigment	gelb	x	
Chlorophyllin	Alfalfa	Pigment	grün	x	
Chlorophyll	Gerstengras	Pigment	grün	x	
Carotin	Karotten, Rüben	Pigment	gelb/orange	x	
Betanin	Rote Beete	Pigment	rot	x	
Capsanthin	Paprika	Pigment	rot	x	
Spirulina (Phycocyanin)	Mikroalgen	Pigment	grün	x	
Indigo	Indigopflanze	Pigment	blau	x	
Anchan	Schmetterlings-erbse	Pigment	blau	x	
Bixin	Annattopflanze	Pigment	rot/braun	x	
Lignin I	Weizenstroh	Pigment, Füllstoff, Bindemittel*	hellbraun	x	

Lignin II	Weichhölzer	Pigment, Füllstoff, Bindemittel*	braun	x	
Lignin III	Harthölzer	Pigment, Füllstoff, Bindemittel*	braun	x	
Lignin IV	Hölzer	Pigment, Füllstoff, Bindemittel*	braun	x	
Lignin V	Hölzer	Pigment, Füllstoff, Bindemittel*	braun	x	
Akazienpulver	Akazie	Füllstoff	weiß	x	
Maismehl	Maispflanze	Füllstoff	weiß	x	
Eierschalenpulver	Eierschale	Pigment, Füllstoff	weiß	x	
Cellulose	Laub- und Nadelhölzer	Füllstoff	weiß	x	
Flammruß	diverse	Pigment	schwarz		x
CC E 04926	rPET (25%)	Bindemittel	transparent		x
CC E 04367	Bio basierte Monomere + rPET	Bindemittel	transparent	x	
CC 2679-6 **	Naturharz	Bindemittel	transparent	x	
Cliqflow 707†	Rizinusölderivat	Additiv	weißlich	x	
PORO 294 ***	Steramid	Additiv	weißlich	x	

* Prüfung einer Anwendung für kombinierte Aufgaben im Pulverlack,

** CC 2679-6 ist ein massebilanziertes Standardharz auf Basis zertifizierter Rohstoffbilanzierung

*** PORO 294 ist ein biobasiertes Steramid (aus pflanzlichen Rohstoffen) und fungiert als Additiv zur Optimierung von Oberflächenverlauf sowie zur Unterstützung der Entgasung im System

Alle in der Tabelle genannten Materialien wurden im Laufe des Projekts in mindestens einer Formulierungsrezeptur hinsichtlich ihrer Mischbarkeit getestet. Jede Rezeptur wurde dokumentiert und zur Applizierung gebracht. Appliziert wurden alle Systeme jeweils auf Aluminiumblechen (Prüfblechen).

Bei der Erarbeitung der Marktübersicht und der Bezugsmöglichkeiten wurden regionale Erzeuger oder mögliche Kooperationspartner angesprochen oder gezielt ausgesucht. Die meisten Produkte wurden von Distributoren im norddeutschen Raum bezogen und auch dort hergestellt. Dabei wurde insbesondere Lignin in verschiedenen

Variationen in größeren Mengen verwendet. Hier erfolgte ein direkter Austausch mit einem Erzeuger (Lignopure GmbH). Die Bezeichnungen Lignin I bis Lignin V beziehen sich auf unterschiedliche Ausgangsrohstoffe bzw. Qualitäten. Lignin I, II, und III sind als qualitativ hochwertig einzuordnen, da der Schwefel- und Phosphorgehalt stark reduziert sind und die Ausgangspartikelgrößen bereits auf < 50 µm begrenzt sind. Lignin IV und V zeigten in Voruntersuchungen des Herstellers eine hohe UV-Beständigkeit. Der Kontakt zu regionalen Industriemühlen wurde ebenfalls aufgenommen. Hier gestalten sich jedoch die angefragten Mengen im Bereich weniger Kilogramm als schwierig in der Umsetzung. Grundsätzlich wurde jedoch die Bereitschaft zur Kooperation bei aussichtsreichen Komponenten und entsprechender Abnahmemenge (im Bereich von mehreren Tonnen) signalisiert. Für die zügige Umsetzung des Vorhabens wurden am Markt verfügbare Rohstoffe in Kleinmengen bestellt und getestet. Während der Vorrecherche zu einsetzbaren, nachhaltigen Rohstoffen wurden auch etablierte Rohstoffe im Pigmentbereich recherchiert. Diese dienen dem Vergleich zu den Pigmenten aus Tabelle 1 hinsichtlich Größe, Morphologie, Größenverteilung etc.. Die nachfolgende Tabelle (Tab. 2) führt auf, welche Pigmente in diesem Zusammenhang charakterisiert wurden und als Vergleich herangezogen werden.

Tab. 2: Auswahl etablierter Industripigmente zum Vergleich

Bezeichnung	Basisrohstoff	visuelle Form
Sicopal Gelb L 1100	Bismuth vanadate	gelb
Hostaperm Rosa E	Quinacridone Pigment Rot 122	rosa
Novoperm Rot HF3S 70	Naphthol AS Pigment Rot 188	rot
Heliogen Grün L8731	Cu-phthalocyanine, chlorinated	grün
Sicopal Blau L6210	Co/Al oxide	blau

1.2 Recherche zu Prüf- und Analyseverfahren

Für die Bewertung der Eignung von einzelnen Rohstoffkomponenten für den Einsatz in Pulverlacken wurde ein fester Prüfplan herausgearbeitet, der sich an etablierte branchenübergreifende Prüfstandards anlehnt. Eine logische Vorgehensweise ist dabei, die Pulverlackformulierungen einzelne Testphasen durchlaufen zu lassen und je nach Erfolg die nächste Testphase zu erreichen. Die erste Testphase beinhaltete

Materialprüfungen im Ausgangszustand, ohne Auslagerungsversuche. Folgende Tabelle (Tab. 3) listet die dafür vorgesehenen Materialprüfversuche auf.

Tab. 3: Materialprüfversuche im Ausgangszustand

Prüfung	Zielvorgabe/Auswertung
Messung der Schichtdicke nach DIN EN ISO 2808	ca. 80 – 100 µm
Gitterschnittprüfung nach DIN EN ISO 2409	GT 0-1
Crockmeterprüfung nach DIN EN ISO 105-X12 (trocken und mit Handschweißlösung)	visuelle Bewertung nach DIN EN ISO 4628-1 (Soll: KW 0) Anbluten nach DIN EN 20105-A03 (Soll: GM 4-5)
Farbmessung nach DIN EN ISO 18314-1	IST-Wert
Glanzmessung nach DIN EN ISO 2813	IST-Wert
Prüfung der Chemikalienbeständigkeit Tropfentest nach DIN EN ISO 2812-4 (Verfahren A)	visuelle Bewertung nach DIN EN ISO 4628-1 (Soll: KW 0)

Nach einem positiven Ausgang der in Tabelle 3 dargestellten Prüfungen von Pulverlackrezepturen im Ausgangszustand wurden diese in den nächsten Prüfzyklus überführt. Dieser beinhaltete die in Tabelle 4 dargestellten Auslagerungsversuche.

Tab. 4: Materialprüfversuche nach Auslagerungen

Prüfung	Zielvorgabe/Auswertung
Kondenswasserkonstantklimatest nach DIN EN ISO 6270-2; t= 480 h Zwischenbewertung nach 240h	visuelle Bewertung nach DIN EN ISO 4628-1 (Soll: KW 0) Blasengrad nach DIN EN ISO 4628-2 (max.: 2(S2)) Rostgrad nach DIN EN ISO 4628-3 (Soll: Ri 0) Farbmessung nach DIN EN ISO 18314-1 (Soll: $\Delta E_{ab} < 1,5$) Glanzmessung nach DIN EN ISO 2813 (Glanzverlust <50%) Gitterschnitt nach DIN EN ISO 2409 (Soll: GT 0-1)
Salzsprühnebelprüfung (AASS) nach DIN EN ISO 9227; t= 480 h Zwischenbewertung nach 240h	visuelle Bewertung nach DIN EN ISO 4628-1 (Soll: KW 0-1) Blasengrad nach DIN EN ISO 4628-2 (Soll: 0(S0)) Rostgrad nach DIN EN ISO 4628-3 (Soll: Ri 0) Unterwanderung am Ritz nach DIN EN ISO 4628-8 (Soll: max. 2 mm)

Beständigkeit gegen UV-Strahlung (UV-A) nach DIN EN ISO 16474-3 t= 100 h; t= 200 h	Farbmessung nach DIN EN ISO 18314-1 (Soll: $\Delta E_{ab} < 1,5$) Glanzmessung nach DIN EN ISO 2813 (Glanzverlust <50%)
---	---

Die letzte Prüfung beinhaltete die Prüfung der UV-Beständigkeit (UV-A-Strahlung) und die damit verbundene Auswerteprüfungen. Stellt sich nach den Tests im Ausgangszustand oder nach den Auslagerungsversuchen heraus, dass es nach bestimmten Prüfzyklen zum Versagen der Pulverlackierung führen, werden diese Fehler mikroskopisch analysiert, siehe Tabelle 5.

Tab. 5: Charakterisierungsmethoden nach verschiedenen Versuchen

Prüfung	Zielvorhabe/Auswertung
Lichtmikroskopie	Charakterisierung von Oberflächenfehlern
Rasterelektronenmikroskopie	Charakterisierung von Oberflächenfehlern

2. Charakterisierung von EcoCoat-Komponenten

Für die Charakterisierung der einzelnen nachhaltigen Pulverlackbestandteile wurden zunächst Morphologie und Aspektverhältnis mittels Rasterelektronenmikroskopie mit etablierten Pulverlackrohstoffen verglichen (siehe dazu Tab.1 und Tab. 2). Weiterhin geben thermische Beständigkeit und Mischbarkeit der in Frage kommenden Komponenten für Bindemittel, Füllstoffe, Pigmente und Additive Auskunft über die Eignung. Das Kriterium der Mischbarkeit wird durch Applikation auf Prüfblechen bewertet.

2.1 Morphologie, Aspektverhältnis, thermische Beständigkeit und Mischbarkeit

Für die Bestimmung von Größe, Morphologie und Aspektverhältnis wurden mittels Rasterelektronenmikroskop (FEI XL30 und Zeiss EVO15) alle in Tab. 1 aufgelisteten Materialien untersucht und mit am Markt etablierten Produkten (Tab. 2) verglichen. Die folgenden Abbildungen (Abb. 1 – Abb. 5) zeigen die untersuchten Pigmente.

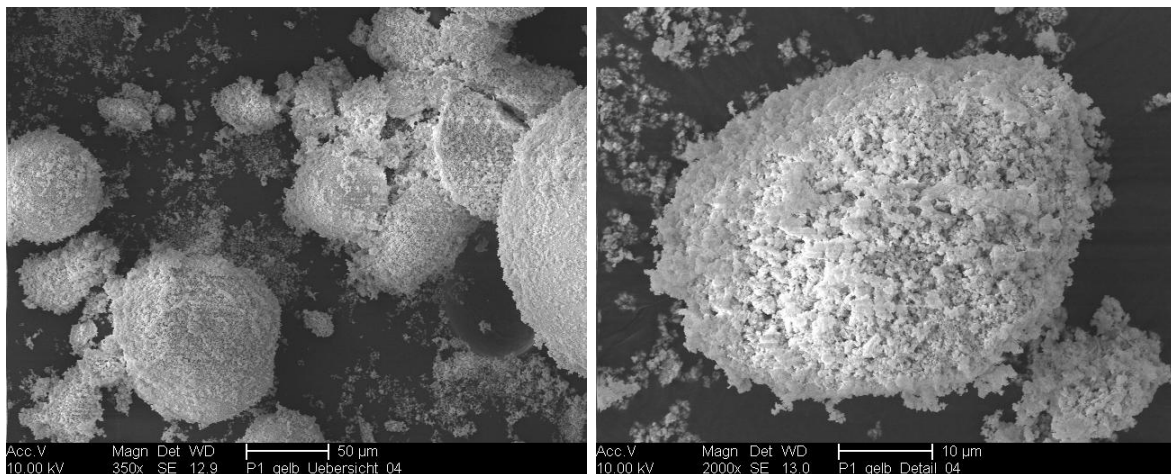


Abb. 1: REM-SE-Aufnahmen: Gelbpigment Sicopal Gelb L1100; Übersicht (links), Detail (rechts)

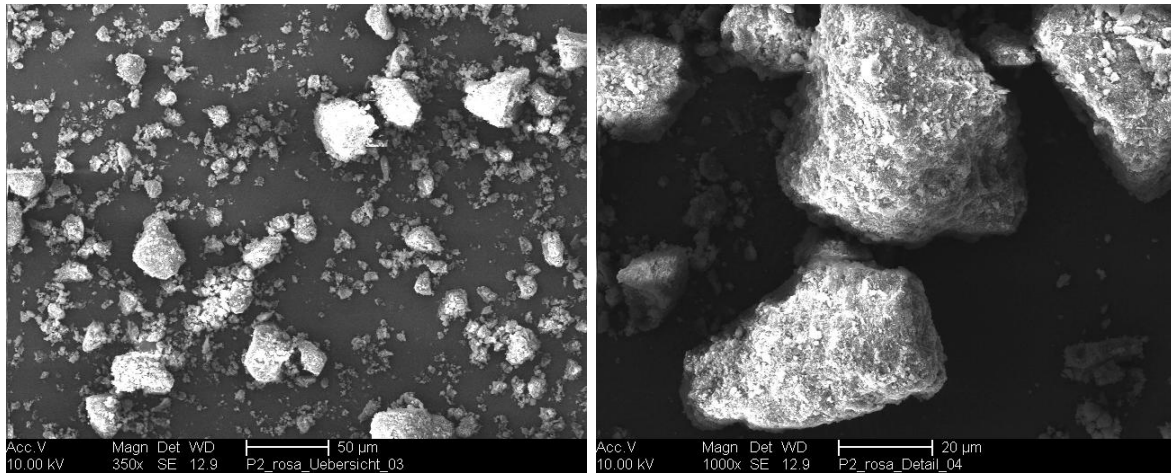


Abb. 2: REM-SE-Aufnahmen: Rosapigment Hostaperm Rosa E; Übersicht (links), Detail (rechts)

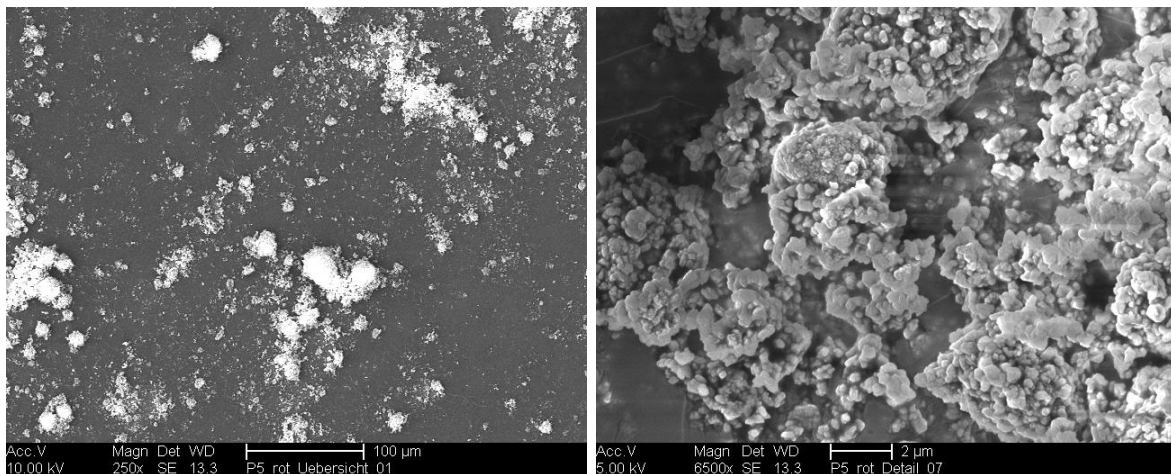


Abb. 3: REM-SE-Aufnahmen: Rotpigment Novoperm Rot HF3S 70; Übersicht (links), Detail (rechts)

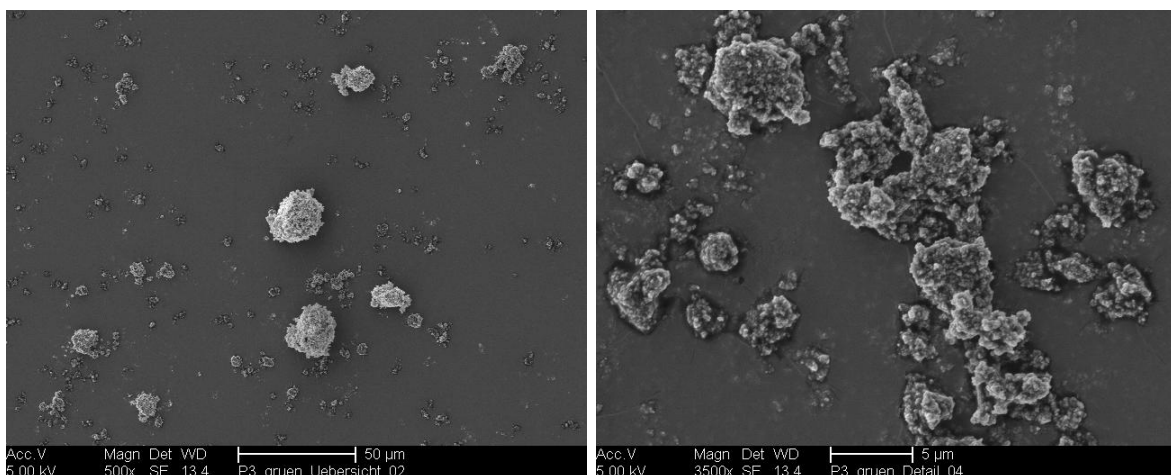


Abb. 4: REM-SE-Aufnahmen: Grünpigment Heliogen Grün L8731; Übersicht (links), Detail (rechts)

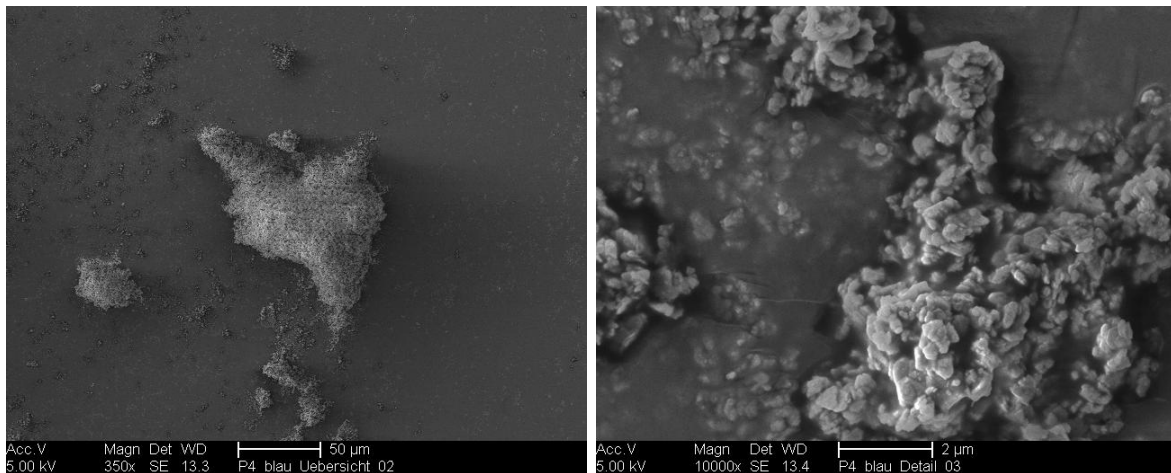


Abb. 5: REM-SE-Aufnahmen: Blaupigment Sicopal Blau L6210; Übersicht (links), Detail (rechts)

Entscheidend für den möglichen Einsatz des Materials sind Partikelform, Partikelgröße und die Größenverteilung der Partikel. Es konnte festgestellt werden, dass alle getesteten Vergleichspigmente in loser Schüttung zu Agglomerationen neigen. Die Oberflächen sind dabei rau bis kantig und die Größenverteilung inhomogen bei Partikelgrößen im Bereich einiger 100 nm bis zu 30 µm. Der Wert von 30 µm Partikelgröße wurde bereits im Vorfeld des Vorhabens als Grenzwert angedacht. In Anbetracht einer möglichen Zielschichtdicke des Gesamtschichtaufbaus des Endprodukts muss zwingend vermieden werden, dass einzelne Partikel die Möglichkeit haben, den Querschnitt der Beschichtung zu überbrücken und so ohne Bindemittelmatrix das Eindiffundieren von Feuchtigkeit in die Schicht ermöglichen. Dies würde unweigerlich zum Funktionsverlust der Beschichtung führen und Korrosionseffekte in den jeweils beschichteten Materialien nach sich ziehen. Keines der Pigmente zeigt ein ausgeprägtes Aspektverhältnis der Partikel.

Die folgenden Abbildungen (Abb. 6 – Abb. 16) zeigen REM-Aufnahmen bzw. eine Auswahl der EcoCoat-Komponenten. Die Auswahl beruht dabei auf erfolgreichen weiteren Testreihen, die sich im Laufe des Projekts ergaben.

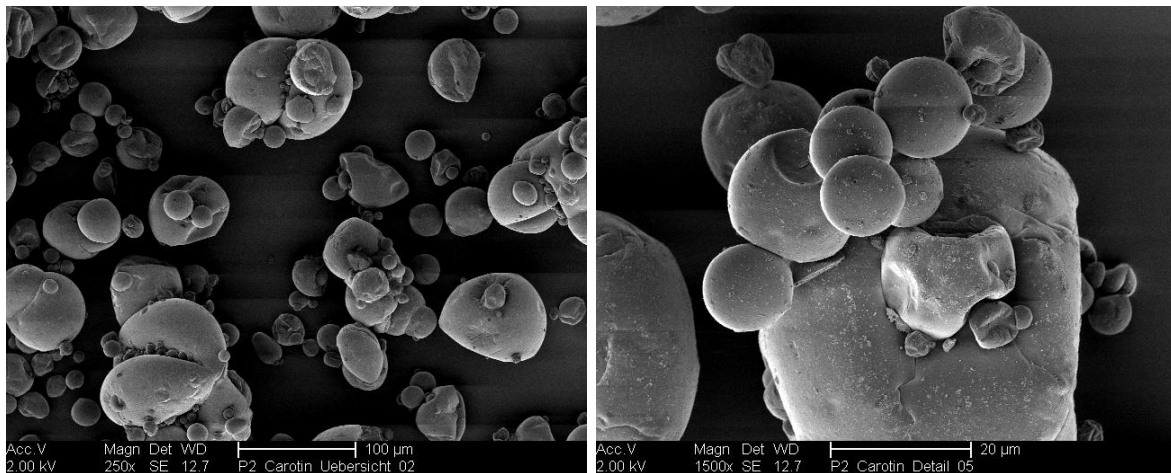


Abb. 6: REM-SE-Aufnahmen: Gelbpigment Carotin; Übersicht (links), Detail (rechts)

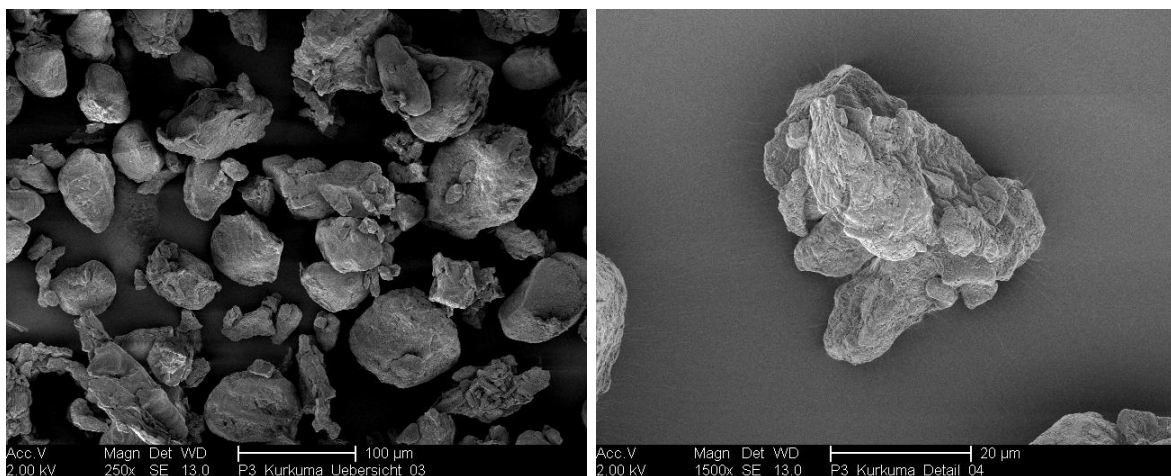


Abb. 7: REM-SE-Aufnahmen: Gelbpigment Curcumin; Übersicht (links), Detail (rechts)

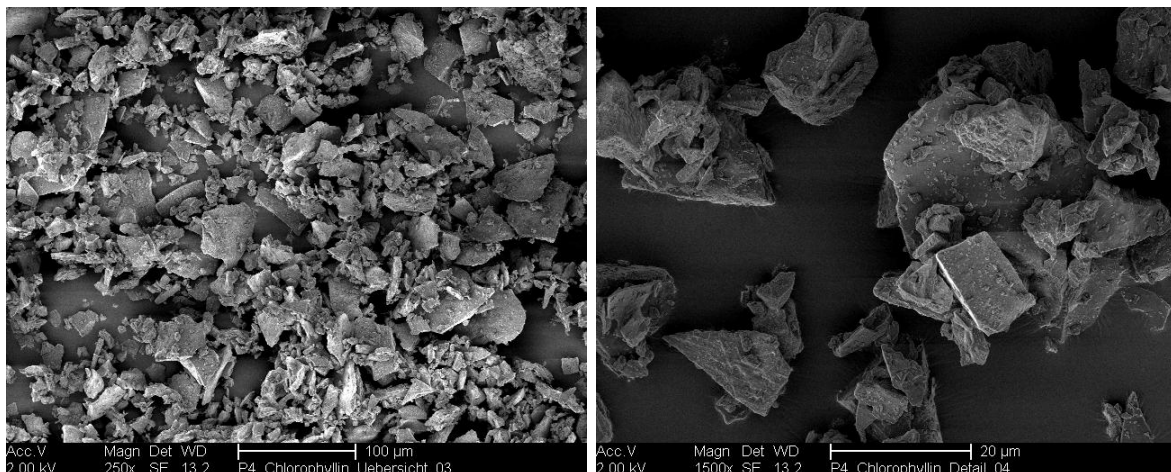


Abb. 8: REM-SE-Aufnahmen: Grünpigment Chlorophyllin; Übersicht (links), Detail (rechts)

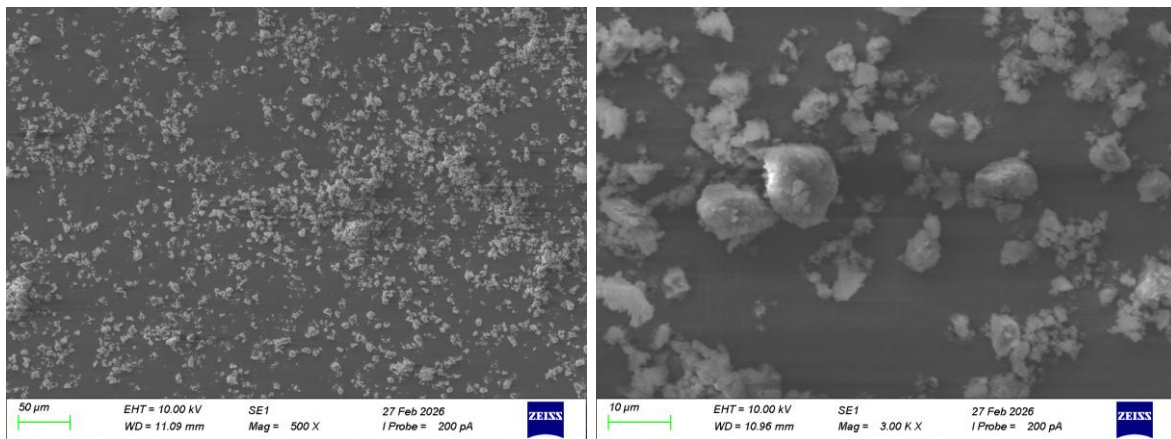


Abb. 9: REM-SE-Aufnahmen: Braunpigment Lignin I; Übersicht (links), Detail (rechts)

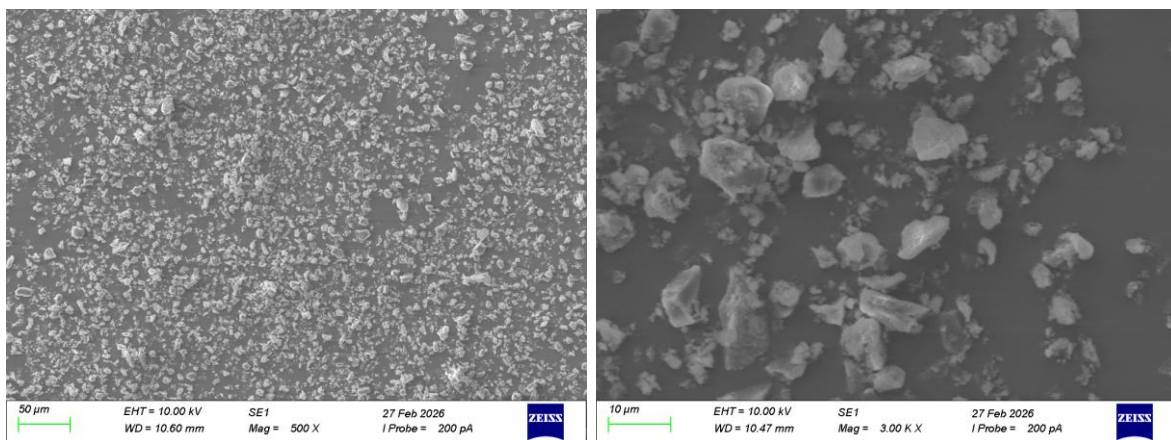


Abb. 10: REM-SE-Aufnahmen: Braunpigment Lignin II; Übersicht (links), Detail (rechts)

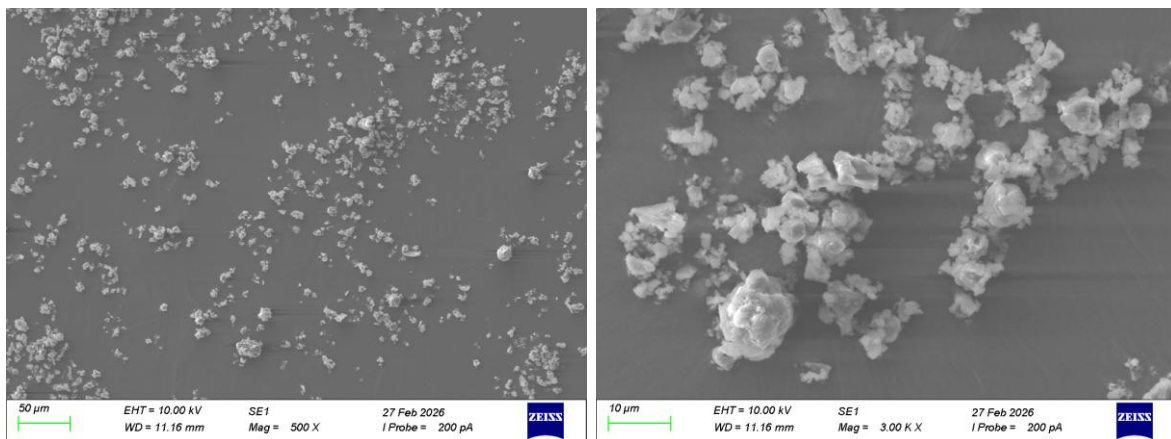


Abb. 11: REM-SE-Aufnahmen: Braunpigment Lignin III; Übersicht (links), Detail (rechts)

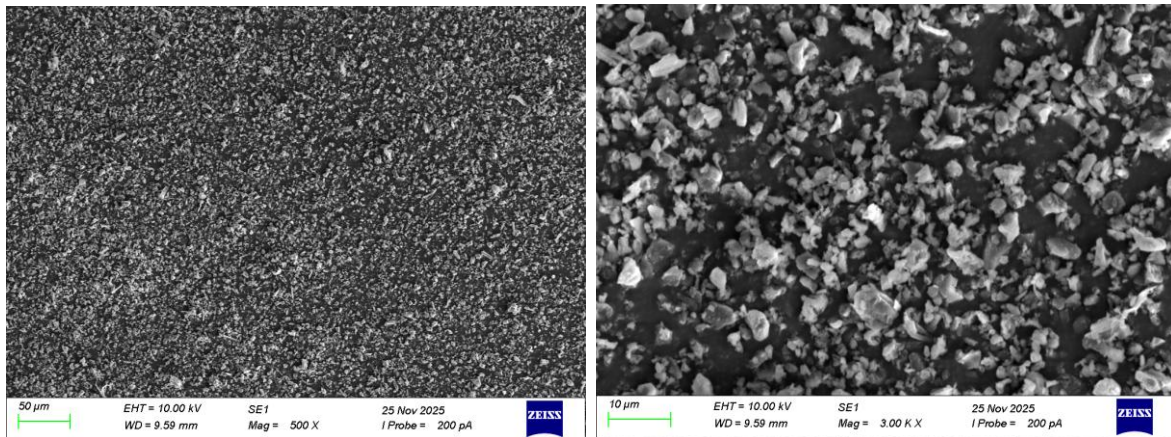


Abb. 12: REM-SE-Aufnahmen: Braunpigment Lignin IV; Übersicht (links), Detail (rechts)

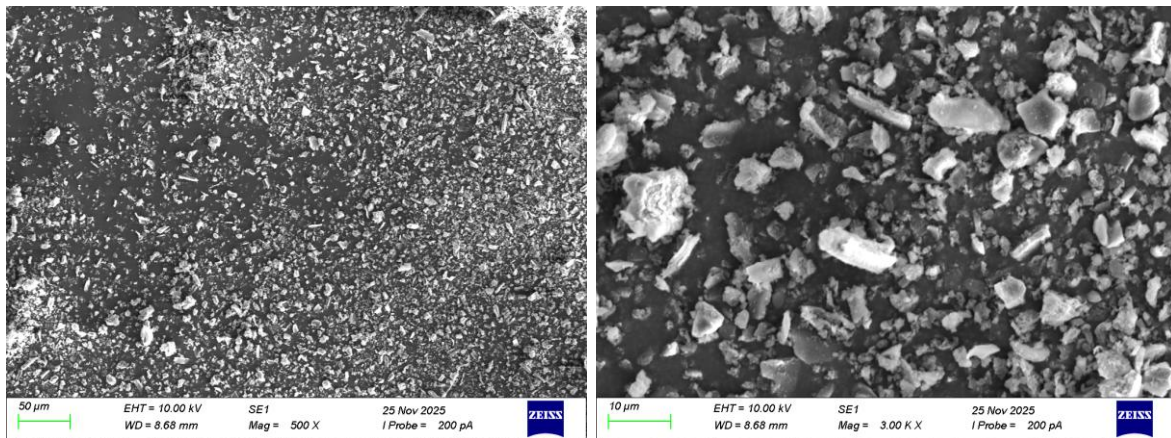


Abb. 13: REM-SE-Aufnahmen: Braunpigment Lignin V; Übersicht (links), Detail (rechts)

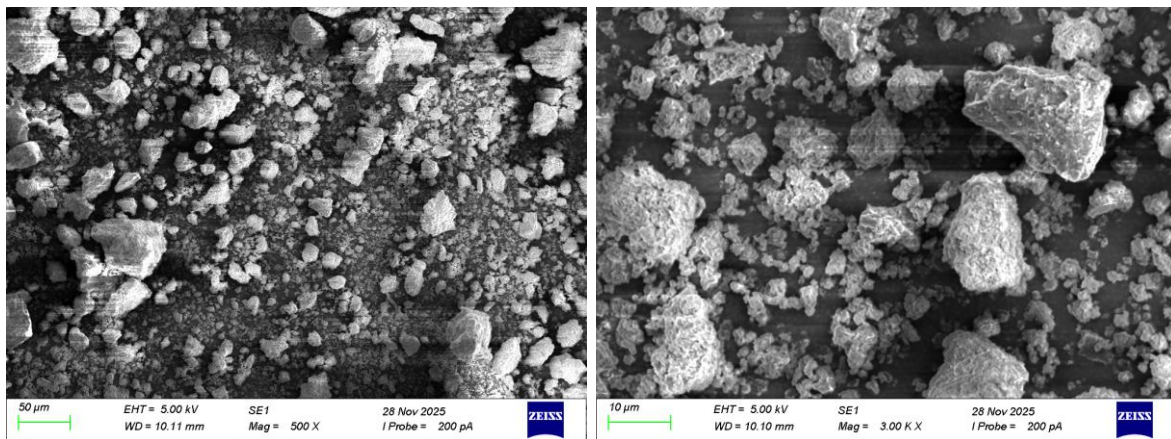


Abb. 14: REM-SE-Aufnahmen: Blaupigment Indigo; Übersicht (links), Detail (rechts)

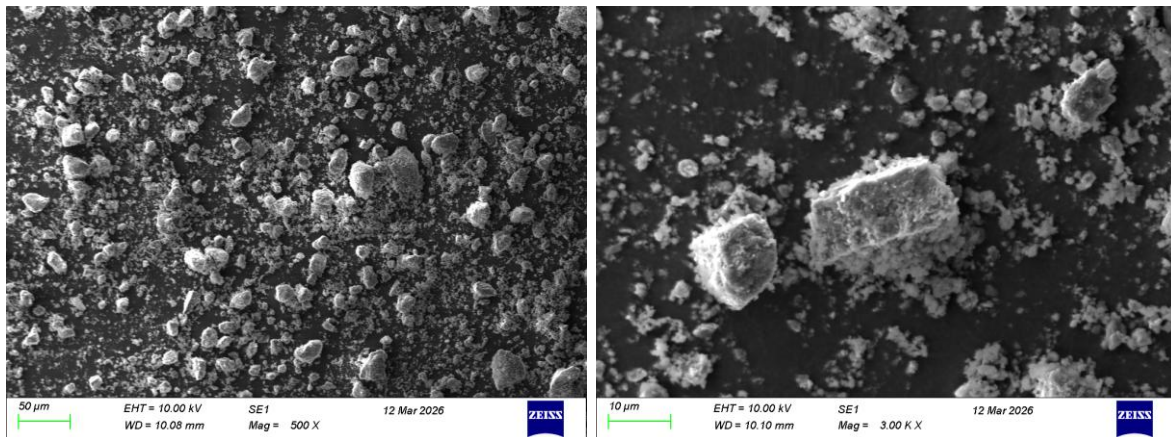


Abb. 15: REM-SE-Aufnahmen: Schwarzpigment Ruß; Übersicht (links), Detail (rechts)

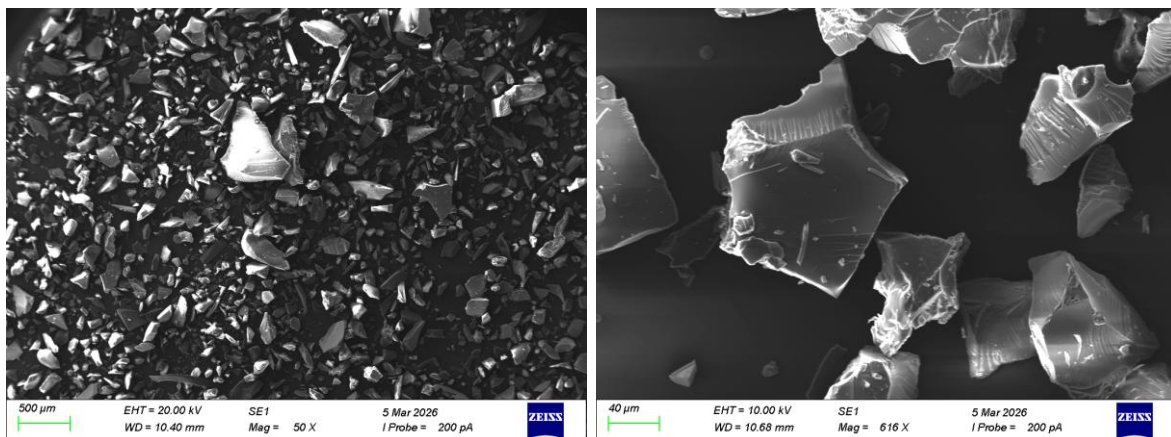


Abb. 16: REM-SE-Aufnahmen: Bindemittel rPET; Übersicht (links), Detail (rechts)

Die Abbildungen zeigen wesentliche Unterschiede im Vergleich zu den marktüblichen Pigmenten. So sind die Partikelgrößen teilweise erheblich größer (bis zu 100 µm) und die Oberflächen teilweise glatt (vgl. Abb. 6 - Carotin und Abb. 7 - Curcumin). Insgesamt zeigen sich oft inhomogene Größenverteilungen mit erheblichen Schwankungen. Partikelgrößen im Submikrometerbereich konnten nicht nachgewiesen werden.

Aus den Ergebnissen wurde ein Siebprozess als direkte Maßnahme abgeleitet. So konnten fehlerhafte Beschichtungssysteme und sichtbare Einzelpigmente bereits vor weiteren Arbeitsschritten ausgeschlossen werden. Alle Materialien, welche zu große Partikelgrößen aufwiesen, wurden in mehreren Schritten in einem Siebturm an der OVGU auf Partikelgrößen < 30 µm gebracht und erst danach an die Projektpartner weitergegeben. Für eine exakte Aussage zu den Größenverteilungen im Ausgangszustand und nach dem Sieben wurden Messungen zur Partikelgrößenverteilung mit dem Mastersizer 3000 der Fa. Malvern Panalytical durchgeführt.

Die Größenverteilung wurde dabei nach Lösung in VE-Wasser bestimmt. Abbildung 17 zeigt exemplarisch die Auswertung zur Bestimmung der Größenklasse für die Untersuchung von Lignin I.

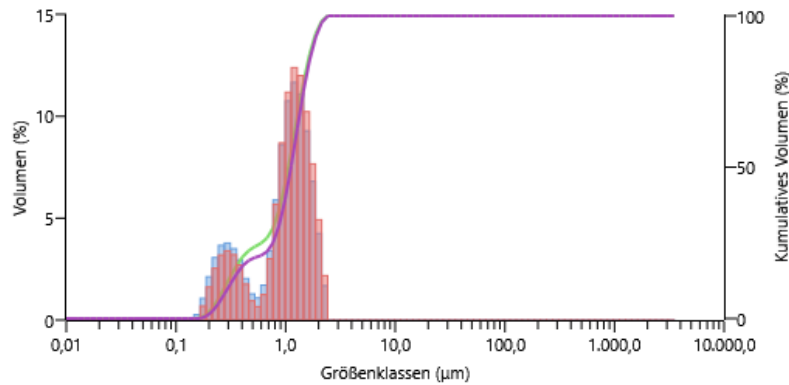


Abb. 17: Bestimmung der Partikelgrößenverteilung von Lignin IV

Da Pulverlacke zur Vernetzung des Gesamtsystems über einen Zeitraum von mindestens 10 Minuten hohen Temperaturen (bis zu 200 °C) ausgesetzt sind, wurden alle Pigmente und Füllstoffe einer Prüfung der thermischen Beständigkeit unterzogen. Die Prüfung erfolgte in einem Kammerofen bei einer Auslagerungstemperatur beginnend bei $T = 110\text{ °C}$ und einer Haltedauer von $t = 15\text{ min}$. Nach jeweils 15 min wurden die Proben aus der Ofenlagerung entnommen und eine visuelle Veränderung der Farbe zu einem unbelasteten Vergleichsstandard bewertet. Im nächsten Prüfzyklus wurde schließlich die Temperatur um $T = 10\text{ °C}$ erhöht und die Proben erneut für $t = 15\text{ min}$ ausgelagert. Abbildung 18 zeigt das experimentelle Vorgehen exemplarisch anhand von Carotinpulver. Sobald eine wesentliche Veränderung eintrat, wurde dies erfasst und die Temperatur des vorherigen Zyklus als Grenzwert zur Beständigkeit dokumentiert.

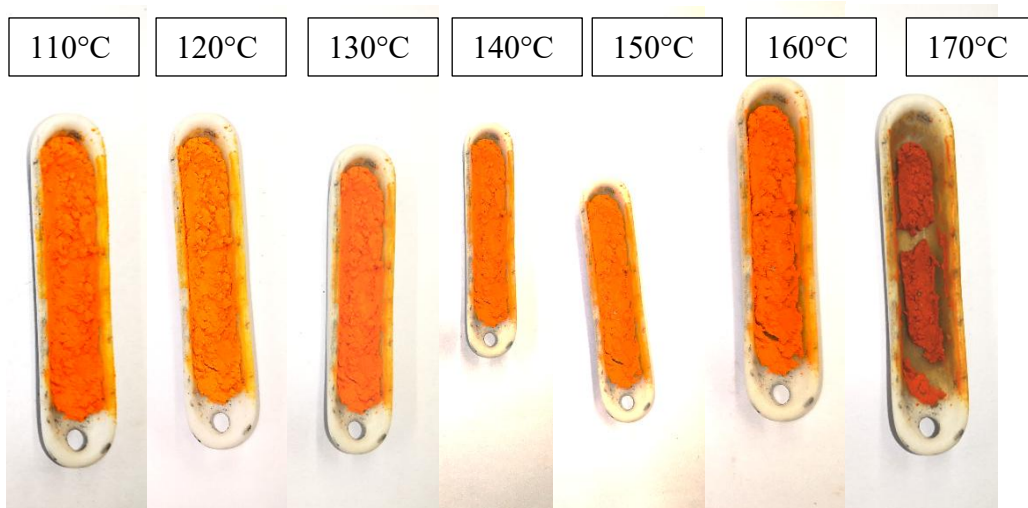


Abb. 18: Prüfung der thermischen Beständigkeit von Carotinpulver

Es wurde untersucht, inwieweit natürliche Pigmente für den Einsatz in einem Pulverlack geeignet sind. Hierzu erfolgte die Prüfung anhand einer Richtformulierung für Fassadenpolyester der Firma Ganzlin. Das Pigment stellte dabei den einzigen biobasierten Rohstoff innerhalb der Rezeptur dar. Sämtliche Rezepturbestandteile wurden vorgemischt, extrudiert, vermahlen und anschließend beschichtet. Die hergestellten Musterbleche wurden visuell hinsichtlich der Eignung der Pigmente bewertet. Als Beurteilungskriterien dienten dabei die Oberfläche, der Glanz sowie die Färbung der Beschichtungen.



Abb. 19: Beschichtete Versuchsbleche mit Curcuminpigmentierung (links), Chlorophyllin-pigmentierung (Mitte) und Ligninpigmentierung (rechts)

Die folgende Tabelle (Tab. 6) fasst die thermische Beständigkeit und die Mischbarkeit der untersuchten Pulverlackkomponenten zusammen.

Tab. 6: Zusammenfassung der Ergebnisse zu Kapitel 2.1

Material	thermische Beständigkeit	gleichmäßig färbend?	Morphologie und Aspektverhältnis
Curcumin	bis 160°C	Ja	geeignet
Chlorophyllin	bis 180°C	Teilweise	geeignet
Chlorophyll	bis 170°C	Nein	geeignet
Carotin	bis 160°C	Nein	geeignet
Betanin	bis 160°C	Nein	bedingt geeignet
Capsanthin	bis 160°C	Nein	bedingt geeignet
Spirulina (Phycocyanin)	bis 170°C	Nein	geeignet
Indigo	>180°C	Ja	geeignet
Anchan	bis 160°C	Nein	ungeeignet
Bixin	bis 160°C	Ja	geeignet
Lignin I	bis 170°C	Ja	geeignet
Lignin II	bis 170°C	Ja	geeignet
Lignin III	bis 170°C	Ja	geeignet
Lignin IV	bis 170°C	Ja	geeignet
Lignin V	bis 170°C	Ja	geeignet
Akazienpulver	>180°C	Nein	geeignet
Maismehl	>180°C	Nein	geeignet
Eierschalpulver	>180°C	Nein	geeignet
Cellulose	>180°C	Nein	geeignet
Flammruß	>180°C	Ja	geeignet

Es zeigte sich, dass der Großteil der untersuchten Stoffe eine gute Eignung zur weiteren Verwendung aufweist. Nicht erwartbar war, dass beispielsweise Betanin (Rote Bete) kaum färbende Wirkung besaß. Das beschichtete Prüfblech zeigte eine eher beige Farbe mit deutlichen, rot-violetten Punkten. Die insgesamt aussichtsreichen Ergebnisse konnten in die Richtrezeptur eingebracht und zur Überprüfung durch die oben beschriebenen Methoden überführt werden.

Bereits in diesem Projektabschnitt konnte eine gute Farbvielfalt erzielt werden und durch die Verwendung der Komponenten als Pigment und/oder Bindemittel (einzeln und in Kombination) war abzusehen, dass ein Einbringen von biobasierten

Komponenten in eine Pulverbeschichtung grundsätzlich umsetzbar ist. Die Schichten zeigten sich bereits nach der Applikation als festhaftend und homogen in der Schichtdicke, sowie im Verlauf. Abbildung 20 zeigt exemplarisch eine Farbvariation.



Abb. 20: Farbvariationen an beschichteten Versuchsblechen

2.2 Materialprüfungen

Um das Projektziel von Pulverbeschichtungen mit mindestens 90–95% nachwachsenden oder recycelten Anteilen zu realisieren, wurden die in Kapitel 2.1 als verwendbar deklarierten Materialien einzeln oder miteinander kombiniert in ein biobasiertes oder recyceltes Bindemittel eingebracht. Grundlage für die Bildung einer erfolgreichen Rezeptur bzw. Formulierung waren passende Morphologie, Aspektverhältnis, thermische Beständigkeit, Mischbarkeit aller Komponenten und die damit verbundene Applizierbarkeit. Als Erfolgskriterium wurde eine einfache visuelle Bewertung des vernetzten Systems hinsichtlich Deckverhalten, Gleichmäßigkeit, Fehleranzahl und Farbkonstanz der Beschichtung festgelegt.

Gemäß der Tabellen 3 und 4 wurden die beschichteten Systeme zur Beurteilung der Eignung für den Einsatz in industriellen Maßstäben weiteren Prüfungen unterzogen. Dabei stand zunächst die Überprüfung der Haftung im Anlieferungszustand und nach Kondenswasserkonstantklimaprüfung im Fokus. Die folgende Abbildung (Abb. 21) zeigt das Bewertungskriterium für eine erfolgreich und eine nicht erfolgreich bestandene Gitterschnittprüfung.

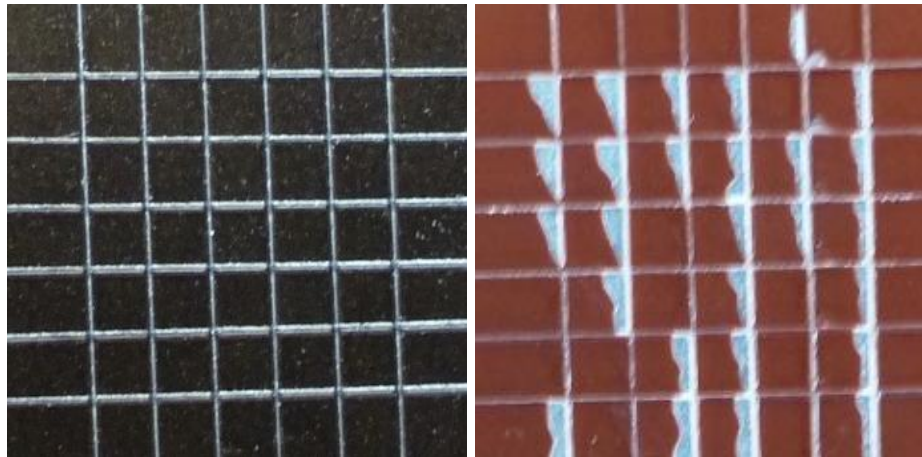


Abb. 21: Haftungsverhalten im Anlieferungszustand: Bewertung GT 0 (links) und beispielhaft GT 3 (rechts)

Das Prüfergebnis (Abb. 21, links) ist hier mit GT 0 (hervorragend, die Schnittländer sind vollkommen glatt; keines der Quadrate des Gitters ist abgeplatzt.) zu bewerten. Nach dieser ersten Bewertung wurden alle erfolgreich getesteten Systeme zur Auslagerung in ein Kondenswasserkonstantklima (CH) nach DIN EN ISO 6270-2 gebracht. Für insgesamt 480 h wurden alle Formulierungen somit bei $T = 40 \pm 3 \text{ °C}$ und etwa 100 % relativer Feuchte mit Betauung der Probekörper ausgelagert. Nach 240 h erfolgte jeweils eine visuelle Zwischenbewertung aller Proben hinsichtlich Veränderung, Blasengrad und Rostgrad. Zum Ende der Auslagerung wird diese visuelle Bewertung wiederholt und zusätzlich die Farb- und Glanzänderung sowie die Haftung im Gitterschnittverfahren geprüft. Als Vergleich wird stets das Rückstellmuster im Ausgangszustand herangezogen. Abbildung 22 zeigt den Vergleich der beschichteten Versuchsbleche in einer Fotodokumentation. Bei der hier abgebildeten Formulierung handelt es sich um eine Kombination aus rPET und Rußpigment als Lasurformulierung (ohne Füllstoff).



Abb. 22: Bewertung nach 480 h Kondenswasserkonstantklima zu einem unbelasteten Vergleichsstandard (links)

Neben der Lagerung in Kondenswasserkonstantklima wurden die Proben Korrosionsprüfungen in künstlichen Atmosphären, d.h. in Essigsäure-Salzsäure-Nebelprüfung (AASS) ausgelagert. Der sogenannte AASS-Test beinhaltet dabei einen zusätzlichen Anritz, der auf dem Prüfblech eingebracht wird. Für Aluminiumproben müssen zwei rechtwinklig zueinander liegende, aber sich nicht kreuzende Ritzlinien angebracht werden. Eine Ritzlinie muss parallel zur Walzrichtung und die andere im rechten Winkel dazu angebracht werden. Dazu wurde ein Ritzstichel nach *Sikkens* mit einer Hartmetallschneide und Breite von 0,5mm genutzt. Abschließend nach 480h Prüfzeit wird erneut eine visuelle Veränderung des Systems einschließlich Blasengrad, Rostgrad und Unterwanderung am Ritz bewertet. Abbildung 23 zeigt exemplarisch den visuellen Zustand bei einer Zwischenbewertung nach einer AASS-Prüfung.

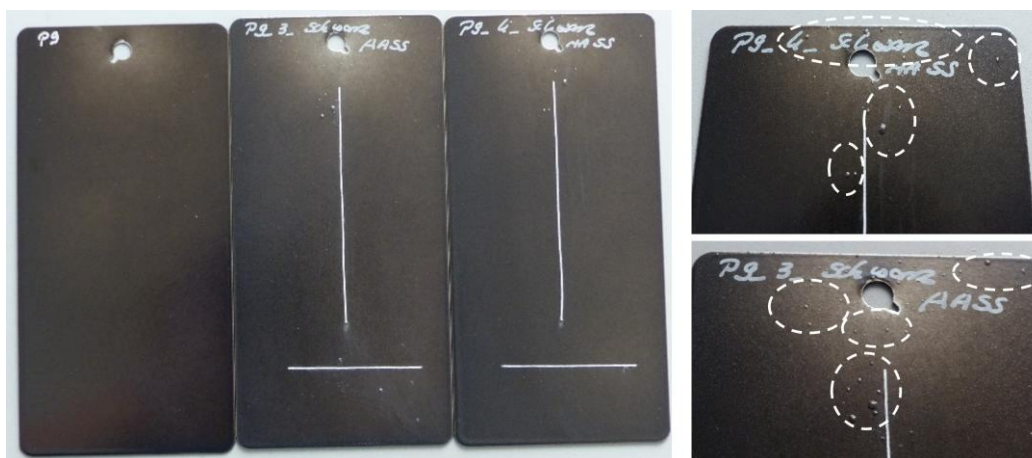


Abb. 23: Zwischenbewertung nach 240 h AASS-Test zu einem unbelasteten Vergleichsstandard

Markiert ist hier im rechten Bildbereich eine Blasenbildung, welche zu einem negativen Testergebnis führt.

Eine dritte Auslagerungsprüfung ist die beschleunigte Bewitterung mit UV-A-Strahlung nach DIN EN ISO 16474-3 (Verfahren A: künstliche Bewitterung). Ein Zyklus bestand aus 4 h trocken Bestrahlung bei 60 °C und 4 h Kondensation bei 50 °C. Als Lampentyp wurde UVA-340 verwendet. Somit war eine Bestrahlung von 0,83 W/m²/nm bei 340 nm sichergestellt. Die Prüfdauer betrug abweichend zum Prüfplan nur 100 h, da bereits nach dieser Zeit ein Abbau der Beschichtung ersichtlich war. Die Kriterien zum Bestehen der Prüfung liegen in der Bewertung von visuellen Veränderungen sowie einer Farb- und Glanzmessung gegenüber einem unbelasteten Standard. Die folgende Abbildung (Abb. 24) zeigt jeweils ein Beispiel für eine gute UV-Beständigkeit und eine schlechtere Resistenz.



Abb. 24: Visueller Zustand nach UV-A-Belastung; links nach 300 h ohne visuelle Veränderung, rechts nach 100 h mit starker visuell wahrnehmbarer Veränderung

Das erste Prüfblech von links zeigt jeweils den Messstandard und ist somit ohne Einwirkung der UV-Belastung.

Nachdem sich eine Einordnung der in Frage kommenden EcoCoat-Varianten abzeichnete, wurde eine Auswahl von Formulierungen zusätzlichen Abrieb- und Beständigkeitsprüfungen unterzogen. Die Prüfungen sind dabei an realen Anwendungsszenarien für Oberflächennutzungen orientiert. Zum einen handelte es sich dabei um die Crockmeterprüfung nach DIN EN ISO 105 X12; ein standardisiertes Prüfverfahren für Abriebprüfungen. Bei diesem Verfahren wird der Abrieb durch den Druck eines Fingers simuliert. Bei ausgeführten Bewegungen (Doppelhüben) wird die Oberfläche sowohl trocken mit Reibgewebe als auch nass (mit Reibgewebe getränkt

in künstlicher Handschweißlösung) gerieben. Das Bewertungskriterium dieser Prüfung ist eine visuelle Veränderung der Oberflächenbeschichtung sowie das Anbluten bzw. Verfärben des weißen Reibgewebes, welches sich auf dem ausführenden Reibstift befindet. Abbildung 25 zeigt ein charakteristisches Ergebnis nach der Prüfung.



Abb. 25: Visueller Zustand nach Crockmeterprüfung mit 100 Doppelhüben; trocken

Alle mithilfe der Crockmeterprüfung untersuchten Beschichtungen zeigten eine gute bis sehr gute Abriebbeständigkeit in Form von keinen oder sehr geringen sichtbaren Veränderungen (Reibspuren) der Oberfläche. Ein Anbluten des Reibgewebes war nie zu verzeichnen.

Die Chemikalienbeständigkeitsprüfung wird ebenfalls herangezogen, um die Resistenz gegen anwendungsrelevante Medien zu beurteilen. Diese wurde als Tropfentest nach DIN EN ISO 2812-4 (Verfahren A) durchgeführt. Bei dieser Prüfung wurde mittels Tropfenbildung das jeweilige Medium auf die Oberfläche aufgebracht und für insgesamt $t = 5$ min gehalten. Anschließend wurden die Medien mit Wasser abgespült und die Oberfläche getrocknet. Abschließend wurde die visuelle Veränderung bewertet. Die folgende Abbildung (Abb. 26) zeigt beispielhaft die Auswertung der Prüfung.

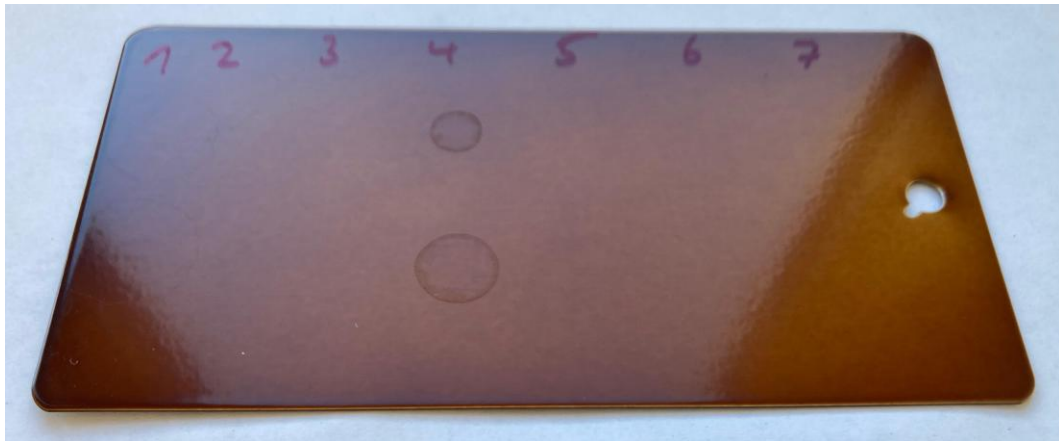


Abb. 26: Visueller Zustand nach Tropfentest zur Überprüfung der Chemikalienbeständigkeit

Tabelle 7 listet die eingesetzten Chemikalien auf.

Tab. 7: Liste der eingesetzten Chemikalien

Position	Chemikalie / Medium
1	Isopropanol
2	Wasserstoffperoxid
3	destilliertes Wasser
4	Aceton
5	Zitronensäure (20%)
6	Fit-Wasser-Lösung
7	Kochsalzlösung

Alle untersuchten Systeme zeigten für die Beständigkeit gegen die meisten Chemikalien gute bis sehr gute Ergebnisse. Eine Ausnahme bildete die Überprüfung der Beständigkeit gegenüber Aceton, welche teilweise starke visuell sichtbare Veränderungen der Oberflächen zur Folge hatte.

In Tabelle 8 ist eine zusammenfassende Auswahl an Prüfergebnissen verschieden pigmentierter Beschichtungssysteme hinsichtlich ihrer Haftfestigkeit im Ausgangszustand sowie ihrer Beständigkeit gegenüber künstlicher Bewitterung und Feuchtebeanspruchung dargestellt.

Tab. 8: Prüfergebnisse für Ausgangszustand, nach Bewitterung und Kondenswasserprüfung

	AW	nach 100h DIN EN ISO 16474-3		nach 240h DIN EN ISO 6270-2				nach 480h DIN EN ISO 6270-2				
Versuch	DIN EN ISO 2409 Haftfestigkeit	DIN EN ISO 2813 Glanzverlust	DIN EN ISO 18314-1 Farbänderung	vis. Veränderung DIN EN ISO 4628-1	Blasengrad DIN EN ISO 4628-2	Rostgrad DIN EN ISO 4628-3	vis. Veränderung DIN EN ISO 4628-1	Blasengrad DIN EN ISO 4628-2	Rostgrad DIN EN ISO 4628-3	Farbänderung DIN EN ISO 18314-1	Glanzverlust DIN EN ISO 2813	DIN EN ISO 2409 Haftfestigkeit
V1.1_gelb_s	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+
V1.2_gelb_s	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+
V2.1_gelb	+	+	-	+	+	+	+	+	+	+	+	+
V2.2_gelb	+	+	-	+	+	+	+	+	+	+	+	+
V1.1_grün_s	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+
V1.2_grün_s	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+
V2.1_grün	+	+	-	+	o	+	+	o	+	-	+	+
V2.2_grün	+	+	-	+	o	+	+	o	+	+	+	+
V2.1.1_gelb	+	+	-	+	+	+	+	+	+	o	+	+
V2.2.1_gelb	+	+	-	+	+	+	+	+	+	+	+	+
V3_orange	+	+	-	+	+	+	o	+	+	-	+	+
V3.1_orange	+	+	-	+	+	+	o	+	+	-	+	o
V4_grün	+	-	-	-	+	+	-	+	+	-	+	+
V4.1_grün	+	-	-	-	+	+	o	+	+	-	+	+
V5.1_Bixin	+	+	-	+	+	+	+	+	+	o	+	+
V5.2_Bixin	+	+	-	o	+	+	o	+	+	+	+	+
V5.3_Bixin	+	+	-	o	+	+	o	+	+	-	+	+
V6.1_Indigo	+	+	o	+	+	+	+	+	+	+	+	+
V6.2_Indigo	+	+	-	+	+	+	+	+	+	+	+	+
V7.1_braun	+	+	-	-	+	+	-	+	+	-	+	+
V8_schwarz	+	+	+	+	+	+	o	+	+	o	+	+
V9_schwarz	+	+	-	-	+	+	-	+	+	-	+	+
V10_schwarz	+	+	+	o	+	+	o	+	+	o	+	+
V11_braun	+	-	-	-	+	+						
V12_braun	+	-	-	-	+	+						
V13_braun	+	-	-									
V14_braun	+	+	-									
V15_braun	+	-	-	-	+	+						
V16_braun	+	-	-	-	+	+						
V17_blaue	+	+	-									
V18_blaue	+	+	-									
V19_blaue	+	+	o									
V20_blaue	+	+	-									

V21_grün	+	+	-										
V22_grün	+	+	-										
V23_grün	+	+	-										
V24_grün	+	+	-										

+ bestanden (grün), - nicht bestanden (rot), o bedingt bestanden (gelb)

Die Prüfungen erfolgten gemäß DIN EN ISO 16474-3 sowie DIN EN ISO 6270-2. Bewertet wurden Haftfestigkeit, Farbänderung, Glanzverlust, visuelle Veränderungen, Blasenbildung und Rostgrad. Die Ergebnisse zeigten durchweg eine sehr gute Haftfestigkeit aller Systeme im Ausgangszustand. Wie zu erwarten, erzielten die Standardformulierungen, gekennzeichnet durch „_s“ auch durchgehend positive Bewertungen nach den Belastungstests. Die Hauptschwierigkeit bestand in der Farbstabilität der neuen Systeme nach der künstlichen Bewitterung. Hier wurde die Bewitterungszeit von 1000h geplant auf 100h reduziert, da bereits nach 100h UV-A-Bestrahlung signifikante Farbabstände auftraten. Bei der Kondenswasserprüfung traten leichte bis mittlere Veränderungen bei den neuen Systemen auf, insbesondere hinsichtlich Farbänderung und Glanzverlust. Besonders kritischere Ergebnisse wurden bei den Varianten V4, V11, V12, V13, V15 und V16 festgestellt.

Bei allen Systemen waren Blasenbildung, Rosterscheinungen, Glanzverlust nahezu nicht vorhanden und zudem eine sehr gute Haftfestigkeit nach Kondenswasserkonstanklima.

In Tabelle 9 sind die Prüfungen mittels AASS-Prüfung nach DIN EN ISO 9227, Abriebprüfung nach DIN EN ISO 105-X12 sowie Medienbeständigkeitsprüfungen nach DIN EN ISO 2812-4 zusammengefasst.

Tab. 9: Prüfergebnisse für AASS-, Abrieb- und Medienprüfung

	nach 240h DIN EN ISO 9227			nach 480h DIN EN ISO 9227				DIN EN ISO 105 X12		DIN EN ISO 2812-4						
Versuch	DIN EN ISO 4628-1	DIN EN ISO 4628-2	DIN EN ISO 4628-3	DIN EN ISO 4628-1	DIN EN ISO 4628-2	DIN EN ISO 4628-3	DIN EN ISO 4628-8	100 Hübe dry	10 Hübe nass	Isopropanol	Wasserstoffperoxid	Dest. Wasser	Aceton	Zitronensäure (20%)	Fit-Wasser-Lösung	NaCl-Lösung 820%
V1.1_gelb_s	+	+	+	+	o	+	+	o	+							
V1.2_gelb_s	+	+	+	+	o	+	+	+	+							
V2.1_gelb	+	+	+	+	o	+	+	+	+							
V2.2_gelb	+	+	+	+	o	+	+	o	+							
V1.1_grün_s	+	+	+	+	o	+	+	+	+							
V1.2_grün_s	+	+	+	+	o	+	+	+	+							
V2.1_grün	+	+	+	+	o	+	+	+	+							
V2.2_grün	+	+	+	+	o	+	+	+	+							
V2.1.1_gelb	+	+	+	+	+	+	+	+	+							
V2.2.1_gelb	+	+	+	+	o	+	-	+	+							
V3_orange	+	+	+	+	+	+	+	+	+							
V3.1_orange	+	+	+	+	+	+	+	o	+							
V4_grün	o	+	+	-	+	+	+	+	+							
V4.1_grün	o	+	+	-	+	+	+	+	+							
V5.1_Bixin	o	+	+	+	+	+	o	o	+							
V5.2_Bixin	+	+	+	+	+	+	o	+	+							
V5.3_Bixin	o	+	+	+	+	+	o	o	+							
V6.1_Indigo	+	+	+	+	+	+	o	o	+							
V6.2_Indigo	+	+	+	+	o	+	+	+	+							
V7.1_braun	+	+	+	+	+	+	+	+	+							
V8_schwarz	+	+	+	+	+	+	o	o	+							
V9_schwarz	+	-	+	+	o	+	+	o	+							
V10_schwarz	+	+	+	+	+	+	o	+	+							
V11_braun										+	+	+	-	+	+	+
V12_braun										+	+	+	-	+	+	+
V13_braun										+	+	+	-	+	+	+

V14_braun										+	+	+	-	+	+	+
V15_braun										+	+	+	-	+	+	+
V16_braun										+	+	+	-	+	+	+
V17_blaue										+	+	+	-	+	+	+
V18_blaue										+	+	+	-	+	+	+
V19_blaue										+	+	+	-	+	+	+
V20_blaue										+	+	+	-	+	+	+
V21_grün										+	o	+	-	+	+	+
V22_grün										+	o	+	-	+	+	+
V23_grün										+	+	+	-	+	+	+
V24_grün										+	+	+	-	+	+	+

+ bestanden, - nicht bestanden, o bedingt bestanden

Die Ergebnisse zeigen insgesamt eine gute Leistungsfähigkeit der Beschichtungssysteme. Auch hinsichtlich Haftung, Oberflächenstabilität und Korrosionsbeständigkeit zeigten die meisten dieser Systeme keine relevanten Auffälligkeiten. Leichte Veränderungen, die mit gelben Bewertungen gekennzeichnet wurden, liegen weiterhin im akzeptablen Bereich und beeinflussen die Gesamtbewertung nicht wesentlich. Schwächen zeigten sich hauptsächlich bei der Beständigkeit gegenüber Aceton, während Prüfungen mit den anderen Medien überwiegend positive Ergebnisse lieferten.

3. Ökologische und sozioökonomische Ergebnisse

Die Betrachtungen von Pulverbeschichtungen in diesem Projekt umfassten nicht nur Herstellung, Funktion und optische Kriterien. Zusätzlich ging es im Forschungsprojekt EcoCoat insbesondere darum, den Einsatz von nachwachsenden oder recycelten Rohstoffen sozioökonomisch und ökologisch zu betrachten.

3.1 Sozioökonomie

Pulverbeschichtungen stellen ein etabliertes Verfahren der Oberflächenveredelung dar, das sich durch Lösemittelfreiheit, hohe Materialeffizienz und gute mechanische Eigenschaften auszeichnet. Vor dem Hintergrund wachsender ökologischer Anforderungen rücken zunehmend Beschichtungssysteme in den Fokus, die nicht auf petrochemischen Rohstoffen basieren, sondern aus biogenen oder recycelten Materialien hergestellt werden. Diese Entwicklung ist nicht nur technologisch, sondern auch sozioökonomisch relevant, da sie Auswirkungen auf Wertschöpfungsketten, Lieferketten, Beschäftigung, Kostenstrukturen und gesellschaftliche Akzeptanz hat.

Ein zentraler Vorteil biobasierter und recycelter Pulverbeschichtungen liegt in ihrer potenziell verbesserten Umweltbilanz. Durch die Substitution fossiler Rohstoffe können Treibhausgasemissionen entlang des Lebenszyklus reduziert werden, insbesondere wenn nachwachsende Rohstoffe oder Sekundärmaterialien eingesetzt werden. Dies kann Unternehmen dabei helfen, regulatorische Anforderungen zu erfüllen und sich im Kontext von Klimaschutzstrategien wettbewerbsfähig zu positionieren. Gleichzeitig entsteht eine erhöhte Nachfrage nach biobasierten Rohstoffen, was neue wirtschaftliche Impulse für die Land-, Agrar- und Forstwirtschaft sowie für Recyclingindustrien generieren kann. In strukturschwachen Regionen könnten dadurch zusätzliche Einkommensquellen und Arbeitsplätze entstehen.

Ein weiterer zentraler Punkt ergibt sich aus der zunehmenden Bedeutung nachhaltiger Produkte für Konsumentinnen und Konsumenten sowie industrielle Abnehmer. Unternehmen, die umweltfreundliche Beschichtungslösungen anbieten, können ihr Markenimage stärken und sich von Wettbewerbern differenzieren. Dies gilt insbesondere in Branchen mit hohem Nachhaltigkeitsdruck, etwa im Bauwesen, in der Automobilindustrie oder im Konsumgütersektor. Darüber hinaus können biobasierte Pulverbeschichtungen zur Förderung einer Kreislaufwirtschaft beitragen, indem sie Recyclingströme integrieren und die Abhängigkeit von Primärressourcen reduzieren.

Demgegenüber stehen jedoch auch Herausforderungen und potentielle Nachteile. Ein wesentliches Problem ist die bis vor dem beginnenden Iran-Konflikt (28.02.2026) häufig noch höhere Kostenstruktur biobasierter oder recycelter Rohstoffe im Vergleich zu petrochemischen Alternativen. Diese Kosten können durch begrenzte Verfügbarkeit, geringere Skaleneffekte und aufwendigere Verarbeitungsprozesse bedingt sein. Für kleine und mittlere Unternehmen kann dies eine Markteintrittsbarriere darstellen. Im Rahmen des Forschungsprojekts wurde eine Umfrage erarbeitet, die mögliche Hürden des Projektansatzes von erzeugender und verbrauchender Industrie einordnet. Dazu wurden über eine Onlinebefragung im Zeitraum vom 01.01.2025 – 30.05.2025 mehr als 50 Unternehmen aus verschiedenen Regionen Deutschlands befragt. Der Fragebogen umfasste insgesamt 13 Fragen, die sich sowohl auf technische Aspekte, als auch auf die Akzeptanz der Thematik bezogen. Ein Teil der Ergebnisse ist in Abbildung 27 zusammengefasst.

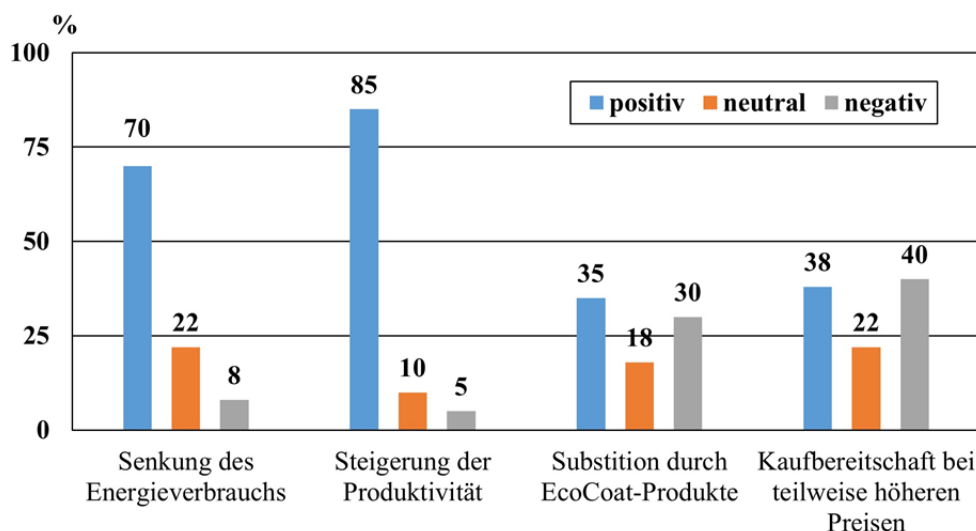


Abb. 27: Zusammenfassung der wesentlichen Ergebnisse der Online-Befragung

Es ist festzuhalten, dass eine Senkung der Kosten über eine Senkung des Energieverbrauchs und über eine Produktivitätssteigerung bei der weiten Mehrheit der Befragten auf positive Resonanz stößt. Eine generelle Ablösung von funktionierenden und etablierten Produkten durch EcoCoat-Materialien kann sich ebenfalls die Mehrheit der Befragten vorstellen, wobei 40% der Befragten angaben, keine Bereitschaft zu zeigen, höhere Preise zu zahlen. Insgesamt bleibt der Sektor kostengetrieben und ökosoziale Aspekte stoßen nur bei ca. einem Drittel der Befragten auf Zustimmung.

Für die Realisierung einer Innovation in diesem Bereich muss zusätzlich der technische Aspekt der Umsetzbarkeit berücksichtigt werden. Die Entwicklung innerhalb des Forschungsprojekts EcoCoat zielte daher darauf ab, dass Standardverarbeitungstechnik genutzt werden kann. Hinsichtlich der Applikationstechnik wurden alle gängigen Typen getestet und es wurden keine Komplikationen hinsichtlich der elektrostatischen Aufladbarkeit, Förderbarkeit oder Ähnlichem festgestellt. Der Prozessschritt des Einbrennens bleibt jedoch ein wichtiger Faktor in der Verarbeitungskette. Dazu wurde im Rahmen der Erhebung festgestellt, dass 90% der Befragten ihre Öfen durch Gas als Energieträger beheizen und dass 50% der Befragten Durchlauföfen verwenden. Die Regelung von sehr großen Öfen von 200 °C auf 135 °C und beim nächsten Bauteil ggf. wieder zurück auf 200 °C ist komplex. Eine erfolgreiche Umsetzung ist demnach eng mit der Steuerung und Regelung der Ofenanlagen und der Fertigungsplanung verbunden. Eine große Mehrheit gibt an, dass es grundsätzlich umsetzbar oder zumindest bedingt umsetzbar ist. Lediglich 4% der Befragten gaben an, dass es technisch nicht umsetzbar ist. Zusätzlich bleibt festzuhalten, dass die angespannte Situation auf dem Weltmarkt, insbesondere in Bezug auf petrochemische Rohstoffe und Erzeugnisse, eine starke Volatilität der entsprechenden Rohstoffkosten verursacht. Diese Kostenschwankungen können die Einschätzungen der befragten Unternehmen verändert haben (Befragungszeitraum: 01/2025-05/2025) und möglicherweise einen Trend zu preisstabileren, regional verfügbaren und umweltverträglicheren Alternativrohstoffen begründen.

Die Nutzungskonkurrenz um biologische Ressourcen stellt einen zu berücksichtigenden sozioökonomischen Faktor dar. Der verstärkte Einsatz nachwachsender Rohstoffe für industrielle Zwecke kann in Konflikt mit der Nahrungsmittelproduktion oder dem Naturschutz stehen, insbesondere wenn landwirtschaftliche Flächen intensiv genutzt werden. Auch an diesem Punkt zeigte die durchgeführte Umfrage, dass die Befragten hier keine weitreichenden Probleme sehen. Bei recycelten Materialien stellt zusätzlich die Qualitätssicherung eine Herausforderung dar, da heterogene Materialströme zu Schwankungen in den Produkteigenschaften führen können. Dies erfordert geeignete Standards und Zertifizierungssysteme, um Vertrauen in die Materialien zu schaffen. Mit PET als Bindemittel wurde ein Werkstoff eingesetzt, der durch das allgemeine Pfandsystem bereits einen hohen Wiederverwendungswert/-standard besitzt. Schließlich sind auch

arbeitsmarktbezogene Effekte zu betrachten. Es sind umfangreiche Maßnahmen wie Qualifizierungsprogramme und industriepolitische Strategien notwendig, um negative soziale Auswirkungen abzufedern, die durch eine Beeinträchtigung der traditionell gewachsenen, petrochemischen Industrie entstehen können.

Zusammenfassend bieten biobasierte und recycelte Pulverbeschichtungen erhebliche sozioökonomische Chancen, insbesondere im Hinblick auf Nachhaltigkeit, Innovation und regionale Wertschöpfung. Vor allem vor einer sich verändernden Ressourcenpolitik aufgrund von globalen Spannungen im Erdölsektor nimmt dieses Thema eine zuvor unerwartete, aber aktuell immense Bedeutung ein. Zusätzlich wurden insbesondere die Energieansätze mit geringeren Einbrenntemperaturen und kurzen Haltezeiten von den Umfrageteilnehmern als sehr wichtig und positiv erachtet.

3.2 Ökologie

Pulverbeschichtungen gelten allgemein als umweltfreundlichere Alternative zu lösemittelhaltigen Beschichtungssystemen, da sie keine flüchtigen organischen Verbindungen (VOC) emittieren und einen hohen Materialnutzungsgrad durch eine mögliche Pulverrückgewinnung aufweisen. Aktuell besitzen insbesondere Pulverbeschichtungen, die nicht auf petrochemischen Rohstoffen basieren, besonderes Potential. Diese können aus biogenen oder recycelten Materialien hergestellt werden. Neben diesem ökonomischen Umstand ist auch der reduzierte ökologische Fußabdruck, der durch die Verwendung biobasierter oder recycelter Pulverlackkomponenten erreicht werden kann, ein Kriterium. Auch vor dem Hintergrund von nationalen und globalen Nachhaltigkeitszielen und der Transformation hin zu einer Kreislaufwirtschaft ist der im Forschungsprojekt verfolgte EcoCoat-Ansatz von wachsender Relevanz.

Ein wesentlicher ökologischer Vorteil biobasierter und recycelter Pulverbeschichtungen liegt in der Reduktion der Abhängigkeit von fossilen Ressourcen, die in ihrer Gewinnung und Verarbeitung mit besonders starken CO₂-Emissionen einhergehen. Durch den Einsatz von im Projektverlauf untersuchten, nachwachsenden Rohstoffen wie pflanzlichen Harzen (Bindemittel), Stärke oder Lignin (Füllstoff), biobasierten Pigmenten sowie von Sekundärmaterialien aus Recyclingprozessen, kann der Verbrauch endlicher Ressourcen und somit auch der Grad von CO₂-Emissionen gesenkt werden. Die Verwendung von Rohstoffen, die aus

regionaler und nachhaltiger Produktion stammen und kurze Transportwege und Lieferketten aufweisen, trägt zusätzlich zur Verringerung von Treibhausgasemissionen bei. Darüber hinaus können die im Projektverlauf untersuchten Beschichtungen die Prinzipien der Kreislaufwirtschaft fördern, indem sie Abfallströme als Rohstoffquelle nutzen und somit zur Ressourcenschonung beitragen.

Des Weiteren ergibt sich aus der geringeren Umwelttoxizität biobasierter Ausgangsstoffe im Vergleich mit petrochemischen Komponenten ein weiterer Vorteil. Dies zeigt sich insbesondere, wenn der Produktlebenszyklus bereits weit vorangeschritten ist. Zudem bleibt der grundsätzlich ökologische Vorteil von Pulverbeschichtungen durch die Rückgewinnung von Overspray sowie den Verzicht auf Lösemittel und der damit verbundenen, nahezu verlustfreien Applikation erhalten. Den Vorteilen stehen jedoch auch ökologische Herausforderungen gegenüber. Die Produktion biogener Rohstoffe ist häufig mit intensiver Flächennutzung verbunden, was zu Nutzungskonkurrenzen mit der Nahrungsmittelproduktion oder zu negativen Auswirkungen auf Biodiversität und Ökosysteme führen kann. Insbesondere in der Landwirtschaft kann der Einsatz von Düngemitteln, Pestiziden und erheblichen Mengen an Wasser zu zusätzlichen Umweltbelastungen beitragen. Die tatsächliche ökologische Bilanz hängt daher stark von der Art und Herkunft der eingesetzten Biomasse ab. Lignin als Füllstoff und Pigment hat sich im Rahmen des EcoCoat-Projekts als besonders vorteilhaft erwiesen, da es biologisch erzeugt ist und in einigen industriellen Prozessen bereits in großen Mengen als Sekundärprodukt anfällt.

Auch recycelte Materialien sind nicht uneingeschränkt ökologisch unbedenklich. Die Aufbereitung und Reinigung von Recyclingströmen erfordert Energie und kann mit Emissionen verbunden sein. Zudem können Verunreinigungen oder Materialdegradation die Qualität der Beschichtung beeinträchtigen, was zu kürzeren Lebensdauern und damit indirekt zu einem erhöhtem Ressourcenverbrauch führen kann. In solchen Fällen könnte der ökologische Vorteil gegenüber konventionellen Systemen relativiert werden. Dennoch zeigt das bereits etablierte Wiederverwertungssystem von PET als Nutzwerkstoff der Lebensmittel- und Verpackungsindustrie, dass eine hochwertige Stofftrennung funktionieren kann und immense Chancen bietet. Ein weiterer relevanter Aspekt ist die Dauerhaftigkeit einer Beschichtung. Wie die im Projekt erhaltenen Ergebnisse zeigen, weisen biobasierte und recycelte Pulverbeschichtungen eine teilweise geringere Beständigkeit gegenüber UV-

Strahlung und chemischen Einflüssen auf. Dies kann je nach Verwendung und Umgebungsbedingungen häufigere Wartungs- oder Ersatzzyklen erforderlich machen. Dennoch konnte nachgewiesen werden, dass sich vor allem das Einsatzszenario von EcoCoats in Innenräumen oder Interieurbereichen als geeignet herausstellt. Darüber hinaus existiert kein qualitativer Unterschied von EcoCoat-Beschichtungen im Vergleich zu etablierten, weniger nachhaltigen Produkten.

Zusammenfassend lässt sich feststellen, dass biobasierte und recycelte Pulverbeschichtungen insbesondere im Hinblick auf Ressourcenschonung, Emissionsreduktion und Förderung der Kreislaufwirtschaft ein erhebliches ökologisches Potential besitzen. Gleichzeitig sind ihre Umweltwirkungen stark kontextabhängig durch Faktoren wie Rohstoffherkunft, Produktion und Materialeigenschaften bedingt. Um fundierte Aussagen über eine tatsächliche ökologische Vorteilhaftigkeit treffen zu können, ist eine ganzheitliche Lebenszyklusanalyse in Zukunft unerlässlich.

Im Rahmen des Forschungsprojekts und der fortgeschrittenen Ergebnisinterpretation von einzelnen Materialkomponenten wurde versucht, mittels einer Kohlenstoffäquivalentberechnung, einen CO₂-Fußabdruck und einen Vergleich gegenüber etablierten und marktüblichen Produkten zu erstellen. Das Vorgehen stützt sich dabei auf Daten, die am Unternehmensstandort der Ganzlin Beschichtungspulver GmbH vorlagen. Die Vergleichsrechnung wurde anhand von technischen Produktdatenblättern und darin enthaltenen CO₂-Emissionswerten durchgeführt. Es ist zu beachten, dass die angegebenen und für die Berechnung herangezogenen Werte sich auf den Herstellungsprozess eines Pulverlacks beziehen und Faktoren des späteren Produktlebenszyklus (Wartung, Reparatur, Transport, Entsorgung) nicht in die Berechnung eingegangen sind. Des Weiteren ist zu beachten, dass der Fokus der Berechnung aufgrund des größten Anteils innerhalb einer Pulverlackformulierung auf der Bindemittelkomponente liegt. Die Berechnung eines CO₂-Äquivalents für Füllstoffe wie Lignin (chargen- und artabhängig), Indigo oder Ruß stellt sich zusätzlich als sehr komplex dar.

Die resultierende Kohlenstoffäquivalentberechnung für verschiedene Bindemittel ergab das nachfolgend dargestellte, vergleichende Ergebnis:

- Emissionsfaktoren (Datenblätter):
 - Epoxid-/Polyesterharz: 5-6 kg CO_{2e} je kg [8, 9]
 - rPET: 2,0-2,5 kg CO_{2e} je kg [10]
 - Bioharz: 1,0-2,0 kg CO_{2e} je kg [11]
 - Polyesterharz
massebilanziert: 2,0-3,0 kg CO_{2e} je kg [12]
- in Rechnung genutzte Faktoren:
 - Epoxid-/Polyesterharz: 5,5 kg CO_{2e} je kg
 - rPET: 2,25 kg CO_{2e} je kg
 - Bioharz: 1,5 kg CO_{2e} je kg
 - Polyesterharz
massebilanziert: 2,5 kg CO_{2e} je kg
- unter Annahme von 70% Bindemittelanteil (konventionelle Zusammensetzung, restliche Bestandteile werden hier nicht berücksichtigt) für 1 kg Pulverlack:
 - Epoxid-/Polyesterharz: 0,7 kg * 5,5 kg CO_{2e}/kg = **3,85 kg CO_{2e}**
 - rPET: 0,7 kg * 2,25 kg CO_{2e}/kg = **1,575 kg CO_{2e}**
 - Bioharz: 0,7 kg * 1,5 kg CO_{2e}/kg = **1,05 kg CO_{2e}**
 - Polyesterharz
massebilanziert: 0,7 kg * 2,5 kg CO_{2e}/kg = **1,75 kg CO_{2e}**

Demzufolge ergibt sich unter den oben beschriebenen Annahmen durch die Nutzung eines biobasierten Harzes als EcoCoat-Komponente eine Reduktion des emittierten CO₂ um mehr als 70% im Vergleich zu einem konventionellen Pulverlack mit Epoxid- oder Polyesterharz als Bindemittel. Bei Nutzung von rPET beträgt die mögliche Einsparung fast 60%, bei Verwendung eines massebilanzierten Polyesterharzes 55%. Weiterhin bilden die Vermeidung energieintensiver Primärrohstoffproduktionen, die Nutzung von Abfallströmen (Kreislaufwirtschaft) sowie die Nutzung nachwachsender, biologischer Bestandteile (auch recycelte biologische Harze möglich) nicht genau quantifizierte Vorteile im Vergleich zur Nutzung von z.B. Epoxidharz als Bindemittel.

Um ein vollumfängliches Kohlenstoffäquivalent für EcoCoats bilden zu können, ist eine genaue Bewertung des CO₂-Fußabdrucks für verbleibende Füllstoffe, Pigmente und Additive erforderlich. Bislang ist die bestehende Datenlage zu allen eingesetzten Füllstoffen und Pigmenten zu klein für verlässliche Aussagen. Ergänzend erschwert

die Diversität der landwirtschaftlichen Herstellungsprozesse (Düngemiteileinsatz, Transportwege) die Abschätzung von CO₂-Emissionen von EcoCoat-Komponenten für die Nutzung als Füllstoffe oder Pigmente. Teilweise bestehen starke stoffspezifische Unterschiede in den EcoCoat-Pulverlackbestandteilen. In diesem Zusammenhang ist vor allem das Biopolymer Lignin zu nennen, welches hinsichtlich seiner Stoffherkunft vollkommen verschiedene CO₂-Emissionen während des Wachstumsprozesses verursacht. So ist der CO₂-Fußabdruck von Lignin, welches aus Weichhölzern gewonnen wird, deutlich kleiner als von Lignin auf Basis von Weizenstroh. Das hängt mit dem Umstand zusammen, dass bereits CO₂ während der gesamten, mehrjährigen Wachstumsphase des Holzes aufgenommen wird und das Kohlenstoffaufnahmepotential von Weichhölzern deutlich höher ist als das von Weizengetreide.

Neben der Betrachtung der Herstellung des Pulverlacks ist ebenso die Verarbeitung des Materials während des Beschichtungsprozesses entscheidend. Im Rahmen des Projekts wurde durch eine konsequente Rezeptierung eine erhebliche Reduktion der Einbrenntemperaturen erreicht. Diese liegen für Standardprodukte in den meisten Fällen bei ca. 180 °C – 200 °C für eine Einbrenndauer von meist 10-15 Minuten. Im Projektverlauf konnten diese Einbrenntemperaturen auf 160 °C bei einer Einbrenndauer von 8 Minuten reduziert werden. Für eine überschlägige Abschätzung der Energieeinsparung bei gleichem Durchsatz wird angenommen, dass die Bauteile jeweils bei gleichen Haltedauern von Raumtemperatur ausgehend erwärmt werden. Betrachtet wird die Reduktion der Temperatur von 200 °C auf 160 °C. Somit werden die Bauteile statt um 180 K nur um 140 K erwärmt. Dies entspricht einer Reduzierung um rund 30%. Da bei höheren Temperaturen auch Abgasverluste und Wärmeverluste im Ofen zunehmen, kann unabhängig von Luftwechsel, Fördertechnik, Werkstückmasse, Wirkungsgrad des Ofens und Energieträger, bei gleichbleibender Haltezeit, von einer möglichen Einsparung von bis zu 40% ausgegangen werden [1]. Insbesondere bei den älteren gasbeheizten, aber noch immer häufig eingesetzten, Öfen kann dieser Wert noch höher ausfallen. Durch die kürzere Haltezeit (8 Minuten statt 12 Minuten) kann die benötigte Energie ebenfalls reduziert werden.

3.3 Publikationstätigkeit im Projektverlauf

Während und unmittelbar nach dem Projekt erfolgten mehrere Maßnahmen zur Sichtbarmachung des Projekts und zur Vorstellung der Resultate. Dafür wurden verschiedene Plattformen genutzt. Regelmäßig wurden Beiträge auf den LinkedIn-Seiten der Core Facility Microscopy and Materials Analysis CMMA I OVGU und der iLF Magdeburg GmbH geteilt. Weiterhin erfolgten Beiträge in Fachzeitschriften, Fachvorträge wurden gehalten und es gab einen Messeauftritt auf einer branchenrelevanten Leitmesse. Tabelle 10 zeigt eine Auflistung der öffentlichkeitswirksamen Maßnahmen zum Forschungsprojekt EcoCoat. Abbildung 28 zeigt Fotos der jeweiligen Messebesuche bzw. Präsentationen.

Tab. 10: Auflistung von Messen und Beiträgen in Fachzeitschriften

Veröffentlichungsmaßnahme	Messe/Veranstaltung	Fachzeitschrift
Fachvortrag zum Projekt mit Exponaten (iLF und OVGU) Februar 2026	Pulversymposium Dresden 2026 (Messe)	
Leitmesse zum Thema Lackiertechniken mit Exponaten (Ganzlin) April 2026	PaintExpo 2026 Karlsruhe (Messe)	
Fachvortrag OVGU März 2026	Forschungsseminar des Methodisch Diagnostischen Zentrums Werkstoffprüfung e.V.	
Fachvortrag iLF Magdeburg GmbH 19.03.2026	Bezirksgruppentreffen des Verbands der Ingenieure des Lack- und Farbenfaches e.V. (VILF)	
Schriftbeitrag zum Projektzwischenstand im Mai 2025; Verbreitung der Umfrage		Besser Lackieren 05/2025 (S.12) [13]
Schriftbeitrag zum Projektende im Februar 2026; Präsentation von Projektergebnissen		Journal für Oberflächentechnik 05/2026 (S.30-31) [14]



Abb. 28: Messeauftritt bei der PaintExpo (links), Fachvortrag beim Pulversymposium in Dresden (rechts oben) und Fachvortrag beim MDZWP-Forschungsseminar (rechts unten)

Fazit und Ausblick

Im Forschungsprojekt EcoCoat wurde das Ziel gesetzt, einen nachhaltigen Pulverlack für industrielle Anwendungen zu entwickeln, der zu mindestens 90% aus biologisch nachwachsenden oder recycelten Rohstoffen besteht. Dabei konnte gezeigt werden, dass alle Komponenten eines Pulverlacks (Bindemittel, Füllstoffe, Pigmente und Additive) durch biologische oder recycelte Materialien substituierbar sind. Im Rahmen des Projekts wurden anhand eines umfangreichen Versuchsplans insgesamt mehr als 35 Rezepturen getestet. Das Vorgehen für die Erstellung von Formulierungen basierte dabei auf Eingangsuntersuchungen, die die Eignung für erste Materialprüfungen durch eine passende Morphologie, thermische Stabilität und Mischbarkeit der Komponenten zu einem Pulverlack betrachteten. Nach der Formulierung einer erfolgversprechenden Rezeptur wurden die EcoCoat-Pulverlacke appliziert und ersten Materialcharakterisierungen unterzogen, wie z.B. Haftungsprüfungen auf Versuchsblechen. Weitere Materialprüfungen waren visuelle Bewertungen, Farb- und Glanzmessungen und Festhalten weiterer visueller Veränderungen. Dieser Prüfumfang wurde ebenfalls nach Auslagerungsversuchen (Kondenswasserkonstantklimatetest, Salzsprühnebeltest,

simulierte, beschleunigte UV-Bewitterung in direktem Sonnenlicht (UV-A-Bestrahlung)) durchgeführt. Während die EcoCoat-Pulverbeschichtungen bei den verschiedenen Klimaversuchen in der weiten Mehrheit eine gute bis sehr gute Resistenz gegen Veränderungen zeigten, erwies sich die UV-Bestrahlung als größte Herausforderung. Die überwiegende Mehrheit zeigte keine UV-Stabilität, was sich insbesondere in Farb- und Glanzverlusten auswirkte. Die Beschichtungen, die eine Beständigkeit gegen UV-Bestrahlung aufwiesen, wurden zwei weiteren Beständigkeitsprüfungen unterzogen. Zum einen der Prüfung des Abriebverhaltens mit und ohne Chemikalieneinfluss und zum anderen einer umfangreichen Chemikalienbeständigkeitsprüfung durch den sogenannten Tropfentest. Nach erfolgreichem Bestehen wurden insgesamt vier Basisformulierungen, die dem EcoCoat-Ansatz von mindestens 90% biologischer oder recycelter Bestandteile entsprechen, definiert. Diese sind nach Abschluss aller Materialprüfungen als industriell anwendbar einzuordnen. Zusätzlich kann durch die Berücksichtigung eines recycelten PET als Bindemittel die Auswahl erweitert werden. Diese Varianten erfüllen jedoch das Ziel von 90% biologischer Bestandteile nicht vollständig. Tabelle 11 listet diese Pulverlackvarianten auf.

Tabelle 11: EcoCoat-Pulverlacke

Farbton	Bindemittel	Lasur/Deckend	Pigment
Schwarz	rPET	Lasur	Ruß
Grün	rPET	Deckend	Chlorophyllin
Braun	rPET	Lasur	Lignin
Blau	rPET	Deckend	Indigo
Schwarz	Bioharz	Deckend	Ruß
Grün	Bioharz	Deckend	Chlorophyllin
Braun	Bioharz	Lasur	Lignin
Blau	Bioharz	Deckend	Indigo

Nach der erfolgreichen Herausarbeitung der funktionierenden Basisrezepturen, die mindestens für Innenraumanwendungen und teilweise auch für Außenanwendungen geeignet sind, können diese nun durch Zusatz geringer Mengen (1-2 Masseprozent) von klassischen Pigmenten oder durch Kombinationen untereinander in eine breite Palette von Farbtönen abgewandelt werden. Abbildung 29 zeigt die im Rahmen des

Projekts umgesetzten Variationen und die erfolgreiche Applikation auf verschiedenen Bauteilen.



Abb. 29: Übersicht zu erzeugter Farbvielfalt und Applikation am Bauteil

Für eine Bewertung des Impacts, den das Forschungsprojekt hat, kann sich auf zwei Bereiche konzentriert werden: einen ökonomischen bzw. sozioökonomischen Bereich sowie einen ökologischen Bewertungsbereich. Aus ökonomischer Sicht sind es vor allem aktuelle geopolitische Umstände, die dem Projekt eine große Bedeutung verleihen. Mit den gegebenen geopolitischen Schwierigkeiten aus dem Frühjahr 2026 in den Ölgebieten der Golfregion sind die Verfügbarkeit von Erdöl sowie eine entsprechende Preisstabilität nicht mehr sicher gewährleistet. Demzufolge sind diverse Industriezweige auf Alternativlösungen zu Erdöl als Rohstoff und Energieträger angewiesen. Für Unternehmen in der Pulverlackherstellung bieten die Ergebnisse des EcoCoat-Projekts die Chance, Rohstoffzugänglichkeiten zu stabilisieren und zu vereinfachen oder direkt mit regionalen Partnern benötigte Rohstoffe zu erzeugen. Aus ökonomischer Sicht ist für die verarbeitenden Industrien der Pulverlacke die Energieeinsparung beim Einbrennen besonders hervorzuheben und kann sich bei steigenden Energiepreisen, insbesondere bei Gas, positiv auf die Produktionskosten auswirken. Des Weiteren entstehen mit Blick auf die angrenzenden Schlüsselindustrien eine Vielzahl an Möglichkeiten, um Stoffkreisläufe zu schließen und somit Lieferketten zu verbessern und Transportwege zu minimieren. Aus ökologischer Sicht würde eine Etablierung des EcoCoat-Ansatzes in der Pulverlackindustrie die Nachhaltigkeit der Produkte stark verbessern. Mit dem

Wegfallen von energieintensiven Synthesen und chemischen Arbeitsprozessen bei der Umwandlung von Erdöl zu Polymeren wird bei der Produktion der Lackrohstoffe bereits deutlich weniger CO₂ emittiert. Außerdem besitzen nachwachsende Rohstoffe das Potential, bereits während ihrer Wachstumsphase CO₂ zu binden. Zum gegenwärtigen Stand konnte mithilfe einer überschlägigen Kohlenstoff-äquivalentberechnung gezeigt werden, dass Pulverlacke, die aus nachwachsenden oder recycelten Rohstoffen bestehen, im Bereich der Bindemittelkomponente CO₂-Emissionen um 50% bis 80% reduzieren können. Bindemittel bilden mit 70% den größten Masseanteil in einem Pulverlack. Es ist anzunehmen, dass eine bilanzierte Betrachtung biologischer Pigmente und Füllstoffe die angenommenen Werte weiter reduzieren würde. In Zukunft sollte in diesem Bereich eine genaue Quantifizierung des CO_{2e} für die verbleibenden Pulverlackbestandteile vorgenommen werden um das Gesamtergebnis konkretisieren zu können.

Abschließend zeigt der Verlauf des Forschungsprojekts EcoCoat, dass eine Substitution von klassischen ölbasierten Pulverlacken aus verschiedensten Gründen sinnvoll ist. Nachdem materialspezifische Optimierungsansätze, vor allem einer stärkeren UV-Beständigkeit der Gesamtmatrix, vorgenommen worden sind, kann sich der sozioökonomische und ökologische Nutzen der Beschichtungen schnell zeigen. Eine erfolgreiche Implementierung des Ansatzes in der Industrie führt somit zu mehr Unabhängigkeit in Rohstofffragen sowie zur Verbesserung des ökologischen Fußabdrucks und somit auch zur Verbesserung der Lebensqualität der Gesellschaft. Aufgrund des wichtigen Grundsatzes, Materialien in Stoffkreisläufen zu führen, würde das auch in diesem Fall nicht nur marktwirtschaftliche Anreize setzen, sondern zusätzlich Arbeitsplätze und neue industrielle Beschäftigungsfelder hervorbringen, die an weitreichenderen Recyclingkonzepten arbeiten. Durch die Publikation der Zwischenergebnisse im Projektverlauf wurden bereits konkrete Anfragen aus verschiedenen Bereichen der Industrie (Möbelindustrie, Metallbau, Architektur und Automotive) an die Projektpartner herangetragen. Erste Bemusterungen sowie eine erste Produktion einer Menge von ca. 50 kg sind bereits erfolgt. Das Projektkonsortium arbeitet derzeit an der Verbesserung der UV-Beständigkeit der Rohstoffe und es zeigen sich erste Erfolge. Ein Einsatz klassischer UV-Stabilisatoren ist im Projektverlauf nicht erfolgt und es wird auch zukünftig versucht, direkt am Rohstoff zu arbeiten.

Quellen- und Literaturverzeichnis

- [1] Pietschmann, Judith: Industrielle Pulverbeschichtung, Vieweg Verlag, 2002, ISBN 3-528-03380-0
- [2] <https://www.wirsindfarbe.de/statistiken/markt-fuer-pulverlacke-2025>
- [3] <https://www.bpb.de/kurz-knapp/zahlen-und-fakten/globalisierung/239756/haupthandelsstroeme-erdoel-kohle-und-erdgas/>
- [4] <https://www.fortunebusinessinsights.com/de/pulverbeschichtungsmarkt-102139>
- [5] <https://www.360researchreports.com/de/market-reports/powder-coating-market-212373>
- [6] <https://www.freilacke.de/pulverbeschichtung-kunststoffe-leitfaehig-machen/>
- [7] Goldschmidt, Artur; Streitberger, Hans-Joachim: BASF Handbuch Lackiertechnik, Vincentz Verlag, 2002, ISBN 3-87870-324-4.
- [8] Datenblatt Epoxidharz: Environmental Product Declaration – Epoxy Powder Coating; Declaration Number: EPD-VDL-20230165-AG1-EN; Verband der deutschen Lack- und Druckfarbenindustrie e.V.; Juni 2023; Frankfurt
- [9] Datenblatt Polyesterharz: Environmental Product Declaration – Polyester Powder Coating; Declaration Number: EPD-VDL-20230163-AG1-EN; Verband der deutschen Lack- und Druckfarbenindustrie e.V.; Juni 2023; Frankfurt
- [10] Datenblatt rPET: Allnex – The Coating Resins Company: Product Sustainability & Regulatory Affairs Department; Crylcoat Ocean E 04926 Powder Coating Resins; Latvia, Riga 2022
- [11] Datenblatt Biobasiertes Harz: Allnex – The Coating Resins Company: Product Sustainability & Regulatory Affairs Department; Crylcoat Ocean 04367; Latvia, Riga 2022
- [12] Datenblatt Massebilanziertes Polyesterharz: Allnex – The Coating Resins Company: Product Sustainability & Regulatory Affairs Department; Crylcoat 2679-6 BC; Latvia, Riga 2022
- [13] Schweizer, Silvia: Nachhaltige Pulverlacke für industrielle Anwendungen; Besser Lackieren 05/2025; 12
- [14] Zierau, Marco: Pulverlacke ökologisch neu denken. *J Oberfl Techn* **66**, 30–31 (2026). <https://doi.org/10.1007/s35144-026-3815-6>



EcoCoat

Nachhaltige Pulverlacke für industrielle Anwendungen



29.05.2026