ABSCHLUSSBERICHT ZUM VERBUNDPROJEKT: INNOVATIVER STÄRKEBASIERTER SCHUTZ HISTORISCHER METALLBAUWERKE BZW. METALLISCHER BAUWERKSKOMPONENTEN

KURZTITEL: StarkMetall

VERBUNDPARTNER:	Lackierzentrum Reichenbach GmbH Zwickauer Str. 225 08468 Reichenbach [KMU, GmbH] FKZ: 03WIR0716B
VERBUNDPARTNER:	FISSEK GmbH Am Fernblick 13 08499 Reichenbach im Vogtland OT Obermylau [KMU, GmbH] FKZ: 03WIR0716C
VERBUNDPARTNER:	Burg Mylau Burg 1 08499 Mylau/Vogtland [Futurum Vogtland, e.V.] FKZ: 03WIR0716D
VERBUNDKOORDINATOR:	Innovent e.V. Technologieentwicklung Prüssingstr. 27B 07745 Jena [Forschungseinrichtung, e.V.] FKZ: 03WIR0716A

Anhang I

Im Verbundprojekt “Innovativer stärkebasierter Schutz Historischer Metallbauwerke bzw. Metallischer Bauwerkskomponenten” (StarkMetall) wurde ein Pulverlack analoger Beschichtungsprozess mit Materialien aus nachwachsenden Rohstoffen für den Einsatz im Außen- und mechanisch beanspruchten Innenbereich von den Projektpartnern Innovent e.V. Technologieentwicklung, Lackierzentrum Reichenbach GmbH, FISSEK GmbH und der Burg Mylau entwickelt. Die Basis hierfür bilden Stärke-Fettsäure-Ester, welche in einem ersten Schritt chemisch synthetisiert und in einem zweiten Schritt vermahlen werden. Dabei entstehen Partikel, die sich elektrisch aufladen lassen, ähnlich einem Pulverlack. Durch die Abscheidung auf Metalloberflächen lassen sich so geschlossene Schichten erzeugen, welche die Korrosion des Metalls behindern.

Geschlossene Schichten lassen sich auch durch den Auftrag der Stärke-Fettsäure-Ester als Nasslack erreichen. Im Projekt war es nun das Ziel, die Eignung als Korrosionsschutz im Außenbereich zu überprüfen, was deutlich strengeren Anforderungen unterliegt als der bereits untersuchte Innenbereich.

Untersucht wurden die chemischen Synthesen des Materials sowohl im Reaktor als auch über eine Reaktivextrusion, was eine kontinuierliche Produktion über einen Extruder ermöglichen würde. Allerdings wiesen Teile der Reagenzien eine zu niedrige Viskosität für die Extrusion auf, was zu schlechter Durchmischung und heterogenem Material führte. Erreicht werden konnte mit den Ergebnissen der Reaktivextrusion allerdings eine Mischung von Stärke im Lösungsmittel Imidazol in einem Verhältnis, das im Reaktor bisher nicht zugänglich war.

Die Stärke-Fettsäure-Ester wurden demnach im Reaktor in insgesamt elf Synthesen im Maßstab von 100 Gramm bis einigen Kilogramm hergestellt. Die Produkte wurden dann selbst und auch bei einem Dienstleister vermahlen. Dabei zeigen sich bei den Verfahren deutliche Unterschiede in der Partikelgröße (20 µm Durchschnitt beim Dienstleister gegen 100 µm Durchschnitt bei den selbst vermahlenen Proben) und auch beim Partikelaussehen (kantig beim Dienstleister gegen rund bei den selbst vermahlenen Proben). Diese führten dann zu verändertem Verhalten in der Pulverlackbeschichtungstechnik. Es zeigte sich, dass die kleinen, kantigen Proben deutlich schlechter aus der Pulverlackpistole ausflossen und diese verstopften, was die großen runden Partikel nicht taten. Dieses Problem konnte bis zum Projektende trotz umfangreicher Untersuchungen nicht zufriedenstellend behoben werden.

Mithilfe des Auftrags als Nasslack gelang es dennoch die Stärke-Fettsäure-Ester in größeren Mengen auf Metalloberflächen in Form von Blechen aufzutragen. Diese Bleche wurden dann auf ihren Korrosionsschutz und ihr Verhalten bei mechanischen Beanspruchungen hin untersucht. Gegenüber milden Chemikalien zeigten sie einen gewissen Schutz, versagten aber bei forcierenden Bedingungen wie Säuren oder dem Kochsalzsprühtest. Bei mechanischen Beanspruchungen wie einer Dornbiegeprüfung, einer Tiefungsprüfung, einer Kugelschlagprüfung und einer Überprüfung des Eindruckwiderstands nach Buchholz zeigten sich meist kleinere Haftungsprobleme der Beschichtungen auf den Substraten. Ein signifikanter Einfluss verschiedener Vorbehandlungsmethoden wie sandstrahlen oder schleifen konnte in Bezug auf die Haftfestigkeit nicht festgestellt werden.

Zum Abschluss des Projekts wurde die Nassbeschichtung auf zwei Demonstratoren bei der Burg Mylau angewendet, um die Beständigkeit der Beschichtung im laufenden Betrieb beurteilen zu können. Vorgestellt wurden die Ergebnisse in der Lokalpresse und auf einer Fachtagung.

Anhang II

Zielstellung des Vorhabens

Im Verbundprojekt “Innovativer stärkebasierter Schutz Historischer Metallbauwerke bzw. Metallischer Bauwerkskomponenten” (StarkMetall) wird ein Pulverlack analoger Beschichtungsprozess mit Materialien aus nachwachsenden Rohstoffen für den Einsatz im Außen- und mechanisch beanspruchten Innenbereich entwickelt.

Die Basis hierfür bilden Stärke-Fettsäure-Ester als Grundmaterial des neuen Beschichtungssystems. Es sind signifikante weitere Entwicklungsarbeiten nötig, um dieses für den vorgesehenen Einsatz im Außenbereich weiterzuentwickeln, inklusive Peripherie wie zum Beispiel Synthesekapazitäten. Am Ende des Projektes soll ein Prototyp-System bestehen, welches beim Partner Burg Mylau an einem demonstrativen Objekt (z.B. Abbildung 1) angewandt wird und im Nachgang weiter vertrieben werden kann. Es wird die Weiterentwicklung des bereits im Innenbereich getesteten Systems angestrebt. Das bestehende System eignet sich für den Schutz von empfindlichen Gütern im wenig belasteten Innenraum und ist erst in kleinem Maßstab getestet worden.

Abbildung 1: Metallische Objekte, fotografiert auf Burg Mylau.

Durch das Zusammenspiel der Partner wird die Synthese und Verarbeitung des Materials, die industrielle Aufbringung und Entfernung, die Haltbarkeit unter Belastung, sowie der Einsatz im Feld genau erforscht. Das System wird auf die entsprechenden Anwendungsfälle optimiert. Durch Vernetzung der Partner können erste kommerzielle Anwendungen erfolgen.

Detaillierte Beschreibung der Arbeitspakete:

AP1 Erstellung eines Lastenheftes und Definition der Anforderungen an das System

Innerhalb des Berichtszeitraums konnte unter Mitwirkung aller Partner ein Lastenheft erarbeitet werden. Zusätzlich wurde ein Datenblattmuster eines zukünftigen Produkts inklusive nötiger Normtests und Parameter erarbeitet. Ausgewählte Prüfeigenschaften sind in Tabelle 1 dargestellt.

Tabelle 1: Zu erzielende Eigenschaften des Pulver- bzw. Nasslacks.

Eigenschaft	Zu erzielender Wert	Erzielter Wert	Beschrieben in
Lagerbedingungen (Temp. rH)	trocken, kühl ≤ 25 °C (typischer PL)	trocken, kühl ≤ 25 °C	AP 3
Korngrößenverteilung (ASTM5861-95)	Dx (10) > 20 µm Dx (50) = 30-35 µm Dx (90) < 140 µm	Dx (10) 4.01 µm Dx (50) 21.8 µm Dx (90) 83.0 µm	AP 3

Eigenschaft	Zu erzielender Wert	Erzielter Wert	Beschrieben in
Rückstände in Werkzeugen, Reinigung von Werkzeugen	Reinigung möglich	Reinigung prinzipiell möglich	AP 3
Einbrenn- und Trocknungsoptionen 8Nasslack)	Strahlungswärme, Umgebungswärme	Umgebungswärme, 60 °C	AP 3, AP 5
Aufladefähigkeit	Verlust < 15 %	~18-47% Verlust	AP 3, AP 5
Einbrenntemperatur (Pulverlack)		160 °C	AP 3
Korrosionsbeständigkeit	C3 niedrig 120 h mittel 240 h hoch 480 h sehr hoch 720 h ->Korrosion am Ritz max. 1,5 mm Ø	Nicht bestanden	AP 7
Haftfestigkeit	GT 0-1; ≥ 5 MPa		AP 4, AP 5
Glanzgrad	Glänzend, seidenglänzend, Seidenmatt	Matt	AP 3, AP 5
Oberflächenstruktur	Glatt	Glatt	AP 3, AP 5
Beständigkeit Chemikalien	keine visuelle Veränderung	Teilweise erreicht	AP 7
Dornbiegeprüfung	≤ 5 bzw. 8 mm Risse zulässig aber keine Ablösung mit Klebeband	Teilweise Ablösungen	AP 7
Tiefungsprüfung	≥ 3 bzw. 5 mm Risse zulässig aber keine Ablösung mit Klebeband	Teilweise Ablösungen	AP 7
Kugelschlagprüfung	20 bzw. 40 inch/pound Risse zulässig aber keine Ablösung mit Klebeband	Teilweise Ablösungen	AP 7
Eindruckwiderstand nach Buchholz	≥ 80 (Eindruckwiderstand)	Teilweise Ablösungen	AP 7
UV-B-Beständigkeit	300 h Restglanz ≥ 50 %	Teilweise erreicht	AP 7
Entfernungsmöglichkeiten	Trockeneis oder Wasserstrahlverfahren	Trockeneisstrahlen	AP 6

Des Weiteren wurden verschiedene Metalllegierungen für diese Untersuchungen von der Firma Fissek recherchiert und bereitgestellt. Von der Burg Mylau wurden das Wetterprofil für den Standort Mylau recherchiert, um die Anforderungen realitätsnäher gestalten zu können.

AP2 Synthese und Analyse der Pulvermaterialien

Chemische Synthesen

Es wurden im Projektverlauf insgesamt elf Synthesen gefahren, von denen eine abgebrochen werden musste, da ein Riss im Reaktormantel während der Reaktion entdeckt wurde. Die Resultate der Synthesen sind in Tabelle 2 dargestellt.

Tabelle 2: Übersicht über die durchgeführten Synthesen.

ID	Stärke	m (Stärke)	Reag1	V;m	Reag2	V;m	m (Prod)
StM-L01	Mais	100 g	Vinyllau-rat	197 mL	Acetanyd-rid	146 mL	216 g
StM-L02	Weizen	100 g	Vinyllau-rat	295 mL	Acetanyd-rid	119 mL	183 g
StM-L03	Kartoffel	100 g	Vinyllau-rat	295 mL	Acetanyd-rid	119 mL	201 g
StM-L04	Weizen	100 g	Vinyllau-rat	295 mL	Acetanyd-rid	119 mL	237 g
StM-K01	Mais	25g	Vinyllau-rat	8.5 mL	-	-	Gering
StM-T01	Mais	800 g	Vinyllau-rat	1.8 eq	Acetanyd-rid	2 eq	2,00 kg
StM T02-1	Weizen	1,00 kg	Vinyllau-rat	2,94 L	Acetanyd-rid	1,18 L	1,78 kg
StM T02-2	Weizen	1,00 kg	Vinyllau-rat	2,94 L	Acetanyd-rid	1,18 L	1,57 kg
StM T03-1	Weizen	1,00 kg	Vinyllau-rat	2,94 L	Acetanyd-rid	1,18 L	2,15 kg
StM T03-2	Weizen	1,00 kg	Vinyllau-rat	---	---	---	abgebro-chen
StM T04	Weizen	1,00 kg	Vinyllau-rat	2,94 L	Acetanyd-rid	1,18 L	1,79 kg

Die Synthesen beschränkten sich auf Stärke-Laurat-Acetat Mischester als Stoffklasse möglicher Schichtkandidaten aufgrund der Erfahrungen aus dem Vorgängerprojekt und initialen Tests. Es wurden verschiedene vielversprechende Derivate im Labor im Hundertgramm-Maßstab synthetisiert und analysiert. Die Auswahl der Stärke ist für die Reaktionsführung von Bedeutung und beeinflusst das Schmelz- bzw. Löseverhalten während der Reaktion. Weizenstärke zeigte hierbei das beste Verhalten. Ausgehend von den so gewonnenen Erkenntnissen wurden die Synthesen in den einstelligen Kilogramm-Maßstab übertragen. Dabei ergaben sich Skalierungsschwierigkeiten zwischen dem Kleinreaktor im Labormaßstab und dem Reaktor für den Technikumsmaßstab. Insbesondere das veränderte Durchmischungsverhalten zwischen den beiden Reaktoren sorgte für abweichende Ergebnisse. Wegen technischer Limitationen ist für den Großreaktor nicht das optimale Verhältnis von Rührblatt- und Reaktorgeometrie gegeben, weshalb für reproduzierbare Ergebnisse sehr genau auf die Reaktionsführung geachtet werden muss. Da Elternzeit- und krankheitsbedingt eine personelle Vertretung benötigt wurde, war die Reproduzierbarkeit der Ergebnisse nicht von Anfang an gegeben. Die Aufarbeitung der Reaktion gestaltete sich mit dem für dieses Projekt neu angeschafften Schneid-und Dispergierwerkzeug dabei deutlich einfacher.

Um die Synthese wirtschaftlicher zu gestalten, wurde ein Unterauftrag zur Reaktivextrusion vom IKTS in Stuttgart bearbeitet. Dort gelang es, die Stärke in einem hohen Mischungsverhältnis von 40 zu 60 mit dem Imidazol zu einem homogenen Strang zu verarbeiten. Dieser konnte dann unter Stickstoff-

kühlung granuliert werden und stellte einen wichtigen Zwischenschritt zur Reaktivextrusion dar. In einem zweiten Schritt wurde dann das Granulat mit den eigentlichen Reaktivkomponenten vermischt und extrudiert. Aufgrund der sehr niedrigen Viskositäten der Reaktivkomponenten gelang dies nicht. Dennoch ist die Generierung einer Imidazol/Stärke-Mischung im Verhältnis von 40/60 deutlich wirtschaftlicher als das im Reaktor eingesetzte Verhältnis von 20/80 (Stärke/Imidazol).
Das in Stuttgart hergestellte Granulat wurde in weiteren Versuchen im Glas bei bis zu 130 °C stehen gelassen, um das Schmelzverhalten zu beobachten (Abbildung 2). Es zeigte sich, dass das reine Granulat zwar an-, aber nicht vollkommen durchschmilzt. Stattdessen färbt es sich bei den im Reaktor üblichen Temperaturen braun, was auf Zersetzung hindeutet. Auch Mischungen mit Imidazol zeigten ein ähnliches Verhalten und ergaben keine homogenen Schmelze. Stattdessen zeigte sich bei der inhomogenen Mischung (jeweils linkes Vial), dass das untenliegende Imidazol schmilzt und sich verfärbt, beim Abkühlen unter die Schmelztemperatur dann aber einen festen Block bildet. Solch ein Block stellt eine Gefahr für die Glaswand des Reaktors dar und unterstreicht erneut, wie wichtig eine gute Durchmischung während der laufenden Synthese ist. Aufgrund dieser Erfahrungen wurde das Granulat nicht in einer Synthese verwendet.

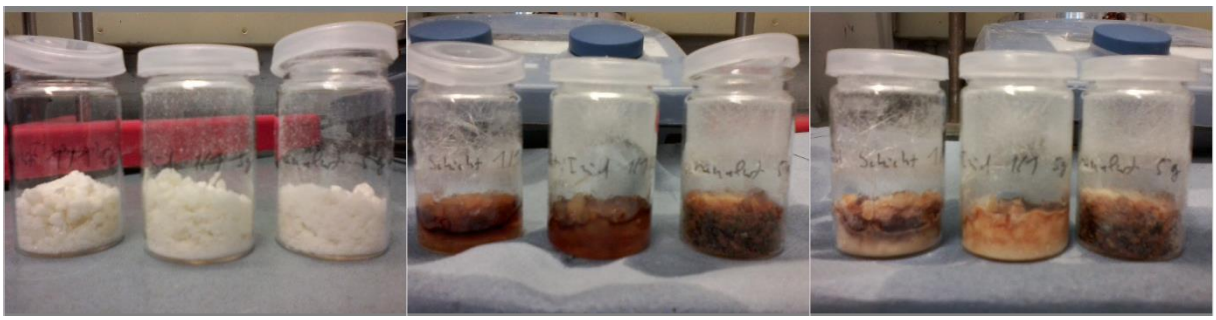

Abbildung 2: Einfluss von Hitze auf Stärke/Imidazol-Granulat. linkes Vial geschichtete Mischung aus Granulat und Imidazol, mittleres Vial durchmischte Mischung aus Granulat und Imidazol, rechtes Vial nur Granulat; linkes Bild vor dem Heizen, mittleres Bild nach 1h bei 130 °C, rechtes Bild nach dem Abkühlen.

Analytik der Pulver

Die Analytik der Pulver beginnt mit der chemischen Identifikation der Pulverbestandteile, da chemische Unterschiede sich in unterschiedlichen Materialeigenschaften äußern werden. Dafür eignet sich insbesondere die IR-Spektroskopie. Ein Vergleich der Chargen StM T02-1, StM T02-2 und StM L02 in Form von Rohmaterial zeigt allerdings Abweichungen zueinander (siehe Abbildung 3). Die drei dargestellten Proben weisen weitestgehend die gleiche stöchiometrische Zusammensetzung auf (siehe Tabelle 2), L02 wurde allerdings im kleinen Reaktor gefahren und T02-1 und T02-2 im großen Reaktor. Die dabei auftretenden Unterschiede in der Temperaturführung und der Durchmischung der Reagenzien führen zu Unterschieden in der Substitution. Indikativ dafür sind die Banden bei 1740, 1235 und 1165 cm^{-1}, deren unterschiedliches Verhältnis zueinander chemische Unterschiede anzeigen. Dabei sind vor allem unterschiedliche Substitutionsgrade der Glucoseeinheit der Stärke von Bedeutung.

Abbildung 3: IR-Spektren von Stärkeestern, hergestellt mit gleicher Zusammensetzung und gleichen Parametern in verschiedenen Chargen; lila im kleineren Reaktor, rot und blau im großen Reaktor.

Ein Vergleich der IR-Spektren von Rohmaterial von StM T03 mit StM T02-2 zeigt recht große Übereinstimmung (Abbildung 4), allerdings ist die Bande bei 1165 cm^{-1} etwas stärker ausgeprägt bei StM T03. Im Vergleich mit der Charge StM-L02 aus dem kleinen Reaktor zeigt sich aber ebenfalls die Abweichung bei den Banden 1740, 1235 und 1165 cm^{-1}. Das lässt auf unterschiedliche Materialeigenschaften für StM T02-2 und StM T03 untereinander, als auch im Vergleich mit StM L02 schließen.

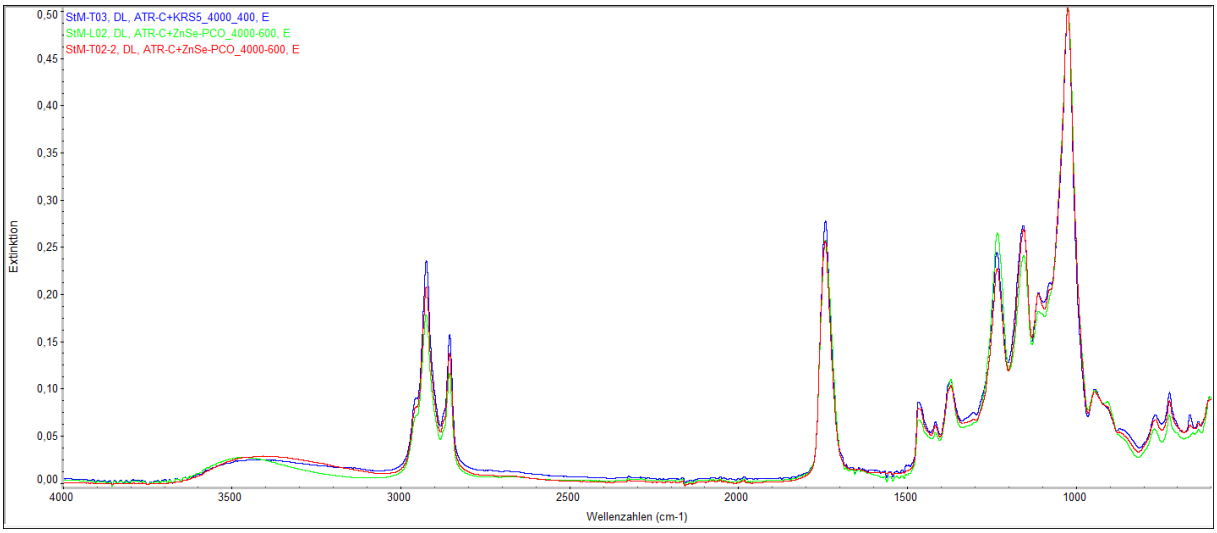

Abbildung 4: IR-Spektren von StM T03 (blau) im Vergleich mit StM L02 (grün) und StM T02 (rot).

AP3 Verarbeitung der Pulver, Schichtabscheidung und Untersuchung

Die in AP2 dargestellten Stärkeester wurden im Anschluss im Haus oder in Unteraufträgen vermahlen. Die Mahlergebnisse unterschieden sich deutlich durch die unterschiedlichen Verfahren. Bei INNOVENT wurde eine Kugelmühle verwendet, die vor der Mahlung gekühlt werden kann, aber nicht während des Mahlvorgangs. Auch ist der Durchsatz in dieser Mühle auf maximal 50 g pro Durchlauf beschränkt. Von der Firma Noll als ersten Unterauftragnehmer wird eine Zyklonmühle verwendet, die ein kontinuierliches Mahlen und Kühlen mit einem Durchsatz von bis zu 100 kg/h erlaubt. Als drittes Mahlverfahren wurde gegen Ende des Projekts am Leibniz-Institut für Polymerforschung Dresden eine Probe mit einer Rotormühle vermahlen. Diese erlaubt auch nur eine initiale Kühlung, hat aber einen Durchsatz von mehreren hundert Gramm pro Stunde.

Ein Vergleich der Pulver findet sich in den Rasterelektronenmikroskopie (REM)-Aufnahmen in Abbildung 5. Die bei INNOVENT vermahlenen Pulver waren sehr groß und besaßen sehr runde Konturen,

wohingegen die von der Firma Noll vermahlenen Pulver kleiner und deutlich kantiger sind (siehe Abbildung 5). Die unterschiedliche Größe lässt sich durch unterschiedliche Parameter während des Mahlens erklären, während die veränderte Partikelform vermutlich auf eine Erwärmung der Pulver am Ende des Mahlvorgangs bei INNOVENT zurückzuführen ist. Die in Dresden bemusterten Pulver wiederum zeigen ein ähnliches abgerundetes Aussehen wie die bei INNOVENT hergestellten Proben, sind von der Partikelgröße aber dazwischen. Für Pulverlacke sind Partikelgrößen mit einem Median von etwa 80 µm typisch, einem Wert, den die in Dresden vermahlenen Proben am Nächsten kommen.

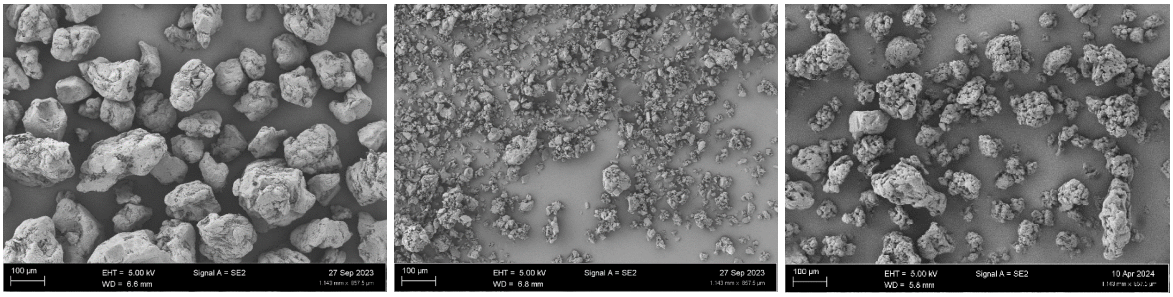

Abbildung 5: REM-Aufnahmen der Pulver; links: bei INNOVENT vermahlene Probe, Mitte: extern bei Noll vermahlene Probe; rechts: in Dresden bemusterte Probe.

Die von der Mahlung erhaltenen Pulver wurden bei INNOVENT auf ihr Fließverhalten in einer Pulvermesszelle (Fluidisierung) untersucht. Die besten Ergebnisse wurden mit der bei INNOVENT vermahlenen Probe StM L02 nach Mischung mit Cellulose acetat butyrat (CAB) im Verhältnis 4/1 erzielt. Die bei der Firma Noll vermahlenen Pulver zeigten auch nach Mischung mit CAB als Rieselhilfe eine schlechte Fluidisierung. Weitere Untersuchungen ergaben, dass bei der Mahlung bei der Firma Noll Wasser an der Pulveroberfläche ankondensiert, was zu einem Verklumpen des Pulvers führt. Eine Entfernung des Wassers im Vakuumtrockenschrank erhöhte die Fluidisierbarkeit des Pulvers deutlich. Sie reichte dennoch nicht an L02 heran (siehe Abbildung 6, je niedriger das Moment desto besser fließt die Probe).

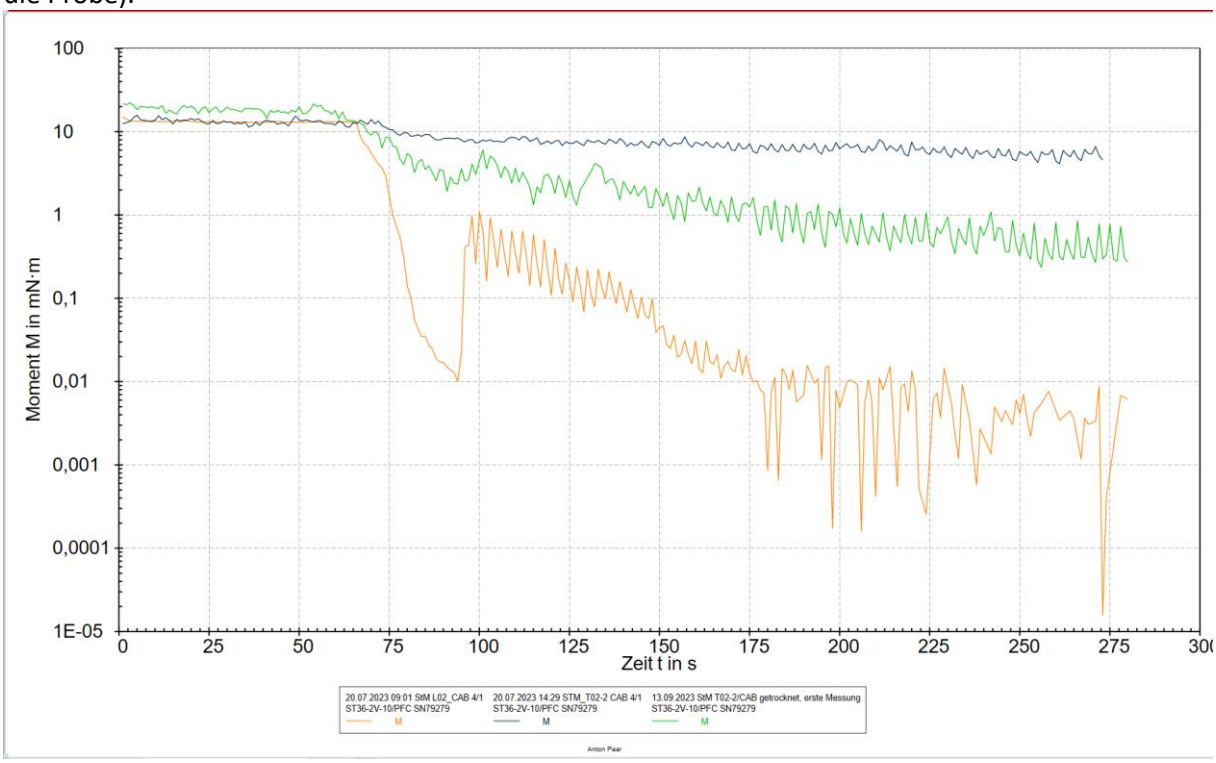

Abbildung 6: Fluidisierungsmessungen verschiedener Pulver; StM L02 als bisher bestes Material (orange), StM T02-2 direkt nach der Mahlung (schwarz) und StM T02-2 nach dem Trocknen im Vakuumtrockenschrank (grün); alle Proben sind 4/1 mit CAB vermischt.

Um die Fluidisierung weiter zu verbessern, wurden Pulverproben mit nanopartikulärem pyrogenem Siliciumoxid (Aerosil 200) als Rieselhilfe versetzt. Unter Zugabe von 5 Gew.-% Aerosil 200 konnte ein

verbessertes Fluidisierungsverhalten und ein steter Fluss des Pulvers aus der Pulverlackpistole bei INNOVENT beobachtet werden. Untersuchungen beim LZR und der Dr. Herrmann GmbH zeigten später dann jedoch, dass die Aufladbarkeit des Pulvers darunter leidet, weshalb die verwendeten Pulver nicht für einen Trockenauftrag geeignet waren.
Als Alternative zum Pulverlackauftrag wurde der Nassauftrag ins Auge gefasst. Dazu wurden Untersuchungen mit der Löslichkeit der Stärkeester in verschiedenen Lack-typischen Lösungsmitteln wie *n*-Butylacetat (BuOAc), Methylethylketon (MEK), Propylenglycolmonomethyletheracetat (PGMMA) oder 1-Methoxypropanol durchgeführt. Dazu wurde die Pulverprobe „StM-T03/CAB + 5% Aerosil 200“ („T03“) in den entsprechenden Lösungsmitteln gelöst. Dies gelang bei einem Feststoffgehalt von 20% bei allen Lösungsmitteln außer Methoxypropanol. Höhere Feststoffanteile sind bei allen Lösungsmitteln problematisch und zeigen Suspensionen mit starkem Bodensatz, der sich mit den zur Verfügung stehenden Mitteln nicht homogenisieren lässt.

Tabelle 3: Eignung verschiedener Lösungsmittel/Stärkeester-Kombinationen für den Sprühauftrag.

Lösungsmittel	20/80 Stärkeester/LM	30/70 Stärkeester/LM	40/60 Stärkeester/LM
BuOAc	Geeignet	Ungeeignet	zwei Phasen, ungeeignet
MEK	Geeignet	Bedingt geeignet	Bedingt geeignet
PGMMA	Geeignet	Ungeeignet	Ungeeignet
Methoxypropanol	Zwei Phasen, ungeeignet	Ungeeignet	Ungeeignet

Ausgehend von diesen Ergebnissen wurde auch StM-T02-2/CAB 4/1 + 5% Aerosil 200 mit 20 Massen% in MEK („T02“) gelöst. Die beiden Stärkeesterlösungen in MEK wurden auf von der Firma Fissek bereitgestellten Stahlblechen aufgetragen (Abbildung 7). Da Probleme beim Auftragen durch zu schnelles Verdampfen des Lösungsmittels MEK auftraten, wurde das höhersiedende Lösungsmittel BuOAc in 20% Volumenanteil zugefügt. Des Weiteren wurden zum Nasslack „T02“ die Modifikatoren TegoWet 280 („T02-2A“) und TegoTwin 4000 („T02-2B“) jeweils zugesetzt mit dem Ziel, die Haftung weiter zu verbessern. Allerdings zeigten die modifizierten Nasslacke keine deutliche Verbesserung im Vergleich mit der originalen Probe „T02“.
Um die Eignung der Beschichtungen besser beurteilen zu können, wurde Paraloid B72 als Referenz besorgt und auf die Bleche in der gleichen Art und Weise aufgetragen, wie die Stärkeesterbeschichtungen. Ein einfacher Ritztest zeigt, dass T03 die stärksten Abplatzungen von allen drei Beschichtungen aufweist. Die Haptik der Stärkeesterbeschichtungen ist weniger rutschig und die Optik deutlich matter als die von Paraloid B72.

Abbildung 7: Mit Nasslack beschichtete Bleche; eingeritzt zur weiteren Analytik; li. Paraloid B72 als Referenz; mi. StM T02/CAB 4/1 + 5% Aerosil 200; re. StM T03/CAB 4/1 + 5% Aerosil 200.

Zur Erprobung der Lagerfähigkeit wurden im Lackierzentrum Reichenbach verschiedene Materialpro-

ben eingelagert. Temperaturen und Luftfeuchtigkeit werden aufgezeichnet. Monatlich erfolgt eine optische Begutachtung des Materials. Eingelagert wurde Pulverlackmaterial, welches bereits nach wenigen Wochen verklumpte und nicht mehr verwendungsfähig war. Der Nasslack wurde ebenfalls in die Lagerüberwachung genommen und erfüllt mit Stand 12/24 alle Anforderungen (Tabelle 4).

Tabelle 4: Lagerfähigkeit.

Eigenschaft	**Pulverprobe**	**Erfüllt / Nicht erfüllt**
Lagerung bei Temperaturen zwischen 5 und 35°C	Eingelagert am 01.05.22	Erfüllt / nicht erfolgreich
Mindesthaltbarkeitsdauer 24 Monate	Eingelagert am 01.05.22	erfüllt / nicht erfolgreich
Luftfeuchtigkeit im Lagerraum zwischen 35% und 75%	Eingelagert am 01.05.22	erfüllt / nicht erfolgreich
Eigenschaft	**Nasslackprobe**	**Erfüllt / Nicht erfüllt**
Lagerung bei Temperaturen zwischen 5 und 35°C	Lieferung 02/24	Erfüllt
Mindesthaltbarkeitsdauer 24 Monate	Lieferung 02/24	Stand 12/24 erfüllt
Luftfeuchtigkeit im Lagerraum zwischen 35% und 75%	Lieferung 02/24	Erfüllt

AP4 Vorbehandlungen für industrielle Anwendungen

Das zu erprobende Substrat soll auf einer Vielzahl von Trägermaterialien einsetzbar sein. Grundlage dafür ist die Erprobung geeigneter Vorbehandlungen für diese Materialien, um die Haftung des Substrats auf den Trägermaterialien zu gewährleisten. Gemeinsam mit dem Kooperationspartner FISSEK GMBH MASCHINEN UND WERKZEUGBAU wurde vom Lackierzentrum Reichenbach eine Werkstoffdefinition der zu erprobenden Trägermaterialien erarbeitet.
So wurden in der ersten Versuchsreihe Testbleche aus S235JR Stahlblech mit verschiedenen mechanischen und chemischen Technologien vorbereitet, welche diese entfetten um eine Haftung der Beschichtung zu erzeugen. Die Ergebnisse der mechanischen Versuche mittels Sandstrahlen wurde mittels Rauhigkeitsmessung ermittelt und waren zufriedenstellend (Abbildung 8).

Abbildung 8: li: Kennwerte nach der Sandstrahlvorbehandlung; re: Wasserbruchprüfung.

Die Wasserbruchprüfung (Waterbreaktest) ist eine gängige Methode, um die Oberflächenreinheit von Metallen zu prüfen. Für eine zuverlässige Haftung muss ein Material eine hohe Oberflächenenergie haben. Eine saubere Oberfläche hat in der Regel eine hohe Energie und sollte im Test dazu führen, dass das Wasser in einem ungebrochenen Bogen von der Oberfläche abfließt. Obwohl die Entfettung mittels lösemittelhaltigen Entfetters zu den traditionellen Technologien der Bauteilereinigung gehört, waren die Ergebnisse der Vortests zur Haftung bei diesen Technologien (Reihe 1, 2 und 8 in Tabelle 5)

nicht zufriedenstellend.

Tabelle 5: Ergebnisse der Voruntersuchungen mittels Wassserbruchprüfung.

Versuchsreihe	Reinigungsart	Ergebnis der Wasserbruchprüfung
Reihe 1	Entfetten mit Bremsenreiniger	Teilweise IO
Reihe 2	Entfetten mit Silikonentferner	Teilweise IO
Reihe 3	Entfetten/Eisenphosphatieren	**IO**
Reihe 4	Sandstrahlen mit Edelstahl	**IO**
Reihe 5	Sandstrahlen mit Glasperlen	**IO**
Reihe 6	Sandstrahlen mit Granatsand	**IO**
Reihe 7	Entfetten mit Tensid Ekasit	**IO**
Reihe 8	Schleifen und Entfetten	Teilweise IO

Zur weiteren Untersuchung der optimalen Haftung wurden die Stahlbleche der Fa Fissek GmbH unterschiedlich vorbehandelt und anschließend pulverlackiert. Von diesen Blechen wurde mittels Stempelabriss die Zugspannung ermittelt, um den Einfluss der Vorbehandlung einschätzen zu können. Die Ergebnisse sind in Abbildung 9 zusammengefasst und zeigen nur einen geringen Einfluss der Vorbehandlung auf die Festigkeit. Sandstrahlen und Schleifen erhöhen die Rauigkeit und sorgen für etwas, aber nicht signifikant bessere Haftung. Für weitere Pulverlack-Versuche wurde vor der Beschichtung standardmäßig mit Aceton entfettet. Für den Nasslackauftrag wurde mit den Blechen ebenso verfahren. Abweichende Vorbehandlungen im weiteren Bericht werden dann gesondert erwähnt.

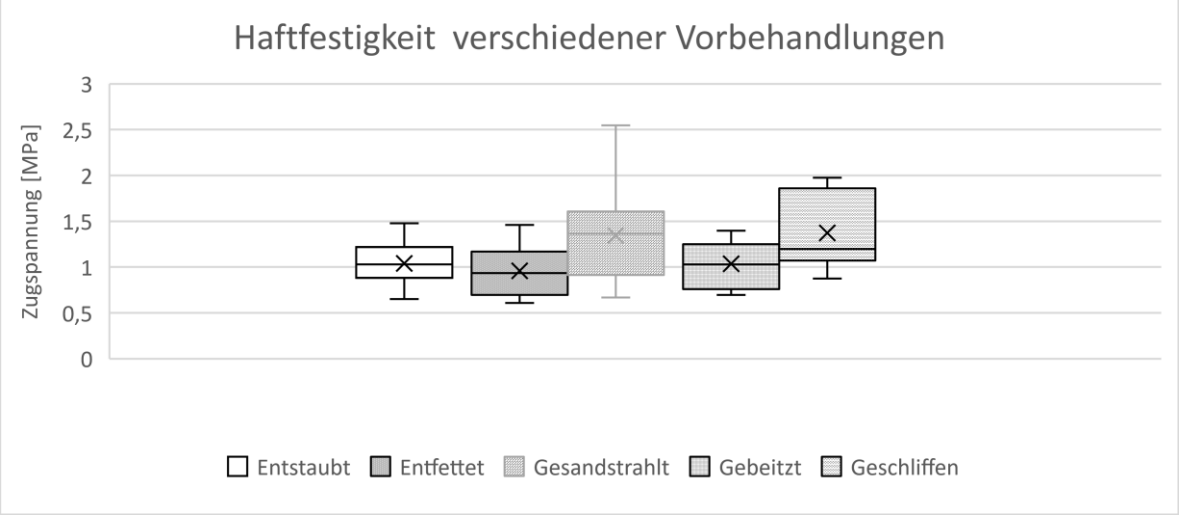

Abbildung 9: Haftfestigkeit verschieden vorbehandelter Stärkeesterproben.

AP5 Beschichtung praxisrelevanter Substratwerkstoffe und Untersuchung der Korrosionsbeständigkeit

Beschichtung mittels Pulverlackauftrag

Die bei INNOVENT vermahlenen Pulver „StM T01“ (in zwei Varianten), „StM-L02“ und „CAB“ wurden mit Pulverbeschichtungspistolen auf die vom Projektpartner FISSEK GMBH MASCHINEN UND WERKZEUGBAU gelieferte Stahlbleche versucht, aufzutragen. Das Material war allerdings nicht ausreichend rieselfähig und ließ sich nicht elektrostatisch ausreichend aufladen (siehe auch Tabelle 6).

Tabelle 6: Untersuchungsergebnisse zu Materialuntersuchungen StM-T01 und StM-L02.

Pulver	Fluidisierung	Rieselfähigkeit	Aufladung
StM-T01/CAB 1:7	schlecht	stockt teilweise	nicht möglich, da stockt
StM-T01/CAB 2:1	sehr Schlecht	stockt	nicht möglich, da stockt
StM-L02/CAB 4:1	mangelhaft	ok	18,6 % Verlust
CAB	mangelhaft	ok	18,2 % Verlust

Die Werkzeuge verklebten teilweise so stark, dass Schlauchpakete nach wenigen Versuchen erneuert werden mussten. Die erreichten Schichtdicken lagen unter 10 µm. Es zeigte sich insbesondere, dass das Material nach nur wenigen Tagen Transport und Lagerung verklumpte und nach 14 Tagen nach Anlieferung gar nicht mehr verarbeitbar war.
Auch die später entwickelten Pulvermaterialien StM T02 und StM T03 zeigten ungenügendes Riesel- und Aufladungsverhalten (siehe AP3), so dass der Fokus auf Beschichtungen mittels Nasslack gelegt wurde.

Beschichtungen mittels Nasslack

Dazu wurden Stahlbleche wurden mittels der in Butylacetat gelösten Stärkeesters StM-T01 und StM-L02 beschichtet. Im Vorfeld wurden Versuche zur Vorbereitung der Testbleche unternommen mit dem Ziel, die Haftfestigkeit der Beschichtung zu erproben. Dazu wurden die Bleche (1) chemisch/organisch entfettet (Bremsenreiniger), (2) sandgestrahlt und (3) chemisch/organisch entfettet, beflammt und zusätzlich mit einem Haftvermittler Pyrosil vorbeschichtet. Das durch den Projektpartner INNOVENT gelieferte Testmaterial wurde mittels Pinsel und Rollenapplikation aufgetragen.

Abbildung 10: Beschichten von Platten mit dem Nasslacksystem beim LZR.

Die Lackierungen erfolgten in der Nasslackierungsanlage unter verschiedenen Bedingungen hinsichtlich Temperatur und Luftfeuchtigkeit. Die Trocknung des Materials erfolgte forciert im Ofen, getestet wurden auch hier verschiedene Temperaturbereiche.

Beschichtungen im Temperaturbereich unterhalb 18°C und oberhalb 25°C führten zu Ergebnissen, die nicht akzeptabel waren. Luftfeuchtigkeiten unter 30% und oberhalb 70% führten ebenfalls zu inaktzeptablen Ergebnissen. Die Beschichtung blieb klebrig und es wurden Schichtdicken unterhalb von 5 µm erreicht (Ziel 60 µm). Innerhalb des Idealtemperaturbandes von 20°C – 25°C wurde eine maximale Schichtdicke von nur 15 µm erreicht. Auch die gewünschte Haptik (glatt verlaufend, fest) konnte nicht erreicht werden. Die Testbleche wurden beim Unterauftragnehmer Dr. Herrmann GmbH & Co. KG analysiert. Die Ergebnisse sind in Tabelle 10 dargestellt.

Tabelle 7: Untersuchungsergebnisse zu Nasslack StM T01

Vorbehandlung	Schichtdicke [µm]	Haptik/Optik	Gitterschnitt	Kugelschlag(20 Inch/pound)	Kraft [MPa]	Bruchbild
Silikonentferner + Beflammen + Pyrosil	12	Klebrig/feinstr.	GT 0	Kleine Risse/ keine Abplatzungen	1	80 Y 20 A/B
Strahlen	12	Klebrig/feinstr.	GT 0	Kleine Risse/ keine Abplatzungen	1,5	100 Y
Silikonentferner + Bremsenreiniger	13	Klebrig/feinstr.	GT 0	Kleine Risse/ keine Abplatzungen	0,8	100 Y

Die Untersuchungen der Beschichtungen führten in der Summe aber zu dem Ergebnis, dass diese Beschichtungsstoffe mittels Nassapplikation ebenfalls nicht als verwendungsfähig eingestuft werden mussten.

In der weiterführenden Versuchsphase wurden aus den Pulverproben StM-T02/CAB und StM-T03/CAB durch den Projektpartner INNOVENT e.V. Materialien entwickelt, welche sich durch Pinsel, Rolle oder Lackierpistole in Nasslackanlagen auftragen ließen.

Die Lackierungen erfolgten in der Nasslackierungsanlage auf Stahlblechen unter variierende Bedingungen hinsichtlich Temperatur und Luftfeuchtigkeit. Die Trocknung des Materials erfolgte forciert im Ofen in verschiedene Temperaturbereichen. Getestet wurde die Beschichtungen im Temperaturbereich zwischen 15°C und 35°C. Beschichtungen unterhalb 18°C und oberhalb 27°C führten zu Ergebnissen, die nicht akzeptabel waren. In den unteren Temperaturbereichen kam es zu Lackenthaftungen und die Mindest-Schichtdicke von 60 µm konnte zum Teil nicht erreicht werden, in den zu hohen Temperaturbereichen kam es ebenfalls zu Haftungsstörungen und die Optik des Lackes wurde rauh und uneben. Luftfeuchtigkeiten unter 35% und oberhalb 70% führten ebenfalls zu inaktzeptablen Ergebnissen, ähnlich denen außerhalb des idealen Temperaturbandes.

Die Trocknung erfolgte im Ofen bei 60°C bei 30 min Einbrennzeit. Temperaturen und Zeiten unterhalb dieser Werte führten insbesondere zu Problemen in der Lackhaftung.

Innerhalb des Idealtemperatur- und Luftfeuchtigkeitsbereiches wurde die gewünschte Schichtdicke (mind. 60 µm) und auch die gewünschte Haptik (glatt verlaufend, fest) erreicht. Eine ausreichende Haftung konnte jedoch in den Werkstatt-Tests nur für das Material Stärkeester StM-T02-2/CAB (4:1) 5% Aerosil 200 in 20 % in Butylacetat erreicht werden.

Tabelle 8: Untersuchungsergebnisse zu Nasslacken StM T02 und StM T03.

Material	Vorbehandlung	Schichtdicke [µm]	Optik	Gitterschnitt	Ergebnis
StM-T02-2/CAB + 5% Aerosil 200 (20% in BuOAc)	Sandgestrahlt mit Granatsand	81	Matt, transparent	GT 0	IO

Material	Vorbehandlung	Schichtdicke [µm]	Optik	Gitterschnitt	Ergebnis
StM-T02-2/CAB + 5% Aerosil 200 (20% in BuOAc)	Geschliffen	72	Matt, transparent	GT 0	IO
StM-T02-2/CAB + 5% Aerosil 200 (20% in BuOAc)	Silikonentferner	69	Matt, transparent	GT 1-2	Bedingt IO
StM-T03/CAB + 5% Aerosil 200 (20% in BuOAc)	Sandgestrahlt mit Granatsand	105	Matt, transparent mit milchigen Schlieren	GT 1-2	Bedingt IO
StM-T03/CAB + 5% Aerosil 200 (20% in BuOAc)	Geschliffen	85	Matt, transparent mit milchigen Schlieren	GT 4	NIO
StM-T03/CAB + 5% Aerosil 200 (20% in BuOAc)	Silikonentferner	105	Matt, transparent mit milchigen Schlieren	GT 4	NIO

AP6 Studien zur großflächigen Entfernung der Beschichtung

Die Versuche zur Entschichtung wurden im Lackierzentrum Reichenbach mit den Materialien StM T02/CAB und StM T03/CAB, jeweils mit 5% Aerosil gelöst zu 20 % in Butylacetat vorgenommen. Die Probebleche hierfür wurden im Normbereich bei 23°C Lufttemperatur und 45% Luftfeuchtigkeit beschichtet, mit einer Ablüftzeit von 15 min und anschließender forcierten Trocknung von 30 min bei 60°C.
Typische Vorgehensweisen zur Entschichtung von Lackierungen sind chemische Entfernungen durch Lösemittel oder Beize, mechanische Verfahren wie Sandstrahlen und Glasperlenstrahlenoder das physikalisch-mechanische Verfahren des Trockeneisstrahlens. Alle diese Entschichtungstypen wurden getestet und ausgewertet.
Eine Analyse der Oberflächen wurde mittels optischer Begutachtung und Glanzprüfer PCE-GM 60 Plus vorgenommen. Dabei wird in einem standardisierten Winkel von 60° das Objekt beleuchtet, ein Sensor gegenüber nimmt dann die Stärke der Reflexion auf und gibt Sie als Glanzpunkte/ Glossunits wieder. Durch einen Abgleich mit den Werten der Ausgangssituation lassen sich Beschichtungsrückstände identifizieren. Nachteil an dieser Bestimmung ist vor allem der kleine räumliche Messbereich auf den Proben. Daher ist die optische Begutachtung durch einen erfahrenen Lackiermeister ergänzend erfolgt. Bei allen Entschichtungsverfahren wurde auch der Aufwand gemessen, um eine Aussage zur Wirtschaftlichkeit des Verfahrens treffen zu können. Das Material StM-T03/CAB zeigte bei allen Versuchen eine schlechtere Haftung als die Beschichtung mit Material StM-T02-2/CAB.

Entschichtung durch Trockeneisstrahlen

Das Trockeneisstrahlen ist ein Druckluftstrahlverfahren, bei dem als Strahlmittel festes Kohlenstoffdioxid, sogenanntes Trockeneis, mit einer Temperatur von rund −78 °C eingesetzt wird. Es ist elektrisch nicht leitend, chemisch inert, ungiftig und nicht brennbar. Unter atmosphärischem Druck sublimiert Trockeneis, d. h., es geht direkt vom festen in den gasförmigen Zustand über, ohne sich zuvor zu ver-

flüssigen. Im Versuch wurde der anzuwendende Strahldruck, das Düsenwerkzeug (Schneecrasher oder Strahllanze) in Verbindung mit dem Zeitaufwand der Entschichtung (min/qm) gemessen. Das Werkzeug Strahllanze verstärkt dabei die Druckluftleistung um ca. das Doppelte.
Abbildung 11 zeigt die Wirkung einer Strahllanzenbehandlung mit Trockeneis, 10 bar, auf Beschichtungen mit StM T02/CAB auf einem sandgestrahlten (Mitte) und einem geschliffenen Trägerblech (rechts).

Abbildung 11: li: Kärcher Trockeneisstrahlgerät mit den Einstellmöglichkeiten; Mitte sandgestrahltes Blech, re: geschliffenes Blech mit StM T02 nach der Entschichtung mit Trockeneis.

Der Aufwand für die verschiedenen Entschichtungen ist dabei wie folgt:
(1) gestrahlte Trägermaterialien Stahlblech:
Material StM-T02-2/CAB Entschichtung ab 10 bar mit ca. 10 min/ qm (erhöhter Aufwand)
Material StM-T03/CAB Entschichtung ab 8 bar mit ca. 7 min/ qm (vertretbarer Aufwand)
(2) geschliffene Trägermaterialien Stahlblech:
Material StM-T02-2/CAB Entschichtung ab 8 bar mit ca. 4 min/ qm (vertretbarer Aufwand)
Material StM-T03/CAB sofortige vollständige Entschichtung ab 5 bar Strahldruck
(3) chemisch entfettete Trägermaterialien Stahlblech:
Material StM-T02-2/CAB sofortige und vollständige Entschichtung ab 5 bar Strahldruck
Material StM-T03/CAB sofortige und vollständige Entschichtung ab 5 bar Strahldruck

Zusammenfassend kann man zur Entschichtung mit Trockeneis folgendes festhalten: Der Aufwand liegt in einem vertretbaren Aufwand, die Ergebnisse sind auch optisch zufriedenstellend. Die Oberflächenbeschaffenheit des Materials hat sich durch die Entschichtung mit Trockeneis nicht wesentlich geändert, was positiv zu bewerten ist. Die Entschichtungsmethode ist gut geeignet.

Entschichtung durch Lösemittel/ VOC

Empfindliche Oberflächen, die nicht angegriffen werden dürfen, sollten mit organischen Entlackern behandelt werden. Im Versuch wurde der Zeitaufwand der Entschichtung (min/qm) gemessen und mit bekannten Bearbeitungszeiten verglichen. Die Entschichtung mit Lösemittel (Bremsenreiniger) zeigt sehr schlechte Ergebnisse für alle Vorbehandlungsarten und Beschichtungs-Materialien. Die Beschichtung wurde nur angelöst und auch nach einer Bearbeitungszeit von mehr als 40 min pro qm (Zeitaufwand nicht mehr akzeptabel) befanden sich noch mehr als 50% Beschichtungs-Rückstände auf den Blechen. Die Methode ist zur Entschichtung nicht geeignet.

Entschichtung durch Glasperlenstrahlen

Beim Glasperlenstrahlen werden Glasperlen mit Druckluft von 6 bar auf die zu behandelnde Oberfläche gestrahlt. Dabei erzeugen die Glasperlen einen gleichmäßigen Abtrag von Beschichtungen, ohne das darunterliegende Material zu beschädigen. Im Versuch wurde der Zeitaufwand der Entschichtung (min/qm) gemessen und mit bekannten Bearbeitungszeiten verglichen. Zusammenfassend kann man

zur Entschichtung mit Glasperlenstrahlen festhalten: Der Aufwand der Entschichtung liegt in einem vertretbaren Maße zwischen 4,9 und 10,5 min/qm. Die Oberfläche des Materials hat sich durch die Entschichtung mit Glasperlenstrahlen leicht verändert. Die Entschichtungsmethode ist gut geeignet.

Entschichtung durch Sandstrahlen

Beim Sandstrahlen wird Granatsand mit Druckluft von 6-8 bar auf die zu behandelnde Oberfläche gestrahlt. Der Aufwand der Entschichtung liegt zum Teil in einem vertretbaren Maße zwischen 3,7 und 9,25 min/qm bei chemisch entfetteten und geschliffenen Blechen. Bei sandgestrahlten Blechen ist der Aufwand mit 18,5 min/qm vergleichsweise hoch. Es zeigen sich dabei deutliche Unterschiede zwischen dem Material T02 und T03. Die Oberfläche des Trägermaterials verändert sich durch die Entschichtung mit Sandstrahlen deutlich, soweit dieses nicht schon vorher (in der Vorbereitung) sandgestrahlt wurde. Die Entschichtungsmethode ist nur bedingt geeignet.

Entschichtung durch Beize

Empfindliche Oberflächen, die nicht angegriffen werden dürfen, können mit Entlackern/ Beize behandelt werden. Im Versuch wurde dazu die saure Beize HAUG Ekastrip Kalt-/Heißentlackung H1635 genutzt. Das Beschichtungsmaterial löst sich bei allen Beschichtungsproben nach ca. 4 Stunden im Beizbad an und lässt sich mit einem Spatel vom Träger ablösen und kann mittels Filtration entsorgt werden, die Dauer beträgt ca. 40 min pro qm. Die Entschichtungsmethode ist grundsätzlich geeignet, jedoch aufwendig und unterliegt einer relativ großen ökologischen Belastung.

Entschichtung mit Wasserhochdruck

Für die Untersuchungen wurden ein handelsüblicher Hochdruckreiniger der Fa. Kärcher verwendet. Mit diesem wurde ein Wasserdruck von 20 bis 110 bar erreicht. Es wurde die Beschichtung auf Aluminium und Verzinkten Stahl in den Lackvarianten „T02 A“ - STM T02-2/CAB (4:1) 5% Aerosil (20 % in MEK)+0,46 TegoTWIN 4000 „T02 B“ - STM T02-2/CAB (4:1) 5% Aerosil (20 % in MEK)+0,9 TegoWet 280 geprüft. Die Oberflächenvorbereitung erfolgte mittels Silikonentferner (Entfettung). Es wurden keine Enthaftungen beobachtet, unabhängig des Substrats und der Beschichtung. Es konnte auch keine Reduzierung der Schichtdicken beobachtet werden. Die Entschichtungsmethode ist nicht geeignet.

Zusammenfassung Entschichtungsmethoden

Zusammenfassend kann man festhalten, dass nur die Entschichtungsmethoden des Glasperlenstrahlens und des Trockeneisstrahlens gut geeignet sind, um die untersuchten Beschichtungen vom Trägermaterial zu lösen. Glasperlenstrahlen ist dabei finanziell weniger aufwendig, kann jedoch nur in einer Anlage (Werkstatt) durchgeführt werden. Trockeneisstrahlen kann im Freien direkt am Objekt rückstandsfrei und umweltschonend durchgeführt werden.
Beide Methoden kommen zu guten Ergebnissen. Jedoch kommt es zu Unterschieden in der Optik der Materialien, die ggf. zu berücksichtigen sind. Tabelle 9 zeigt die Unterschiede im Glanzgrad nach der Vorbereitung und nach der Entschichtung. zeigt die Einstufung der Messwerte im Ausdruck des Glanzgrades.
Jedes zu beschichtende Trägermaterial besitzt seinen speziellen Glanzgrad, so hatten die Arbeitsproben durchgängig Werte über 100 (hochglänzend). Es ist zu erkennen, dass die Vorbereitungsart „Sandstrahlen“ bereits den Effekt hat, dass das Trägermaterial dann einen Glanzgrad von 8 (Matt) aufweist. Nach der Reinigung mit Sandstrahlen oder Glasperlenstrahlen wird dieser Wert wieder erreicht.
Mit dem Entschichten durch Trockeneisstrahlen werden – je nach Vorbehandlung – höhere Werte im Glanzgrad nach der Entschichtung erreicht. Dieses ist also für sensiblere Trägermaterialien besser geeignet.

Tabelle 9: Übersicht über Glanzgrade vor und nach der Entschichtung.

Entschichtung	Material	Vorbehandlung	Glanzgrad nach Vorbehandlung	Glanzgrad mit Lack	Glanzgrad nach Entschichtung	Differenz
Trockeneisstrahlen	StM-T02	Strahlen	8	8	4	-4
Trockeneisstrahlen	StM-T02	Schleifen	53	12	71	18
Trockeneisstrahlen	StM-T02	Silikonentferner	181	15	160	-21
Trockeneisstrahlen	StM-T03	Strahlen	8	4	4	4
Trockeneisstrahlen	StM-T03	Schleifen	53	8	51	-2
Trockeneisstrahlen	StM-T03	Silikonentferner	181	11	198	17
Lösemittel	StM-T02	Strahlen	8	8	7	n/a
Lösemittel	StM-T02	Schleifen	53	12	12	n/a
Lösemittel	StM-T02	Silikonentferner	181	15	18	n/a
Lösemittel	StM-T03	Strahlen	8	4	7	n/a
Lösemittel	StM-T03	Schleifen	53	8	11	n/a
Lösemittel	StM-T03	Silikonentferner	181	11	19	n/a
Glasperlenstrahlen	StM-T02	Strahlen	8	8	8	0
Glasperlenstrahlen	StM-T02	Schleifen	53	12	8	-45
Glasperlenstrahlen	StM-T02	Silikonentferner	181	15	7	-173
Glasperlenstrahlen	StM-T03	Strahlen	8	4	8	0
Glasperlenstrahlen	StM-T03	Schleifen	53	8	8	-45
Glasperlenstrahlen	StM-T03	Silikonentferner	181	11	8	-173
Sandstrahlen	StM-T02	Strahlen	8	8	3	-5
Sandstrahlen	StM-T02	Schleifen	53	12	3	-50
Sandstrahlen	StM-T02	Silikonentferner	181	15	4	-177
Sandstrahlen	StM-T03	Strahlen	8	4	3	-5
Sandstrahlen	StM-T03	Schleifen	53	8	3	-50
Sandstrahlen	StM-T03	Silikonentferner	181	11	3	-178
Beize	StM-T02	Strahlen	8	8	17	9
Beize	StM-T02	Schleifen	53	12	57	4
Beize	StM-T02	Silikonentferner	181	15	55	-126
Beize	StM-T03	Strahlen	8	4	18	10
Beize	StM-T03	Schleifen	53	8	54	1
Beize	StM-T03	Silikonentferner	181	11	58	-123

AP7 Analytik

Die Analytik der Beschichtungen wurde zumeist vom Unterauftragnehmer Dr. Herrmann GmbH- durchgeführt. Zunächst wurden Korrosionstests an Musterteilen durchgeführt, die mit StM T01 beschichtetet waren. Dazu wurden ein Salzsprühnebeltest nach DIN EN ISO 9227 und ein Kondenswassertest (CH) gemäß DIN EN ISO 6270-2 durchgeführt:

Zur Bestimmung der Beständigkeit einer Beschichtung gegen Feuchtigkeit wurden die zu untersuchenden Proben beim Unterauftragnehmer Dr. Herrmann GmbH bei konstanter Temperatur (40 ± 3 °C) und einer Luftfeuchte von ca. 100 % in einer Klimakammer (Erichsen Hygrotherm 519) eingelagert. Nach Ablauf der vereinbarten Versuchsdauer (240 h) erfolgte die Auswertung anhand des Blasengrades und wahrnehmbarer Korrosionserscheinungen und zeigte ein gutes Prüfbild (Abbildung 12).

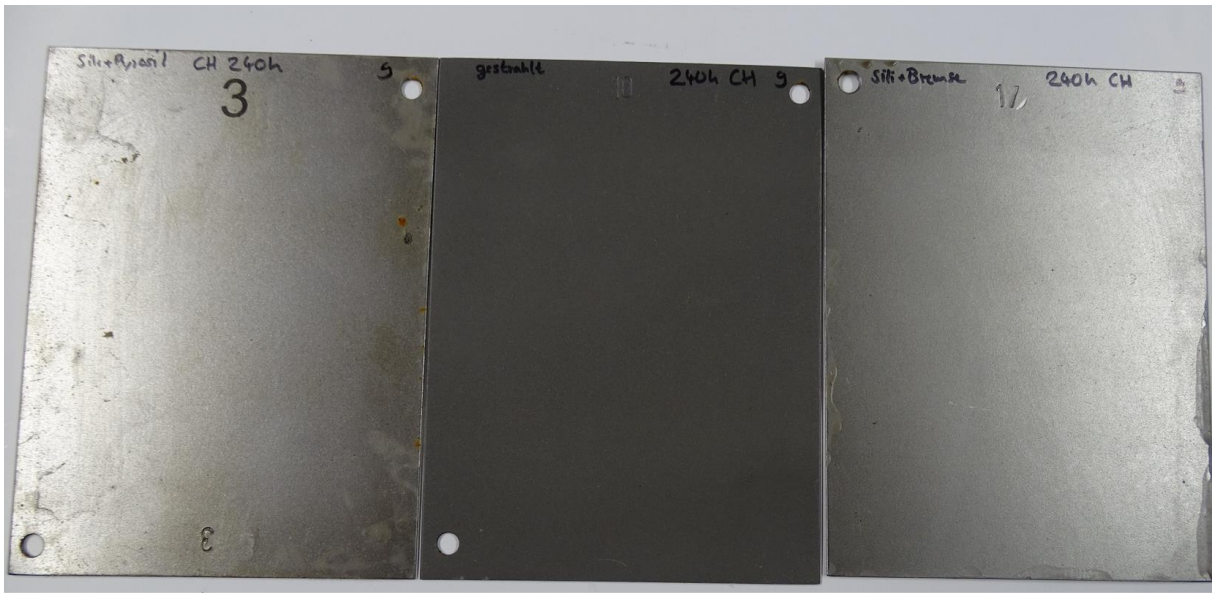

Abbildung 12: Mit StM T01 beschichtete Bleche nach 240 h in 100 % Luftfeuchte.

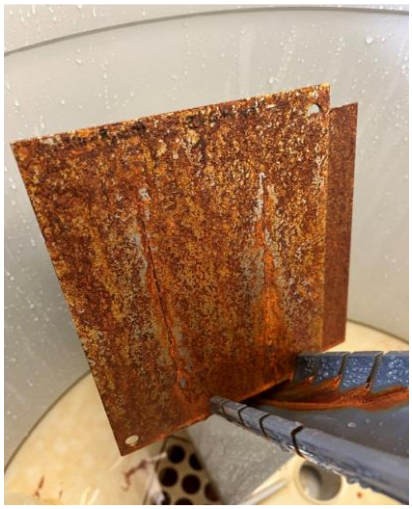

Abbildung 13: Mit StM T01 beschichtete Bleche nach 24 h im neutralen Salzsprühtest.

Für den neutralen Salzsprühtest wurden die zu beanspruchenden Teile nach einer definierten Oberflächenbeschädigung (Zwei Einschnitte in den Lackfilm mit Ritzstichel nach SIKKENS, 1,0 mm Schneide) in der Testapparatur (Gerät: Q-FOG CCT 600) mit Natriumchloridlösung besprüht. Der Prüfzeitraum richtet sich nach der zu untersuchenden Korrosionsschutzklasse. Nach dem Salzsprühnebeltest werden die Blasenbildung, die Enthaftung und die Unterrostung jeweils am Ritz bewertet. Dabei wird für die Beurteilung der Beschichtungsschäden die DIN EN ISO 12944 als Bewertungsgrundlage gewählt. Die Testergebnisse hinsichtlich der Korrosionsbeständigkeit der Beschichtung StM T01 im Salzsprühnebeltest waren nicht zufriedenstellend und die Versuche in der Testkammer wurden nach wenigen Stunden abgebrochen.

Die weiter entwickelten Materialien „StM-T02-2/CAB + 5% Aerosil 200“ („T02“) und „StM-T03/CAB + 5% Aerosil 200“ (T03) wurden als Nasslacke auf Stahlbleche mit Schichtdicken zwischen 30 und 40 µm aufgetragen. Mit diesen Proben wurde bei INNOVENT die Chemikalienbeständigkeit überprüft, indem

die entsprechende Chemikalie mit einem Wattetupfer aufgenommen und dieser auf dem Blech gelagert wurde. Visuelle Änderungen der Bleche wurden notiert und dokumentiert.

Tabelle 10: Chemikalienbeständigkeit.

Chemikalie	T02 Veränderung nach	T03 Veränderung nach	Ohne Beschichtung Veränderung nach
AcOH (25%)	1h	1 h	1 h
EtOH	Keine Veränderung nach 2 Wochen	Keine Veränderung nach 2 Wochen	2 h
HCl (1 M)	2 h	4 h	1 h
NaOH (1 M)	2 h	2 h	2 h
H_2O	Keine Veränderung nach 2 Wochen	Keine Veränderung nach 2 Wochen	Keine Veränderung nach 2 Wochen
Spülmittel	1 Woche	1 Woche	2 h

Es zeigt sich, dass die hochkorrosiven Säuren Essigsäure und Salzsäure sehr rasch zu Rostbildung sowohl bei den beschichteten Blechen als auch bei der unbeschichteten Referenz führen. Ein gewisser Schutz wird durch die Stärkeesterbeschichtung gewährleistet. Gegenüber 1 M Natronlauge zeigt sich kein Unterschied, anders bei der Spülmittellösung. Die unbeschichtete Probe verändert sich nach zwei Stunden, die beschichteten Bleche zeigen erst nach einer Woche Veränderungen. Für destilliertes Wasser wurde bei allen Proben kein Unterschied festgestellt.

Die Sonnenlichtbeständigkeit der mit T02 und T03 beschichteten Bleche wurde durch einen UV-B-Alterungstest untersucht und durch Veränderungen des Glanzgrades evaluiert (Abbildung 14). Das Ziel war eine Abnahme des Glanzgrades von weniger als 50 % gegenüber dem Ausgangswert. Als Referenz wurde Paraloid B72 verwendet, dies zeigt nach dem Test eine gesteigerten Glanzgrad, vermutlich durch UV-induziertes Quervernetzen der Moleküle. Die Stärkeesterproben zeigen eine Abnahme des Glanzes, T02 auf 48% des Ausgangswertes und damit knapp unter der Anforderung von 50%, T03 zeigt mit 65 % zwar auch eine deutliche Abnahme, liegt aber in der Anforderung prinzipiell drin. Damit ist eine gewisse UV-Beständigkeit des Systems gegeben.

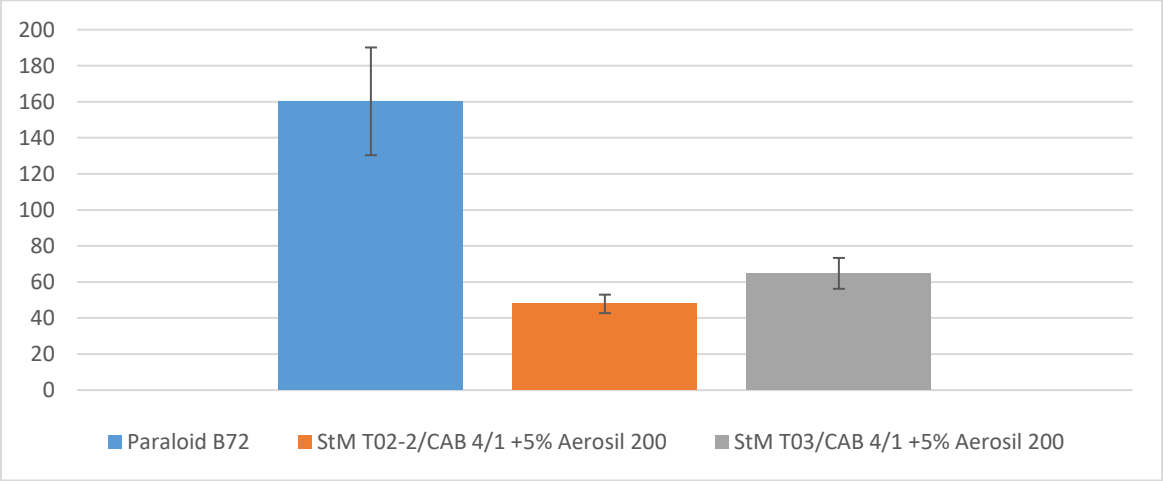

Abbildung 14: Glanzgrad nach UV-B-Bestrahlung für 300 h.

Außerdem wurden die Bleche mit „T02“, „T03“ und Paraloid B72 mechanischen Prüfungen unterzogen, einer Dornbiegeprüfung, einer Tiefungsprüfung, einer Kugelschlagprüfung mit 1000 g Kugelgewicht und einer Überprüfung des Eindruckwiderstands nach Buchholz. Die Ergebnisse sind in Tabelle 11 zusammengefasst. Der Eindruckwiderstand ist ein Maß für die Härte des Lacks und ist für die Stärkeesterproben geringer als beim Vergleich Paraloid B72. Das Ziel von größer 80 erreichen beide Stärkeesterproben nicht, T02 ist dabei näher an der Vorgabe. Für zukünftige Versuche wird also ein festerer, härterer Lack benötigt.

Die Tiefungs-, Kugelschlag- und Dornbiegeprüfung spiegeln jeweils die Haftung der Beschichtung auf

unterschiedlich verformten Blechen wieder. Daher ist das Ziel bei allen Tests, keine Ablösung der Beschichtung zu beobachten. Lediglich bei der Dornbiegeprüfung von T02 wurde keine Enthaftung sichtbar. Anscheinend müssen weitere Maßnahmen ergriffen werden, um die Haftung zu verbessern, obwohl die Haftungswerte mittels Zugfestigkeit sich bei den unterschiedlichen Vorbehandlungsmethoden nicht signifikant unterscheiden (vergleiche auch Abbildung 9).

Tabelle 11: Materialprüfungen von Stärkeesterlacken im Vergleich zu Paraloid B72.

	Eindruckwiderstand nach Buchholz	**Tiefungsprüfung**	**Kugelschlagprüfung**	**Dornbiegeprüfung**
Ziel	*>80*	*>3 mm, keine Ablösung, nur Risse*	*Keine Ablösung, nur Risse*	*<5 mm, keine Ablösung, nur Risse*
Paraloid B72 (Referenz)	82,5±13,7	Ab 5,0±0,8 mm Enthaftung, ab 9,3±0,4 mm Rissbildung	Ab 5 cm Fallhöhe Delle, Enthaftung sichtbar, Risse ab 15 cm Fallhöhe	keine sichtbare Rissbildung aber sichtbare Enthaftung über die gesamte Länge
StM-T02-2/CAB + 5% Aerosil 200	70,7±14,3	Ab 8,9±0,4 mm Enthaftung, ab 9,8±0,6 mm Rissbildung	Ab 5 cm Fallhöhe Delle, Enthaftung sichtbar, Risse ab 10-25 cm Fallhöhe	keine sichtbare Rissbildung und keine sichtbare Enthaftung
StM-T03/CAB + 5% Aerosil 200	52,5±5,6	Ab 4,7±0,9 mm Enthaftung, aber 5,4±0,5 mm Rissbildung	Ab 5 cm Fallhöhe Delle, Enthaftung und Risse sichtbar	keine sichtbare Rissbildung aber deutlich sichtbare Enthaftung ab unterschiedlichen Durchmessern von 3,7-15,7 mm

Korrosionsschutzuntersuchungen der Bleche mittels Kondenswassertest zeigten dabei nach 69 h an den Ritzen erste Korrosion in unterschiedlichem Ausmaß, aber kaum Unterwanderung der Schicht (Abbildung 15). Das Ausmaß des Rosts variiert dabei zwischen „T02“ und „T03“. Während bei den T02-Beschichtungen sehr deutliche Rostspuren zu erkennen sind, sind diese bei T03 schwächer ausgeprägt, trotz der sichtbar schlechteren Haftung der Beschichtung. Insgesamt ist die Schutzleistung beider Stärkeesterbeschichtungen aber ähnlich zur Referenz Paraloid B72.

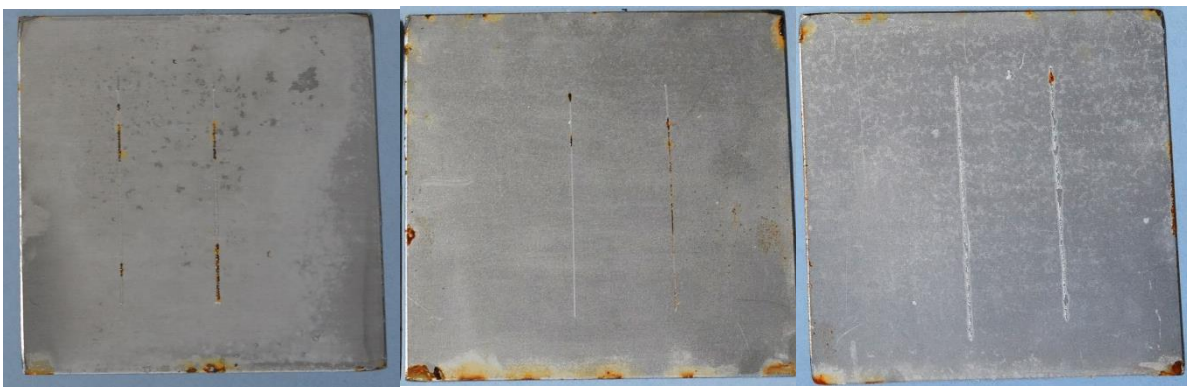

Abbildung 15: Kondenswassertest an beschichteten Blechen nach 69 h; li. Paraloid B72; mi. StM T02/CAB 4/1 + 5% Aerosil 200; re. StM T03/CAB 4/1 + 5% Aerosil 200.

Beim neutralen Salzsprühtest ist bereits nach 24 h deutliche vollflächige Korrosion bei den Stärkeesterproben zu beobachten (Abbildung 16). Die Morphologie der Korrosion unterscheidet sich dabei, für T02-Proben ist der Rost deutlich dunkler und kleinflächiger, für die T03-Proben heller und gleichmäßig verteilt. Für die T03-Proben ergibt sich noch ein interessantes Detail, die Beschichtung platzt großflächig ab und kann wie eine Folie vom Substrat entfernt werden. Teile des Rosts bleiben dabei an der

Beschichtung hängen (Abbildung 17).

Abbildung 16: Neutraler Salzsprühtest an beschichteten Blechen nach 24 h; li. Paraloid B72; mi. StM T02/CAB 4/1 + 5% Aerosil 200; re. StM T03/CAB 4/1 + 5% Aerosil 200.

Abbildung 17: Entfernen der Beschichtung von korrodierter T03-Probe.

Die modifizierten Proben StM-T02-2 A und B wurden auf Stahlblechen, Aluminium und verzinkten Blechen aufgetragen und untersucht. Die Ergebnisse in Tabelle 12 zusammengefasst und in Abbildung 18 dargestellt, sie zeigen eine teilweise sehr schlechte Lackhaftung. Diese Bleche wurden jedoch nicht mechanisch vorbehandelt, sondern nur mit Lösemittel-Entfetter.

Tabelle 12: Gitterschnitt- und Stempelabrissprüfung StM-T02-2 A+B auf Aluminium und verzinkten Blechen

Probe	Gitterschnitt		Stempelabriss	
T02-2A	GT 0	**IO**	1,5/1,8/MPa 100% Y/Z // 100% Y/Z	**NIO**
T02-2B	GT 0	**IO**	0,0/0,5 MPa // 100% Y/Z	**NIO**
T02-2A Al	GT 0	**IO**	1,2 MPa, 90 % A/B; 10 % Y/-	**NIO**
T02-2B Al	GT 1	**IO**	1,6 MPa, 90 % A/B; 10 % Y/-	**NIO**
T02-2A Zn	GT 5	**NIO**	1,0 MPa, 90 % A/B; 10 % Y/-	**NIO**
T02-2B Zn	GT 2	Bedingt IO	1,2 MPa, 90 % A/B; 10 % Y/-	**NIO**

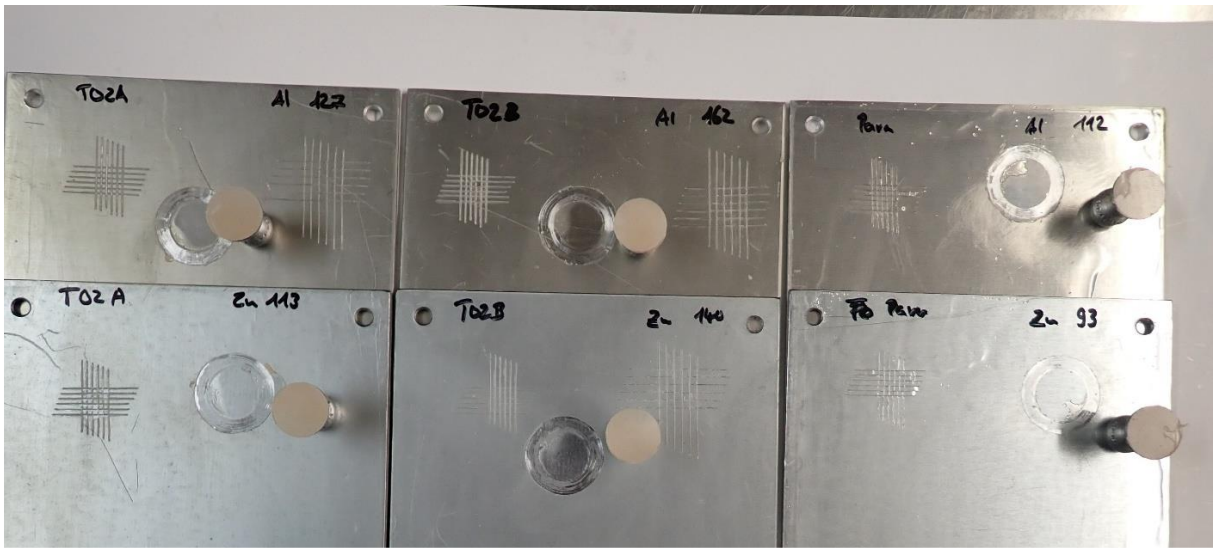

Abbildung 18: Ergebnisse der Stempelabriss- und Gitterschnittprüfung T02-2 modifiziert auf Aluminium (oben) und verzinktem Blech (unten); v.l.n.r. T02A, T02B, Paraloid.

Zur Bestimmung der Beständigkeit einer Beschichtung gegen Feuchtigkeit wurden die zu untersuchenden Proben bei konstanter Temperatur (40 ± 3 °C) und einer Luftfeuchte von ca. 100 % in einer Klimakammer (Erichsen Hygrotherm 519) eingelagert. Nach Ablauf der vereinbarten Versuchsdauer (240 h) erfolgt die Auswertung anhand des Blasengrades und wahrnehmbarer Korrosionserscheinungen.
Die Ergebnisse zeigen teilweise eine signifikante Blasenbildung. Außerdem zeigen alle Proben eine Trübung der Beschichtung nach dem Test.

Korrosionsbeständigkeitsermittlung im neutralen Salzsprühnebeltest (in Anlehnung an DIN EN ISO 9227:2023-03)
Die Bleche wurden dann dem neutralen Salzsprühtest für 240 h ausgesetzt und die
Ergebnisse sind in Abbildung 19 zusammengefasst. Rotrostdurchbrüche oder Korrosion des Stahlsubstrats am Ritz konnte nicht beobachtet werden, jedoch eine teilweise flächige Enthaftung der Beschichtung, mit Ausnahme der Probe Paraloid auf Aluminium.

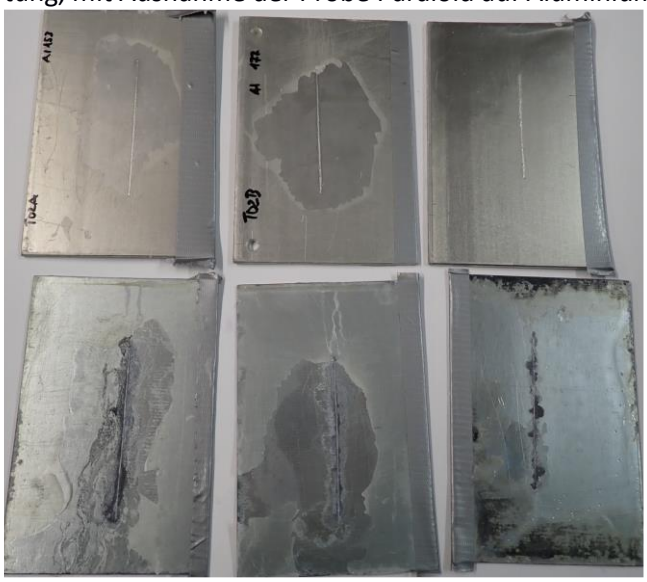

Abbildung 19: Ergebnisse des nSS-Tests über 240 h T02-2 modifiziert auf Aluminium (oben) und verzinktem Blech (unten); v.l.n.r. T02A, T02B, Paraloid.

Zusammenfassend muss man feststellen, dass die Modifikationen des Stärkeester StM-02-2/CAB keinen erhöhten Korrosionsschutz erzielen konnten, weder auf Aluminium oder verzinkten Stahl.

AP8 Demonstrator, Ergebnisevaluierung sowie Presse- und Öffentlichkeitsarbeit

Als mögliche Demonstratoren wurden von der Burg Mylau schützenswerte Objekte ausgewählt, bewegliche und auch fest installierte. Da die Korrosionsschutzeigenschaften des Stärkeesters gering sind, wurde in Absprache mit den Projektpartnern nicht wie ursprünglich geplant das Brunnengitter als Demonstatorobjekt ausgewählt, sondern eine Ofenplatte und ein Dreifuss. Nach einer Sandstrahlreinigung im Lackierzentrum Reichenbach wurde auf diesen beiden Objekten die Stärkeesterbeschichtung im Nasslackverfahren aufgetragen. Die Objekte wurden an einer exponierten Stelle im Außenbereich aufgestellt. Bereits nach vier Wochen sind Korrosionsschäden erkennbar, obwohl die Beschichtung noch intakt ist, wie an den Wassertropfen gut zu erkennen ist.

Abbildung 20: v.l.n.r.: gesandstrahlte Ofenplatte, Dreifuß während der Beschichtung, Korrosionsspuren am Dreifuß nach vier Wochen mit intakter Beschichtung.

Die Ergebnisse und das weitere Vorgehen wurden in regelmäßigen Onlinetreffen während des gesamten Projektverlaufs besprochen. Die Öffentlichkeitsarbeit erfolgte größtenteils über die Burg Mylau. So wurde das Projekt zweimal in der Lokalpresse am 27.01.2022[i] und am 31.01.2022[ii] vorgestellt. Einem Fachpublikum an u.a. Restauratoren wurde die Thematik im Rahmen eines Vortrages auf der Tagung INNO-Kultur am 15.03.2024 nähergebracht.

Abbildung 21: li: Vorstellung des Projekts auf der INNOKultur-Tagung, rechts Demonstratoren im Außenbereich der Burg Mylau.

Wichtigste Positionen des zahlenmäßigen Nachweises

Die wichtigsten Positionen des zahlenmäßigen Nachweises stellen die Unteraufträge für die Reaktivextrusion (AP 2) und die Vermahlung bei der Firma Noll (AP3), der Unterauftrag für die Analytik bei der Dr. Herrmann GmbH (AP7) sowie die Anschaffung eines Schneidkopfes für die Dispergiereinheit (AP2 und AP3) dar. In den Beschreibungen der Arbeitspakete sind die Nutzen dieser Posten genauer

erläutert. Zusammengefasst lässt sich sagen, dass mit der Reaktivextrusion ein ökonomisch günstigeres Mischungsverhältnis der Reagenzien Imidazol und Stärke erreichbar, die externe Vermahlung notwendig für die Bereitstellung von größeren Pulvermengen ist, die durchgeführten Analysen bei der Dr. Herrmann GmbH maßgeblich den Fortschritt des Projekts gefördert haben und der Schneidkopf zu einer deutlichen Zeitersparnis bei der Aufarbeitung der Reaktionen führt.

Notwendigkeit und Angemessenheit der Projektarbeiten

Die in dem Projekt "Innovativer stärkebasierter Schutz Historischer Metallbauwerke bzw. Metallischer Bauwerkskomponenten" (StarkMetall) durchgeführten Arbeiten hatten zum Ziel, ein Lacksystem basierend auf nachwachsenden Rohstoffen zu etablieren. Im Folgenden werden die im Antrag formulierten Ziele den erreichten Ergebnissen gegenübergestellt.

Herstellung des Lacksystems

Ziel des Projektes war es, die Synthese der Stärkeester als Lackgrundlage im Technikumsmaßstab gewährleisten zu können. Anschließend sollte dann die Konfektionierung zum Pulverlack oder zum Nasslack erfolgen. Diese Teilschritte wurden teilweise erzielt. Es wurden mehrere Synthesen im Technikumsmaßstab durchgeführt und daraus Daten gesammelt, welche Abweichungen erlaubt sind, damit Reaktionsprodukte die gewünschten Materialeigenschaften aufweisen. Dabei wurden mehrere kg der Stärkeester hergestellt und analysiert. Die Konfektionierung zum Pulverlack wurde nach verschiedenen internen und externen Versuchen letztendlich extern durchgeführt. Die Bemusterung am Leibniz-Institut für Polymerforschung in Dresden zeigte die vielversprechendsten Ergebnisse. Die Konfektionierung zum Nasslack konnte bei INNOVENT intern etabliert werden.

Auftragung, Analyse und Wiederentfernung des Lacksystems

Die Applikation des Lacksystems sowohl in Pulver- als auch in Nassform wurde untersucht und optimiert. Trotz der Optimierungsversuche hinsichtlich des Pulverlacks zeigte sich, dass der Nassauftrag verlässlichere Beschichtungsergebnisse liefert. Diese Beschichtungen wurden hinsichtlich ihres Korrosionsschutzes charakterisiert. Es wurden mehrere Methoden untersucht, um die Beschichtung wieder zu entfernen, von denen das Trockeneisstrahlen am erfolgreichsten war. Eine Anlage, um diese Entschichtung automatisiert ablaufen lassen zu können, wurde aufgrund des Projektfortschritts nicht verwirklicht.

Projektevaluierung und Öffentlichkeitsarbeit

Während des Projektverlaufs trafen sich die Partner regelmäßig online und in Präsenz, um den Fortschritt zu besprechen. Die Öffentlichkeitsarbeit erfolgte ebenfalls projektbegleitend.

Externer Fortschritt auf dem Gebiet

Es wurden einige Veröffentlichungen auf dem Gebiet der Pulverlackbeschichtungen seit Projektbeginn bekannt. EP 4093912 „Biopolymerzusammensetzung und deren Verwendung als Pulverlack" zum Beispiel beschreibt die Herstellung von Pulverlack basierend auf Chemikalien aus nachwachsenden Rohstoffen, aber vor allem auf Polyesterbasis und damit einer chemisch ganz anderen Herangehensweise. Die Firma Grimm-Pulverlack bietet auf ihrer Homepage ein Pulverlacksystem voraussichtlich ab Q4/2024 an, basierend auf Biogas. Im Bereich der Nasslacke werden vor allem die Quellen der etablierten Monomere durch nachwachsende Rohstoffe ersetzt. Das erfordert dennoch mehrere

chemisch-synthetische Schritte bis zum Lacksystem. Es ist also das Bestreben erkennbar, dass die Lacke insgesamt nachhaltiger werden sollen. Allerdings sind alle diese Lacke nicht als wieder entfernbar oder wieder verwendbar konzipiert.

Verwertung

Wissenschaftliche Verwertung

Die Vorstellung des Projekts im Rahmen eines Vortrags anlässlich der INNOKultur-Tagung zeigte das rege Interesse vom Fachpublikum an der Thematik des (reversiblen) Korrosionsschutzes. Aufgrund der fehlenden Schutzeigenschaften für den Außenbereich konnten hier aber keine direkten Anknüpfungspunkte gefunden werden.

Wirtschaftliche Verwertung

Die Materialebene betrachtend konnten während des Projektverlaufs die Kosten für das Beschichtungsmaterial sowie auch der zeitliche personelle Aufwand pro kg Beschichtungsmaterial gesenkt werden (siehe Tabelle 13). Vor allem durch die Skalierung der Synthese ergaben sich finanzielle Ersparnisse, durch die Verwendung des für dieses Projekt angeschafften Schneidkopfes kann Zeit gespart werden pro Synthese. Für das konfektionierte Material fallen allerdings Kosten an, die im kleineren Maßstab durch Eigenleistung erbracht wurden. Die Auslagerung des Mahlvorgangs fällt dabei deutlich ins Gewicht, was auch an der Dimensionierung der Mahlanlage beim Dienstleister liegt. Bei größeren Auftragsmengen oder einem anderen Dienstleister würde der Preis pro kg deutlich sinken. Es ist davon auszugehen, dass ein Up-scaling vom Technikums- in den Produktionsmaßstab die Kosten weiter senken wird.

Ein Ansatz dazu war der Unterauftrag zur Reaktivextrusion, der nur teilweise das gewünschte Ergebnis lieferte. Die geplante Reaktion zum Endprodukt fand nicht statt, dafür war es aber möglich, Imidazol und Stärke in einem ökonomisch günstigeren Verhältnis homogen zu mischen als es bei INNOVENT bisher möglich war.

Tabelle 13: Kostenvergleich zu Beginn und zu Ende des Projekts.

	Stand der Technik zu Projektbeginn (StM L01)	**Stand der Technik zu Projektende (StM T03)**
Materialkosten	836€	628 €
Ertrag	2,16 kg	2,69 kg
Kosten pro kg	**387 €**	**233 €**
Mahlen (entfällt beim Nasslack)	Personalaufwand	557€/kg Pulverlack
Lösungsmittel (entfallen beim Pulverlack)	Nicht durchgeführt	35 €/5 L Nasslack (entspricht 1 kg Pulverlack)

Ein Vergleich mit kommerziell erhältlichem Paraloid B72-Lack zeigt dennoch recht hohe Kosten pro Kg Beschichtungsmaterial. So kosten 5 L Paraloid B72 etwa *150 €* auf dem Markt.[iii] Damit liegt der Preis dieses auf fossilen Rohstoffen basierenden Schutzlacks etwa bei 55% der Materialkosten für die gleiche Menge an stärkebasiertem Nasslack. Bei nur einer ähnlichen bis sogar schlechteren Korrosionsschutzwirkung zwischen beiden Produkten stellt dieses Verhältnis noch einen zu großen Sprung für eine wirtschaftliche Konkurrenzfähigkeit des Produkts dar. Die Prozesskosten der Beschichtung selbst entsprechen den Zeiten und Kosten ähnlicher Beschichtungen und stellen somit keinen Wettbewerbsnachteil dar. Interessant aus der Marktbetrachtung ist vor allem die Möglichkeit, die Beschichtung relativ kos-

tengünstig und ökologisch unbedenklich wieder vom Trägermaterial zu entfernen. Somit sind Anwendungsmöglichkeiten des Materials als Interimsbeschichtung empfindlicher und wertvoller Teile denkbar.
Auf der Verfahrensebene sind gewonnene Erkenntnisse bezüglich der Herstellung von Pulverlacken zu nennen, die bei INNOVENT in Zukunft in andere Projekte einfließen können. Auch durch die Vernetzung der Firmen als Projektpartner sind Möglichkeiten für weitere Kooperationen entstanden.
Die Verwertung nach außen hin ist durch die Veröffentlichungen in der Lokalpresse gestartet und wird durch eine Pressemitteilung im Q4 2024 oder Q1 2025 und eine idw-Mitteilung in Q1 2025 ergänzt. Weiterhin ist durch die Präsentation im Rahmen der Tagung INNOKultur 2024 das Thema einem Fachpublikum an u.a. Restauratoren vorgestellt worden. Dabei stieß das Konzept einer wieder entfernbaren Beschichtung basierend auf nachwachsenden Rohstoffen auf rege Nachfrage und ermöglicht auch hier Anknüpfungspunkte. Zusätzlich werden die Ergebnisse des Projekts in die Weiterbildungsreihe bei INNOVENT aufgenommen. Die Ergebnisse und den Verlauf des Forschungsthemas stellte die Lackierzentrum Reichenbach GmbH im Mai 2024 während eines Treffens der Wirtschaftsvereinigung Nördliches Vogtland Unternehmern der Region vor und warb dabei für gemeinsame Innovations-Projekte im Vogtland. All diese Faktoren tragen zu nicht näher bestimmbaren Umsatzsteigerungen durch eventuelle Folgeprojekte und neuen Kooperationen bei. So befindet sich das Lackierzentrum Reichenbach derzeit mit der Firma MAHLE in Reichenbach in der Evaluierung eines gemeinsamen Projekts zur Erforschung von Korrosionsschutzsystemen in Brackwasserkühlern.

---

[i] https://www.freiepresse.de/vogtland/reichenbach/wie-vogtlandpioniere-kuenftig-mit-mais-oder-kartoffel-staerke-metall-schuetzen-wollen-artikel11960914, Bezahlschranke, zuletzt abgerufen am 24.10.2024
[ii] https://www.otz.de/lokales/landkreis-greiz/article402137907/mylau-historische-metallobjekte-nachhaltig-schuetzen.html, Bezahlschranke, zuletzt abgerufen am 24.10.2024
[iii] https://www.kremer-pigmente.com/de/shop/mal-binde-klebemittel/67404-paraloid-b-72-in-ethylacetat-25.html, zuletzt abgerufen am 20.11.2024