

„Umweltschonendes Verfahren zur Herstellung optisch hochwertiger, trocken applizierbarer Chromfilme“

**Abschlussbericht über ein FuE-Projekt
unter dem Aktenzeichen AZ: 34635/01**

gefördert durch



Deutsche
Bundesstiftung Umwelt

www.dbu.de

Bewilligungsempfänger:

plasma technology GmbH

Marie-Curie-Straße 8, 71083 Herrenberg

Jörg Eisenlohr

Tel.: +49 7032 91838-150

E-Mail: j.eisenlohr@plasmatechnology.de



Herrenberg, November 2020

Projektkennblatt
der
Deutschen Bundesstiftung Umwelt



Az	34635/01	Referat	Finanzielles projekt-controlling	Fördersumme	111.000 €
Antragstitel		Umweltschonendes Verfahren zur Herstellung optisch hochwertiger, trocken applizierbarer Chromfilme			
Stichworte		Lackfolie, Verchromung, PVD, Plasma			
Laufzeit	Projektbeginn	Projektende	Projektphase(n)		
24 Monate	11.08.2018	13.08.2020	1		
Zwischenberichte		jährlich			
Bewilligungsempfänger		plasma technology GmbH Marie-Curie-Straße 8 71083 Herrenberg		Tel +49 7032 91838-150 Fax +49 7032 91838-200	
				Projektleitung Jörg Eisenlohr	
				Bearbeiter Jörg Eisenlohr	
Kooperationspartner -					
Zielsetzung und Anlass des Vorhabens					
<p>Im Mittelpunkt steht ein neuer, auf der plasmagestützten physikalischen Gasphasenabscheidung (Plasma-PVD) basierender Verfahrensansatz, welcher die effiziente und optisch hochwertige Verchromung von Klarlackfilmen ermöglicht. Damit kann zukünftig erstmals eine qualitativ ernstzunehmende, umweltfreundliche Alternative zur galvanischen Chrombeschichtung angeboten werden. Im Plasma soll dabei ein kontinuierlicher Beschichtungsprozess umgesetzt werden, in dem die Chromabscheidung effektiv verkapselt und gleichzeitig eine haftvermittelnde Primerschicht aufgebracht wird.</p>					
Darstellung der Arbeitsschritte und der angewandten Methoden					
<p>Das in einer Laufzeit von 24 Monaten realisierte Vorhaben war durch drei Arbeitsschwerpunkte gekennzeichnet:</p>					
<p>1) <i>Technische Grundlagenuntersuchungen</i> Zunächst sollten anhand von Grundlageuntersuchungen die relevanten Prozessparameter und Stoffeigenschaften identifiziert werden. Dazu wurden relevante Lackfilme hinsichtlich ihres Verhaltens bei unterschiedlichen Bedingungen in der Plasmaanlage untersucht. Im Weiteren wurden grundsätzliche Abscheidevoraussetzungen und -bedingungen von PVD Schichten auf den vorher spezifizierten Lackfilmen untersucht. Die Ergebnisse wurden gebündelt in einem ersten Anlagenkonzept umgesetzt, aus welchem die stofflichen und prozesstechnischen Grundlagen für eine anforderungsgerechte Primerschicht abgeleitet wurden.</p>					
<p>2) <i>Plasmabasierte Chrom- und Primerbeschichtung</i> Hier lag der Fokus insbesondere auf der Festlegung von prozesstechnischen Anforderungen. Dabei wurden schrittweise die Prozessvorgaben für eine anforderungsgerechte Abscheidung von Chromschichten auf Lackfilme erarbeitet. In diesem Zusammenhang wurde auch unterschiedliche Schichtkomplexe unter Vermeidung von optischen und haftungsspezifischen Einschränkungen sowie der gezielten Einstellbarkeit von Farbtönen und Glanzgraden untersucht. Hinzu kam die Aufgabe einer rückseitigen Primerbeschichtung, die ebenfalls im Plasma realisiert und deutlich verbesserte Haftungsvoraussetzungen auf relevanten Polymeroberflächen erwirken sollte.</p>					
<p>3) <i>Anlagentechnische Umsetzung des Gesamtprozesses</i> Im dritten Arbeitsschwerpunkt wurde der kleintechnische Nachweis für die Erzeugung der anvisierten Chromfile erbracht. Im Fokus stand hierbei die Entwicklung einer integrierten mehrstufigen Plasmabeschichtung als kontinuierlicher R2R-Prozess.</p>					
<small>Deutsche Bundesstiftung Umwelt • An der Bornau 2 • 49090 Osnabrück • Tel 0541/9633-0 • Fax 0541/9633-190 • http://www.dbu.de</small>					

Ergebnisse und Diskussion

Die angestrebten Ziele konnten im Ergebnis erreicht werden. Die Fertigung einer galvanisch gleichwertigen Verchromung in Bezug auf Optik, Oberflächenqualität und Festigkeit konnten durch die Kombination aus einem Klarlackfilm und einer plasmagestützten Gasphasenabscheidung mit nachgelagerter Primerbeschichtung realisiert werden und kann nach Abschluss des Projektes auf eine Serienfertigung hochskaliert werden. Dazu wurden Untersuchungen bezüglich der Applikationsmethodik des verchromten Klarlacks auf den Substraten durchgeführt. Es hat sich herausgestellt, dass neben den deutlichen Umweltvorteilen der Trockenverklebung auch die technischen Anforderungen damit erfüllt werden können. Zur Validierung der kontinuierlichen R2R-Fertigung wurde die Fertigungsstrecke miniaturisiert im Labor aufgebaut und für Testproduktionen verwendet.

Auch die energetischen Ziele konnten erfolgreich umgesetzt werden. Es wurden Energieeinsparungen gegenüber den galvanischen Verchromungsprozessen von mehr als 97 % (Einfachbeschichtung) erreicht. Gleichzeitig wurde die Umweltbelastung durch eine Abkehr von Säuren zur Oberflächenvorbehandlung sowie einen Verzicht von Entschäumern mit PFOS-Anteil substantiell reduziert.

Die wirtschaftlichen Argumente sprechen gleichfalls für das neue Herstellungsverfahren. Durch die nachgewiesene Gleichwertigkeit zu galvanischen Verchromungsverfahren öffnen sich dadurch unzählige mögliche Endabnehmer. Hinzu lassen sich mit dem Verfahren sehr günstige Produktionskosten realisieren, die eine Preisgestaltung ermöglichen, die deutlich unter den Marktpreisen für galvanisch verchromte Bauteile angesiedelt sind. Vor diesem Hintergrund bieten sich hierfür sehr große Marktpotenziale.

Öffentlichkeitsarbeit und Präsentation

Durch das Erreichen der Zielspezifikationen und dem damit einhergehenden Nachweis der grundsätzlichen Praktikabilität des Beschichtungsverfahrens, setzt man sich bei plasma technology in Zusammenarbeit mit der Sommer Engineering aktuell intensiv damit auseinander, das erarbeitete Verfahren in die Fertigungsreife zu überführen. Die Aussichten, auch dieses Stadium prozess- und anlagentechnisch zu erreichen stellen ebenfalls sehr positiv dar.

Problematisch im Hinblick auf die nun parallel angestrebte Erschließung konkreter Applikationen und potenzieller Aufträge stellt sich die aktuelle Corona-Pandemie dar, da Prozessänderungen und damit verbundene Investitionsentscheidungen in relevanten Branchen (insbesondere Automobil) gerade weitgehend vermieden bzw. verschoben werden. Dennoch sollen die Ergebnisse nun aufbereitet und in den kommenden Monaten verstärkt präsentiert und kommuniziert werden, um die nach Corona erwartete Aufschwungphase für eine erfolgreiche Markteinführung nutzen zu können. Dies soll neben direkten Gesprächen mit den OEMs und Zulieferern, zu denen insbesondere der Partner Sommer einen hervorragenden Zugang besitzt, auch über gezielte Fachveröffentlichungen und Veranstaltungsbeiträge erfolgen.

Die Zielanwendungen konzentrieren sich dabei nicht auf die Beschichtung von großflächigen Bauteilen, sondern vielmehr auf den Bereich von dreidimensionalen Bauteilen mit kleinen Sichtflächen. Dazu zählen insbesondere dekorative Einbauteile in Fahrzeugen und Konsumprodukten.

Fazit

Das abgeschlossene Projekt kann als großer Erfolg bewertet werden. Es wurden die formulierten Zielsetzungen erreicht und somit ein umweltfreundliches Plasmaverfahren zur Herstellung von hochwertig verchromten Klarlackfilmen erarbeitet. Damit konnte gleichzeitig der Nachweis erbracht werden, dass es sich in einen industrietauglichen, d. h. kontinuierlichen Beschichtungsprozess umsetzen lässt. Auch eine gegenüber der konventionellen Chromgalvanik deutlich verbesserte Energieeffizienz konnte den neuen Chromfilmen attestiert werden.

Die auf diesem Weg verchromten Klarlackfilme wurden in vielzählige Testreihen bewertet und bieten demnach sehr gute Voraussetzungen dafür, den strengen Zulassungsanforderungen, z. B. der Automobilindustrie, gerecht werden zu können. Daher steht dem Einsatz für die optische Gestaltung von dreidimensionalen Bauteilen mit kleinen Sichtflächen nichts im Wege.

Auf dieser Grundlage ergibt sich im Ergebnis der Arbeiten erstmalig ein umweltfreundliches, trockenes und emissionsfreies Verchromungsverfahren, welches in den entscheidenden Faktoren der optischen Eigenschaften, Kratzfestigkeit, Korrosions- und Alterungsbeständigkeit den Anforderungen entspricht und zukünftig eine ernstzunehmende Alternative gegenüber umweltkritischen galvanischen Beschichtungsprozessen darstellt.

1. Inhaltsverzeichnis

1. Inhaltsverzeichnis	4
2. Verzeichnis von Bildern und Tabellen	5
3. Zusammenfassung	6
4. Einleitung.....	7
5. Hauptteil.....	10
5.1 Arbeitsschwerpunkte und erzielte Ergebnisse	10
5.1.1 Technische Grundlagenuntersuchungen	10
5.1.2 Technische Umsetzung des Beschichtungsprozesses	12
5.1.3 Beschichtungsversuche.....	13
5.1.4 Schichtbewertung	14
5.1.5 Plasmaprimer als immanente Haftvermittlerschicht	17
5.1.6 Untersuchungen zur gezielten Einstellung von Farbtönen und Korrosionsbeständigkeiten	19
5.2 Ökologische, technologische und ökonomische Bewertung	22
5.3 Maßnahmen zur Verbreitung der Vorhabensergebnisse.....	23
5.4 Fazit	23

2. Verzeichnis von Bildern und Tabellen

Abbildung 1:	Versuchsanlage mit integrierter Turbopumpe	10
Abbildung 2:	Drehteller für die rotierende Substratlagerung und schwenkbare Aufnahme des PVD-Targets	11
Abbildung 3:	Erste Beschichtungsproben auf Referenzsubstraten	11
Abbildung 4:	Versuchsanlage für durchlaufende Oberflächen	12
Abbildung 5:	Blick in die PVD-Kammer mit der integrierten Lackfilm-Mimik.....	12
Abbildung 6:	Laufende PVD-Beschichtung	14
Abbildung 7:	Bei variiertem Wickelgeschwindigkeit erzeugte Beschichtungsprobe.....	14
Abbildung 8:	Oberflächenoptik und Schichtprofil beschichteten UV-Klarlackfilms	16
Abbildung 9:	Oberflächenoptik und Schichtprofil eines beschichteten konventionellen Klarlackfilms	16
Abbildung 10:	Versuchswerkzeug zur Simulation von Tiefziehverarbeitungen	17
Abbildung 11:	Versuchswerkzeug zur grundlegenden Vorbewertung des Umformverhaltens der beschichteten Muster.....	17
Abbildung 12:	Beispiel eines Mehrschichtkomplexes zur weiterführenden Funktionalisierung der Chromfolie.....	20
Abbildung 13:	Versuche zur Umsetzung unterschiedlicher Oberflächenfärbungen	20
Abbildung 14:	Beispielhafte REM-Aufnahme der erzeugten PVD-Beschichtung.....	21
Abbildung 15:	REM-Aufnahme der stark inhomogenen Metallschicht.....	21
Tabelle 1:	Oberflächenbeurteilung unterschiedlicher Substrate für die PVD-Verchromung.....	14
Tabelle 2:	Auszug der Haftungsuntersuchungen	18
Tabelle 3:	Auszug der Haftungsuntersuchungen	18

3. Zusammenfassung

In diesem Bericht sind die Ergebnisse eines Projekts zur Entwicklung eines durchgängigen, trockenen und emissionsarmen Verfahrensansatzes zur Herstellung von hochwertig verchromten Klarlackfilmen, auf Basis der plasmagestützten physikalischen Gasphasenabscheidung (Plasma-PVD) dargestellt. Das Projekt wurde im Zeitraum vom 11.08.2018 bis 13.08.2020 durchgeführt.

Dabei ging es darum, ein alternatives und umweltschonendes Verchromungsverfahren zu entwickeln, das die umweltschädliche galvanische Oberflächenverchromung als standardisiertes Verfahren ablöst. Dafür musste im ersten Schritt nachgewiesen werden, dass durch die Verbindung aus Plasma-PVD mit Lackfilmen Chromoberflächen hergestellt werden können, die sowohl in der Optik als auch in der Oberflächenqualität gleichauf sind mit denen einer galvanischen Verchromung. Darauf aufbauend musste die Applizierbarkeit und Beständigkeit der PVD/Lack Beschichtung auf den Substraten unter zu Hilfenahme eines emissionsarmen Trockenklebers, gemäß den Anforderungen der Automobil- und Konsumgüterbranche nachgewiesen werden.

Diese Projektziele inklusive der damit verbundenen Zielparameter konnten ohne Einschränkungen erreicht werden. Zudem konnte die produktionsrelevante Skalierbarkeit des Verfahrens nachgewiesen werden.

Die Entwicklung des verfahrenstechnischen Ansatzes zur Realisierung der angestrebten Chrombeschichtung findet bei der plasma technology GmbH statt. Diese Arbeiten werden dabei durch die Sommer Engineering GmbH tatkräftig in den Bereichen der Evaluierung und Abstimmung des PVD- und Primerauftrags unter material- und beschichtungstechnischen Gesichtspunkten unterstützt.

Das Projekt wurde von der Deutschen Bundesstiftung Umwelt gefördert (AZ 34635/01)

4. Einleitung

Geht es darum, Oberflächen mit einer sehr hochwertigen und langlebigen Glanzoptik zu versehen, so führt heute noch immer kein Weg an der konventionellen galvanischen Verchromung vorbei. Die nasschemischen Beschichtungsprozesse stehen jedoch stark in der Kritik, da sie im Hinblick auf die eingesetzten Chemikalien, die resultierenden Emissionen bzw. Abwasserbelastungen (insbesondere CrVI und PFOS) sowie den erforderlichen Energieeinsatz erhebliche Umweltrisiken mit sich bringen.

Um diese zu umgehen, wird seit vielen Jahren an alternativen Verfahrensansätzen gearbeitet. Der endgültige Durchbruch, der mithilfe eines „sauberen“ und effizienten Beschichtungsverfahrens qualitativ gleichwertige Oberflächenverchromungen ermöglicht, ist jedoch bis heute nicht gelungen. Vielmehr sehen sich die diesbezüglich bekannten Entwicklungen immer noch erheblichen Defiziten gegenüber, die sich bei

- der alternativen CrIII-Galvanik in unerwünschten Schichtverfärbungen, verminderten Glanzgraden und sehr aufwendigen Beschichtungsprozessen,
- metallisierten Beschichtungsfolien in der eingeschränkten Oberflächenoptik und Kratz-, Alterungs- sowie Chemikalienbeständigkeit und
- vakuumprozessierten Oberflächenverchromungen (z. B. PVD) in stark schwankenden, kaum reproduzierbaren Beschichtungsqualitäten

begründen.

Vor diesem Hintergrund sind weiterhin umweltfreundliche, d. h. trockene und emissionsfreie Verfahren zur Glanzverchromung von Oberflächen von höchstem Interesse, wenn sie gleichzeitig die bislang nur aus der Galvanik bekannten Beschichtungsqualitäten ermöglichen würden.

Das von der plasma technology GmbH mit der Unterstützung der Sommer Engineering GmbH durchgeführte Vorhaben visiert genau eine solche Beschichtungslösung an. Im Mittelpunkt steht ein neuer Verfahrensansatz, welcher die direkte Verchromung von Hochglanzlacken in einem hoch effizienten, trockenen Prozess ermöglicht. Dabei wird mittels plasmagestützter physikalischer Gasphasenabscheidung (Plasma-PVD) eine als trockener Film vorliegende Klarlackschicht rückseitig metallisiert und so mit einer hochwertigen Chromoptik ausgerüstet. Heutzutage gibt es vier Ansätze, die das Problem der Glanzverchromung thematisieren. Jeweils mit unterschiedlich großem Erfolg und unzufriedenstellenden Auswirkungen auf die Umweltbelastung:

Die Verchromung von Metall- und Kunststoffoberflächen erfolgt heute in der Regel über galvanische CrVI-Prozesse, die im Vergleich noch immer die besten optischen Qualitäten, Schichtbeständigkeiten sowie häufig auch wirtschaftlichen Voraussetzungen mitbringen. Allerdings stehen diesen Vorteilen erhebliche umweltspezifische Nachteile der konventionellen Chromgalvanik gegenüber, die sich im Einsatz toxischer ChromVI-Elektrolyte, umweltschädlicher Badhilfsstoffe (Entschäumer → PFOS etc.) und Vorbehandlungschemikalien (Säuren etc.), einem hohen Energiebedarf, einer sehr aufwändigen Abluft- und Abwasserbehandlung sowie kostspieligen Reststoffentsorgung begründen. Aus diesen Gründen steht die Verarbeitung CrVI-haltiger Systeme seit Jahren im Fokus der EU-Umweltgesetzgebung und voraussichtlich in wenigen Jahren vor dem kompletten Aus.

Dies ist jedoch insofern problematisch, da es bis heute keine alternativen Verchromungssysteme gibt, die eine gleichwertige Optik, Härte, Kratzfestigkeit sowie mechanische und chemische Beständigkeit mitbringen. Dies gilt auch für die im Hinblick auf die Umweltbelastung weniger kritischen CrIII-Elektrolytsysteme, welche zwar mittlerweile auch für einzelne optische Beschichtungen kommerziell vermarktet und eingesetzt werden, jedoch noch unbewältigte Defizite hinsichtlich der exakten Umsetzung definierter Farbtöne und Glanzgrade, optischen Beständigkeit und Nickelgängigkeit aufweisen. Hinzu kommt, dass der galvanische Prozess mit CrIII-Systemen (z. B. hinsichtlich der Badzusammensetzung) sehr stör anfällig ist und eine extrem präzise Ausregelung der Abscheidparameter erfordert, um reproduzierbare Beschichtungsergebnisse gewährleisten zu können. Damit steigen auch die Fehlproduktionsraten, was nach Erfahrungen und Aussagen von Mitarbeitern des Galvanikbeschichters Bolta (Diepersdorf) in Verbindung mit den gegenüber der CrVI-Galvanik um ca. 30 % höheren Prozesskosten (u. a. infolge der höheren Elektrolytpreise, Wartungs- und Energieaufwände) für viele Applikationen unüberwindbare Hürden aufbaut.

In den vergangenen 20 Jahren ist es gelungen, PVD-Prozesse für die Metallisierung von unterschiedlichsten Substraten erfolgreich zu etablieren und somit eine prinzipielle Verfahrensalternative zur galvanischen Beschichtung anzubieten. Im Hinblick auf optische Oberflächen bringt die PVD-Technologie den Vorteil mit, dass über die Wahl der Targetmetalle sowohl günstige Beschichtungskosten als auch vielfältige Farbeffekte möglich sind.

Soll jedoch eine im Hinblick auf das Zusammenspiel von Glanzgrad, Farbton und Beständigkeit wirklich galvanikadäquate Oberflächenverchromung abgebildet werden, so ist dies bisher nur in der Kombination von Lack- und PVD-Schichten möglich. In der Kombination mit klassischen Nasslackbeschichtungen sind PVD-Beschichtungen jedoch immer noch verbreitet mit klaren Einschränkungen hinsichtlich der realisierbaren optischen Qualität und insbesondere auch Prozesseffizienz verbunden. Im Vergleich zu galvanischen Verchromungen beschränken sich diese Prozesse heute in erster Linie auf dekorative Bauteilbeschichtungen in kleinflächigen Applikationen z. B. für Bedienknöpfe, Handytastaturen.

Eine prinzipielle Alternative zur galvanischen Oberflächenverchromung bieten Folien mit Chromoptik. Bei heute kommerziell angebotenen Varianten handelt es sich um Polymerfolien, die rückseitig bedampft und so mit einer Metallbeschichtung ausgerüstet werden. Derartige Folien sind in unterschiedlichsten Farbvarianten umsetzbar und, z. B. über Anbieter wie AKZO, auf dem Markt verfügbar. Eine wirkliche Alternative zur galvanischen Verchromung bieten sie jedoch nicht, da ausnahmslos alle eingesetzten Foliensubstrate zu unrein und in sich strukturell zu inhomogen sind, als dass ein vergleichbarer Glanzgrad oder eine adäquate Farbbrillanz umsetzbar wäre. Neben der „milchigen“ Optik kommt hinzu, dass die relevanten – zumeist auf umweltkritischen Fluorpolymeren basierenden – Foliensubstrate nicht annähernd die Alterungs-, Kratz- und Chemikalienbeständigkeit galvanischer Chromschichten mitbringen. So sind bei allen marktverfügbaren Chromeffektfolien unter dauerhafter UV-Einwirkung Verfärbungen zu beobachten, welche die optische Qualität im Zeitverlauf deutlich verringern. Vor diesem Hintergrund scheitern sie bis heute z. B. an den Zulassungsnormen der Automobilindustrie.

Seit wenigen Jahren bieten die Karl Wörwag Lack- und Farbenfabrik GmbH & Co. KG, aber mittlerweile auch andere Hersteller wie Akzo, 3M und Senoplast mit ih-

ren Lackfilmen eine bis dato völlig neue Beschichtungslösung an, mit der sich sowohl in der Herstellung als auch Applikation gegenüber konventionellen Lackbeschichtungen erhebliche Material- und Energieeinsparungen verbinden lassen. Die folienartigen Einkomponenten-(Klarlack) oder Zweikomponentensysteme (Basis- und Klarlack) bringen eine gleichbleibende Qualität, hohe Beständigkeit sowie definierte Farben mit und können von der Rolle trocken auf Oberflächen verklebt werden, ohne dass dieser Verarbeitungsschritt noch einmal die letztendliche Schichtqualität beeinflusst.

Vor diesem Hintergrund bringen sie prinzipiell optimale Voraussetzungen als Alternative zur galvanischen Chrombeschichtung mit. Chromeffekte sind seitens o. g. Hersteller für die Lackfilmtechnologie bisher noch nicht betrachtet worden. Was sich einerseits an der fehlenden Erfolgsaussicht einer entsprechenden Rezepturimplementierung und andererseits darin begründet, dass eine Heranziehung und Betrachtung ergänzender Beschichtungstechnologien wie PVD bisher nicht in Erwägung gezogen wurde.

Zwar sind PVD-Beschichtungen und die als Basissubstrat verwendeten Lackfilme also jeweils bekannt, die Zusammenführung beider Ansätze bietet jedoch völlig neue Möglichkeiten für die Herstellung optisch hochwertiger Bauteiloberflächen. Diese sollten im Rahmen des Vorhabens erstmals erschlossen und umweltfreundliche Chrombeschichtung erarbeitet werden, die

- in ihren optischen Eigenschaften hinsichtlich Chromeffekt und Glanzgrad den galvanischen Referenzen ohne visuell wahrnehmbare Einschränkungen entspricht,
- als sehr dünne (30 – 40 µm) und homogene Oberflächenbeschichtung geometrie- und formatvariabel verklebt werden kann.
- eine sehr hohe Oberflächenqualität hinsichtlich Kratzfestigkeit, Chemikalien- und Alterungsbeständigkeit bietet.
- eine Metallisierungsschicht integriert, die vorder- und rückseitig effektiv gegen Oxidationseffekte verkapselt wird.
- in allen Herstellungsschritten durch einen hocheffizienten Material- und Energieeinsatz sowie Beschichtungsprozesse gekennzeichnet ist, in denen umweltschädliche Ausgangsstoffe, Abfall- und Reaktionsprodukte ausgeschlossen und der Einsatz von Lösemitteln durch die Nutzung UV-härtender Lackrezepturen (bei der Lackfilmherstellung) minimiert werden kann.
- perspektivisch einem kontinuierlichen Rolle-zu-Rolle-Prozess entspringt, der die filmbildende Fertigungsstufe (Aufrakeln und Trocknen des Lackfilms) mit der plasmabasierten PVD- und Primerbeschichtung in einer durchgängig automatisierten Anlagenlösung zusammenführt.

Chrombeschichtungen, welche die hier verfolgten qualitativen, verfahrenstechnischen und umweltspezifischen Attribute in gleicher Weise abbilden, sind trotz der vielfältigen galvanischen, folien- und lackbasierten Beschichtungstechnologien bislang auf dem Markt nicht verfügbar.

5. Hauptteil

5.1 Arbeitsschwerpunkte und erzielte Ergebnisse

5.1.1 Technische Grundlagenuntersuchungen

Für die technischen Grundlagenuntersuchungen wurde im ersten Schritt eine Versuchsanlage aufgebaut (Abbildung 1). Zu den Aufgaben in diesem Zusammenhang gehörte insbesondere auch die stabile Umsetzung der relevanten Druckbereiche, was über die zweistufige Konfiguration aus einer vorgeschalteten Vakuum- und integrierten Turbopumpe erreicht werden konnte. Für Letztere musste jedoch eine effektive Wasserkühlung implementiert werden. Darüber hinaus wurden Lösungen für die Elektrodendurchführung, die automatische Druckmessung und -regelung sowie die zunächst rotierende Probenmimik im Plasma erarbeitet.



Abbildung 1: Versuchsanlage mit integrierter Turbopumpe (rechts)

Die Versuchssteuerung wurde auf der Basis der eigenen Steuerungssoftware entwickelt und ermöglicht sowohl manuelle Modi als auch automatische Programmabläufe in einem breiten variablen Parameterfeld. Damit ergaben sich gute Voraussetzungen für eine umfassende Betrachtung der Abscheidebedingungen bei unterschiedlichen Parametersettings.

Für die Grundlagenversuche wurde in der Vakuumkammer zunächst ein Drehteller aufgebaut, auf dem zu beschichtende Substrate unter der PVD-Quelle rotieren können. Gleichzeitig wurde die PVD-Quelle schwenkbar integriert, so dass ein problemloses Auswechseln der Targetmaterialien möglich ist. Als Targets ließen sich in dieser Konstellation neben Chrom auch andere Metalle wie Edelstahl, Silber, Gold einsetzen. Die Anlage wurde zudem so konstruiert, dass weitere PVD-Quellen integriert hätten werden können. Damit lag die technische Basis für die Grundlagenversuche zur Schichtabscheidung vor.



Abbildung 2: Drehteller für die rotierende Substratlagerung (links) und schwenkbare Aufnahme des PVD-Targets

Die Grundlagenversuche zur Schichtabscheidung wurden aus Kostengründen zunächst mithilfe eines Edelmetalltargets durchgeführt. Bereits nach wenigen Iterationen konnten hiermit schon recht homogene und glänzende Schichten abgeschieden werden. Im Zuge dieser ersten Versuche wurden einzelne Prozessparameter gezielt verändert. Dies betraf insbesondere den Prozessdruck (0,01 – 0,3 mbar), Gasfluss (50 – 500 sccm), die Beschichtungszeit sowie Plasmaleistung (0 – 1.000 W). Darüber hinaus wurden unterschiedliche Prozessgase (Ar, ArH₂...) eingesetzt, um die spezifische Parametrierung des Beschichtungsprozesses sowie Ausbildung der Oberflächenqualität bewerten zu können. Im Ergebnis konnten ähnlich zu den eingangs durchgeführten Versuchen erste Anhaltspunkte für die gezielte Beeinflussung der Beschichtungsqualität (optische Dichte, Glanzgrad, Homogenität) erarbeitet werden.

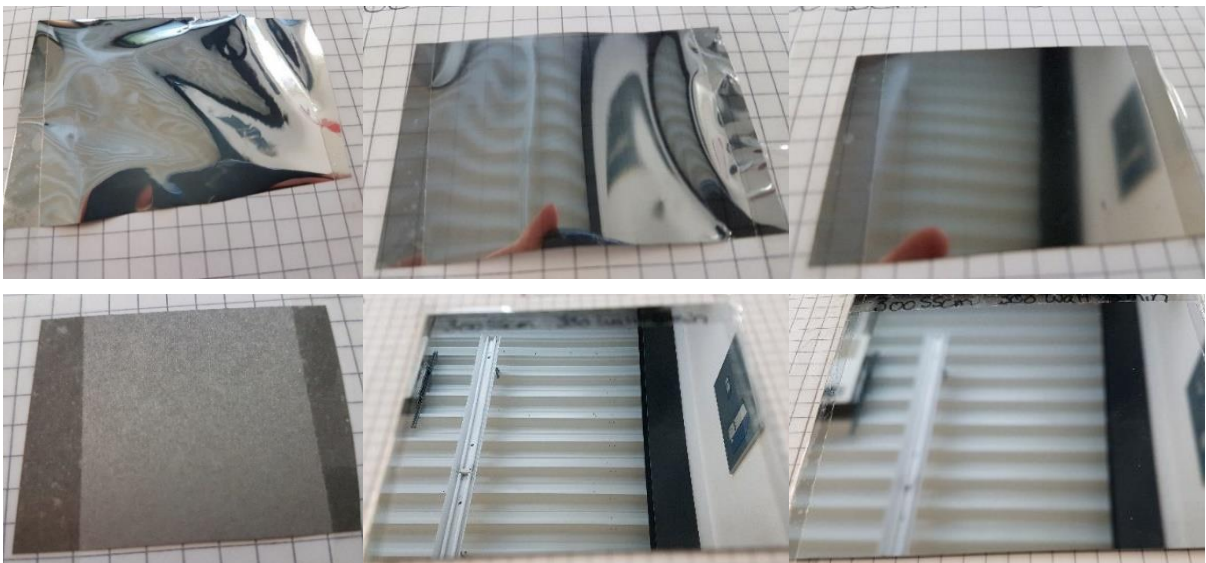


Abbildung 3: Erste Beschichtungsproben auf Referenzsubstraten mit bereits z. T. sehr guten optischen Eigenschaften

Die Untersuchungen zeigten, dass sich schon kleinste Parameteränderungen in der Beschichtungsoptik widerspiegeln. Dennoch konnten auf unterschiedlichen Referenzsubstraten mit einem Edelmetalltarget bereits stark glänzende oder sogar spiegelnde Oberflächen erzeugt werden (vgl. Abbildung 3). Klarlackfilme wurden in diesem Zusammenhang bewusst noch nicht betrachtet, um unabhängig von deren voraussichtlich hoher Prozesssensibilität die groben Verfahrensvorgaben für die PVD-Beschichtung grundlegend eingrenzen zu können.

5.1.2 Technische Umsetzung des Beschichtungsprozesses

Auf Basis der für statische Beschichtungsversuche ausgelegten Labortanlage sollte ein Anlagenkonzept entwickelt werden, welches optimale Abscheidungsbedingungen auf einer durchlaufenden Folienoberfläche zulässt. Dieses wurden in mehreren Stufen erarbeitet, die insbesondere auf eine seitliche Anordnungen der Targets, die Bahnführung, Konfiguration der Rollenelektroden in der PVD-Kammer sowie die Parametrierung der Prozesssteuerung hinsichtlich der Generatorleistung, Antriebsgeschwindigkeiten und -synchronisation, um die technischen Voraussetzungen für eine homogene und exakt regelbare Schichtabscheidung sowie durchgängige Automatisierung des Prozesses abzielten. Im Ergebnis konnte eine entsprechende Versuchsanlage konzipiert und aufgebaut werden (Abbildung 4/ Abbildung 5).

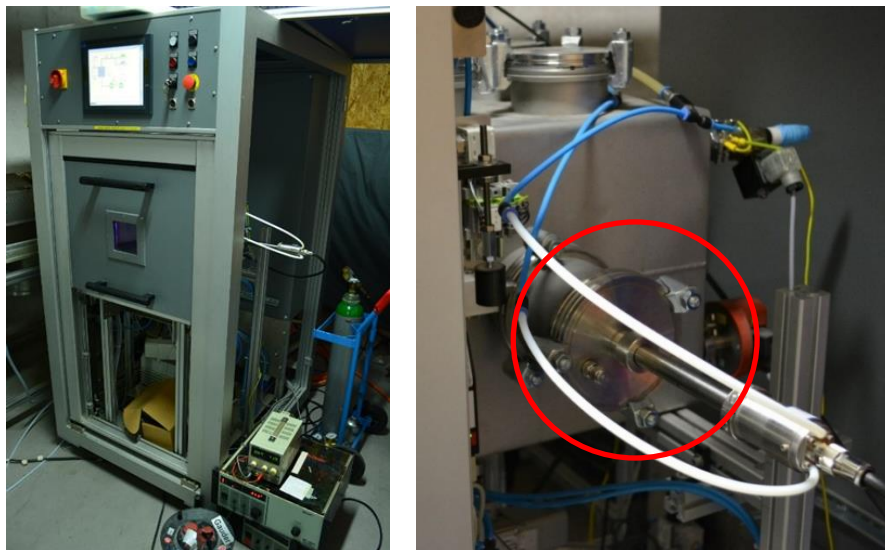


Abbildung 4: Versuchsanlage für durchlaufende Oberflächen mit seitlicher Anordnung des Targets

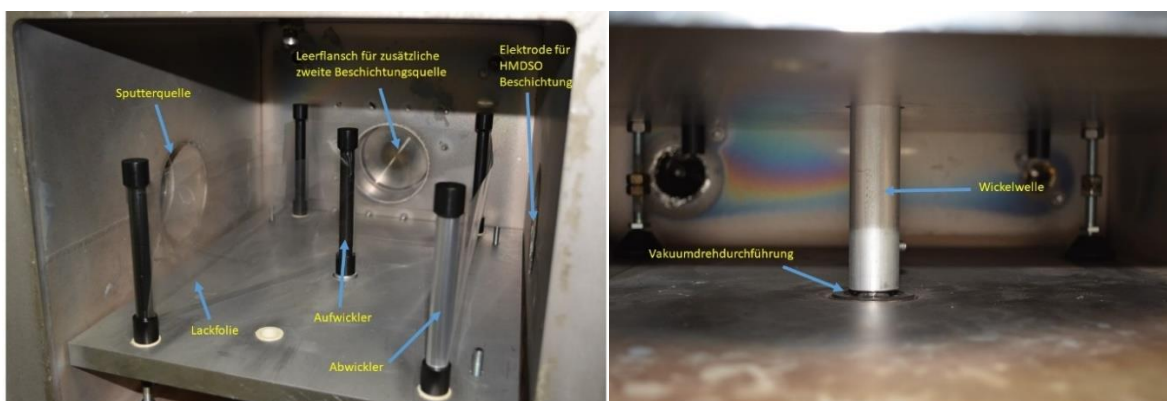


Abbildung 5: Blick in die PVD-Kammer mit der integrierten Lackfilm-Mimik

Die Beschichtung erfolgt auf der durchlaufenden Folie, was über eine vollautomatische Wickeleinrichtung realisiert wurde. Die besondere Herausforderung bestand darin, die Antriebskopplung ohne Beeinträchtigung des Kammerdrucks zu realisieren. Daher musste der Schrittmotor außerhalb der Vakuumkammer angeordnet werden, von dem aus die Wickelwelle über eine Vakuumdurchführung in die Kammer geführt wurde. Darüber hinaus musste für die Folienmimik durchgängig eine optimale Zugspannung sichergestellt werden, um einerseits die Oberfläche in einem konstanten Abstand an der Sputterquelle vorbeiführen und dabei Überdehnungen, die sich später als Fehler in der Chromschicht abbilden hätten können, sicher ausschließen zu können. Geregelt werden dabei die Parameter Foliengeschwindigkeit, Transportrichtung, Positionsfahrten (um definierte Folienbereiche gezielt vor der Beschichtungs- bzw. Sputterquelle zu positionieren), Endpunktposition und Substrattemperatur.

5.1.3 Beschichtungsversuche

Im Zuge der ersten Versuche mussten noch mehrere Abstimmungen vorgenommen werden, um die Folie sehr gleichmäßig und ohne schlupf- bzw. anders bedingte Stockeffekte durch die PVD-Kammer führen zu können. Die Beschichtungsseite war dabei dem Target zugewandt. Die Schichtdicke wurde über die Foliengeschwindigkeit eingestellt.

Die vielschichtigen weiterführenden Versuche zeigten im Ergebnis jedoch auch, dass sich mit der erarbeiteten Anlagentechnik sehr homogene und deckende Chromschichten applizieren ließen. In der Abbildung 6 ist der Beschichtungsprozess abgebildet. Es ist zu sehen, dass rechts vom Target der Folienfilm noch durchsichtig ist, während er links davon dunkler erscheint, da hier bereits die Chromschicht abgeschieden wurde. Die Schichteigenschaften lassen sich dabei nicht allein über die Foliengeschwindigkeit steuern, sondern können über die Plasmaleistung, den Prozessdruck und die Zusammensetzung des Targets eingestellt werden.

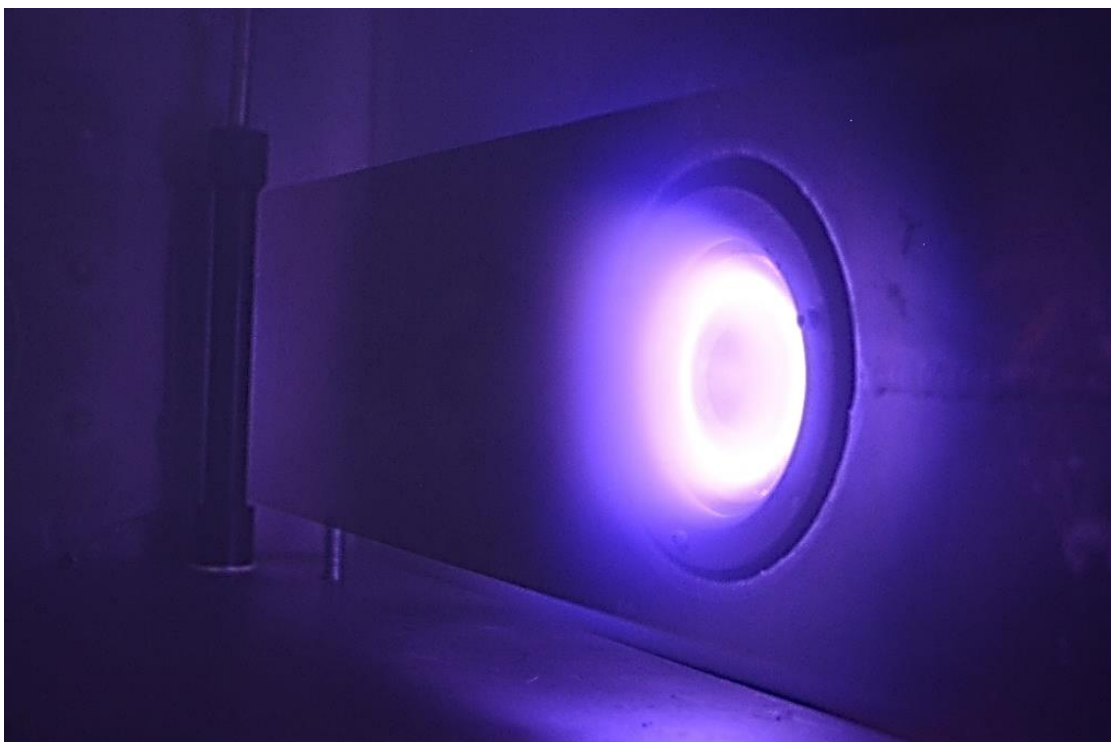


Abbildung 6: Laufende PVD-Beschichtung

Die Beschichtungsversuche wurden die erzeugten Proben einer intensiven Prüfung unterzogen. Dabei wurde insbesondere in den Zugtests und der anschließenden Bewertung der Lichtdurchlässigkeit festgestellt, dass die bei langsameren Wickelgeschwindigkeiten und damit mit dickere und dichteren Schichten ausgerüsteten Folien deutlich bessere Ergebnisse erbrachten, als die bei geringeren Wickelgeschwindigkeit hergestellten Proben.

Auch hinsichtlich der prozesseitigen Beschichtungsvoraussetzungen konnten die geeigneten Setups schrittweise herausgearbeitet werden. Diese waren beispielsweise für die in Abbildung 7 gezeigte Beschichtungsprobe auf ein Edelstahltarget, das Sputtergas Argon, eine Plasmaleistung von 120 W sowie einen Prozessgasfluss von konstant 200 sccm bzw. einem Prozessdruck von 0,1 mbar definiert. Als Hauptparameter für gezielte optische Schichtveränderungen wurde jedoch die Wickelgeschwindigkeit bestätigt.



Abbildung 7: Bei variiert Wickelgeschwindigkeit erzeugte Beschichtungsprobe (Dichte der Schicht steigt von links nach rechts; Durchsichtigkeit sinkt von links nach rechts)

5.1.4 Schichtbewertung

Optische Schichtqualitäten

Zur Bewertung der auf den UV- und konventionell getrockneten Klarlackfilmen erzielbaren Beschichtungsqualitäten wurden relevante Referenzsubstrate gegenübergestellt. Hierbei handelte es sich um Trägerfolien aus PP, PC, PC/PBT und Fluorpolymeren.

Tabelle 1: Oberflächenbeurteilung unterschiedlicher Substrate für die PVD-Verchromung

Folie	Substrat	Bewertung ggü. Referenz	gesamte Schichtdicke (µm)	Dehnbarkeit der Folie (%)	Haftungstest Klebebandabriss	Heißwasserdampf Test
Wörwag, UV-Klarlack / Folie	PUR	4	119-127	7 %	Gt0	Gt2, m0g0, sichtbare Veränderungen der Oberfläche
Wörwag, UV-Klarlack, Primer / Folie	PUR	4	97-107	7 %	Gt0	Gt2, m0g0, keine sichtbaren Veränderungen der

						Oberfläche
Wörwag, konventioneller Klarlack / Folie	PUR	4	89-94	15 %	Gt0	Gt0, m0g0, kaum sichtbare Veränderungen der Oberfläche
Orafol Oraguard 283 Stone Guard Film	PUR	3	162 (ohne Träger)	15 %	Gt0	Gt0, m0g0, keine sichtbaren Veränderungen der Oberfläche
Gröner, GRONAL PU Lackschutzfolie transparent	PUR	3	303-305 (ohne Träger)	15 %	Gt0	Gt0, m0g0, keine sichtbaren Veränderungen der Oberfläche
Orafol, ORACAL 961 Caravan Film Premium Cast 010 Weiß Glanz	PVC	3	91-94 (ohne Träger)	12 %	Gt0	Gt0, m0g0, keine sichtbaren Veränderungen der Oberfläche
Orafol, ORACAL 970G Premium Wrapping Cast 351 Kommunalorange 152 cm 30329707/2,00m	PVC	4	186-188	12 %	Gt0	Gt0, m0g0, sichtbare Veränderungen der Oberfläche
Orafol, ORACAL 961 Caravan Film Premium Cast 010 Weiß Glanz / Klarlack	PVC	3	110-123 (ohne Träger)	12 %	Gt0	Gt0, m0g0, keine sichtbaren Veränderungen der Oberfläche
PC Folie	PC	2	71-74	10 %	Gt0	Gt0, m0g0, keine sichtbaren Veränderungen der Oberfläche
PP Folie	PP	6	182-184	15 %	Gt4	Gt4, m2g1, matte Oberfläche
Gröner, GRONAL SpyProtect Sichtschutzfolie silver 07i	Fluor	1	92-96	Max 5 %	Gt0	Gt0, m0g0, keine sichtbaren Veränderungen der Oberfläche

Grundsätzlich zeigte sich zunächst, dass die betrachteten Klarlackfilme auf PU-Basis nicht den optischen Qualitäten der Fluor- und PC-Substrate entsprachen. Zu begründen war dies darin, dass die untersuchten Klarlackschichten von vornherein immanente Rissbildungen mitbrachten, die sich auch in der PVD-Beschichtung abbildeten. Daraus ergeben sich jedoch keine grundsätzlichen Ausschlusskriterien für dekorative Oberflächenanwendungen, es wurde jedoch deutlich, dass großflächige Beschichtungen hiermit nicht adressiert werden können, sondern die Zielrichtung eher im Bereich dreidimensionaler Bauteile mit kleineren Sichtflächen zu sehen ist. Dies bestätigt die primäre Intention des Projektes, eine Beschichtungsalternative insbesondere für dekorative Einbauteile wie Zierleisten, Bedienelemente oder Dachrelings zu erarbeiten.

Abbildung 8 zeigt ein typisches Beispiel für die in den UV- Klarlackfilme zu beobachtenden Riss- bzw. Marmoreffekte, die sich durch eine feine Rissbildung an der Oberfläche ergeben. Diese sind je nach Lichteinfall deutlich sichtbar und erzeugen – gerade bei großen Oberflächen – eine matte Optik.

Auch konventionell gehärtete Klarlackfilme brachten diese Einschränkungen mit, die hier jedoch in erster Linie darauf zurückzuführen waren, dass die Substrate im PVD-Prozess auf 80 °C erwärmt wurden und sich dabei ausdehnten. Bei der Ab-

kühlung schrumpfte der Klarlack stärker als die aufgetragene Metallschicht, so dass es zur Rissbildung kam (Abbildung 9).

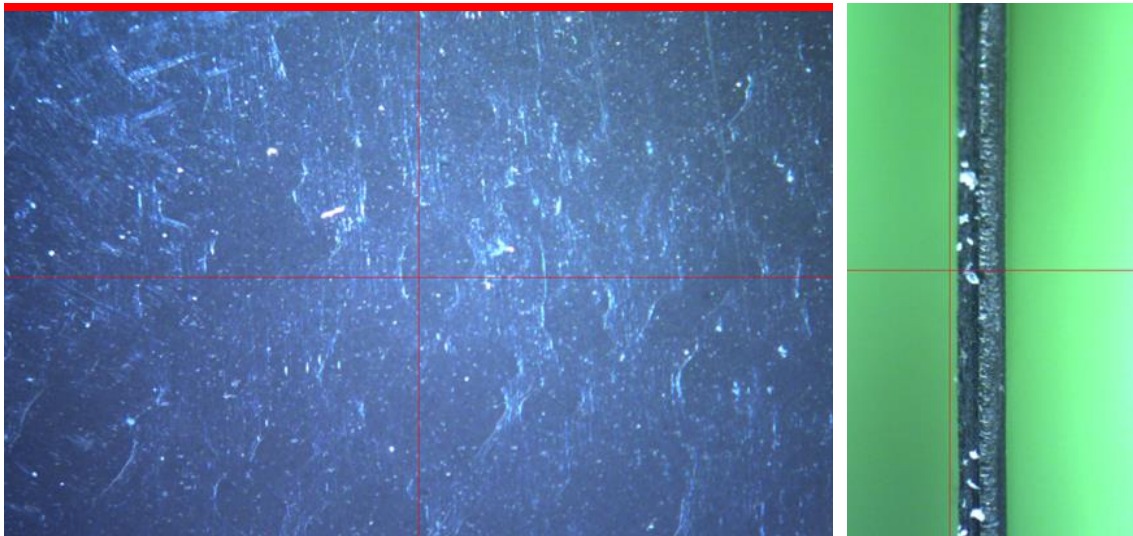


Abbildung 8: Oberflächenoptik (links) und Schichtprofil (rechts) eines beschichteten UV- Klarlackfilms Gesamtschichtdicke: 119 – 127 μm : 2 Klarlackschichten, 2 Träger- bzw. Transferfolien

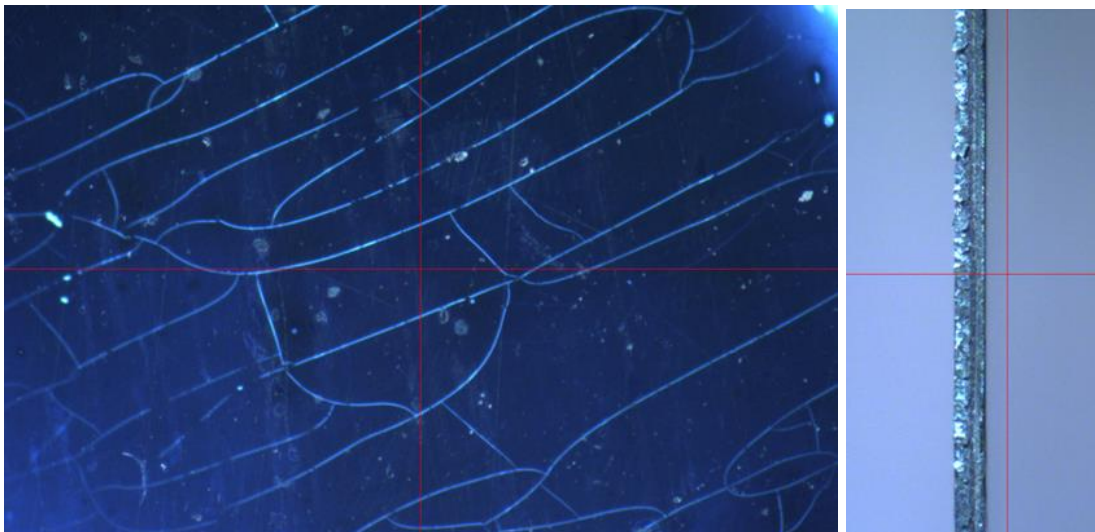


Abbildung 9: Oberflächenoptik (links) und Schichtprofil (rechts) eines beschichteten konventionellen Klarlackfilms

Grundsätzlich konnte im Ergebnis der Versuche jedoch bestätigt werden, dass die Beschichtung eines Klarlackfilms auf der Rückseite sowohl bei UV gehärteten wie auch bei konventionell gehärteten Systemen möglich war.

Umformeigenschaften

Im Hinblick auf die präferierte Beschichtung von dreidimensionalen Bauteiloberflächen wurden aus diesem Kenntnisstand heraus Versuche durchgeführt, in denen das Umformverhalten (insbesondere Tiefziehverhalten) der beschichteten Folien analysiert werden sollte.

Im ersten Schritt wurde hierfür ein vereinfachter Versuchsaufbau entwickelt (Abbildung 10), an dem die Tests durchgeführt werden konnten. Dieser bestand aus einem Absaugflansch, auf den ein abzuformendes Objekt gelegt und darüber die PVD-Folie fixiert wurde.



Abbildung 10: Versuchswerkzeug zur Simulation von Tiefziehverarbeitungen der beschichteten Muster

Anschließend wurde die Folie mit Heißluft „tiefgezogen“ und legt sich auf dem Werkstück ab. Als Beispielformen wurden hierfür ein 3D-Druck des Firmenlogos und ein Schraubenschlüssel ausgewählt, die in diesem Kontext bereits komplexe 3D-Geometrien darstellten (Abbildung 11).



Abbildung 11: Versuchswerkzeug zur grundlegenden Vorbewertung des Umformverhaltens der beschichteten Muster - die Ergebnisse der „Tiefziehversuche“ zeigten unabhängig von den unterschiedlichen Umformeigenschaften der Proben eine insgesamt gute Beständigkeit der optischen Oberflächeneigenschaften nach der Umformung

In der Gegenüberstellung der beschichteten Lack- und Referenzfolien ließen sich insgesamt positive Umformeigenschaften attestieren, wobei durchaus qualitative Unterschiede zu registrieren waren. Die besten Ergebnisse ließen sich mit einer vergleichsweise dünne Polycarbonat-Folie und Edelstahl PVD-Beschichtung erzielen, während die PU-basierten Klarlackfilme einen größeren Verformungswiderstand mitbrachten. Hier wurde jedoch ein Optimierungspotenzial erkannt, dass in den späteren Schritten mit veränderten Beschichtungsparametern umgesetzt werden konnte.

5.1.5 Plasmaprimer als immanente Haftvermittlerschicht

Ein weiterer Aspekt, der eine genauere Untersuchung erforderte, war die rückseitige Abscheidung von Primerschichten im Plasma, die als Haftvermittler für die Applikation auf der Bauteiloberfläche fungieren sollten.

Als Referenz wurden Kleberücken von 3M herangezogen, welche aus einer reinen Kleberschicht besteht, die sich zwischen zwei Silikonträgerfolien befindet. Der Anbringungsprozess des Kleberückens auf der PVD-Folie erfolgte über ein einseitiges Kaschieren der Silikonträgerfolien, woraufhin die Lack/PVD-Folie auf dem Bauteil appliziert werden kann.

In einem manuellen Prozessablauf hat sich dabei die blasenfreie Aufbringung des Kleberückens als problematisch herausgestellt, so dass es in einer zukünftigen Serienfertigung erforderlich sein wird, auf geeignete Kaschiermaschinen zurückzugreifen. Zur Überprüfung der Ergebnisse wurde in einem ersten Schritt die Haftung zwischen dem Plasmaprimer und der PVD/Lack-Oberfläche untersucht, dabei haben sich die beiden folgenden Konfigurationen bewährt (siehe Tabelle 2).

Tabelle 2: Auszug der Haftungsuntersuchungen

Ausgangszustand Lack/ PVD Kleberücken laminiert	Plasma primer				Haftungstest		Ergebnis
		Aktivierungs- prozess	Plasma- primer	Nach- behandlung	Kochtest	Schältest	
PVD/Lack mit Vorbehand- lung Plasmaprimer UV- Lack Prozess	Gas	O2		O2	Gt 2	i.O.	i.O.
	Zeit	60 sec	10 sec	10 sec			
Konventioneller Lack mit Modifikation Prozess UV- Lack	Gas	O2		O2	Gt 2	i.O.	i.O.
	Zeit	60 sec	10 sec	10 sec			

Die beiden vielversprechenden Kombination wurden anschließend direkt auf Standard ABS-Platten aufgerakelt und hinsichtlich der Klebeschichthaftung auf dem Substrat untersucht. Im Ergebnis der Untersuchungen konnten die folgenden drei Konfigurationen herausgestellt werden, welche nach vorläufiger Einschätzung bereits den Anforderungen der Automobil- und Konsumgüterbranche gerecht werden sollten. Hinzu kam die positive Erkenntnis, dass durch den Plasmaprimer kein optischer Einfluss auf die Oberfläche resultierte.

Tabelle 3: Auszug der Haftungsuntersuchungen des mithilfe eines Plasmaprimeres auf ABS applizierten Lack/PVD-Beschichtung

Folienapplikation / auf ABS Platten	Aktivierungs- prozess	Plasmaprimer	Nach- behandlung	PVD/ Plasma primer/ Kleber- schicht	Laminierung Platte	Haftungs-test Kochtest	Haftungs-test Schältest	Ergebnis	Bemerkung
konventioneller Klarlack/ Leistung des Plasma-primerprozesses 50%				x	x	Gt1	i.O.	i.O.	Prozess funkti- oniert. Optimie- rung UV / PVD Schicht not- wendig
PVD/Lack mit Vorbehandlung Plasmaprimer UV-Lack Prozess Leistung des Plasmaprimerpro- zesses 10%	60 sec	10 sec	15 sec	x	x	Gt0-1	i.O.	i.O.	

Folienapplikation / auf ABS Platten	Aktivierungsprozess	Plasmaprimer	Nachbehandlung	PVD/ Plasma primer/ Kleberschicht	Laminierung Platte	Haftungs-test Kochtest	Haftungstest Schältest	Ergebnis	Bemerkung
PVD/Lack mit Vorbehandlung Plasmaprimer UV-Lack Prozess Leistung des Plasmaprimerprozesses 25%	60 sec	10 sec	15 sec	x	x	Gt0-1	i.O.	i.O.	Die Leistungsreduzierung hat die Ergebnisse verbessert und das Ziel wurde erreicht

Im Ergebnis des Projektes konnten so letztendlich zwei auf einer mehrstufigen integrierten Plasmabehandlung basierende Ansätze erarbeitet werden, mit denen

- Chrombeschichtungen erzeugt werden können, die in ihrer optischen Qualität der galvanischen Verchromung gleichzusetzen sind

und

- eine verlässliche Möglichkeit bieten, die Chrombeschichtung mit Hilfe eines umweltfreundlichen und emissionssparenden Plasmaprimers auf dem Substrat aufzubringen.

Dabei erfüllt die Klebeverbindung der Beschichtung mit dem Substrat die von der Automobil- und Konsumgüterbranche gestellten Anforderungen. Die Anlagenparameter müssen je nach Bauteil individuell angepasst und optimiert werden. Hier wurde die Machbarkeit der durchgängigen, trockenen Herstellung von chrombeschichteten Lackfilmen in umfassenden Beschichtungsversuchen nachgewiesen und anhand der Applikation auf ABS-Platten erfolgreich als proof of concept dargestellt.

5.1.6 Untersuchungen zur gezielten Einstellung von Farbtönen und Korrosionsbeständigkeiten

Nachdem man im Vorfeld die zwei zentralen Projektziele einer chromadäquaten Oberflächenoptik, rückseitigen Haftungsoptimierung sowie deren prozesstechnisch reproduzierbare Abbildung in einer Plasmaanlage erreicht hatte, standen in der letzten Projektphase gezielte Beeinflussungen der Farbgebung und des Oxidationswiderstandes im Mittelpunkt der Untersuchungen.

Um diese Funktionalitäten auf der Lackfilmoberfläche abbilden zu können, mussten geeignete Multilayer-Komplexe erarbeitet werden. Nach eingehenden Vorversuchen konnten hierfür definierte Schichtabfolgen aus PVD- und HDMSO-Layern bestimmt werden, welche sowohl eine gezielte Beeinflussung der Optik als auch eine sehr gute Korrosionsbeständigkeit versprachen (Abbildung 12). Während Erstere durch die Zusammensetzung der Metallschichten bestimmt wird, bilden die HDMSO-Schichten eine glasartige, sehr dichte Barriere gegenüber Feuchtigkeit aus, was eine dauerhaften immanenten Korrosionsschutz ermöglicht.



Abbildung 12: Beispiel eines Mehrschichtkomplexes zur weiterführenden Funktionalisierung der Chromfolie

Die Beschichtungsversuche auf den Klarlackfilm wurden dabei mit unterschiedlichen Metallen durchgeführt. Dabei wurde neben Edelstahl auch Indium und Gold eingesetzt, um eine definierten „Abstufung“ des Farbtons zu erreichen. Während ein höherer Edelstahlanteil zu einer stärkeren Blautönung mit hohem Glanzgrad führte, resultierte ein gesteigerter Indium-Anteil in einem matten, bräunlicheren Oberflächeneffekt (Abbildung 13).

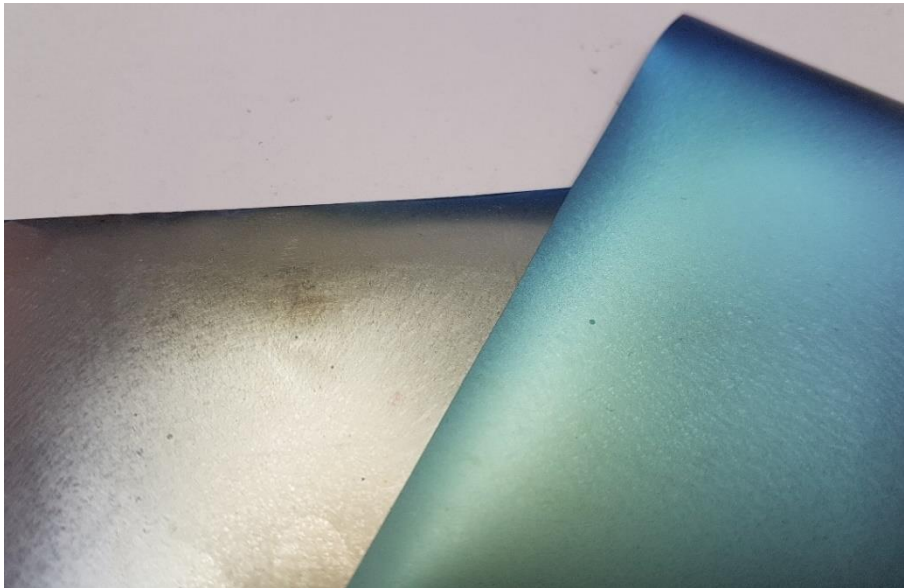


Abbildung 13: Versuche zur Umsetzung unterschiedlicher Oberflächenfärbungen

Dies wurde über einen mehrstufigen Plasmaprozess erreicht, der für die unterschiedlichen Metalle z. B. folgende Prozesssequenzen und -parameter vorsah:

Edelstahl-/Indium-Beschichtung

- Prozesszeit: 1 min
- Sputterquelle: Edelstahl und Indium
- Generatorleistung: 100 W
- Prozessgas: ArH₂ 7,5,
- Durchflussrate: 200 sccm
- Druck von 0,1 mbar

Goldbeschichtung

- Prozesszeit: 1 min
- Sputterquelle: Gold
- Generatorleistung: 150 W
- Prozessgas: ArH₂ 7,5,
- Durchflussrate: 200 sccm
- Druck von 0,1 mbar

Barrierschicht

- Prozesszeit: 3 min
- Precursor: HMDSO_{flüssig}
- Generatorleistung: 150 W
- Durchflussrate: 100 sccm
- Druck: 0,15 mbar

Barrierschicht

- Prozesszeit: 10 min
- Precursor: HMDSO_{flüssig}
- Generatorleistung: 150 W
- Durchflussrate: 100 sccm
- Druck: 0,15 mbar

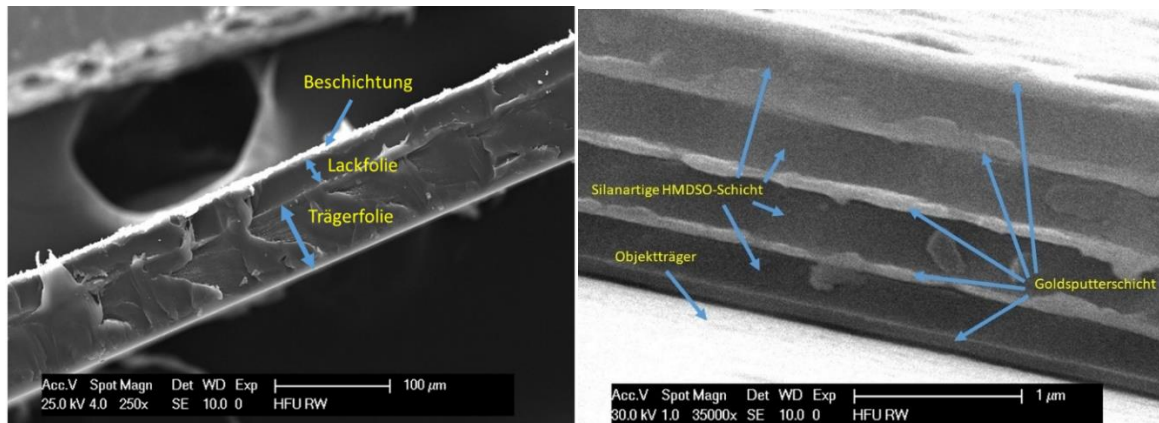


Abbildung 14: Beispielhafte REM-Aufnahme der erzeugten PVD-Beschichtung
 Im Rahmen der begleitenden Analysen wurde deutlich, dass sich die spezifischen Farbeffekte auch auf Interferenzen zurückzuführen sind. Diese erschließen sich bei der Betrachtung der Mikromorphologie des Metalllayers, die sich deutlich inhomogener darstellte (vgl. Abbildung 15), als ursprünglich angenommen wurde.

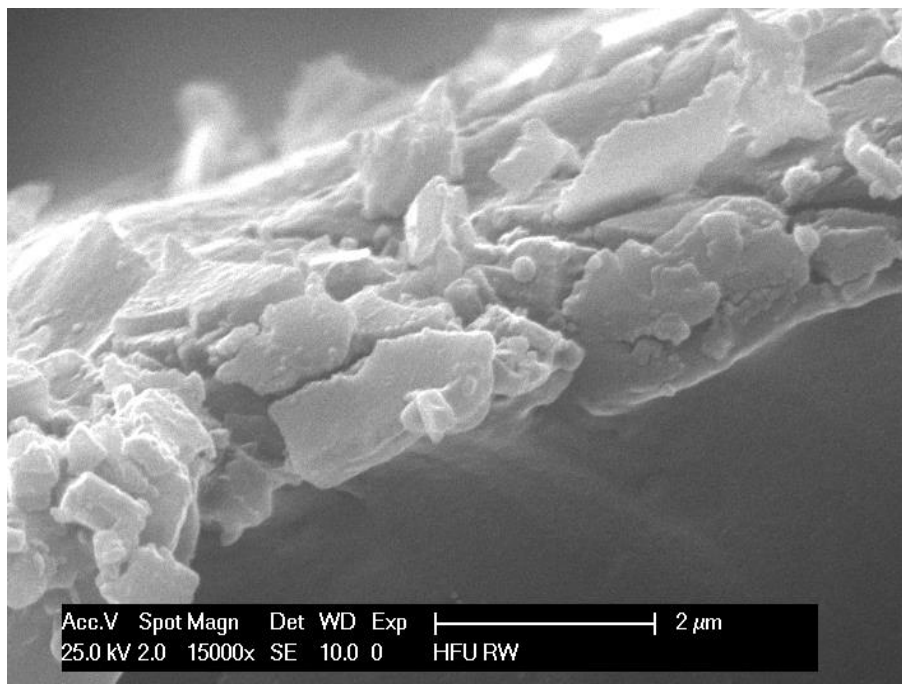


Abbildung 15: REM-Aufnahme der stark inhomogenen Metallschicht

Im Ergebnis der Untersuchungen konnte letztendlich nachgewiesen werden, dass sich die Schichtfärbung über die Wahl bzw. Zusammensetzung des Targets gezielt beeinflussen lässt und somit hochwertige Metallic- und Interferenz-Optiken auf den Klarlackfilmen umsetzbar sind. Gleichzeitig konnte herausgearbeitet werden, dass entsprechende Mehrschichtsysteme, die in Verbindung mit eingelagerten HMDSO-Schichten appliziert werden, erheblich verbesserte Barriereigenschaften gegenüber Wasser bzw. Feuchtigkeit mitbringen, so dass darüber relevante Korrosionsprobleme zuverlässig vermeidbar sind.

5.2 Ökologische, technologische und ökonomische Bewertung

Die im Vorhaben erzielten Ergebnisse sind auch über die sehr guten optischen Qualitäten der Klarlackfilm-Beschichtung hinaus sehr positiv zu bewerten, denn es bietet in technologischer, ökologischer und ökonomischer Sicht völlig neue Perspektiven für die Verchromung von dreidimensionalen Bauteilen mit kleiner Sichtfläche.

Aus ökologischer Sicht stellen sich insbesondere

- die qualitative Wettbewerbsfähigkeit gegenüber konventionellen galvanischen Chromschichten und damit trockene und schadstofffreie Herstellung
- der Verzicht auf notwendige nasschemische Oberflächenvorbehandlungen mit Salz-, Salpeter- oder Chromsäuren und der Entfall von umweltkritischen Netzmitteln bzw. Entschäumer mit PFOS-Anteilen

sowie

- die hohen Energieeffizienz des Verfahrens → Der Energieaufwand zur Herstellung eines einfach verchromten Klarlackfilms liegt ≥ 97 % unter dem für eine galvanische Beschichtung

dar. Damit sind klare Vorteile gegenüber den bislang bekannten Ansätzen zur Verchromung von Bauteilen aufzeigen.

In der technologischen Bewertung ist insbesondere der Nachweis der technischen Machbarkeit, aber auch die Realisierung eines durchgängigen, trockenen Plasmaprozesses anzuführen, welches die komplette Prozessabfolge für die Chrom- und Primerbeschichtung von Lackfilmen innerhalb einer Plasmaanlage erlaubt. Als entscheidendes technisches Kriterium hierbei ist, dass die Chrombeschichtungen qualitativ denen einer galvanisch verchromten Oberfläche entsprechen. Dies gilt aufgrund immanenter Mikrorisse der heute als Substrat verfügbaren Klarlackfilme vorerst nur für kleinere Sichtflächen, wie sie auf Zielleisten, Bedienelementen, Dachrelingen, Griffelemente, Schriftzüge, Kühlergrills oder Embleme, auf die jedoch von vornherein der Fokus ausgerichtet war. Dabei konnte auch der wichtige Nachweis erbracht werden, dass die chrombeschichteten Lackfilme ohne spürbare optische Einschränkungen umgeformt werden können, so dass gerade dreidimensionale Bauteilgeometrien auf diesem Weg problemlos beschichtet werden können.

Auch in der ökonomischen Bewertung kann ein positives Fazit gezogen werden. Anhand des bereits im Antrag beispielhaft herangezogenen Kühlergrills können die auf Basis der nun vorliegenden Prozessenerfahrungen ermittelten Kosten hier klar benannt werden. Dabei kann auch der ursprünglich angestrebte wirtschaftliche Vorteil der Plasmabeschichtung bestätigt werden, der sich sehr nah am ursprünglich prognostizierten Wert einordnen lässt.

Chromfolie (IST)		Chromfolie (Prognose)		Chrom Galvanik		
Klarlackfilm	8 €	Klarlackfilm	8 €	CrIII / CrVI	CrIII	CrVI
PVD Schicht	5 €	PVD Schicht	8 €	Nickel /Messing		
Primerschicht	3 €	Primerschicht	4 €	Vorbehandlung		
Gesamtkosten	16 €	Gesamtkosten /m ²	20 €		95 €	73 €
Ausschuss	5 %	Ausschuss	5 %	(Schätzung Kunde)	20 %	5 %

eff. Gesamtkosten/m ²	17 €	eff. Gesamtkosten/m ²	21 €	eff. Gesamtkosten/m ²	114 €	77 €
----------------------------------	------	----------------------------------	------	----------------------------------	-------	------

Darüber hinaus ergeben sich wirtschaftliche Vorteile des Plasmaverfahrens auch infolge der gegenüber der Kunststoffgalvanik deutlich geringeren Investitions- und Abschreibungskosten, die sich letztendlich auch im Bauteilpreis widerspiegeln. Als Grundlage zur Berechnung dient hier eine Anlage, in der der Schichtaufbau aus PVD und Plasmaprimer stationsweise hintereinander vollautomatisch erfolgt. Zudem ermöglicht einen vollständig reproduzierbaren und exakt regelbaren Beschichtungsprozess, wodurch die Fehlerquoten minimiert werden können. Die in den vielzähligen Versuchen beobachteten Fehlbeschichtungen konnten bei abgestimmten Parametersätzen niedrig gehalten werden, so dass in einem eingefahrenen Fertigungsprozess von einer Fehlerquote von <2 % auszugehen ist.

5.3 Maßnahmen zur Verbreitung der Vorhabensergebnisse

Durch das Erreichen der Zielspezifikationen und dem damit einhergehenden Nachweis der grundsätzlichen Praktikabilität des Beschichtungsverfahrens, setzt man sich bei plasma technology in Zusammenarbeit mit der Sommer Engineering aktuell intensiv damit auseinander, das erarbeitete Verfahren in die Fertigungsreife zu überführen. Die Aussichten, auch dieses Stadium prozess- und anlagentechnisch zu erreichen stellen ebenfalls sehr positiv dar.

Problematisch im Hinblick auf die nun parallel angestrebte Erschließung konkreter Applikationen und potenzieller Aufträge stellt sich die aktuelle Corona-Pandemie dar, da Prozessänderungen und damit verbundene Investitionsentscheidung in relevanten Branchen (insbesondere Automobil) gerade weitgehend vermieden bzw. verschoben werden. Dennoch sollen die Ergebnisse nun aufbereitet und in den kommenden Monaten verstärkt präsentiert und kommuniziert werden, um die nach Corona erwartete Aufschwungphase für eine erfolgreichen Markteinführung nutzen zu können. Dies soll neben direkten Gesprächen mit den OEMs und Zulieferern, zu denen insbesondere der Partner Sommer einen hervorragenden Zugang besitzt, auch über gezielte Fachveröffentlichungen und Veranstaltungsbeiträge erfolgen.

Die Zielanwendungen konzentrieren sich dabei auf nicht auf die Beschichtung von großflächigen Bauteilen, sondern vielmehr auf den Bereich von dreidimensionalen Bauteilen mit kleinen Sichtflächen. Dazu zählen insbesondere dekorative Einbauteile in Fahrzeugen und Konsumprodukten.

5.4 Fazit

Das abgeschlossene Projekt kann als großer Erfolg bewertet werden. Es wurden die formulierten Zielsetzungen des Projektes erreicht und somit ein wettbewerbsfähiger bzw. praxistauglicher Verfahrensansatz zur Herstellung von hochwertig verchromten Klarlackfilmen entwickelt:

Projektziel	Ergebnis/ Bewertung	
→ Nachweis der PVD-Beschichtung anhand von mindestens zwei unterschiedlichen Lackfilm-Substraten	✓	Der Nachweis der Beschichtbarkeit anhand von 3 Lackfolien (vgl. Tab. 1) erbracht.
→ Abscheidung einer homogenen, voll-	✓	Die Homogenität der PVD-

ständig geschlossenen Chrombeschichtung bei Schichtstärken von ca. 100 µm		Beschichtung ist optisch nachweisbar, auf der Mikrostrukturebene stellt sich die PVD-Schicht jedoch technologiebedingt „zerklüftet“ dar.
→ Glanzgrad: >70 GU (20°) nach DIN EN ISO 2813	✓	Mittels Edelmetalltarget konnten sehr hohe Glanzgrade von bis zu 90 GU erzielt werden.
→ Farbton adäquat zu Glanzchromreferenzen auf CrVI-Basis	✓	Auf kleinen Sichtflächen konnten die gleichen Chromoptiken erzeugt werden wie bei galvanischen Referenzmustern. Eine Übertragung auf große Sichtflächen ist nur dann möglich, wenn die immanente Mikrorissigkeit der Klarlackfilme deutlich reduziert werden kann.
→ Nachweis der Realisierbarkeit von mindestens zwei anderen Farbtonvariationen durch entsprechende Variation der Targetmetalle	✓	Beispielhafte Farbvariationen wurden mithilfe von Indium und Goldtargets erzeugt
→ Uneingeschränkte Oberflächenoptik bei einer Längs- und Querdehnung des Chromfilms von bis zu 10 %	✓	Im Zuge der Umformversuche nachgewiesen, in denen teilweise Längs- und Querdehnung von bis zu 20 % erzeugt wurden.
→ Durchgängig plasmabeschichteter Beschichtungsprozess inklusive Vorbehandlung, PVD-Verchromung und Primerbeschichtung	✓	Die durchgängige Abfolge der Prozessstufen Plasmaaktivierung, Plasmabeschichtung und Plasmaprimer wurde innerhalb der Versuchsanlage erfolgreich erprobt.
→ Beschichtungsbreite: 5 cm (kleintechnischer Nachweis!)	✓	Die beschichteten Lackfilmproben hatten eine Breite von 10 cm.
→ Nachweis der Umsetzbarkeit eines kontinuierlichen R2R-Prozesses	✓	Es wurde eine Lackfolien-Mimik erarbeitet, welche eine kontinuierliche Beschichtung der durchlaufenden Bahn ermöglicht.
→ Beschichtungsgeschwindigkeit: 5 – 8 min/m (kleintechnischer Nachweis!)	✓	Die anvisierten Beschichtungsgeschwindigkeiten konnten realisiert werden, wobei die Bahngeschwindigkeit letztendlich auf die gewünschte Schichtdicke abgestimmt werden muss.
→ Energieeinsparung ggü. galvanischen Verchromungsprozess: >90%	✓	In der Versuchsanlage wurde der komplette Beschichtungsprozess

		<p>inklusive Aktivierung, Primerabscheidung und Lackfolienherstellung energetisch bilanziert:</p> <p>→ Cr, 1fach: ~32 Wh/dm²</p> <p>→ Cr + HDMSO, 3fach: ~187Wh/dm²</p> <p>Damit liegt der Energieaufwand zur Herstellung eines einfach verchromten Klarlackfilms ≥ 97 % unter dem für eine galvanische Beschichtung. Selbst bei den deutlich anspruchsvolleren 6-Schicht-Komplexen ergibt sich immer noch eine Energieeinsparung von ≥ 85 %</p>
<p>→ Grundsätzlicher Nachweis der Skalierbarkeit des Beschichtungsprozesses auf serienrelevante Foliendimensionen ($b \geq 300$ mm)</p>	<p>✓</p>	<p>Die Skalierbarkeit der erarbeiteten prozess- und Anlagentechnik ist gegeben und kann sehr gut über die Dimensionierung der Quelle und Elektroden sowie die Lackfilm-Mimik und Steuerung abgebildet werden.</p>

Die beschichteten Lackfilme wurden in ihren Eigenschaften durch ausgiebige Tests bewertet und konnten die maßgebenden Anforderungen ohne wesentliche Einschränkungen erfüllen. Daher steht einer Verwendung im Einsatzgebiet von dreidimensionalen Bauteilen mit kleinen Sichtflächen nichts im Wege.

Auf dieser Grundlage ergibt sich im Ergebnis der Arbeiten erstmalig ein umweltfreundliches, trockenes und emissionsfreies Verchromungsverfahren, welches in den entscheidenden Faktoren der optischen Eigenschaften, Kratzfestigkeit, Korrosions- und Alterungsbeständigkeit den Anforderungen entspricht und zukünftig eine ernstzunehmende Alternative gegenüber umweltkritischen galvanischen Beschichtungsprozessen darstellt.