

Hertfelder Lackierwerk GmbH
Fraunhofer Institut für Produktionstechnik und Automatisierung IPA

Automatisierte maskierungsfreie Zweifarbenlackierung für Spiegelgehäuse

Abschlussbericht über ein Entwicklungsprojekt,
gefördert unter dem Az: 31404 von der
Deutschen Bundesstiftung Umwelt

von

Wolfgang Niemeier, Dr. Oliver Tiedje & Walter Hertfelder

Stuttgart, November 2016

1 Projektkennblatt

Az: 31404 Fördersumme 84.400, 00 €

Antragstitel: Automatisierte maskierungsfreie Zweifarbenlackierung für Spiegelgehäuse

Laufzeit: 31.05.2015 (verlängert bis 31.10.2015), Projektbeginn: 01.01.2014

Bewilligungsempfänger: Hertfelder GmbH, Kirchenweinbergstr. 133, 71672 Marbach, Tel. 07144 / 8524-0, Fax: 07144 / 16788

Projektleitung: Herr Walter Hertfelder

Kooperationspartner:

Walther Spritz- und Lackiersysteme GmbH

Dipl.-Ing. Torsten Bröker (Leiter Konstruktion & Entwicklung)

Telefon: + 49 (0)202 787-2270; E-Mail: T.Broeker@walther-pilot.de

Fraunhofer-Institut für Produktionstechnik und Automatisierung IPA

Dr. Oliver Tiedje (Gruppenleiter Nassapplikations- und Simulationstechnik)

Telefon +49 711 970-1773; Email: oliver.tiedje@ipa.fraunhofer.de

Ziel und Anlass des Projekts

Der Wettbewerb auf dem Automobilmarkt erzeugt einen immer stärkeren Druck der Abgrenzung zu anderen Marken. Dabei spielt die Individualisierung vor allem durch Mehrfarbenlackierung eine immer größere Rolle. Vor allem aber wird die Aufgabenstellung an die Zulieferer weitergegeben, die Anbauteile in Kleinserie in Zweifarbigkeit produzieren sollen. Die Lackierung der Zweifarbigkeit wird derzeit durch Maskierung erzeugt, einem ökologisch und ökonomisch ineffizienten Prozess (vor allem bezüglich Anlagenzeit, Lackverbrauch und Energie).

In Projekt soll ein neuer Prozess entwickelt werden, bei dem vor allem die Prozessschritte Maskierung und zweimaliger Klarlackauftrag und -trocknung vermieden wird.

Darstellung der Arbeitsschritte und angewandten Methoden

Deshalb wird die Pilotanlage am Fraunhofer IPA genutzt, um die Anpassungen zur Spiegelbeschichtung durchzuführen. Die Lacke werden zunächst unverändert aus der Produktion übernommen, um die FreigabeprozEDUREN im Automobilbereich einfach zu halten. Die finale Prüfung findet bei Fa. Hertfelder statt.

Arbeitsschritte:

AP1: Darstellung und Bilanzierung des Ist-Zustands; Erstellung eines Anforderungsprofils

AP2: Grundlegende Versuche auf Originalteilen mit Originallacken; Grundlagenverständnis (z.B. mittels Hochgeschwindigkeitskamera) ; Bestimmung der Prozessstabilität

AP3: Genauigkeitsanforderungen an den Bewegungsablauf

AP4: Vortest der technologischen Eigenschaften des Lackaufbaus (visuelle Beurteilung der Genauigkeit der Linie, Appearance, Schichtdicke, Schichthomogenität, Farbton, Lackhaftung)

2 Inhaltsverzeichnis

Inhalt

1	Projektkennblatt	2
2	Inhaltsverzeichnis	4
3	Abbildungs- und Tabellenverzeichnis	6
4	Abkürzungsverzeichnis	8
5	Zusammenfassung	9
6	Einleitung	10
7	Projektdurchführung	14
7.1	Mikrodosierttechnik	14
7.1.1	Verfahren.....	14
7.1.2	Mikrodosiersysteme.....	16
7.2	Darstellung und Bilanzierung des Ist-Zustands; Erstellung eines Anforderungsprofils	17
7.3	Grundlegende Versuche auf Originalteilen mit Originallacken; Bestimmung der Prozessstabilität	18
7.3.1	Mikrodosiersystem 1.....	18
7.3.2	Magnetventil.....	22
7.3.3	Mikrodosiersystem 2 ab 2016.....	23
7.4	Einfluss Lackmaterial	26
7.5	Genauigkeitsanforderungen an den Bewegungsablauf	26
7.6	Vortest der technologischen Eigenschaften des Lackaufbaus	27
7.7	Erzeugung von Bildern	29
7.8	Erzeugung von Dekorlinien und –streifen auf dreidimensionalen Bauteilen	29
8	Umsetzungsszenario	30
9	Fazit	32
10	Literaturverzeichnis	33

3 Abbildungs- und Tabellenverzeichnis

Abbildung 1: Prozessablauf bei Mehrfarbenlackierung mit Maskierung (Ist-Zustand) – orange: Trocknungsprozesse, dunkelblau: Lackierprozesse, hellblau: manuelle Operationen..... 10

Abbildung 2: Prozessablauf bei maskierungsfreien Mehrfarbenlackierung (Projektziel) – orange: Trocknungsprozesse, dunkelblau: Lackierprozesse, hellblau: manuelle Operationen..... 11

Abbildung 3: Ökobilanzierung einer Standardkarosserielackierung (Quelle: Fa. LCS)..... 12

Abbildung 4: Demonstrator aus Green Carbody Projekt..... 14

Abbildung 5: Gezielte Tropfenerzeugung an einer Düse..... 15

Abbildung 6: Simulation des Lackfilmverlaufens bei der Tropfenapplikation..... 15

Abbildung 7: Array-Anordnung von Mikrodosierventilen zur Erhöhung der Flächenleistung..... 16

Abbildung 8: Detailansicht Mikrodosiersystem..... 17

Abbildung 9: Neues Mikrodosiersystem mit weiteren Stellparametern..... 17

Abbildung 10: Parameteroptimierung im dreidimensionalen Raum..... 19

Abbildung 11: Mikroskop-Aufnahmen zur Optimierung der Einzelpunkte..... 20

Abbildung 12: Untersuchung der Prozessstabilität durch Bestimmung der Konstanz der Ausbringmenge..... 20

Abbildung 13: Korrelation der Hochgeschwindigkeitsaufnahme zur Tropfengenerierung mit der Punktqualität..... 20

Abbildung 14: Analyse der Rückmeldesignale des Applikators bei verschiedenen Schließbewegungen..... 21

Abbildung 15: Linienapplikation auf Kunststoff..... 21

Abbildung 16: Linienapplikation auf Silbermetalllackierung..... 22

Abbildung 17: Flächenapplikation..... 22

Abbildung 18: Tropfenentstehung bei einem Magnetventil..... 23

Abbildung 13: Hochgeschwindigkeitsaufnahme zur Tropfengenerierung und Punkt- / Linienqualität..... 24

Abbildung 19: Linienapplikation zur Untersuchung der Applikationsstabilität..... 25

Abbildung 20: Beurteilung von Linienanfang und-ende..... 25

Abbildung 20: Flächenapplikation: Reproduzierbarkeit, Stabilität, Randschärfe..... 25

Abbildung 21: Auswertung der signifikanten Wechselwirkungen zur Tropfenentstehung..... 26

Abbildung 22: Auswirkung der Roboterbewegung auf die Gradlinigkeit..... 27

Abbildung 23: Aufnahme der scherabhängigen Rheologie der verwendeten Lacke..... 28

Abbildung 24: Verwendete Methodik zur Prüfung der Lackhaftung (Gitterschnitt)..... 28

Abbildung 25: Umwandlung Prozedur des Bildes: Vom Logo als pdf zu einer Berechnung der Ein- und Ausschaltzeit zur Simulation und schließlich der Applikation mit Lack..... 29

Abbildung 25: Aufbringen von Dekorlinien auf Spiegelschale..... 30

<i>Abbildung 25: Erkenntnisse über Anforderungsprofil an Roboter: Abweichungen im Bahnverlauf des Roboters</i>	30
<i>Abbildung 25: Offline Bahnerstellung</i>	31
<i>Abbildung 25: Simulation und Lackiervorgang</i>	31
<i>Abbildung 25: Demonstratorbauteile mit Dekorlinien</i>	31
<i>Abbildung 26: Möglicher Prozessablauf in der Umsetzung</i>	32
<i>Tabelle 1: Konkrete Einsparpotentiale bei der mehrfarbigen Spielbeschichtung</i>	13
<i>Tabelle 2: Parametersätze für die Applikatoreinstellungen</i>	19
<i>Tabelle 3: Parametersätze für die Applikatoreinstellungen</i>	24

4 Abkürzungsverzeichnis

µm	Mikrometer (10^{-6} m)
s	Sekunde
mm	Millimeter
cm	Zentimeter
DOI	Distinctness of image: Abbildungsschärfe, Kenngröße für den Lackoberfläche
SW	Shortwave: Maßzahl für die Kurzwelligkeit einer Lackoberfläche
LW	Longwave: Maßzahl für die Lanwelligkeit einer Lackoberfläche
KmU	Kleine und mittelständische Unternehmen
KWh	Kilowattstunden
WBL	Wasserbasislack
DoE	Design of Experiments: statistische Versuchsplanung
p	Druck: hier Materialdruck in der Düse
PZ	Pulszeit: Öffnungszeit der Materialdüse für die Erzeugung eines Tropfens
PH	Pulshöhe: Parameter für die Öffnungsbewegung der Materialnadel
kWh	Kilowattstunden: Bei Primärenergieberechnungen inkl. aller Energieeinsätze für die Herstellung des Lackmaterials, die Energie für die Stromgewinnung und -transport, ...

5 Zusammenfassung

In dem Projekt der Deutsche Bundesstiftung Umwelt DBU „Automatisierte mas-
kierungsfreie Zweifarbenlackierung für Spiegelgehäuse“ (Az: 31404) der Firma
Hertfelder Lackierwerk GmbH in Kooperation mit dem Fraunhofer Institut für Pro-
duktionstechnik und Automatisierung und der Firma WALTHER Spritz- und La-
ckiersysteme GmbH (WaltherPilot) sollte eine Lösung für den hohen Aufwand bei
der Mehrfarbenlackierung mit doppelten Lackierdurchläufen und Maskierarbeiten
gesucht werden. Dazu wurde am Fraunhofer IPA - Abteilung Beschichtungssys-
tem- und Lackiertechnik – Untersuchungen mittels der Mikrodosiertechnik durch-
geführt. Als Anwendungsbeispiel wurden Spiegelschalen der Fa. Hertfelder ver-
wendet und kommerzielle Lacksysteme.

Durch Optimierung mittels statistischer Versuchspläne und Hochgeschwindig-
keitskameras wurden die Applikationseigenschaften so optimiert, dass der Was-
serbasislack sich verarbeiten lässt. Die Mikrodosiertechnik erzeugt dann definier-
te Punkte, die sich zu Linien und Flächen zusammensetzen lassen. Es konnten
gute Verlaufseigenschaften in einem Komplettaufbau mit Klarlack erreicht wer-
den. Im Rahmen des Projekts wurde außerdem eine Software erzeugt, die in der
Lage ist Bilddateien in die Lackanwendung zu überführen. Da bestehende Lack-
systeme benutzt wurden, sind die Schichteigenschaften nicht beeinflusst.

Im Anschluss an das Projekt sollte die Prozessstabilität als Voraussetzung für die
industrielle Nutzung des Lackierkonzepts untersucht und optimiert werden. Wei-
terer Handlungsschwerpunkt ist eine angepasst Automatisierungslösung für ein-
zelne Anwendungen.

6 Einleitung

Der Wettbewerb auf dem Automobilmarkt erzeugt einen immer stärkeren Druck der Abgrenzung zu anderen Marken. Dabei spielt die Individualisierung vor allem durch Mehrfarbenlackierung eine immer größere Rolle, wie beispielsweise die Fahrzeuge Skoda Fabia, Audi A1, Mini Cooper, Opel Adam zeigen. Vor allem aber wird die Aufgabenstellung an die Zulieferer weitergegeben, die Anbauteile in Kleinserie in Zweifarbigkeit produzieren sollen. Die Lackierung der Zweifarbigkeit wird derzeit durch Maskierung erzeugt, einem ökologisch und ökonomisch ineffizienten Prozess:



Abbildung 1: Prozessablauf bei Mehrfarbenlackierung mit Maskierung (Ist-Zustand) – orange: Trocknungsprozesse, dunkelblau: Lackierprozesse, hellblau: manuelle Operationen

Bei diesem Prozess (Abbildung 1) fallen in einzelnen Prozessschritten folgende Verluste an:

- Maskier- und Hilfsmaterialien:

Die Vorbereitung des Kontrastlackauftrags erfordert einen nicht unerheblichen Bedarf an Material zum Abkleben und Maskieren der Bauteile. Ferner fallen Arbeitsschritte wie das Anschleifen und Reinigen der in Kontrastfarbe zu lackierenden Flächen an, die ebenfalls Verluste an entsprechenden Hilfsmaterialien verursachen.

- Anlagenszeit bei der Maskierung:

Die Arbeitsschritte Maskieren, Vorbereiten und Demaskieren mit anschließender Reinigung erfordern im gesamten Prozessablauf nennenswerte zeitliche als auch räumliche Kapazitäten.

- Lackverluste Kontrastlack:

Beim zweiten Lackauftrag ist eine Beschichtung der Maskiermaterialien nicht zu vermeiden. Dadurch fallen Verluste an Lackmaterial an und es besteht ein zusätzlicher Entsorgungsaufwand an verschmutzten Maskiermaterialien.

- Zweiter Auftrag Klarlack:

Der derzeitige Prozess zur zweifarbigem Lackierung erfordert einen zweiten Klarlackauftrag. Neben den dabei anfallenden Verlusten an Klarlack bedeutet

dies auch einen zusätzlichen erheblichen Energieaufwand, da die Anlagenbefeuchtung und -beheizung den größten Energieverbrauch im gesamten Lackierprozess darstellt.

Des Weiteren erfordern vor allem die Arbeitsschritte Maskieren, Vorbereiten und Demaskieren einen hohen manuellen Aufwand, so dass hier zusätzlich zu den ökologischen Problemen auch der Wettbewerb aus Niedriglohnländern zu berücksichtigen ist. Dazu kommt der hohe Kostendruck vor allem auf die KMU unter den Automobilzulieferern. Vor diesem Hintergrund steht auch Fa. Hertfelder vor der Herausforderung kostengünstig Zweifarb- und Dekorlackierungen von Spiegelgehäusen für verschiedene Automobilhersteller auszuführen, die den Qualitätsstandards der Automobilindustrie entsprechen.

Derzeit liegen Anfragen bezüglich 2-farbig lackierten Kfz-Außenspiegelgehäusen vor, die Auftragsbearbeitung bzw. die Umsetzung scheitert jedoch aus Kostengründen, da die Ausführung dieser Lackierungen aufgrund des derzeitigen Standes der verwendbaren Technik unwirtschaftlich ist.

Zielsetzung dieses Projekts ist daher die Entwicklung eines neuen deutlich effizienteren Prozesses:



Abbildung 2: Prozessablauf bei maskierungsfreier Mehrfarbenlackierung (Projektziel) – orange: Trocknungsprozesse, dunkelblau: Lackierprozesse, hellblau: manuelle Operationen

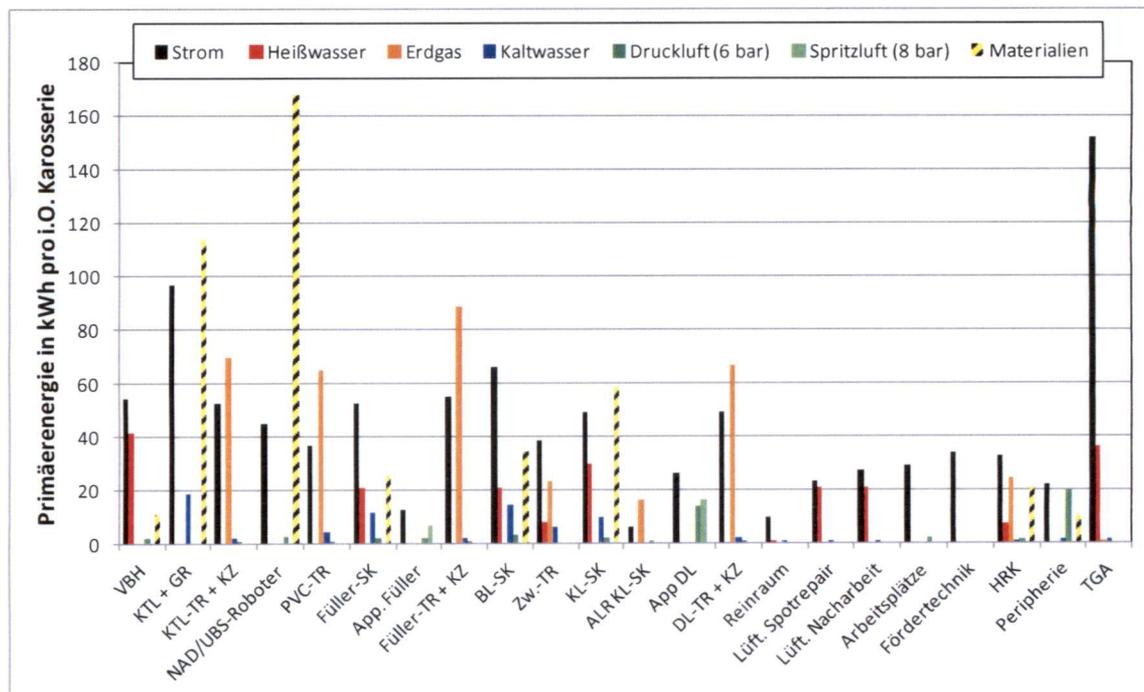
In diesem Prozess (Abbildung 2) werden vor allem die Prozessschritte Maskierung und zweimaliger Klarlackauftrag und -trocknung vermieden. Für eine typische Lackiererei ergibt sich damit aus Daten der Ökobilanzierung ein Potential der Einsparung von 20% des Primärenergiebedarfs der gesamten Oberflächenbehandlung (Abschätzung aufgrund der Ergebnisse einer Ökobilanzierung der Fa. LCS im Rahmen des Green Carbody-Projekts).

Der Auftrag der Kontrastlackierung soll dabei „selektiv“ erfolgen. Das bedeutet, dass der Lackauftrag über ein Verfahren erfolgen soll, welches eine randscharfe Lackierung ohne Lackverluste ermöglicht. Auf diese Weise kann auch materialseitig der Umfang an umweltbelastenden Abfällen reduziert werden.

Im Einzelnen werden folgenden Ressourcen eingespart:

- Einsparung an Maskier- und Hilfsmaterialien: Aufgrund des randscharfen und oversprayfreien Auftrags des Kontrastlacks entfällt die Maskierung der Bauteile.

- Fehlerreduktion durch das Vermeiden des Schleif- und des Maskierprozesses und des damit verbundenen Reparaturaufwands bzw. Ausschusses
- Energieeinsparungen bei der Hallenbelüftung und Beleuchtung für das Vorbereiten der Kontrastlackierung, sowie für das Maskieren und Demaskieren
- Lackeinsparung an Kontrastlack durch Anwendung eines oversprayfreien Verfahrens
- Einsparung von Klarlack durch Vermeidung eines Zweitauftrags
- Energieeinsparung durch Entfallen eines zweiten Klarlackauftrags. Dies betrifft Einsparungen für die Kabinenbelüftung und -befeuchtung sowie die den Entfall eines zweiten Trocknungsvorgangs.



VBH = Vorbehandlung, KTL = Kathodischer Tauchlack, GR = Gleichrichter, TR = Trockner, KZ = Kühlzone, UBS = Unterbodenschutz, NAD = Nahtabdichtung, SK = Spritzkabine, App. = Applikation, BL = Basislack, Zw.-TR = Zwischentrockner, KL = Klarlack, DL = Decklack, Lüft. = Lüftung, HRK = Hohlraumkonservierung, TGA = Technische Gebäudeausrüstung

Abbildung 3: Ökobilanzierung einer Standardkarosserielackierung (Quelle: Fa. LCS)

Die Abschätzung der Einsparpotentiale aufgrund der Zahlenwerte der Fa. LCS ergeben ca. 35% des Energieeinsatzes zur Beschichtung.

Konkret ist davon auszugehen, dass zunächst 10.000 Fahrzeuge mit zweifarbigem Spiegeldesign angefragt werden, da heißt, 20.000 Spiegelschalen, das entspricht ca. 3 % der Jahresproduktion. Pro Spiegel wird 30g Basislack und 30g

Klarlack (Nassmaterial) verbraucht. Auf dieser Grundlage sind die Einsparpotentiale für ein Fahrzeugprojekt dargestellt. Die Einsparung einer Schicht Klarlack spart einen Lackiertakt in der Kabine und im Trockner.

Tabelle 1: Konkrete Einsparpotentiale bei der mehrfarbigen Spielbeschichtung¹

Material	Einsparung pro Teil	Einsparung pro Jahr	Primärenergie-Reduktion pro Jahr
Basislack (Nass)	10 g	200 kg	3 MWh
Klarlack (Nass)	30 g	600 kg	16 MWh
Ablebeband	0,2 m	4.000 m	
Maskierpapier	0,04 m ²	800 m ²	4 MWh
Heizöl (Spritzkabine/ Klarlackofen)	0,15 l	3100 l	150 MWh

Bei dem aktuellen Trend zur Mehrfarbigkeit wird sich dies noch deutlich steigern, so ist davon auszugehen, dass alle Marken ein bis zwei Modelle mit Mehrfarbigkeit anbieten werden, d.h. obige Abschätzung wird entsprechend vervielfacht (Faktor 10-20). Übertragung auf anderen Teile (Zierleisten, Griffe, ...) wird folgen und die Übertragung auf anderen Branchen (Nutzfahrzeuge, Konsumgeräte) kann nach der erfolgreichen Umsetzung in Angriff genommen werden.

¹ Prämissen der Kalkulation: 30 g Basislack pro Teil, 30 g Klarlack pro Teil, 100.000 l Gesamtverbrauch Heizöl in der Lackierung, 4kWh/kWh Primärenergiebedarf Heizöl, 10 kWh/kWh Primärenergiebedarf Strom, 2,5kWh elektrische Energie pro kg Papier: Quellen: Hertfelder, Fa. LCS, Wikipedia

7 Projektdurchführung

7.1 Mikrodosiertechnik

7.1.1 Verfahren

Die Technologie für das Projekt fußt auf den BMBF-Projekt Green Carbody (InnoCaT 5). In diesem Ende 2012 abgeschlossenen Projekt wurden die Grundlagen der oversprayfreien Beschichtung erarbeitet.

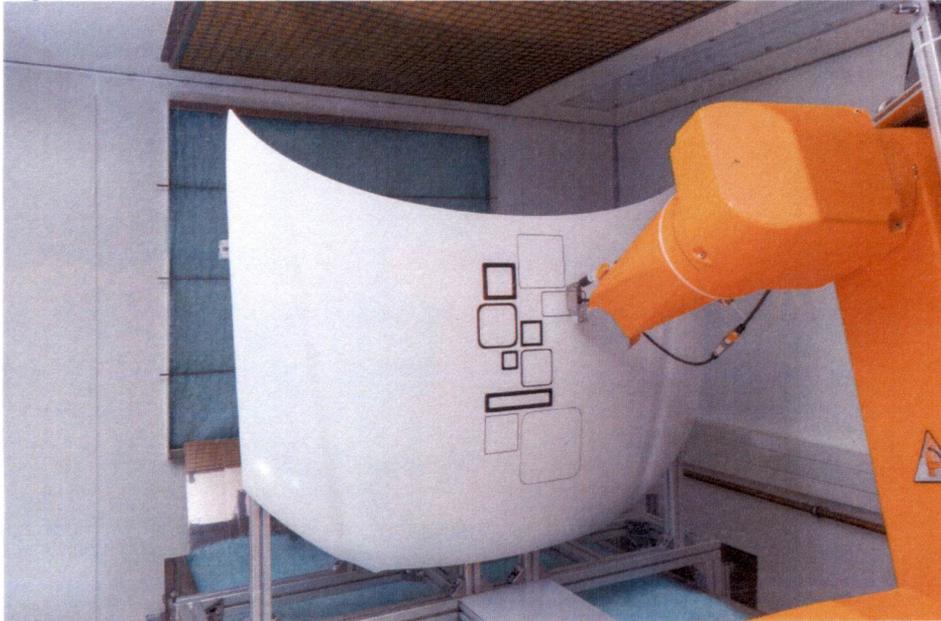


Abbildung 4: Demonstrator aus Green Carbody Projekt

Verwendet wurde dazu ein Applikationssystem dessen Lackdosierung in Form kleinster Tröpfchen über Piezoelemente erfolgt und das ursprünglich für den Auftrag von hochviskosen Medien ausgelegt war.

Es wurde demonstriert, dass ein randscharfer und oversprayfreier Auftrag von einkomponentigen Basislacken (ohne Effektpigmente) möglich ist (Abbildung 5). Dabei konnten aktuell eingesetzte Serienlacke verwendet werden, ohne dass Modifikationen notwendig waren. Das erleichtert die Freigabeprozedur und erlaubt auch kleineren Lackabnehmern, sich an größeren Lackchargen zu beteiligen. Bei geringen Lackmengen wäre eine eigene Lackentwicklung und -produktion nicht wirtschaftlich.

Die Grenzen des Verfahrens sind derzeit in der Beschränkung auf einkomponentige Uni-Basislacke zu sehen. Ein Lackauftrag von Lacken mit Effektpigmenten ist nach dem aktuellen Stand der Entwicklung nicht möglich und im Rahmen des angedachten Projektes nicht ausführbar.

Durch eine sehr kurze Öffnungszeit (Größenordnung 1ms) einer Düse wird ein definierter Lacktropfen (Abbildung 6) erzeugt. Durch die unterschiedlichen Lackgeschwindigkeiten im Öffnungsmoment und Schließmoment kann ein stabiler Tropfen erzeugt werden, wie Aufnahmen mit der Hochgeschwindigkeitskamera zeigten. Bei dem Material spielt vor allem die Rheologie und Oberflächenspannung eine Rolle, wobei die Applikation erlaubt, die Viskosität durch Temperatur-

variation zu beeinflussen. So ist es möglich Lacksysteme direkt aus den bisherigen Anlagen (z.B. für Hochrotationszerstäubung eingestellte Materialien) zu verwenden. Über die Nadelöffnung lässt sich außerdem die Tropfengröße einstellen. Die erzeugten Tropfen können je nach Eigenschaften bis zu einigen Zentimetern frei fliegen und so auch zur Beschichtung komplexerer Objekte genutzt werden.

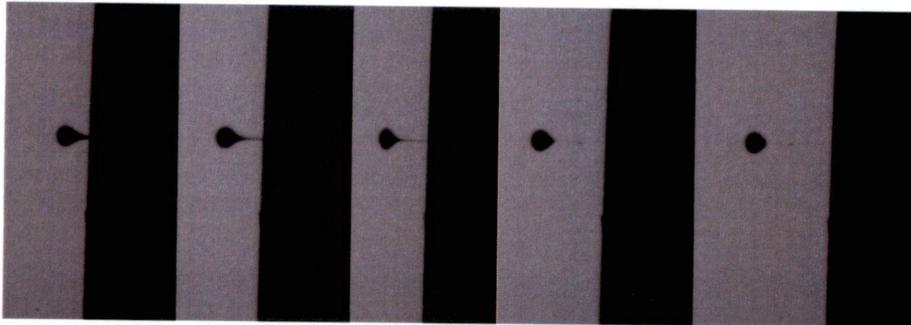


Abbildung 5: Gezielte Tropfenerzeugung an einer Düse

Eine weitere Herausforderung des Projekts war die Erzeugung einer Lackoberfläche mit geringer Struktur und die Frage, ob verstärktes orange-peel auftritt. Um dies zu untersuchen, wurden zunächst numerische Simulationen durchgeführt, basierend auf einem Modell, das zur Optimierung des Lackfilmverlaufs entwickelt wurde (MO 09/2012). Damit konnte gezeigt werden, dass eine gezielte Anordnung von Tröpfchen weniger zu orange-peel neigt, da die auftretenden Wellenlängen kontrolliert werden können (Abbildung 7).

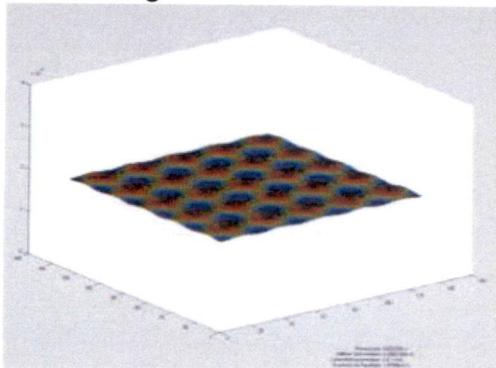


Abbildung 6: Simulation des Lackfilmverlaufs bei der Tropfenapplikation

Eine der verbleibenden Herausforderungen ist die Erzeugung präziser Bewegungsabläufe, die derzeit durch Lackierroboter nicht für alle Anwendungen gegeben ist. Ein weiteres Forschungsthema wird es sein, eine optisch einwandfreie, gleichmäßige Metallic-Effektlackierung zu erzeugen, da derzeit sich die Metallicflakes nicht gleichmäßig gut ausrichten.

Da die Flächenleistung dieser Methode noch recht gering war, wurden auch Versuche zu einer Array-Anordnung mehrerer Düsen durchgeführt, die sehr gute Ergebnisse lieferten. Eine weitere Methode zur drastischen Erhöhung der Flächenleistung besteht in der kontinuierlichen Dosierung, dabei wird gezielt in einem Strahl der Lack auf das Objekt appliziert. In der Kombination von Array-Anordnung (Abbildung 7) und kontinuierlicher Dosierung lassen sich automobilübliche Taktzeiten realisieren.

Das Verfahren wurde mit dem Hans-Jürgen Warnecke Preis 2013 (1. Preis am 18. Oktober 2013) ausgezeichnet.

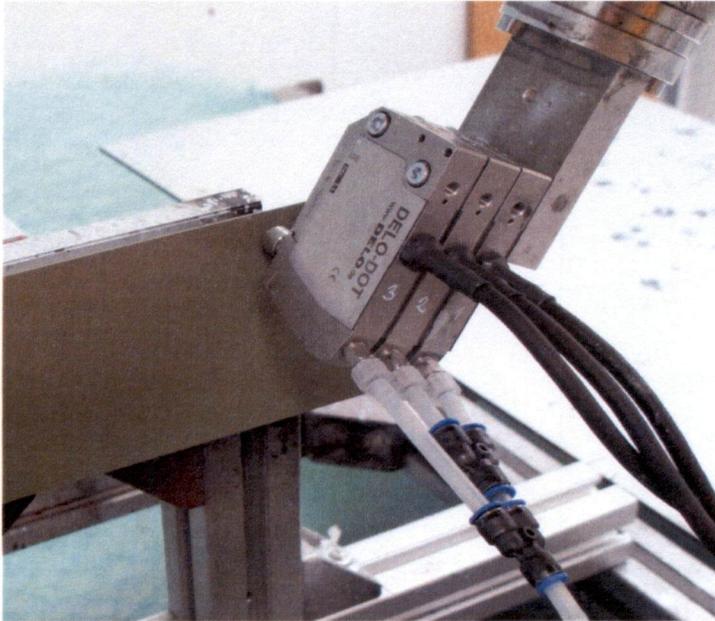


Abbildung 7: Array-Anordnung von Mikrodosierventilen zur Erhöhung der Flächenleistung

7.1.2 Mikrodosiersysteme

Für Versuchsreihen und die Erstellung der ersten Demonstratorbauteile wurde zunächst das aus dem BMBF-Projekt Green Carbody (InnoCaT 5) vorliegende Mikrodosiersystem verwendet. Mit diesem System konnte gezeigt werden, dass die Erzeugung sauberer Linien und Flächen, sowie dekorativer Elemente auf dreidimensionalen Oberflächen prinzipiell möglich ist. Jedoch reagierte das System sehr empfindlich auf Abweichungen in den Parametereinstellungen was darauf zurückzuführen war, dass die Öffnungsbewegung der Nadel nicht immer gleich ablief. Aus diesem Grund musste der Öffnungsvorgang über Rückmeldesignale des Applikators genau überwacht und bei Bedarf manuell korrigiert werden. Bei diesem System war so keine ausreichende Reproduzierbarkeit im Dosierverhalten gegeben. Des Weiteren zeigte sich, dass die Düsen des Dosiersystems bei nicht optimalen Parametern schnell zu Verschmutzung neigen.

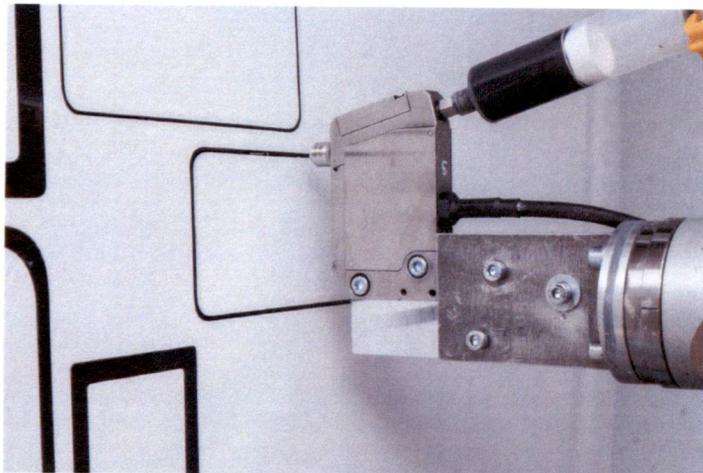


Abbildung 8: Detailansicht Mikrodosiersystem

Aus diesem Grund wurden auf Basis der ersten Ergebnisse weitere Tests mit einem anderen Dosiersystem durchgeführt, welches auf demselben Funktionsprinzip basiert. Durch einen präziser steuernden Controller und die Möglichkeit auch die Flanken beim Öffnungs- und Schließvorgang der Nadel zu beeinflussen, konnte die Tropfengenerierung soweit optimiert werden, dass bei gegebener Parametereinstellung auch reproduzierbare Ergebnisse erreicht werden konnten. Durch eine größere Auswahl an Düsen und die Möglichkeit verschiedene Dosiernadeln zu verwenden ist zudem eine bessere Parameterabstimmung auf das verwendete Lackmaterial möglich. Anders gestaltete Düsenaustrittsgeometrien verringern zudem Verschmutzungen.

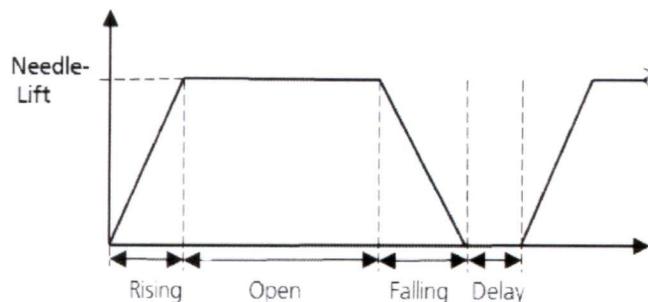
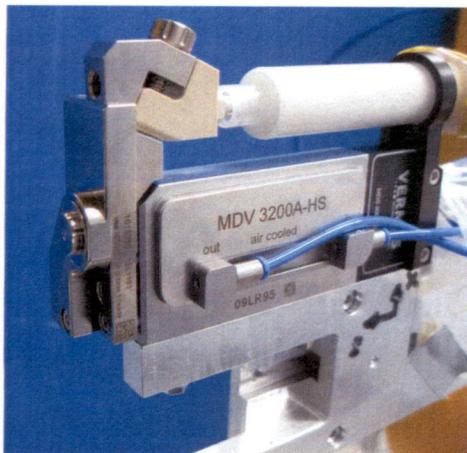


Abbildung 9: Neues Mikrodosiersystem mit weiteren Stellparametern

7.2 Darstellung und Bilanzierung des Ist-Zustands; Erstellung eines Anforderungsprofils

Zunächst wird der Ist-Zustand der Zweifarblackierung aufgenommen. Dies umfasst die einzelnen Arbeitsschritte sowie Material- und Energiebilanzen. Basierend hierauf wird ein Anforderungsprofil für den effizienteren Prozess erstellt.

- Streifen und andere einfache Dekorationen
- Wenn möglich auch Logos / Bilder
- Inline:
 - Aktueller Prozessablauf bei Fa. Hertfelder:
 - Plasma – Primer – Basislack 1 – Basislack 2 – Entfeuchtungstrockner – Klarlack – Ofen
- Oder Offline: Ausschleusen nach Entfeuchtungstrockner
- Gradlinige Kanten (<0,1 mm)
- Alle sonstige Eigenschaften einer Beschichtung sollen erhalten bleiben

7.3 Grundlegende Versuche auf Originalteilen mit Originallacken; Bestimmung der Prozessstabilität

Im Technikum des Fraunhofer IPA wurden grundlegende Versuche auf Originalbauteilen mit den entsprechenden Lacken durchgeführt. Dabei wurden die Applikationsparameter und die Reproduzierbarkeit ermittelt und bewertet. An Hand der Ergebnisse wurden Anforderungen an die Umsetzung im Rahmen von Automatisierungslösungen aufgestellt werden. Bei diesen Aufgaben wurden auch die Analysemethoden des Fraunhofer IPA (z. B. Hochgeschwindigkeitskamera) eingesetzt werden, um die Grundlagen so weit zu verstehen, dass die Parameter einfach bestimmt werden können. Die Zusammenhänge zwischen der Rheologie bzw. Oberflächenspannung der Lacke und dem erzielten Ergebnis wurden bestimmt, um so Lackmaterialien in entsprechende Klassen einteilen zu können, deren Verarbeitung ähnlich ausfällt.

Zunächst wurden im Projekt die Einflüsse gelöst, die aus der Robotersteuerung kommen. Die Beschleunigungs- und Abbremsvorgänge sind zentral bei der Programmierung zu berücksichtigen.

7.3.1 Mikrosdosiersystem 1

In dem hochdimensionalen Raum der Parameteroptimierung der Applikationseinstellungen (am wichtigsten sind dabei Pulsdauer, Pulshöhe, Druck) werden die optimalen Parameter für die Applikation bestimmt. Die Pulsdauer, d. h. die Zeit, die die Düse für die Erzeugung eines Tropfens geöffnet ist, bestimmt wesentlich die Materialausbringmenge. Die Pulshöhe, d. h. wie weit die Nadel geöffnet wird, bestimmt hauptsächlich die Qualität des Tropfens. Der Materialdruck ist der dritte Parameter, der genutzt werden kann, um die Applikation einzustellen. Allerdings wechselwirken alle Parameter sehr stark miteinander, und hängen darüber hinaus mit dem Lackierabstand, der Robotergeschwindigkeit und der Ansteuerung der Nadel zusammen.

Weiterer Bedarf bestand in der Stabilität des Applikators. Es muss genau beachtet werden, dass die Öffnungsbewegung immer genau gleich abläuft, dazu wurde der Öffnungsvorgang über Rückmeldesignale des Applikators genau überwacht.

Nach der Klärung dieser Voraussetzungen wurden die Parametereinstellungen dem wasserbasierten einkomponentigen Lacksystem (Uni Rot) angepasst.

Tabelle 2: Parametersätze für die Applikatoreinstellungen

Punkte		
p	PZ	PH
Gut für Weiterverfolgung		
0,5	1	60
0,6	1	60
1	1	50
1,4	1	50
1,4	1	40
1	2	40
2nd best		
1,4	2	50
1,4	0,6	50

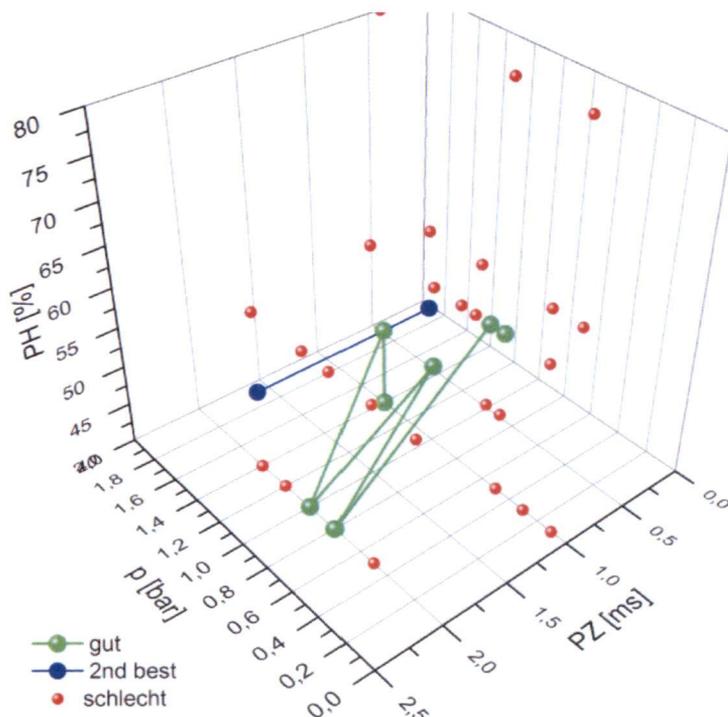


Abbildung 10: Parameteroptimierung im dreidimensionalen Raum

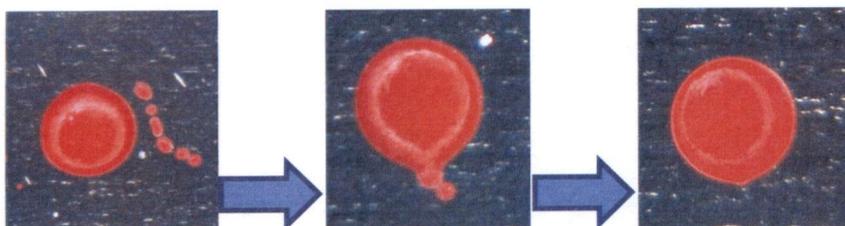


Abbildung 11: Mikroskop-Aufnahmen zur Optimierung der Einzelpunkte

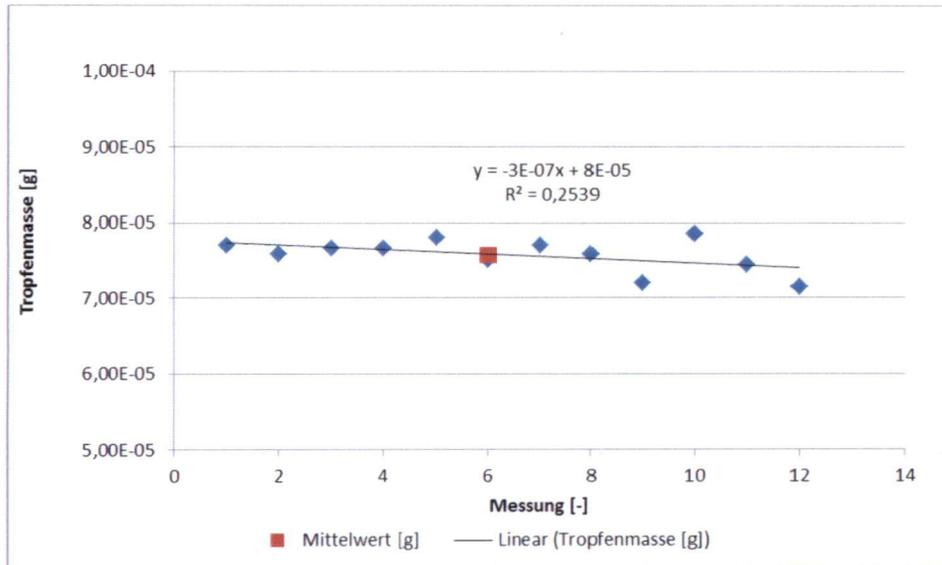


Abbildung 12: Untersuchung der Prozessstabilität durch Bestimmung der Konstanz der Ausbringungsmenge

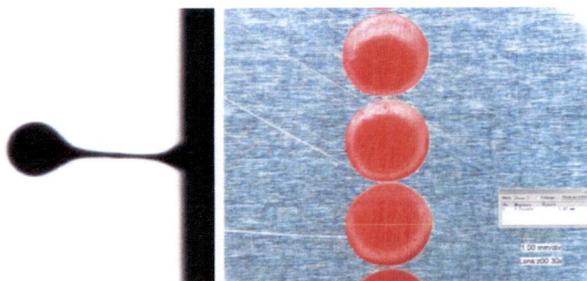


Abbildung 13: Korrelation der Hochgeschwindigkeitsaufnahme zur Tropfengenerierung mit der Punktqualität

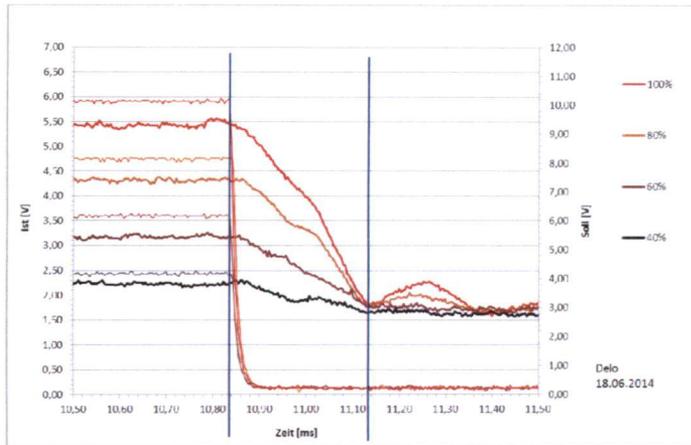


Abbildung 14: Analyse der Rückmeldesignale des Applikators bei verschiedenen Schließbewegungen

Mit den gewonnenen Einstellungen konnten dann Linien erzeugt werden, zunächst auf Kunststoffsubstraten, dann auf lackierten Kunststoffsubstraten, die zwischentrocknet (bei Raumtemperatur) waren.

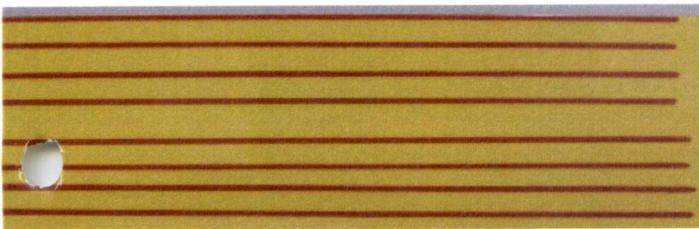


Abbildung 15: Linienapplikation auf Kunststoff

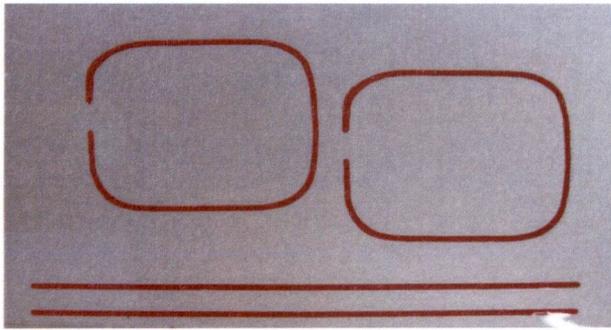


Abbildung 16: Linienapplikation auf Silbermetalllackierung

Die Linienapplikation kann dann auch auf Flächen erweitert werden.

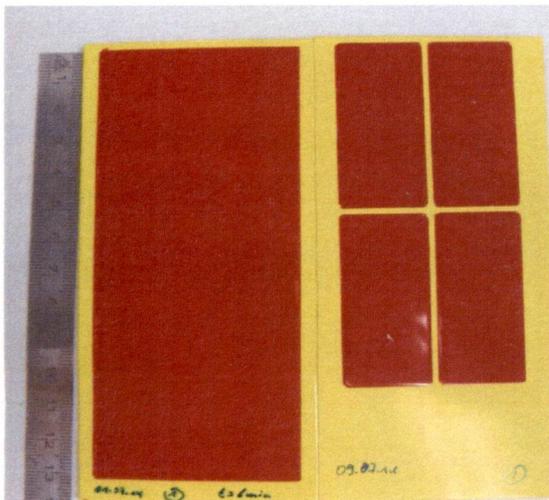


Abbildung 17: Flächenapplikation

7.3.2 Magnetventil

Zur Untersuchung der Übertragbarkeit der Ergebnisse wurde auch Versuche mit einem magnetgeschalteten Dosierventil gemeinsam mit der Firma Walther Pilot durchgeführt. Auch hier ließ sich der Lack gut verarbeiten.

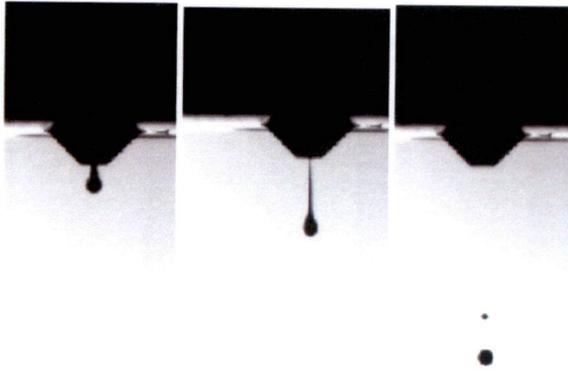


Abbildung 18: Tropfenentstehung bei einem Magnetventil

7.3.3 Mikrodosiersystem 2 ab 2016

Im neuen, ab 2016 verwendeten Mikrodosiersystem wird der Applikator nach Montage der Düse über einen sogenannten „Adjust“ eingestellt, so dass die Düsenöffnung sicher reproduzierbar ist. Eine ständige Überwachung und manuelle Korrektur des Hubs ist damit nicht mehr notwendig. Die Prozessstabilität konnte damit deutlich gesteigert werden. Bei diesem System können zusätzlich die Flanken beim Öffnungs- und Schließvorgang eingestellt werden, so dass hier gezielter auf die Tropfenentstehung beim ersten Materialaustritt und den Tropfenabriss beim Schließen Einfluss genommen werden kann. Durch diese zusätzlichen Stellgrößen konnte die Tropfenstabilität erheblich verbessert werden (weniger Satellitenbildung) und die Verschmutzungsneigung der Düse verringert werden.

Auch hier wurden zunächst die Parametereinstellungen dem wasserbasierten einkomponentigen Lacksystem (Uni Rot) angepasst. Anschließend wurden Versuche zur Stabilität des Systems durch wiederholendes Aufbringen von Linien und Flächen durchgeführt. Hier zeigte sich, dass reproduzierbare Ergebnisse ohne nennenswerte Verschmutzung der Düse erzielt werden können. Als weitere Erkenntnis konnte gezeigt werden, dass nach Anlagenstillstand zwingend ein kurzes Andrücken mit Materialaustritt erfolgen muss, um wiederholbar einen sauberen Linienanfang zu erhalten. Letzteres kann auf das thixotrope Verhalten des Lackes zurückgeführt werden.

Tabelle 3: Parametersätze für die Applikatoreinstellungen

Düse: 200 µm	
Parameter Linien und Flächen	
Rising	0,2 ms
Falling	0,4 ms
Open Time	1 ms
Needle Lift	35 %
Delay	5 ms
Druck	1,5 bar
Applikationsgeschwindigkeit	130 mm/s
Applikationsabstand	2 bis 5 mm
Bahnabstand bei Mehrfachlinien	0,9 mm
Anspülen nach Stillstand	2 bis 5 s

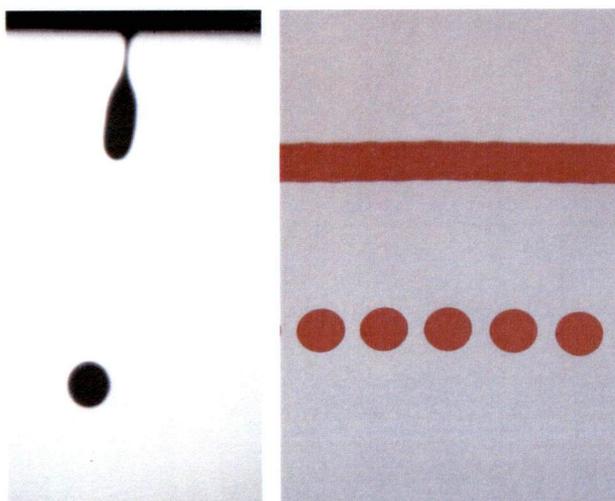


Abbildung 19: Hochgeschwindigkeitsaufnahme zur Tropfengenerierung und Punkt- / Linienqualität

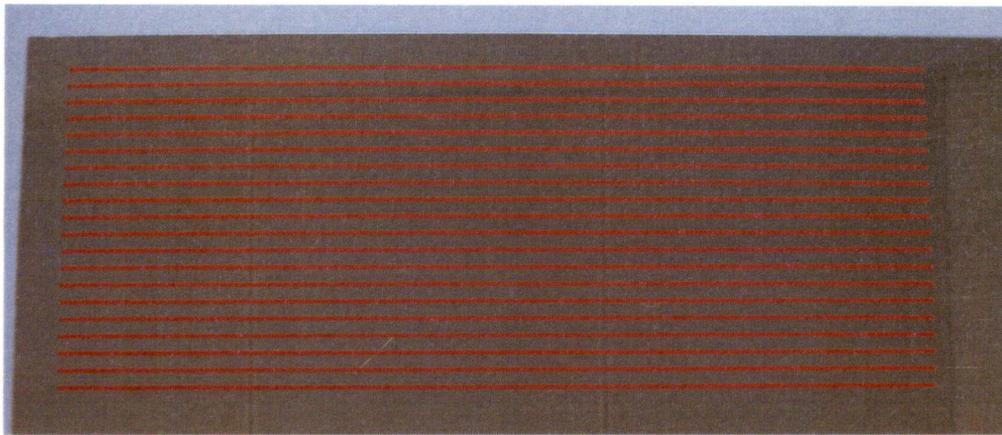
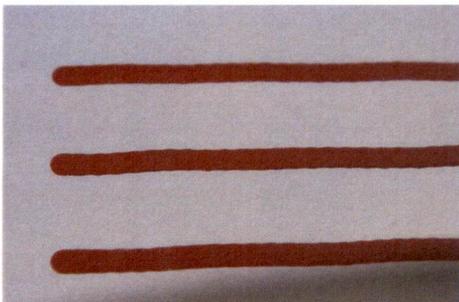
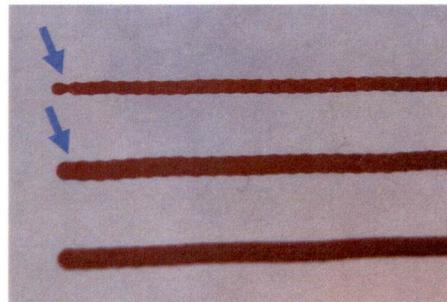


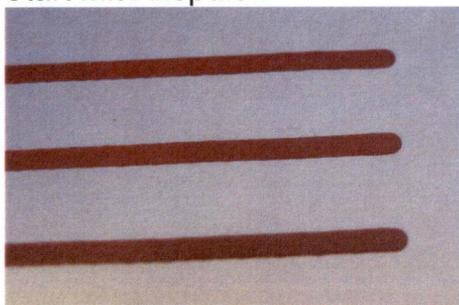
Abbildung 20: Linienapplikation zur Untersuchung der Applikationsstabilität



Start mit Anspülen



Start ohne Anspülen



Linienende

Kriterien:

- Start
- Ende
- Randschärfe
- Reproduzierbarkeit
- Overspray

Abbildung 21: Beurteilung von Linienanfang und-ende

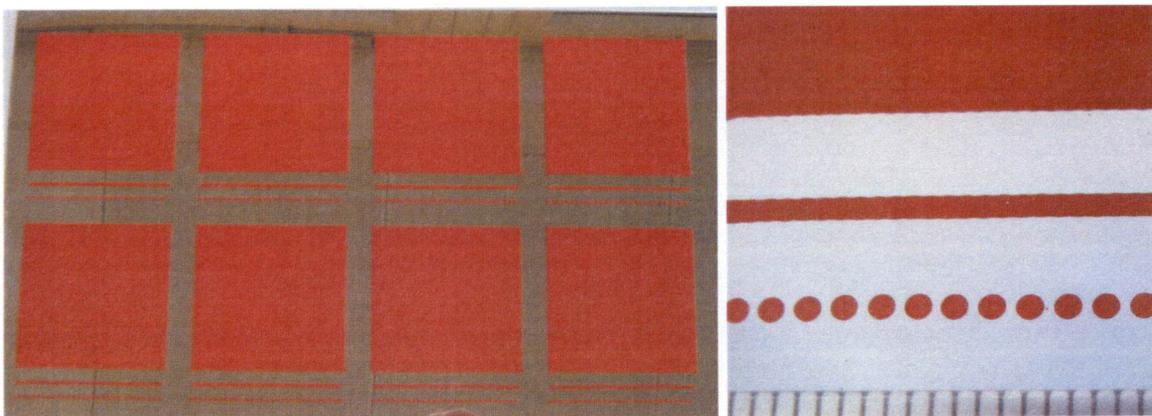


Abbildung 22: Flächenapplikation: Reproduzierbarkeit, Stabilität, Randschärfe

7.4 Einfluss Lackmaterial

Um systematisch die Einflüsse des Materials und der Applikationsparameter zu untersuchen, wurde ein vollfaktorieller Versuchsplan der Materialparameter Oberflächenspannung und Viskosität (bei 1000 / s) auf der einen Seite und Materialdruck, Nadelöffnung und Öffnungszeit als Applikationsparameter auf der anderen Seite durchgeführt. Dazu wurden Modelllacke mit einer bekannten Rezeptur und veränderten Oberflächenspannungs- und Rheologieadditiv hergestellt und vermessen. Diese wurden dann gemäß eines statistischen Versuchsplans appliziert und nach einem Bewertungsschema begutachtet.

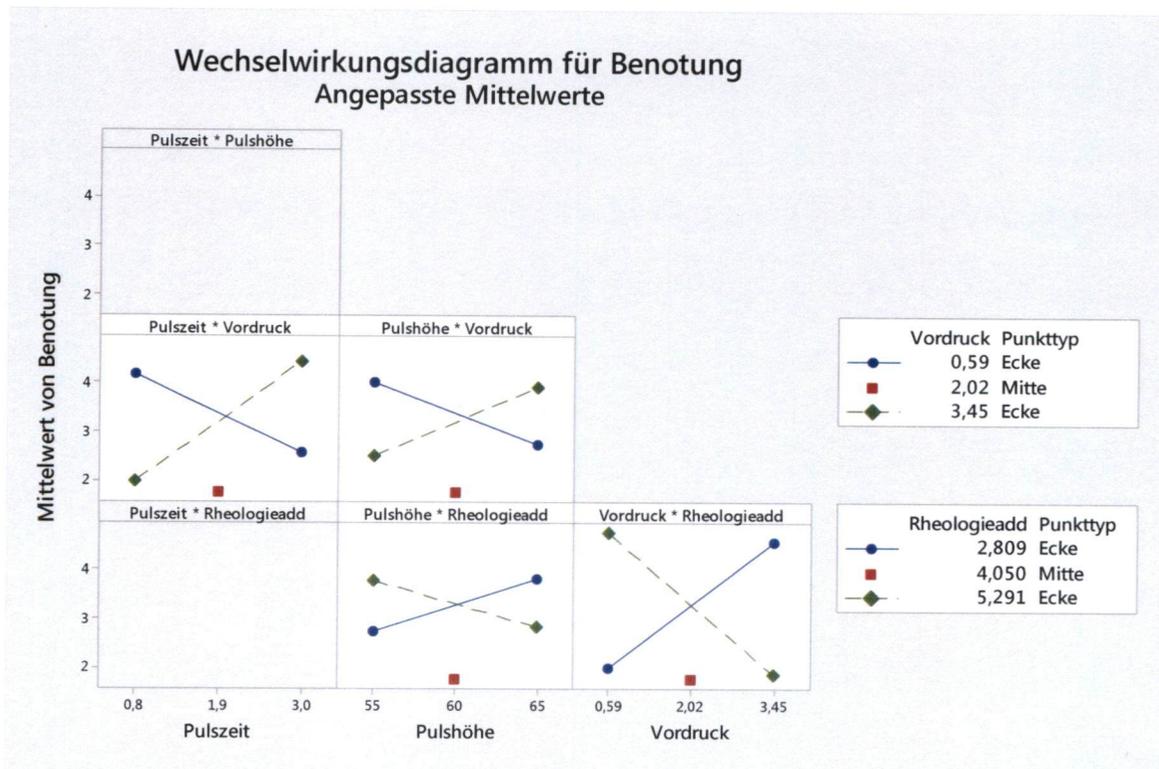


Abbildung 23: Auswertung der signifikanten Wechselwirkungen zur Tropfenentstehung

7.5 Genauigkeitsanforderungen an den Bewegungsablauf

Aus der Anforderung einer randscharfen Trennung von Grund- und Kontrastfarbe ergeben sich hohe Anforderungen an die Genauigkeit der Bahnführung eines Roboters sowie an die Ein- und Ausschaltvorgänge beim Lackieren. In diesem Arbeitsschritt wurde bewertet, inwiefern zur Verfügung stehende Automatisierungssysteme (bevorzugt Industrieroboter) geeignet sind, um einen Lackauftrag in der im Anforderungsprofil festgelegten Qualität zu erhalten. Auch müssen die im Labor ermittelten Prozessparameter auf das Automatisierungssystem übertragen und gegebenenfalls weiter angepasst werden. Vor allem an den Grenzen des Arbeitsbereichs des Roboters kann die Genauigkeit zu gering sein. Auch die

Präzision der Einschaltpunkte stellt eine Herausforderung dar, sinnvoll ist eine Zykluszeit in der Robotersteuerung von ca. 2 ms.

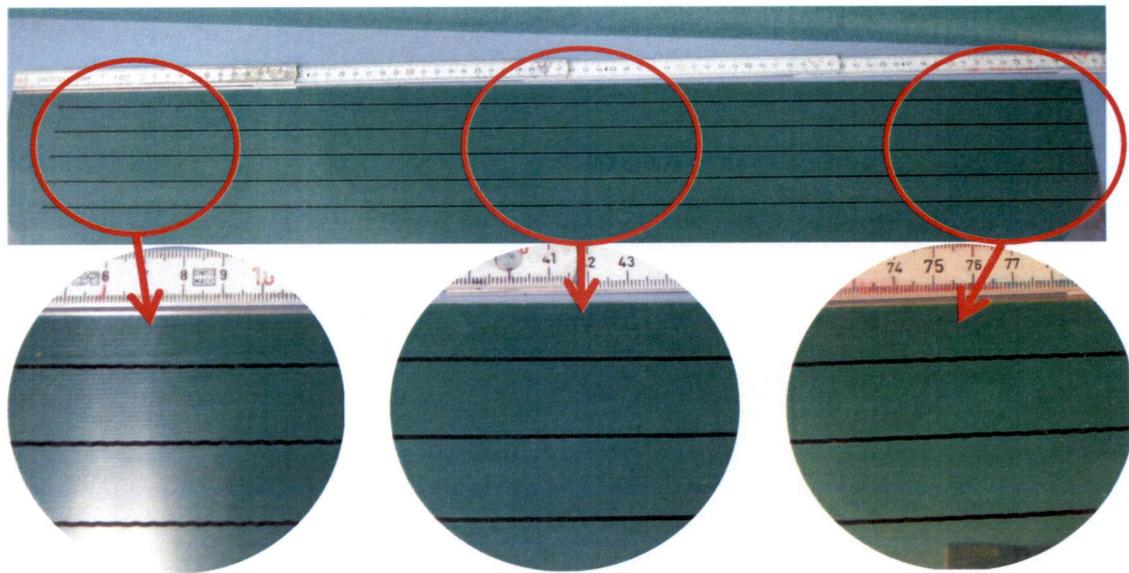


Abbildung 24: Auswirkung der Roboterbewegung auf die Gradlinigkeit

7.6 Vortest der technologischen Eigenschaften des Lackaufbaus

In dem Projekt werden die kritischen Eigenschaften der Lackschicht getestet: Dies umfasst die visuelle Beurteilung der Genauigkeit der Linie und die generelle Appearance, die messtechnische Erfassung der Schichtdicke und Schichthomogenität, den Farbton und Lackfilmverlauf sowie die Lackhaftung mittels Gitterschnittprüfung für den Wechselwirkung der beiden Basislackschichten miteinander. Die Lackhaftung stellt deshalb trotz der Verwendung bereits eingesetzter Lacksysteme eine Herausforderung dar, da hier auf den gehärteten Basislackfilm beschichtet wird. Dieser Prozess kommt derzeit selten vor, deshalb müssen die bestehenden Lacke diesbezüglich getestet werden. Als Rückfalllösung kann auch eine zusätzliche Plasma-Aktivierung die Lackhaftung Basislack auf Basislack erhöhen.

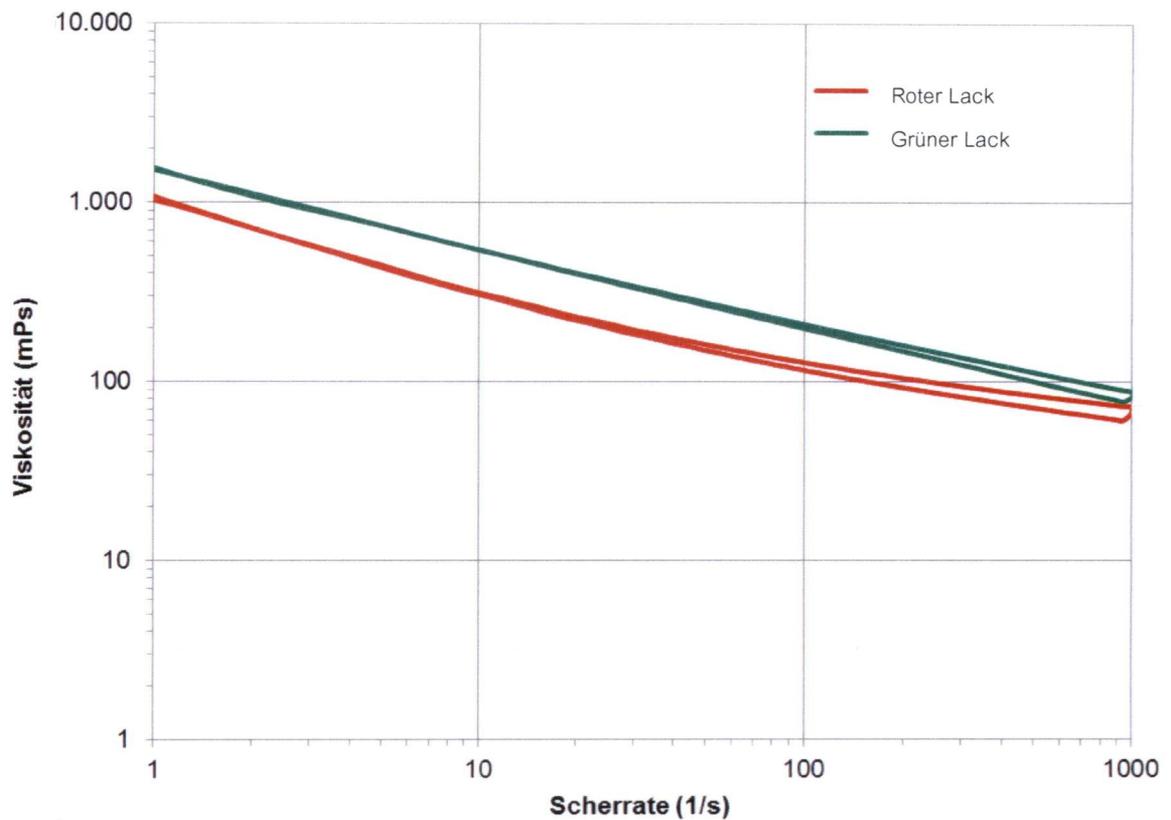


Abbildung 25: Aufnahme der scherabhängigen Rheologie der verwendeten Lacke



Abbildung 26: Verwendete Methodik zur Prüfung der Lackhaftung (Gitterschnitt)

Die Haftung – vor allem von Basislack auf Basislack – war sehr gut, und hat den Gitterschnittwert 0 erreicht – noch nicht getestet wurde die Haftung nach Temperaturwechseltest, was dann anwendungsspezifisch noch zu erfolgen hat. Dabei waren die Schichtdicken im Basislack 33 μm und im Klarlack 45 μm (manuell pneumatisch appliziert). Die Messungen zum Lackfilmverlauf mit dem wavescan ergaben im Durchschnitt einen Longwave von 2,9; einen Shortwave von 5,8 und einen DOI von 95,9 bei waagerechter Lackierung. Damit wurde gezeigt, dass die Einzeltropfen sehr gut verlaufen, wenn die Prozessbedingungen stimmen, vor allem Trägt die Wechselwirkung mit dem Klarlack zu dem Einebnung bei.

7.7 Erzeugung von Bildern

Als Demonstrator sollte ein Bild – das Logo der Firma Hertfelder auf eine Spiegelschale lackiert werden. Dazu wurde ein spezielles Matlab-Programm zur Transformation von Bildformaten in Roboterprogramme genutzt, das auch eine Simulation des Ergebnisses erlaubt.



Abbildung 27: Umwandlung Prozedur des Bildes: Vom Logo als pdf zu einer Berechnung der Ein- und Ausschaltzeit zur Simulation und schließlich der Applikation mit Lack.

Hier konnte gezeigt werden, dass die Vorgehensweise funktioniert. Prinzip bedingt ist die Auflösung natürlich auf ca. 0,4 mm pro Punkt (entspricht ca. 60 dpi) begrenzt. Dazu kommen ggf. Ungenauigkeiten des Roboters, z. B. hat die verwendete Steuerung 4 ms Zykluszeit, was bei 100 mm/s Robotergeschwindigkeit weitere 0,4 mm ausmacht. Damit erreicht diese Art der Bilderstellung keine automatische Qualität. An dieser Stelle laufen derzeit am Fraunhofer IPA Optimierungsalgorithmen, um sauberere Kanten zu erzeugen.

7.8 Erzeugung von Dekorlinien und –streifen auf dreidimensionalen Bauteilen

Als weitere Demonstratorbauteile wurden Dekorlinien auf eine Spiegelschale lackiert. Hier sollte gezeigt werden, dass Dekorstreifen und Kantenbetonungen prinzipiell Randscharf auf dreidimensionalen Bauteilen aufgebracht werden können.

Bei diesen Tests konnten deutlich Schwachpunkte im Bahnverhalten des Roboters beobachtet werden. Starke Umorientierungen beim Bahnfahren führten zu deutlichen Abweichungen bei der Linienführung, so dass die Dekorlinien teilweise von der vorgesehenen Geradlinigkeit abwichen. Hieraus konnten wichtige Erkenntnisse über die Anforderungen an die für solche Aufgabenstellungen vorgesehenen Roboter, deren Bahnverhalten und an die Bahnprogrammierung ge-

wonnen werden. Neben den Anforderungen an die Hard- und Software zur Bahn-treue des Roboters wird es für die Praxisumsetzung auch notwendig sein, die Bahnprogrammierungen offline an Hand von CAD Datensätzen zu erzeugen, was hohe Anforderungen an die entsprechende Software stellt.

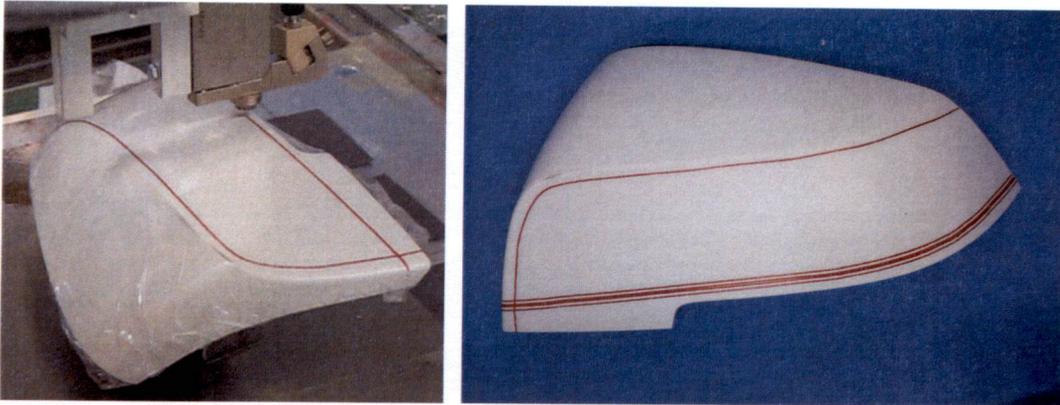


Abbildung 28: Aufbringen von Dekorlinien auf Spiegelschale

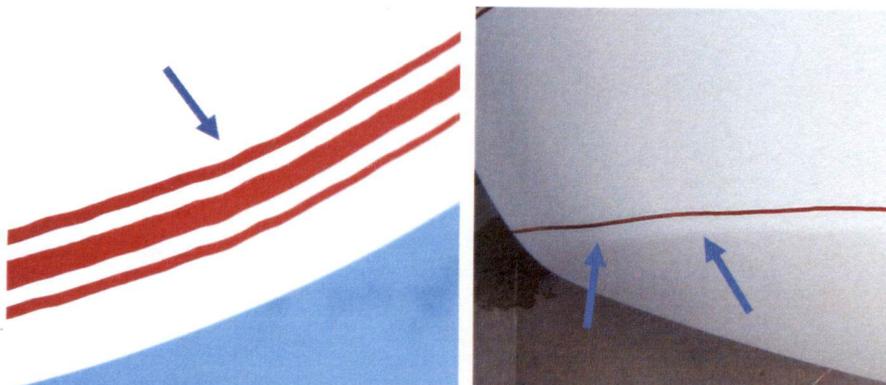


Abbildung 29: Erkenntnisse über Anforderungsprofil an Roboter: Abweichungen im Bahnverlauf des Roboters

8 Umsetzungsszenario

Als Beispielanwendung wurde in der Produktionslinie bei Firma Hertfelder ca. 20 cm langer Streifen unterschiedlicher Breite auf einem Spiegelgehäuse lackiert

Die Demonstratorbauteile wurden anschließend mit Klarlack lackiert und zeigen deutlich das Potenzial für eine Umsetzung auf. Insbesondere wurden durch die sorgfältige offline-Bahnplanung Bahnabweichungen beim Aufbringen der Linien vermieden.

Diese Bauteile dienen auch der Diskussion über mögliche Umsetzungen verschiedener Designs am Bauteil.

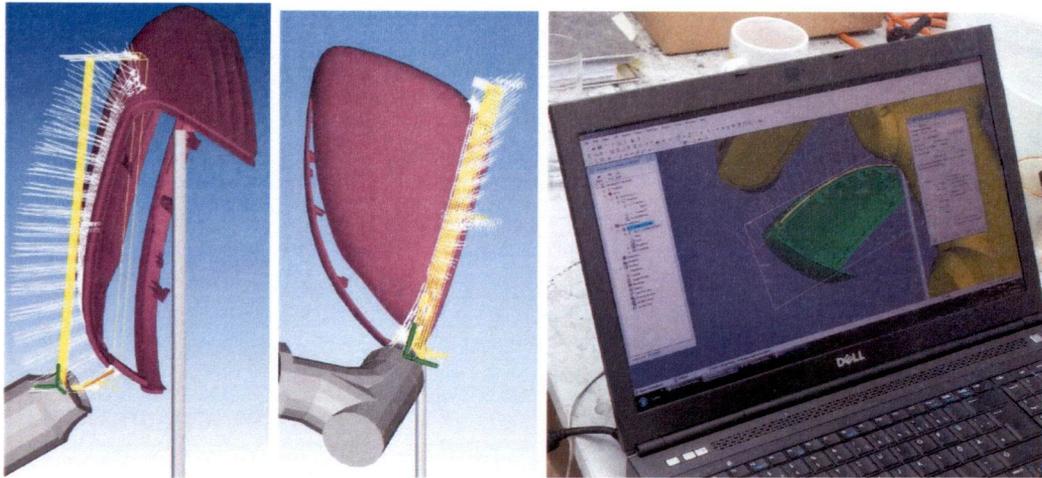


Abbildung 30: Offline Bahnerstellung

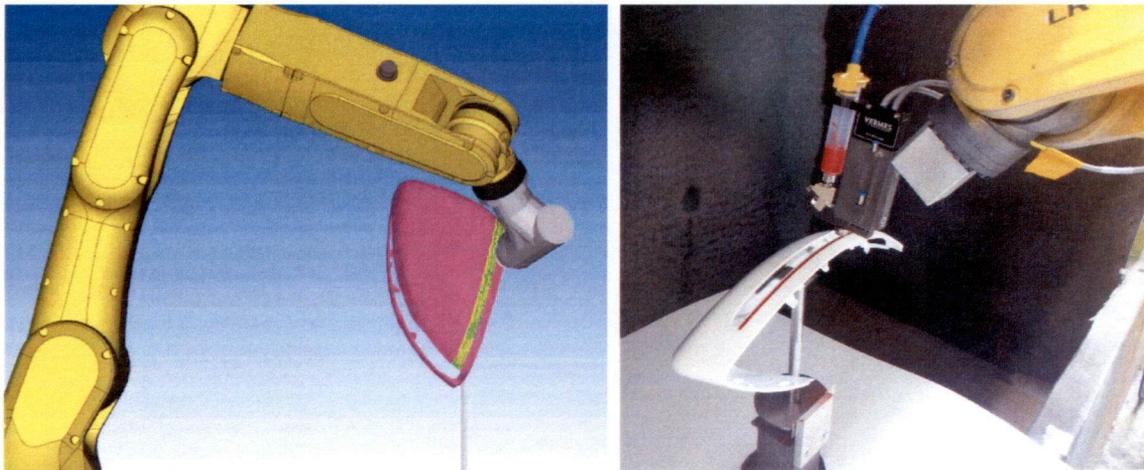


Abbildung 31: Simulation und Lackiervorgang

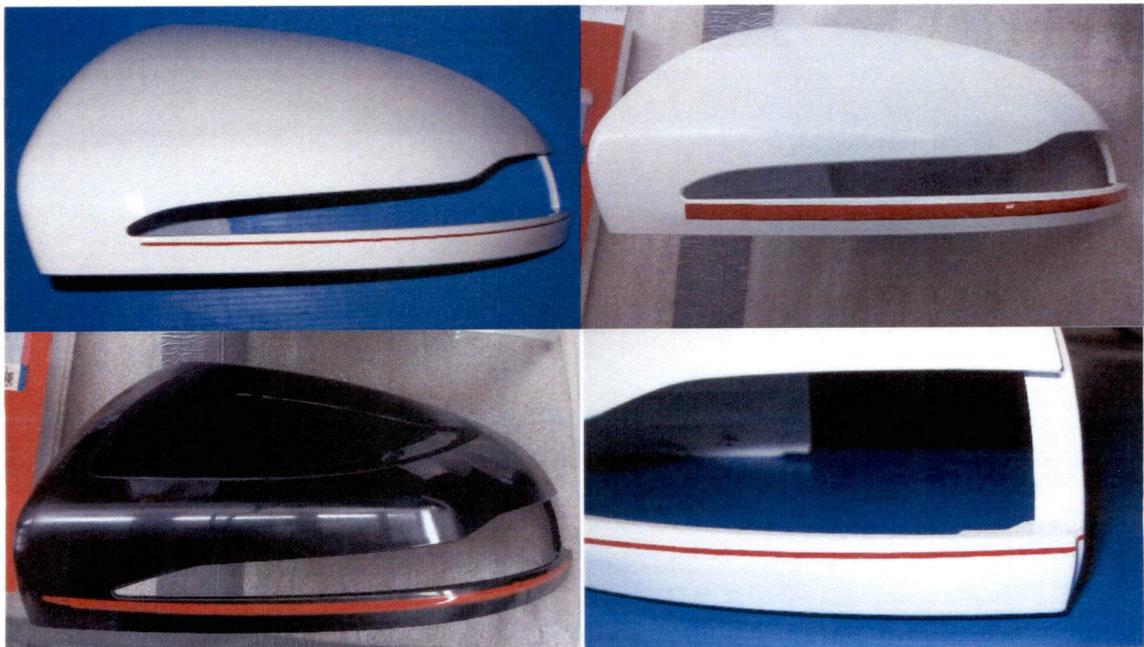


Abbildung 32: Demonstratorbauteile mit Dekorlinien

Ein Ablaufschema, das in den Produktionsablauf der Einfarbenlackierung passt, kann so aussehen:

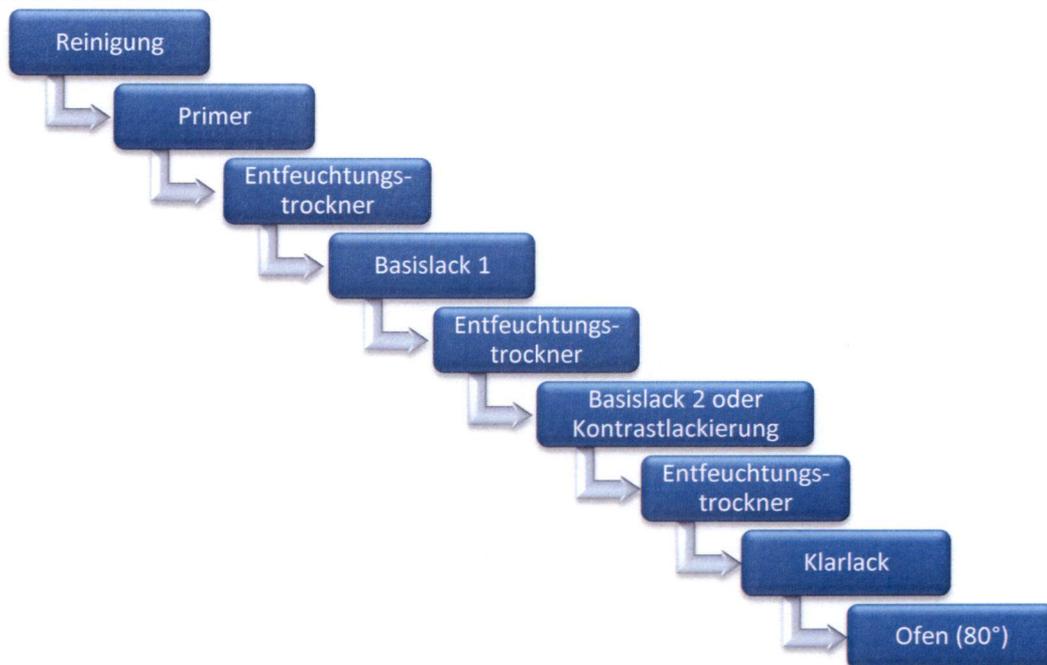


Abbildung 33: Möglicher Prozessablauf in der Umsetzung.

Zu beachten bei der Umsetzung ist insbesondere eine hochpräzise Fördertechnik und Teilaufhängung.

9 Fazit

Die großen Herausforderungen einer guten Lackhaftung zwischen Basislack und der dekorativen Schicht und eines guten Verlaufs konnten gelöst werden. Es können mittels einer Software beliebige Bilder in Lack dargestellt werden, mit der Auflösung von ca. 0,4 mm pro Punkt. Derzeit ist die Flächenleistung mit 40 mm²/s und pro Applikator noch gering, dazu laufen gerade Untersuchungen zur Beschleunigung am Fraunhofer IPA. Der nächste Schritt wird nun sein, dieses Konzept in eine Produktionsanlage zu überführen und dabei die Herausforderungen von genauer Automatisierungslösung, Taktzeit, Prozesssicherheit zu lösen. Als Umsetzungsszenario konnten hierzu bereits Demonstratorbauteile in einer Produktionslinie lackiert werden. An Hand dieser Bauteile konnte das Potenzial für die Lackierung von Dekorlinien gezeigt werden. Zudem wurden wichtige Erkenntnisse für die Anforderungen an die Roboter und die Software zur Bahnerzeugung gewonnen.

10 Literaturverzeichnis

- [Her15] www.hertfelder-gmbh.de/
- [Wal15] <http://www.walther-pilot.de/deutsch/markieren---signieren/index.html>
- [Dec09] Decker, S., Hertfelder, W.: Umstellung einer Lackieranlage auf Wasserlack – Rasante Trocknung, JOT 6.2009, S. 32
- [Ond10] Ondratschek, D.: Energieeffiziente Lackierung von Karosserien. Vortrag bei der 17. DFO Automobil-Tagung, Wiesbaden, 4./5. Mai 2010
- [Ondr10] Ondratschek, D.: Karosserien mit neuen Konzepten energieeffizient lackieren. besser lackieren! Nr. 11, 18. Juni 2010
- [Ond11] Ondratschek, D., Putz, M.: Green Carbody Technologies unter den Gesichtspunkten Leichtbau, Mischbau und Lackierung. Vortrag bei der 28. Arbeitstagung des 1. Deutschen Automobilkreises, Bad Nauheim, 8. November 2011
- [Tie12] Tiedje, O.: Randscharfe Lackiertechnologien sicher und effizient einsetzen. besser lackieren! Nr. 04, 4. März 2012
- [Inn12] Innovationsallianz Green Carbody Technologies – InnoCat®, Ergebnisse Broschüre der Innovationsallianz, Chemnitz, September 2012
- [Hop12] Hoppe, G., Witt, C.: Energieeffiziente Lackierung von Karosserien – Linienprozess vs. Modulares Konzept, Vortrag bei der 29. Arbeitstagung des 1. Deutschen Automobilkreises, 5. – 6. November 2012, Bad Nauheim
- [Tied12] Tiedje, O., Overspray - neue Entwicklungen zur Ressourceneffizienz, JOT live Fachtagung Industrielles Nasslackieren, 13. und 14. November 2012, Stuttgart-Vaihingen.
- [Tiedj12] Tiedje, O.; Ye, Q.: Oversprayarme Beschichtung : Aktuelle Forschung zur Ressourcen-Effizienz, JOT 52 (2012), Nr. 12, S. 28-30
- [Hil13] Hilt, M., Strohbeck, U., Tiedje, O.: Es lohnt sich: Energieeinsparpotenziale bei der Karosserielackierung ausschöpfen. besser lackieren! Nr. 02, 1. Februar 2013
- [Fri13] Fritz, H.-G., De Rossi, U., Weichsel, C., Woll, B., Tiedje, O.: Karosserien verlustfrei beschichten. mo 67 (2013) Nr. 9, S. 30-35
- [Inn13] Innovationsallianz Green Carbody Technologies. besser lackieren. 13/2013 S. 7-12
- [Sch12] Schneider, M., Hager, C., Tiedje, O.: Weniger Versuche bis zum perfekten Verlauf, mo 66 (2012) Nr. 9, S. 16-19.