

Glanzeleistungen in Serie.

Hertfelder Industrielackierungen.



Hertfelder
Hertfelder
LACKIERWERK GmbH

Abschlussbericht

zum Vorhaben NKa3 - 003252

**Innovatives, hochpräzises Lackiersystem
zur Vermeidung des Oversprays**

UMWELT  INNOVATIONS
PROGRAMM

Hertfelder GmbH

Kirchenweinbergstraße 133 | 71672 Marbach/N.

Inhaltsverzeichnis

Berichts-Kennblatt	3
Report Coversheet.....	4
A. Einleitung.....	5
A.1 Kurzbeschreibung des Unternehmens.....	5
A.2 Ausgangssituation.....	5
B. Vorhabenumsetzung	10
B.1 Ziel des Vorhabens	10
B.2 Prozessbeschreibung des Lackierverfahrens.....	11
B.3 Auslegung und Leistungsdaten der technischen Lösung.....	13
B.4 Umsetzung des Vorhabens.....	14
B.5 Behördliche Anforderungen (Genehmigungen).....	18
B.6 Erfassung und Aufbereitung der Betriebsdaten.....	18
C. Ergebnisdarstellung zum Nachweis der Zielerreichung.....	20
C.1 Bewertung der Vorhabendurchführung	20
C.2 Stoff- und Energiebilanz	25
C.3 Umweltbilanz	29
C.4 Wirtschaftlichkeitsanalyse	32
C.5 Technischer Vergleich zu konventionellen Verfahren.....	34
D. Übertragbarkeit	35
D.1 Erfahrungen aus der Praxiseinführung	35
D.2 Modellcharakter und Übertragbarkeit	35
E. Zusammenfassung / Summary.....	37
F. Literatur.....	39

BMU-UMWELTINNOVATIONSPROGRAMM

Zusammenfassung

Abschlussbericht zum Vorhaben

„Innovatives hochpräzises Lackiersystem zur Vermeidung des Oversprays“

Zuwendungsempfänger

Hertfelder GmbH

Umweltbereich

Ressourceneffizienz und Energieeinsparung

Laufzeit des Vorhabens

Von 02.06.2017 bis 31.03.2018

Autoren

Hertfelder, Walter

Pichler, Hans-Peter

Datum der Erstellung

12.11.2019

Gefördert mit Mitteln des Bundesministeriums für Umwelt, Naturschutz und nukleare Sicherheit.

Berichts-Kennblatt

Aktenzeichen des UBA:	Projekt-Nr.: NKa3 - 003252
Titel des Vorhabens: „Innovatives hochpräzises Lackiersystem zur Vermeidung des Oversprays“	
Autoren: Hertfelder, Walter Pichler, Hans-Peter	Vorhabenbeginn: 02.06.2017
	Vorhabenende: 31.03.2018
Zuwendungsempfänger: Hertfelder GmbH Kirchenweinbergstraße 133 71672 Marbach am Neckar	Veröffentlichungsdatum: 12.11.2019
	Seitenzahl: 39
Gefördert im BMU-Umweltinnovationsprogramm des Bundesministeriums für Umwelt, Naturschutz und nukleare Sicherheit.	
Kurzfassung: <p>Im Rahmen des Investitionsvorhabens wurde ein hochpräzises Lackiersystem realisiert, welches unter ökologischen und funktionalen Gesichtspunkten einen maßgeblichen Entwicklungsschritt für die gesamte Branche darstellt. Aufgrund der erreichten Präzision des Lackierverfahrens und des Applikationssystems erfolgt der Lackauftrag definiert und oberflächenkonturnah. Das heißt, dass infolgedessen der benötigte Lackbedarf sowie die durch fehlerhafte Beschichtungen bedingte Ausschussware erheblich reduziert werden konnten. Darüber hinaus ermöglicht das Lackiersystem den Einsatz des InkJet-Verfahrens sowie der piezobasierten Mikrodosiertechnik, was im Bereich der Industrielackierung neue Möglichkeiten für die Realisierung von mehrfarbigen Lackierungen, Schriftzügen oder Verzierungen eröffnet.</p>	
Schlagwörter: Lackiersystem; Overspray; Ressourceneffizienz; Mehrfarbenlackierung; maskierungsfrei	
Anzahl der gelieferten Berichte: Papierform: 6 Elektronischer Datenträger: 1	Sonstige Medien:

Report Coversheet

Reference-No. Federal Environmental Agency:		Project-No.: NKa3 - 003252
Project Title: “An innovative, highly precise coating system for the purpose of avoiding overspray”		
Authors: Hertfelder, Walter Pichler, Hans-Peter		Project start date: 02.06.2017
		Project end date: 31.03.2018
Beneficiaries: Hertfelder GmbH Kirchenweinbergstraße 133 71672 Marbach am Neckar		Publication Date: 12.11.2019
		No. of Pages: 39
Funded in the Environmental Innovation Programme of the Federal Ministry for the Environment, Nature Conservation, Building and Nuclear Safety.		
Short version: As a part of the investment plans, a highly precise coating system was implemented. This system represents a major evolution for the entire industry in terms of its ecological and functional aspects. Due to the precision achieved in the coating process and by the application system, the application of the paint occurs in a precise fashion, close to the contour of the surface. This means that, as a result, the required amount of paint as well as the number of goods rejected due to faulty coating have been reduced significantly. In addition, the coating system allows for the use of inkjet processes as well as piezo-based microdosing technology, which opens up new opportunities for realizing multi-color coatings, logos and lettering or decorations in the field of industrial coating.		
Keywords: Coating systems, overspray, resource efficiency, multi-color coating, selective coating, no masking		

A. Einleitung

A.1 Kurzbeschreibung des Unternehmens

Die Hertfelder GmbH, gegründet 1952, ist ein mittelständisches, familiengeführtes Unternehmen mit derzeit 44 Mitarbeitern und im Bereich des Oberflächenfinishes für Kunststoffteile tätig. Dabei beschichten wir seit über 60 Jahren beispielsweise Karosserieteile, Badezimmerarmaturen und Gebrauchsgütergehäuse auf höchstem Niveau, um durch entsprechende Lackierungen Objekte ästhetisch aufzuwerten und dauerhaft vor Belastungen des täglichen Gebrauchs zu schützen. Diese erstklassigen Lackierungen setzen hoch spezialisiertes Wissen, viel Erfahrung und eine ganzheitliche Qualitätsorientierung voraus. Dokumentiert ist dieses Qualitätsversprechen in den 2008 erfolgten Zertifizierungen nach den Regelwerken ISO/TS 16949:2002 und DIN EN ISO 9001:2000. Auf den zur Verfügung stehenden sechs Anlagen können dabei unterschiedlichste Lackierverfahren für Individuallackierungen und Großserien angeboten werden.

A.2 Ausgangssituation

Unter dem Aspekt globaler Entwicklungen wie weltweiter Ressourcenverknappung und Klimawandel stellt der effiziente Einsatz von Energie und Material aus Sicht der Produktionsforschung eine besondere Herausforderung dar. An vorderster Stelle steht dabei ein Paradigmenwechsel mit dem Ziel, künftig nicht mehr nur „maximalen Gewinn aus minimalem Kapitaleinsatz“, sondern vielmehr einen „maximalen Mehrwert von Produkten aus sparsamstem Einsatz von Ressourcen“ zu generieren. Im Bereich der Lackierungsverfahren besteht dabei die zentrale Herausforderung in der Reduzierung der Material- und Energieverluste, welche insbesondere durch den entstehenden Overspray hervorgerufen werden. In Abbildung 1 ist diesbezüglich eine konventionelle Kunststoff-Lackieranlage für Kfz-Außenspiegelgehäuse der Firma Eisenmann dargestellt. Dabei werden die zahlreichen Außenspiegelgehäuse auf Gehängen über ein untenliegendes Fördersystem durch die einzelnen Prozessschritte geführt. Industrieroboter erzeugen mit entsprechenden Applikationen einen Sprühnebel zur Erzeugung einer gleichmäßigen Lackschicht auf den Außenspiegelgehäusen.

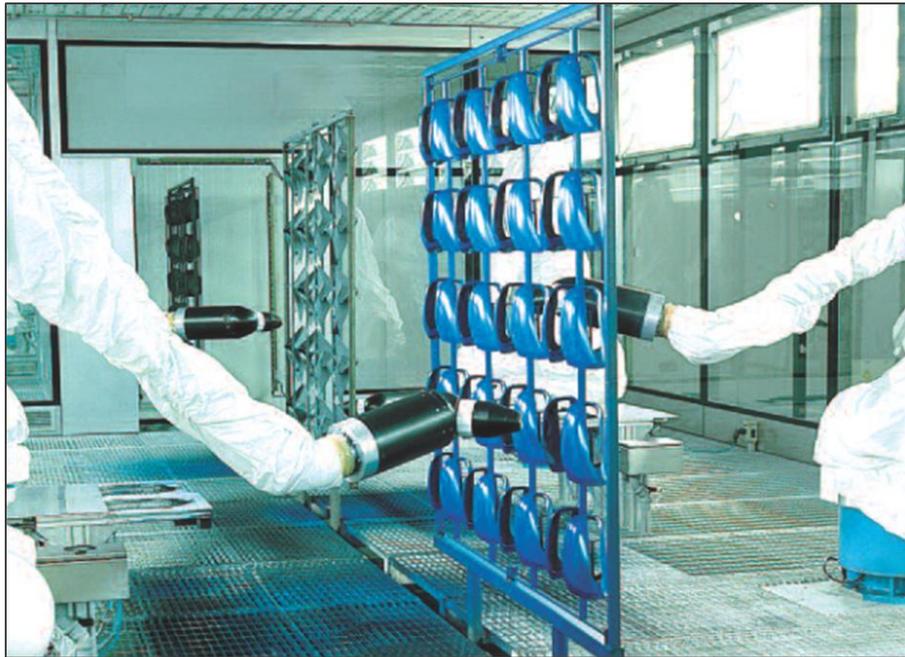


Abbildung 1: Lackieranlage für Kfz-Außenspiegelgehäuse (Quelle Fa. Eisenmann)

Ein möglicher Prozessablauf für eine Kunststoff-Lackierung ist in der folgenden Abbildung dargestellt. Dabei ist deutlich zu erkennen, wie die Kunststoffbauteile die einzelnen Prozessstufen Vorbehandlung, Maskierung, Grundierung, Basis- und Klarlackierung sowie Trocknung durchlaufen. Darüber hinaus sind das Fördersystem der Gehänge angedeutet sowie die Anlagenperipherie bestehend aus Abwasseraufbereitung und regenerativer Nachverbrennung dargestellt. Die notwendigen Anlagenabmessungen und der benötigte Platzbedarf zur Realisierung einer Lackierstraße des Stands der Technik sind hierbei enorm.

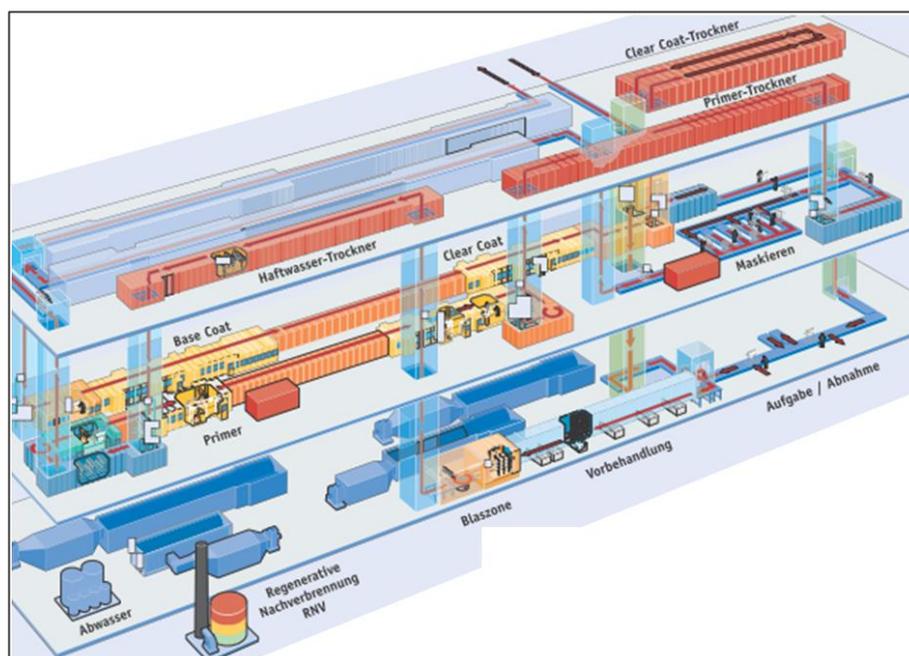


Abbildung 2: Beispielhafter Prozessablauf einer Kunststoff-Lackierung (Quelle: Fa. Eisenmann)

Die größte Problemstellung beim Stand der Technik ist die bislang erreichte Material- und Energieeffizienz. Dabei entfällt aktuell über die Hälfte des Gesamtenergieverbrauchs der Karosserieproduktion auf die Lackierung, wobei in den Prozessschritten Spritzlackieren und Trocknen die bedeutendsten Einsparpotenziale liegen. Der Anteil dieser beiden Prozesse beträgt rund 65 % des Energieverbrauchs der Karosserielackierung, wobei der im Rahmen des Lackierens auftretende Overspray eine entscheidende Herausforderung des Stands der Technik darstellt. Beispielhaft ist hier die benötigte, hohe Kabinenluftströmung sowie deren Konditionierung (Beheizen und Befeuchten) zu nennen. Einsparpotenziale ergeben sich diesbezüglich insbesondere hinsichtlich der Lackverluste, Luftkonditionierung, Ventilatorleistung, Oversprayabscheidung, Oversprayentsorgung und Kabinenreinigung. Gelingt es, dass Overspray erst gar nicht erzeugt bzw. erheblich verringert wird, kann infolgedessen nicht nur die Materialeffizienz maßgeblich gesteigert, sondern darüber hinaus der Energieverbrauch der benötigten Anlagenperipherie reduziert werden.

Die grundlegende Herausforderung der Materialineffizienz im Rahmen eines konventionellen des Lackierprozesses wird in der folgenden Abbildung 3 anhand eines Sankey-Diagramms verdeutlicht. Die Detailanalyse zum Lackverbrauch der LCS Life Cycle Simulation GmbH unterscheidet zwischen den beiden Bestandteilen Lösemittel und Festkörper und definiert die jeweiligen Verlustquellen. Die Analyse zeigt, dass lediglich 20 % des eingesetzten Lacks tatsächlich als beschichtendes Medium auf das Produkt aufgetragen wird.

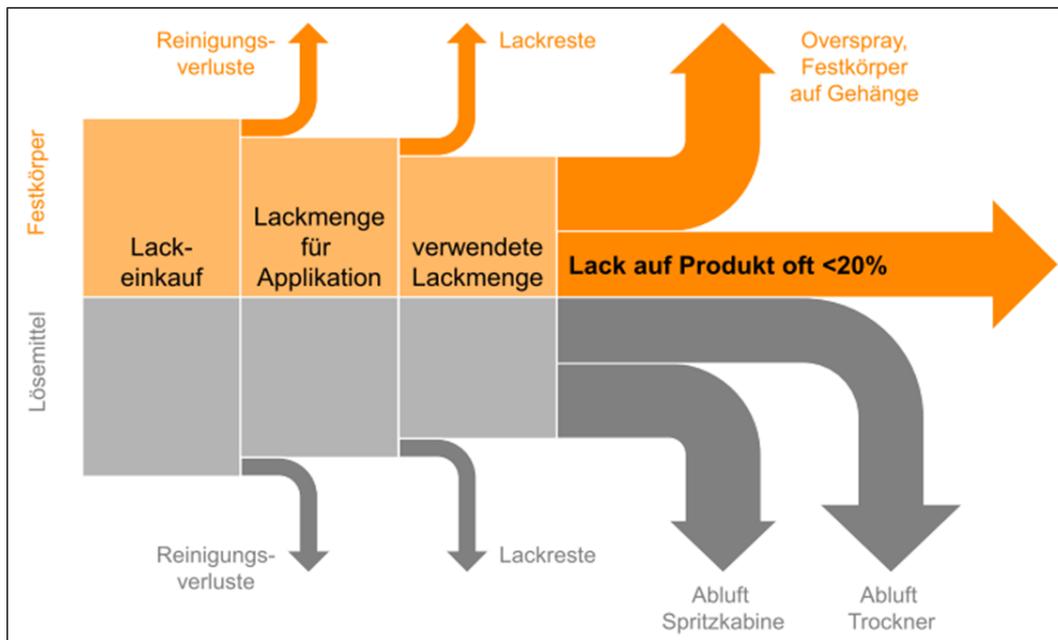


Abbildung 3: Detailanalyse Lackverbrauch (Bestimmung der Materialeffizienz)¹

¹ Quelle: LCS Life Cycle Simulation GmbH

Zusätzlich zu den vorangehend dargestellten Problemstellungen des Stands der Technik in Bezug auf die erreichte Energie- und Materialeffizienz der Lackierprozesse, besteht eine weitere Herausforderung in der Umsetzung von Mehrfarbenlackierungen. Als Zulieferer für internationale Premiumhersteller wie beispielsweise Bentley, Porsche, BMW und Mercedes, die für absolute Spitzenqualität stehen, sehen wir uns mit der Entwicklung konfrontiert, dass die Abgrenzung zwischen den Marken unter anderem durch eine Individualisierung in Form von Mehrfarbenlackierungen, Schriftzügen und Verzierungen realisiert werden soll. Beispielhafte Anwendungsfelder sind zwei- oder mehrfarbige Stoßfänger, Schweller und Außenspiegel, wie Varianten des Skoda Fabia, des Audi A1, des Mini Cooper sowie die AMG A-Klasse zeigen. In der folgenden Abbildung sind zum einen beispielhafte Außenspiegellackierungen und zum anderen einzelne Prozessschritte des Maskierungsverfahrens dargestellt.



Abbildung 4: Beispielhafte Prozessschritte und Anwendungsbereiche der Maskierung

Die gewünschte Zwei- bzw. Mehrfarbigkeit wird derzeit über eine entsprechende Maskierung erzielt, einem ökologisch und ökonomisch ineffizienten Prozess, der durch einen hohen manuellen Aufwand, lange Durchlaufzeiten und erhebliche Materialverluste geprägt ist. Diesbezüglich wurde von 2013 bis 2016 in Kooperation mit dem Fraunhofer IPA ein durch die Deutsche Bundesstiftung Umwelt gefördertes Forschungsvorhaben durchgeführt, mit dem Ziel, lackverlustfreie Beschichtungstechnologien wie die piezobasierte Mikrodosiertechnik oder die InkJet-Technologie auf einen industriellen Fertigungsprozess zu adaptieren sowie die entsprechenden Prozessparameter für die Serienanwendung zu ermitteln (beispielsweise mit Blick auf die Präzision der Einschaltpunkte des Industrieroboters). Es konnte gezeigt werden, dass ein randscharfer und oversprayfreier Auftrag von Basislacken (ohne Effektpigmente) möglich ist. Durch die sehr kurze Öffnungszeit der Düse kann bei der piezobasierten Mikrodosiertechnik ein definierter und durch die unterschiedlichen Lackgeschwindigkeiten beim Öffnungs- und Schließmoment ein stabiler Lacktropfen erzeugt werden. Da die erzeugten Tropfen bis zu einigen Zentimetern frei fliegen können und die Tropfengröße über die

Nadelöffnung definiert werden kann, ist die Technologie grundsätzlich auch für die Beschichtung komplexer Objekte geeignet. Hinsichtlich der detaillierten Entwicklungsergebnisse sei an dieser Stelle auf den entsprechenden Abschlussbericht verwiesen.²

Für die Anwendung der Technologien im Bereich der Mehrfarbenlackierung sind dabei die nachfolgenden ökologischen Problemstellungen relevant:

- Erheblicher Bedarf an Material zum Abkleben und Maskieren sowie zusätzliche Arbeitsschritte wie Anschleifen und Reinigen der zu lackierenden Kontrastfläche.
- Personelle, räumliche und zeitliche Kapazitäten für Maskieren, Vorbereiten und Demaskieren.
- Lackverluste bei Kontrastlack, da das Maskierungsmaterial mitbeschichtet wird sowie der entsprechender Entsorgungsaufwand des Maskierungsmaterials.
- Erhöhte Ausschussquote aufgrund komplexer und händisch geprägter Prozesse.

² Vgl. Fraunhofer IPA und Hertfelder Lackierwerk GmbH: Automatisierte maskierungsfreie Zweifarbenlackierung für Spiegelgehäuse.

B. Vorhabenumsetzung

B.1 Ziel des Vorhabens

Anhand von Abbildung 3 wurde die zentrale Problemstellung des Stands der Technik mit Blick auf die erreichte Materialeffizienz in der Lackierbranche verdeutlicht, wobei unter ökologischen Gesichtspunkten dabei das wesentliche Optimierungspotenzial in der Reduzierung des Oversprays besteht. Zielstellung des Investitionsvorhabens war es infolgedessen, die Effizienz des Lackiersystems deutlich zu steigern, in dem overspraybedingte Lackverluste minimiert werden. Ein weiteres Optimierungspotenzial wurde hinsichtlich ungewollt beschichteter Oberflächen identifiziert. Beispielhaft zu nennen wären diesbezüglich innenliegende Bauteiloberflächen, die beim Stand der Technik über den undefinierten Farbnebel mitbeschichtet werden, obwohl hierzu aus optischer oder funktionaler Sicht keine Notwendigkeit besteht. Aufbauend auf diesem Optimierungspotenzial zur Verbesserung der Materialeffizienz sollte eine hochpräzise Anlagensteuerung und Robotik eingesetzt werden, welche die Beschichtung der Bauteile aus nächster Nähe ermöglicht. Um die grundsätzliche Materialeffizienz des Lackiersystems weiter zu verbessern, sollten darüber hinaus die üblichen Ausschussquoten des Stands der Technik reduziert werden. Dabei ist es von entscheidender Bedeutung, eine hohe Reinigungsqualität bei geringerem Ressourceneinsatz sowie eine hohe Prozessstabilität in Verbindung mit einer hervorragenden Beschichtungsqualität sicherzustellen.

Mit Blick auf die vorangehend skizzierte Problemstellung im Bereich der Mehrfarbenlackierung war es weitere Zielstellung des Vorhabens, mit Realisierung des neuartigen Lackiersystems erstmalig die technologischen Voraussetzungen für eine maskierungsfreie Mehrfarbenlackierung zu schaffen. Die grundsätzlichen Anforderungen an die Anlagentechnik wurden dabei in dem beschriebenen Kooperationsprojekt mit dem Fraunhofer IPA erprobt und definiert. Ziel des Vorhabens war es insbesondere, den Einsatz der InkJet-Technologie sowie eine Lackdosierung in Form kleinster Tröpfchen über Piezoelemente zu ermöglichen und dabei die technologische Machbarkeit der maskierungsfreien Mehrfarbenlackierung auf einer großtechnischen Anlage zu demonstrieren.

Bezüglich der Zielstellungen des Investitionsvorhabens gilt es somit festzuhalten, dass zum einen ein neuer Branchenbenchmark im Bereich der erreichten Beschichtungs- und Materialeffizienz angestrebt wurde, und zum anderen erstmals die technologischen, anlagenseitigen Voraussetzungen einer maskierungsfreien Mehrfarbenlackierung im Serienmaßstab geschaffen werden sollten.

B.2 Prozessbeschreibung des Lackierverfahrens

Aufbauend auf der vorangehend dargestellten Zielstellung des Investitionsvorhabens ist in der nachfolgenden Abbildung das Produktionslayout des Lackierprozesses dargestellt. Anhand der vier farblich gekennzeichneten Teilsysteme Fördertechnik, Waschen, Lackieren und Trocknen erfolgt darauf aufbauend die Beschreibung der technischen Funktionsweise.

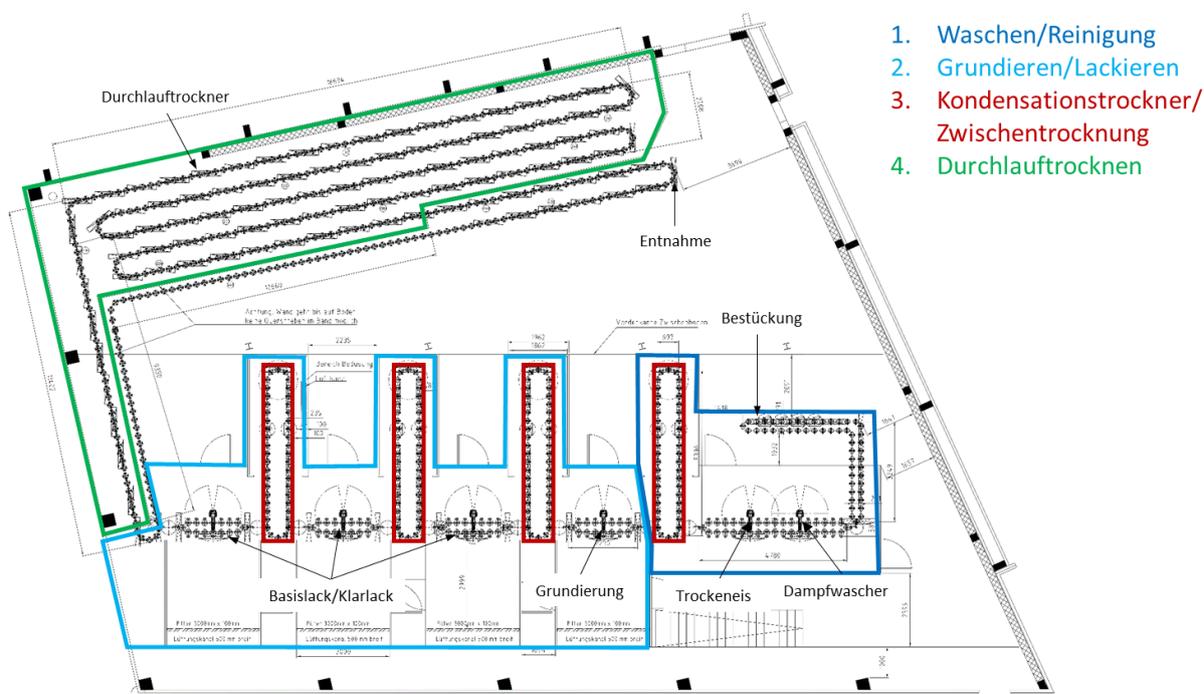


Abbildung 5: Produktionslayout

Im Bereich der Fördertechnik werden aufgrund der ungenügenden Material- und Energieeffizienz sowie des erheblichen Oversprays bei herkömmlichen Anlagen neue Wege beschritten. Beim Stand der Technik werden die zu lackierenden Produkte in einem Gehänge durch die einzelnen Stationen geführt (vgl. hierzu Abbildung 1, 20 Außenspiegelgehäuse je Gehänge). Hiermit gehen zwar eine hohe Stückzahl bzw. kurze Durchlaufzeit einher, zugleich aber auch erhebliche Materialverluste, eine umfangreiche und energieintensive Anlagenperipherie (z. B. Nachverbrennung) sowie eine unzureichende Präzision. Im Vergleich hierzu werden die zu beschichtenden Produkte auf der neuen Anlage einzeln auf entsprechenden Teileträgern durch die Prozessschritte transportiert. Diese Träger rotieren dabei definiert um die eigene Achse, um die einzelnen Prozessschritte wie Reinigung, Lackierung und Trocknung gezielt unterstützen zu können. Infolgedessen kann die Präzision maßgeblich verbessert sowie der Platzbedarf für die Anlagendimensionierung und -peripherie reduziert werden.

Für den Wasch- und Reinigungsprozess kommt eine Kombination aus Dampfwascher und Trockeneis zum Einsatz. Der Dampfwascher ist eine absolute Branchenneuheit und bislang nach unserem Kenntnisstand in keinem vergleichbaren Verfahren im Einsatz. Die Dampföuse

soll dabei über eine Vorrichtung in vertikaler Richtung bewegt werden, während das zu reinigende Produkt in definiertem Abstand horizontal rotiert. Darauf aufbauend werden durch die Trockeneisreinigung letzte Verschmutzungsreste sowie anhaftende Wasserrückstände entfernt. Dabei wird das Trockeneis auf die zu reinigende Oberfläche „geschossen“, was zu einer Reaktion mit den Wasserrückständen führt. Auf entsprechende nasschemische Reinigungsvorgänge sowie nachfolgende Entfeuchtungsprozesse unter Einsatz von Druckluft, wie sie beim Stand der Technik oftmals eingesetzt werden, kann infolgedessen komplett verzichtet werden. Durch den Einsatz des neuartigen Dampfwaschers in Kombination mit einer umweltfreundlichen Trockeneisreinigung können somit erhebliche Umweltentlastungen in den Bereichen Energie, Wasser und Chemikalien realisiert werden.

Der Lackierprozess zeichnet sich in unserem Investitionsvorhaben durch die roboterseitig maßgebende Präzision aus. In Kooperation mit dem Fraunhofer IPA wurden Genauigkeitsanforderungen an den Bewegungsablauf der Industrieroboter definiert, die sich aus einer randscharfen Trennung von Grund- und Kontrastfarbe zur Realisierung eines maskierungsfreien Lackierprozesses ergeben. Dabei wurden zur Verfügung stehende Automatisierungssysteme hinsichtlich der erreichten Qualität und Präzision bewertet, wobei die im Labor ermittelten Prozessparameter auf die Anlagenkomponenten übertragen und angepasst wurden. Aufbauend auf diesen Ergebnissen konnte ein Automatisierungssystem in Form eines 7-achsigen Industrieroboters abgeleitet werden, welches in Bezug auf die Genauigkeitsanforderungen, die Präzision der Bahnführung sowie die Systemsteuerung die benötigten Anforderungen erfüllt. Entscheidend ist dabei, dass der Industrieroboter auf Basis von dreidimensionalen Daten des Bauteils die Kontur im 90 ° Winkel zur Oberfläche in einem exakt definierten Abstand abfährt. Da durch die Umsetzung des Vorhabens ein geringer Abstand zwischen Substratoberfläche und Applikationssystem realisiert werden kann, wird es erstmals ermöglicht, innovative Lackierverfahren wie die piezobasierte Mikrodosierertechnik sowie die InkJet-Technologie in einer großtechnischen Anlage einzusetzen. Die auf Grundlage der vorangehend dargestellten Funktionsweise erreichte Genauigkeit und Oversprayreduzierung ist in der folgenden Abbildung 6 ersichtlich. Gegenübergestellt werden das neuartige, punktgenaue Beschichten einer Motorhaube beim Fraunhofer IPA (links) und ein Außenspiegelgehäuse, welches mit einem herkömmlichen Lackierverfahren in unserem Haus beschichtet

wurde. Hier wurden durch das Overspray ungewollt innenliegende Bauteilflächen beschichtet, wobei aufgrund der Teileträgeraufnahme in der Bauteilmitte das schwarze Grundmaterial zu erkennen ist.



**Abbildung 6: Vergleich Mikrodosierung über Piezoelemente und Stand der Technik
(Quelle: Entwicklungsergebnisse InnoCaT5 und Bild aus eigener Aufnahme)**

Der Trocknungsprozess unterteilt sich in die zwei Teilbereiche Kondensationstrockner und Durchlaufstrockner. Die Kondensationstrocknung mit entfeuchteter Luft wird dabei zwischen den einzelnen Lackierprozessen (Grundierung, Basis- und Klarlack) eingesetzt. Der abschließende Durchlaufstrocknungsprozess wird bei 80 °Celsius und einer durchschnittlichen Trocknungsdauer von zwei bis drei Stunden je Teil realisiert. Über Wärmetauscher wird die Abluft energetisch optimal verwertet. Entscheidend dabei ist, dass beide Trocknungsprozesse auf das innovative Lackierverfahren und das Fördersystem mit Teileträgern ausgelegt ist, bei welchem die zu lackierenden Produkte vereinzelt und nicht auf Gehängen transportiert werden. Aufgrund des intelligenten Transportsystems kann so der benötigte Platzbedarf zur Realisierung der Anlage maßgeblich reduziert werden. Das geplante Investitionsvorhaben benötigt infolgedessen lediglich ca. ein Drittel des Platzbedarfs von herkömmlichen Lackieranlagen.

B.3 Auslegung und Leistungsdaten der technischen Lösung

In der nachfolgenden Tabelle sind die zentralen Eckdaten des Investitionsvorhabens dargestellt. Mit Blick auf die Angabe zur Produktionskapazität ist an dieser Stelle darauf hinzuweisen, dass diese unmittelbar mit der erreichten Taktzeit zusammenhängt und somit aufgrund des beschichteten Produktportfolios entsprechend stark schwanken kann.

Eckdaten des Investitionsvorhabens

Investitionsart	Lackieranlage
Investitionsort	71672 Marbach/N.
Investitionsvolumen	2.327 TEUR
Durchschnittliche Taktzeit	6 - 35 Sekunden (je nach Bauteil)
Produktionskapazität	Ca. 1.000.000 Teile pro Jahr
Max. Lackierbreite der Bauteile	1 Meter

Tabelle 1: Eckdaten des Investitionsvorhabens

B.4 Umsetzung des Vorhabens

Der nachfolgenden Tabelle 2 können die wesentlichen Meilensteine des Investitionsvorhabens sowie deren Umsetzungszeitpunkte entnommen werden.

Projektphase	Termin
Anlagenmontage	Juli, August 2017
Inbetriebnahme der Anlage	September 2017
Abschluss Anlagenoptimierung	Januar 2018

Tabelle 2: Meilensteine des Investitionsvorhabens

Ergänzend zu den aufgezeigten Meilensteinen des Vorhabens dokumentieren die nachfolgenden Bilder den Aufbau und Betrieb der Anlage. Dabei ist deutlich zu erkennen, dass der Beschichtungsroboter die Oberfläche des Objekts konturnah abfährt, was den Overspray des Lackiersystems maßgeblich reduziert. Des Weiteren veranschaulichen die Bilder die vereinzelte Teileaufnahme sowie deren Führung durch die einzelnen Beschichtungsprozesse. In Abbildung 14 ist darüber hinaus der neuartige Reinigungsprozess mittels einer Dampfdüse dargestellt.



Abbildung 7: Dokumentation Anlagenaufbau, Fördersystem und Lackierkabinen



Abbildung 8: Dokumentation Anlagenaufbau, Fördersystem innerhalb der Lackierkabinen



Abbildung 9: Dokumentation Anlagenbetrieb, Gesamtansicht der Lackierstraße

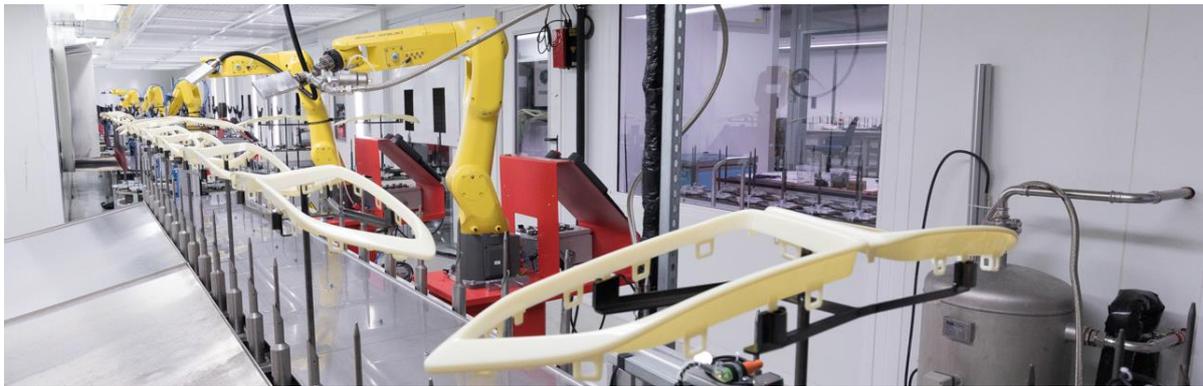


Abbildung 10: Dokumentation Anlagenbetrieb, Lackierung der Kühlergrill-Nieren



Abbildung 11: Dokumentation Anlagenbetrieb, koturnahe Lackierung zur Oversprayreduzierung



Abbildung 12: Dokumentation Anlagenbetrieb, Detailaufnahme oversprayarme Lackierung V-Fuß

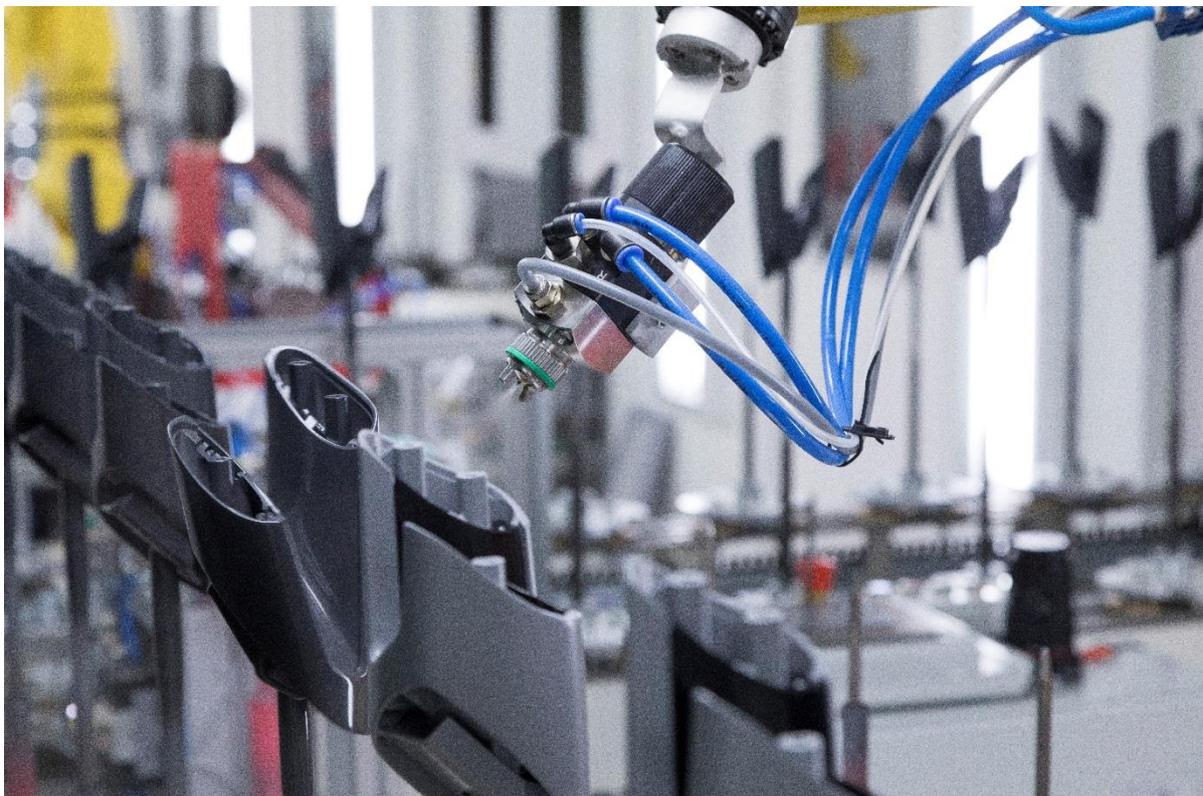


Abbildung 13: Dokumentation Anlagenbetrieb, Detailaufnahme der Applikationstechnik



Abbildung 14: Dokumentation Anlagenbetrieb, Einsatz der Dampfdüse zur Bauteilreinigung

B.5 Behördliche Anforderungen (Genehmigungen)

Hinsichtlich der behördlichen Anforderungen ist die Verordnung zur Begrenzung der Emissionen flüchtiger organischer Verbindungen (VOC; 31. BImSchV) zu nennen. Da der Schwellenwert des jährlichen Lösemittelverbrauchs in Höhe von 15 Tonnen unterschritten wird, ist die Lackieranlage nach der BImSchV nicht genehmigungs-, sondern lediglich anzeigepflichtig. Dieser Pflicht wurde vor der Anlageninbetriebnahme bei der zuständigen Behörde ordnungsgemäß nachgekommen.

B.6 Erfassung und Aufbereitung der Betriebsdaten

Zur Darstellung der erzielten Umweltentlastungen wird das realisierte Lackiersystem einer konventionellen Lackieranlage am Standort gegenüber gestellt. Die aufgenommenen Daten umfassen den Lackverbrauch, den thermischen und elektrischen Energiebedarf sowie die Ausschussquote. Da die Ausschussquote und der Lackverbrauch stark vom jeweiligen Produkt abhängen, erfolgte die Datenerhebung hier produkt- und nicht anlagenbezogen. Um eine Vergleichbarkeit gewährleisten zu können, musste auf ein Referenzprodukt zurückgegriffen werden, welches bereits auf beiden Anlagentechnologien lackiert wurden. Herangezogen wurde hier ein Außenspiegelgehäuse eines namenhaften Premium-Automobilherstellers, der

höchste Anforderungen an die Beschichtungsqualität stellt. Die ausgewertete Stichprobengröße umfasst dabei eine Fertigungscharge mit 600 Außenspiegeln bei einer Taktzeit von 35 Sekunden. Die hohe Taktzeit resultierte aus der Komplexität des Bauteils sowie den hohen Kundenanforderungen.

In der nachfolgenden Tabelle ist diesbezüglich übersichtlich dargestellt, wie die Daten im Rahmen der Erfolgskontrolle erhoben wurden.

Auswertungsgröße	Datenquelle und -erhebung
Lackverbrauch	<ul style="list-style-type: none"> • Vergleich muss produktbezogen erfolgen, Datenerhebung auf Basis des Referenzprodukts „Außenspiegelgehäuse“. • Messung des Lackverbrauchs bei Beschichtung einer Fertigungscharge mit 600 Gehäusen, woraus ein durchschnittlicher Lackauftrag pro Bauteil berechnet werden kann.
thermischer Energiebedarf	<ul style="list-style-type: none"> • Auf der Referenzanlage jahresbezogene Dokumentation des Ölverbrauchs, auf der neuen Anlage Auswertung des jährlichen Gasbedarfs.
Strom	<ul style="list-style-type: none"> • Auswertung des Stromverbrauchs auf Basis der Stromkostenabrechnung.
Ausschuss	<ul style="list-style-type: none"> • Auswertung auf Grundlage der durchgeführten Ausschusserfassung. • Der Vergleich erfolgt produktbezogen auf Basis des Referenzprodukts „Außenspiegelgehäuse“, hierzu Dokumentation entsprechender Ausschussmenge in Bezug auf die beschichtete Bauteilanzahl.

Tabelle 3: Übersicht Datenerhebung

Mit Blick auf die Datenerhebung gilt es an dieser Stelle festzuhalten, dass sämtliche Verbrauchswerte auf einer einschichtigen Anlagenauslastung im Serienbetrieb basieren. Die sukzessive Umstellung auf einen vollumfänglichen Zweischichtbetrieb wird aktuell unter Berücksichtigung der Auftragslage zum Jahresende angestrebt. Um eine Vergleichbarkeit mit der Referenzanlage zu gewährleisten, basieren die angegebenen Verbrauchsdaten auf einem einschichtigen Serienbetrieb, sodass mit Steigerung der Produktionszeit die erzielten Umweltentlastungen entsprechend zunehmen.

C. Ergebnisdarstellung zum Nachweis der Zielerreichung

C.1 Bewertung der Vorhabendurchführung

Nach Beauftragung der Teilvorhaben und Montage der Anlage erfolgten die Inbetriebnahme und das Einfahren des Lackierprozesses. Dabei zeigten sich unterschiedliche Problemstellungen und Herausforderungen, die es im Rahmen der Inbetriebnahme und Anlagenoptimierung zu lösen galt. Diese waren im Einzelnen

- die Programmierung der Anlagensteuerung und des Materialflusses, welche sich als komplexer als ursprünglich geplant herausstellte.
- die Förder- und Mischtechnik, welche, wie bei konventionellen Anlagentechniken üblich, auf größere Lack- und somit Fördermengen ausgelegt war. Hier war eine entsprechende Optimierung der Anlagentechnik notwendig, um eine gleichmäßige und homogene Mischung des Lacks auch bei kleinen Mengen gewährleisten zu können.
- die Positionierung der Teile auf dem Fördersystem und Übergabe der Teile zwischen Zuführband, Reinigungsband, den Lackierbändern und Trockenband. Eine Herausforderung war dabei insbesondere die erreichte Präzision bei der Positionierung der Bauteile.

Trotz der vorangehend aufgezeigten Herausforderungen verlief die Vorhabendurchführung ohne kritische Schwierigkeiten, die eine umfangreichere Anpassung des Prozesses oder der Anlagentechnik erfordert hätten. Dass entsprechende Optimierungen und Anpassungen einzelner Prozesse oder Komponenten durchgeführt werden mussten, war aufgrund des Innovationsgrads des Lackiersystems zu erwarten. Die Anlagenmodifizierungen wurden diesbezüglich im Januar 2018 abgeschlossen.

Hinsichtlich der Bewertung der Vorhabendurchführung gilt es zunächst festzuhalten, dass sich das Verfahrenskonzept auf Basis der bislang erzielten Erkenntnisse bestätigte und insbesondere mit Blick auf die erreichte Ressourceneffizienz neue Maßstäbe setzt. Hervorzuheben ist an dieser Stelle die maßgebliche Reduzierung des Oversprays im Vergleich zu konventionellen Lackierverfahren, was die zentrale Zielstellung des Investitionsvorhabens darstellt. Die nachfolgenden Abbildungen verdeutlichen die erzielte Oversprayreduzierung anhand einer lackierten Kühlergrill-Niere eines Premium-Automobilherstellers. Deutlich wird dabei, dass die ungewollte Beschichtung der Bauteilrückseite nahezu vollständig vermieden werden kann. Die hiermit einhergehende Materialeinsparung basiert auf dem geringen Abstand zwischen Bauteil und Lackierapplikation und dem definierten und zielgerichteten Sprühnebel, wobei diese Einsparungen mit konventionellen Beschichtungssystemen nicht erzielt werden können.



Abbildung 15: Vorderansicht lackierte Kühlergrill-Niere



Abbildung 16: Rückansicht lackierte Kühlergrill-Niere

Um die erreichte Ressourceneffizienz weiter zu verdeutlichen, sind in der nachfolgenden Abbildung zwei lackierte Außenspiegelgehäuse gegenübergestellt. Dabei ist deutlich zu erkennen, dass im konventionellen Lackierprozess die Innenseite des Gehäuses durch den entstehenden Sprühnebel weitestgehend weiß lackiert wurde. Dieses ungewollte Lackieren nicht sichtbarer Oberflächen kann im neuen Prozess nahezu vollständig vermieden werden, sodass der schwarze Kunststoff als Ausgangsmaterial auf der Innenseite kaum Lackmaterial aufweist. Entscheidend dabei ist, dass das neue Lackierverfahren keinen großflächigen Lacknebel erzeugt, sondern den Lack konturnah, gezielt und aus geringer Entfernung auftragen kann. Da die eingesetzten Lacke einen durchschnittlichen Lösemittelanteil in Höhe von 30 Prozent aufweisen, geht mit dieser erheblichen Materialeinsparung darüber hinaus eine wesentliche Reduzierung des Lösemittelverbrauchs einher.



**Abbildung 17: Gegenüberstellung Außenspiegel,
links neuer Lackierprozess, rechts konventionell lackiert**

Eine weitere wesentliche Zielstellung mit Blick auf die Ressourceneffizienz war die angestrebte Reduzierung der Ausschussquoten. Angesichts der gewonnenen Erkenntnisse aus der Serienbeschichtung kann diesbezüglich festgehalten werden, dass die erreichten Ausschussquoten in den untersuchten Produktreihen deutlich unterhalb des Referenzsystems lagen. Grund hierfür sind unter anderem die erzielte Beschichtungsqualität in Kombination mit der eingesetzten Bauteilreinigung bestehend aus einer Trockeneisreinigung sowie einer innovativen Dampfreinigung als ökologische Alternative zum Powerwash-Verfahren, bei welchem die Kunststoffbauteile mit einer meist alkalischen Reinigungslösung beaufschlagt und anschließend gespült werden müssen. Da dieses Verfahren in unserem Haus nicht eingesetzt wird, kann hier zwar keine ökologische Gegenüberstellung durchgeführt werden, zugleich werden aber mit der umgesetzten Reinigung sehr geringe Ausschussquoten bei minimalem Ressourceneinsatz erreicht. Bei komplexen Bauteilen mit hohen Anforderungen an die Beschichtungsqualität kam die technologische Vorteilhaftigkeit des neuen Lackiersystems dabei stärker zu tragen, sodass hier die erreichte Ausschussquotenreduzierung im Vergleich prozentual noch besser ausfiel.

Zielstellung des Investitionsvorhabens war es zusätzlich zur grundsätzlichen Verbesserung der Ressourceneffizienz, die technischen Voraussetzungen zur Realisierung einer piezobasierten Mikrodosierung sowie der InkJet-Technologie zu schaffen. Aus technologischer Sicht, das heißt insbesondere mit Blick auf die realisierte Präzision in den Bereichen Robotertechnik, Anlagensteuerung und Fördersystem, steht dem Einsatz dieser Applikationstechnologien

auf Basis der gewonnenen Erkenntnisse nichts entgegen. Bislang wurden auf der Anlage maskierungsfreie Mehrfarbenlackierungen zu Demonstrations- und Evaluierungszwecken durchgeführt, welche die Einsatzmöglichkeiten des neuen Verfahrens aufzeigten und die technologische Machbarkeit auf einer großtechnischen Anlage bestätigten. In den nachfolgenden Abbildungen sind diesbezüglich zwei Varianten eines Außenspiegelgehäuse dargestellt. In Abbildung 18 erfolgte die maskierungsfreie Mehrfarbenlackierung mittels InkJet-Technologie, Abbildung 19 zeigt die Beschichtungsergebnisse mittels piezobasierter Mikrodosierertechnik. Bei beiden Anwendungen konnte eine hochpräzise und fehlerfreie Beschichtung mit scharfen Konturen auf der Serienanlage nachgewiesen werden.



Abbildung 18: Außenspiegelgehäuse, maskierungsfreie Mehrfarbenlackierung mittels InkJet



Abbildung 19: Außenspiegelgehäuse, maskierungsfreie Mehrfarbenlackierung mittels Piezo-Technologie

Abgesehen von der vorangehend aufgezeigten technologischen Machbarkeit der Applikationssysteme zeigte sich nach Umsetzung des Vorhabens jedoch, dass trotz der erfolgreich beschichteten Demonstratoren konkrete Kundenaufträge im Bereich der Mehrfarbenlackierung bislang ausblieben. Während zum Zeitpunkt der Antragstellung hier bereits konkretes Kundeninteresse von unterschiedlichen Original Equipment Manufacturer (Erstausrüster, kurz OEM) vorlag, stellt sich die aktuelle Marktsituation zur Etablierung der maskierungsfreien Mehrfarbenlackierung deutlich schwieriger dar. Aus heutiger Sicht liegen hierfür unterschiedliche Gründe vor. Zum einen benötigt das Etablieren neuer Lackiertechnologien in der Automobilindustrie aufgrund der langwierigen Freigabeprozesse und Designabstimmungen einen erheblichen zeitlichen Vorlauf. Zum anderen fordern die OEMs bei Designelementen wie der Mehrfarbenlackierung, dass sich die Farbauswahl auf anderen Karosseriebauteilen wiederholt. Das heißt zum Beispiel, dass ein farbiger Markenschriftzug auf einem Außenspiegel ebenfalls auf großvolumigen Außentüren oder Seitenschwellern zu finden sein soll. Die Mehrfarbenlackierung dieser großvolumigen Bauteile mittels InkJet-Technologie oder piezobasierter Mikrodosierung ist mit dem aktuellen Stand der Technik allerdings nicht möglich.

Des Weiteren wird mit Blick auf Mehrfarbenlackierungen von Seiten der OEMs aktuell ein Verfahren angefragt, bei welchem Folien lackiert, zugeschnitten und auf das Bauteil geklebt werden. Anschließend erfolgt der Klarlackauftrag. Dieses Verfahren befindet sich zwar aktuell noch in der Grundlagenuntersuchung, aufgrund der im Investitionsvorhaben erreichten Präzision würde sich die Anlagentechnik jedoch grundsätzlich für das automatisierte Aufkleben der Folien über die Robotik eignen.

Trotz der aktuellen Herausforderung, dass das maskierungsfreie Lackieren nicht in Serienaufträgen angewendet werden konnte, setzt das neue Lackiersystem aufgrund der realisierten Innovationen neue Maßstäbe im Bereich des Lackauftrags. In den nachfolgenden Abschnitten werden diesbezüglich die erfassten Verbrauchswerte des neuen Lackiersystems der Referenzinvestition gegenübergestellt.

C.2 Stoff- und Energiebilanz

Reduzierung des Materialverbrauchs

Die Reduzierung des Materialverbrauchs basiert insbesondere auf der maßgeblichen Reduzierung des Oversprays. Das neue Lackiersystem ermöglicht dabei geringere Abstände zwischen Applikationstechnik und zu beschichtetem Objekt. Da die Objekte des Weiteren einzeln durch den Beschichtungsprozess geführt werden, kann der benötigte Sprühnebel im Vergleich zu konventionellen Lackieranlagen deutlich kleiner gewählt und definierter ausgerichtet werden. In Kombination mit dem konturnahen Abfahren der Oberfläche durch die Robotik war es die zentrale Zielstellung des Investitionsvorhabens, den Overspray erheblich zu reduzieren. Um hier einen quantitativen Vergleich zur Referenzanlage ziehen zu können, wurden für das Referenzprodukt „Außenspiegel“ über eine Chargenfertigung Lackverbrauchsmessungen durchgeführt. Die produktspezifische Taktzeit betrug dabei 35 Sekunden, wobei im Rahmen der Verbrauchsmessung der beiden Anlagen jeweils eine Fertigungscharge mit 600 Außenspiegel lackiert wurde. Während der durchschnittliche Lackeinsatz pro Gehäuse auf der Referenzanlage 35 Gramm betrug, konnte der Verbrauch mit der neuen Anlage auf 15 Gramm pro Bauteil reduziert werden. Diese erhebliche Einsparung entspricht einer Ressourceneffizienzverbesserung im Vergleich zum Stand der Technik um ca. 57 Prozent. Der größere Lackverbrauch beim Stand der Technik in Höhe von 20 Gramm pro Bauteil entfällt dabei insbesondere auf Flächen, die ungewollt beschichtet wurden, beispielsweise die Innenseiten des Gehäuses, sowie auf den erheblich größeren Overspray, der über das Absaug- und Filtersystem aufgenommen wird.

Ein mengenmäßiger Vergleich des Lackeinsatzes auf Jahresbasis für die Gesamtanlagen ist dabei aufgrund der unterschiedlichen Produktmixe erschwert, da die eingesetzte Lackmenge unmittelbar vom Bauteil abhängt und auf der Vergleichsanlage andere Produktgruppen beschichtet werden. Viel mehr zeigt die vorangehende Darstellung anhand eines Referenzprodukts, was für maßgebliche Lackeinsparungen bei gleichen Bedingungen grundsätzlich durch das neue Lackiersystem und die dabei realisierten technischen Innovationen möglich sind.

Darüber hinaus resultiert die Reduzierung des Oversprays unmittelbar in einer längeren Filterstandzeit bei der neuen Anlage. Da die Filter aufgrund des reduzierten Oversprays weniger

Lackpartikel aufnehmen müssen, können die Filtermatten bei vergleichbarer Produktionsmenge länger eingesetzt werden. Auf der Vergleichsanlage erfolgt eine tägliche Filterkontrolle, wobei ca. 18 Quadratmeter Filtervlies pro Tag als Sondermüll entsorgt werden müssen (Filtermaterial und aufgenommener Lack). Auf der neuen Anlagentechnik hingegen konnte die zu entsorgende Vliesmenge auf täglich 6,8 Quadratmeter reduziert werden, was einer Reduzierung von über 60 Prozent entspricht. Gewichtsmessungen des als Sondermüll zu entsorgenden Filtermaterials ergaben dabei eine Reduzierung von 0,8 Tonnen auf 0,3 Tonnen jährlich. Da die Messungen bei Einschichtbetrieb der Anlagen vorgenommen wurden, würden sich die Einsparungen mit zunehmender Produktionsmenge entsprechend erhöhen.

Ressourceneinsparung durch verbesserte Ausschussquote

Ein weiterer zentraler Vorteil der neuen Anlagentechnologie gegenüber konventionellen Beschichtungsprozessen ist die erhebliche Reduzierung der Ausschussquote. Diese Reduzierung basiert auf der höheren Beschichtungsqualität, einer stabilen Prozess- und Anlagensteuerung sowie einer verbesserten Bauteilreinigung mit der Möglichkeit, bei starken Verschmutzungen gezielt den Dampfwascher einzusetzen. Angestrebt wurde im Rahmen der Anlagenauslegung und -konzeption eine Verringerung der Quote von durchschnittlich 9 auf zukünftig ca. 3 Prozent. Da die Ausschussquote bauteilbedingt erheblich schwankt, beispielsweise mit Blick auf die Beschichtungskomplexität sowie die spezifischen Kundenanforderungen, erfolgte die Auswertung auf Basis eines Referenzproduktes. Wie vorangehend bereits hinsichtlich des Lackbedarfs skizziert, wurden hierzu die Außenspiegelgehäuse als Referenzprodukt herangezogen. Bei der untersuchten Fertigungscharge mit 600 Bauteilen zeigte sich dabei, dass die Ausschussquote um ca. 66 Prozent reduziert werden konnte. Während auf der Referenzanlage die Ausschussquote 12 Prozent betrug konnte mit Umsetzung des Vorhabens eine Verringerung auf 4 Prozent realisiert werden, was unter ökologischen Gesichtspunkten von entscheidender Bedeutung ist. Eine Reduzierung der Ausschussquote geht dabei nicht nur mit unmittelbaren Ressourceneinsparungen in den Bereichen Lack, Strom und thermischer Energie einher, sondern verbessert darüber hinaus die Materialeffizienz maßgeblich. Die Ausschussbauteile müssen anschließend sortenrein gesammelt und der externen Verschrottung zugeführt werden.

Zur weiteren Überprüfung sowie der Validierung der erreichten Werte wurden zusätzliche Auswertungen mit einem weiteren Referenzprodukt durchgeführt. Untersucht wurden dabei die Ausschussquoten des nachfolgend dargestellten V-Fußes als Verbindungselement zwischen Außenspiegel und Karosserie.



Abbildung 20: Referenzprodukt V-Fuß

Auf der Referenzanlage wurden 5.213 beschichtete V-FüÙe kontrolliert, wobei davon 302 Stück als Ausschuss dokumentiert wurden. Dies entspricht einer Quote in Höhe von 5,8 Prozent, welche im Vergleich zur Ausschussquote des Außenspiegels aufgrund der niedrigeren Komplexität geringer ausfällt. Im Gegensatz hierzu wurden für das neue Lackiersystem im Zeitraum Januar bis März 2018 10.579 Stück kontrolliert. Bei einer Quote von 1,6 Prozent wurden 174 V-FüÙe als Ausschuss klassifiziert.

Anhand des vorangehenden Vergleichs zwischen den beiden Lackiersystemen lässt sich festhalten, dass mit Umsetzung des Investitionsvorhabens bauteilübergreifend bei unterschiedlichen Komplexitäten erhebliche Verbesserungen der Ausschussquote erzielt werden können, was den ökologischen Stellenwert des Lackiersystems unterstreicht.

Reduzierung des thermischen Energiebedarfs

Die Trocknung unterteilt sich im realisierten Lackiersystem in zwei Teilbereiche: Zwischen den einzelnen Lackierprozessen (Grundierung, Basis- und Klarlack) wird ein Kondensationstrockner mit entfeuchteter Luft eingesetzt, während die Bauteile abschließend durch einen Durchlauftrocknungsprozess bei 80 °C geführt werden. Mit Blick auf das realisierte Lackiersystem ist dabei von entscheidender Bedeutung, dass beide Trocknungsprozesse, beispielsweise mit Blick auf die Trocknungsdauer und Trocknergröße, unmittelbar auf das Lackier- und Bauteilfördersystem abgestimmt sind.

Um diese Einsparung quantifizieren zu können, mussten ganzjährige Verbrauchsmessungen durchgeführt werden. Hintergrund dabei ist, dass der thermische Energiebedarf stark von den Außentemperaturen abhängt. Die energetischen Vorteile des neuen Lackiersystems gegenüber der Referenzanlage zeigten sich dabei insbesondere in den kalten Wintermonaten. Für die Referenzanlage konnte dabei für das Jahr 2018 ein Jahresverbrauch von 33.000 Litern Öl festgestellt werden, was ca. 330.000 Kilowattstunden entspricht. Für das neue Lackiersystem hingegen wurde ein Jahresverbrauch von 205.657 Kilowattstunden erfasst, wo-

bei anstelle von Öl Gas als Energieträger eingesetzt wird. Auf Basis der gemessenen Verbrauchswerte konnte somit eine Reduzierung des thermischen Energiebedarfs um nahezu 40 Prozent nachgewiesen werden. Da die Verbrauchswerte sich darüber hinaus auf einen einschichtigen Anlagenbetrieb beziehen, können die absoluten Energieeinsparungen mit Steigerung der Produktionskapazität durch einen zweischichtigen Anlagenbetrieb zusätzlich gesteigert werden.

Reduzierung des Strombedarfs

Mit Blick auf den jährlichen Strombedarf sind wesentlichen Verbraucher eines Lackiersystems insbesondere das Fördersystem, die Robotik zur Beschichtung der Bauteile sowie die Anlagenperipherie. Angestrebt wurde diesbezüglich, mit Umsetzung der Investitionsmaßnahme trotz der deutlich umfangreichen Beschichtungsrobotik Energieeinsparungen in Höhe von 15 Prozent zu realisieren. Ursächlich für die angestrebten Energieeinsparungen sind der Einsatz energieeffizienter Motoren, eine optimale Abstimmung zwischen Trocknung und Lackierung und somit kontinuierliche Förderprozesse sowie die verbesserte Beschichtungseffizienz, woraus beispielsweise Energieeinsparungen im Bereich der Absaugung realisiert werden können.

Ausgewertet wurde dabei der Strombedarf für das Jahr 2018 für die Referenzanlage sowie für das realisierte Lackiersystem. Im Einschichtbetrieb lag der Strombedarf für die Vergleichsanlage bei ca. 116.085 Kilowattstunden, während für das neue Lackiersystem 84.327 Kilowattstunden ermittelt wurden. Dies entspricht einer Einsparung von ca. 28 Prozent trotz des höheren Automatisierungsgrads bzw. der deutlich komplexeren Anlagenrobotik. Zur Einordnung der Messwerte ist es darüber hinaus wichtig festzuhalten, dass bei den gemessenen Verbrauchswerten die jeweils beschichteten Produkttypen, die Anzahl der beschichteten Bauteile sowie dabei erzielten Gutteile nicht berücksichtigt werden kann. Das heißt, vor dem Hintergrund der nachgewiesenen Reduzierung der Ausschussquote, kann davon ausgegangen werden, dass der Strombedarf bei einem Vergleich pro Bauteil deutlich stärker als die ermittelten 28 Prozent reduziert werden kann.

Die vorangehenden Berechnungen zur Umweltentlastung basieren ausschließlich auf der maßgeblich verbesserten Präzision des Lackierprozesses sowie der gesteigerten Effizienz des Gesamtverfahrens. Die Reduzierung des Lackeinsatzes um über 50 Prozent, die Verbesserung der Ausschussquote um bis zu 66 Prozent sowie die Verringerung des thermischen Energiebedarfs um nahezu 40 Prozent sind dabei unter ökologischen Gesichtspunkten Meilensteine im Bereich der Lackierung und definieren einen neuen Branchenstandard.

Einsatz maskierungsfreie Mehrfarbenlackierung

Mit der Realisierung eines technischen Anlagenkonzepts, welches den Einsatz innovativer und oversprayfreier Applikationstechnologien ermöglicht, wurde darüber hinaus angestrebt, auf eine Maskierung bei Mehrfarbenlackierungen, Verzierungen und Schriftzügen verzichten zu können. Aufgrund der veränderten Marktnachfrage konnten Stand heute die angestrebten Umweltentlastungen aufgrund der fehlenden Serienaufträge noch nicht quantifiziert werden. Die bislang durchgeführten Lackierungen zu Demonstrationszwecken zeigten jedoch, dass das maskierungsfreie Mehrfarbenlackieren technologisch umgesetzt werden kann. Infolgedessen ist davon auszugehen, dass bei entsprechender Nachfrage von Seiten der OEM die angezeigten Entlastungen in Form von zu entsorgenden Maskierungsmaterialien wie Folien oder Abdeckbändern, Lackverlusten auf dem Maskierungsmaterialien und des nicht mehr benötigten zweiten Klarlackauftrags sowie der hierfür notwendigen Prozessenergie realisiert werden können.

C.3 Umweltbilanz

Aufbauend auf den vorangehend dargestellten Umweltentlastungen ist in Tabelle 5 die Umweltbilanz des neuen Lackiersystem gegenüber der Referenzinvestition dargestellt. Wie bereits gezeigt wurde, ist der Lackbedarf als auch die erreichte Ausschussquote stark produktabhängig, was die Darstellung der Umweltbilanz auf Jahresebene erheblich erschwert. Um trotz dieser Schwierigkeit eine Jahresbetrachtung aufzeigen zu können, basiert die Umweltbilanz auf der Annahme, dass jeweils ganzjährig das Referenzprodukt Außenspiegel gefertigt wird. Darüber hinaus ist an dieser Stelle zur Einordnung der Werte wichtig darauf hinzuweisen, dass die Verbesserung der Ausschussquote unmittelbare Auswirkungen auf den thermischen und elektrischen Energiebedarf hat, welche in der Umweltbilanz nicht erfasst werden können. Die energetischen Jahresverbräuche lassen keinen Rückschluss auf die dabei beschichteten Gut- und Ausschussteile zu, sodass die produktbezogenen Einsparungen der Umsetzungsvariante deutlich höher ausfallen, als dies in der Umweltbilanz erkennbar ist. Mit Blick auf die Umweltbilanzen ist an dieser Stelle des Weiteren festzuhalten, dass sämtliche Verbrauchswerte auf einer einschichtigen Anlagenauslastung im Serienbetrieb basieren. Mit Umstellung auf einen Zweischichtbetrieb, welche voraussichtlich zum Jahresende erfolgt, würden sich die Verbrauchswerte voraussichtlich entsprechend verdoppeln.

In der nachfolgenden Tabelle sind die Berechnungsgrundlagen der erstellten Umweltbilanzen dargestellt.

Produktionstage pro Jahr	240 Tage
Produktionszeit pro Tag	8 Stunden
Bauteilgewicht Außenspiegel	274 Gramm
Taktzeit Außenspiegel	35 Sekunden
Emissionsfaktoren ³	
Strom	0,502 kg CO ₂ /kWh
Öl	0,318 kg CO ₂ /kWh
Erdgas	0,247 kg CO ₂ /kWh

Tabelle 4: Berechnungsgrundlagen

³ Quelle: Bayerisches Staatsministerium für Umwelt- und Verbraucherschutz, abrufbar unter:
https://www.umweltpakt.bayern.de/energie_klima/fachwissen/217/berechnung-co2-emissionen

	Lackieranlage Stand der Technik	Lackieranlage Investitionsvorhaben
Lackeinsatz, am Referenzprodukt Außenspiegel		
<i>Lackbedarf pro Bauteil</i>	35 Gramm	15 Gramm
<i>Lackbedarf pro Jahr</i>	6,91 Tonnen	2,96 Tonnen
<i>Davon Lösemittelanteil (30%)</i>	2,07 Tonnen	0,89 Tonnen
<p>Umwelteffekt: Reduzierung des Materialverbrauchs um nahezu 60 Prozent beim Referenzprodukt „Außenspiegel“ im Vergleich zu einer konventionellen Anlagentechnik. Mit der erheblichen Reduzierung des Lackverbrauchs um nahezu 4 Tonnen geht dabei eine maßgebliche Verringerung des Lösemittelsatzes um ca. 1,2 Tonnen einher.</p>		
Ausschussquote, am Referenzprodukt Außenspiegel		
<i>Ausschussquote</i>	12 Prozent	4 Prozent
<i>Ausschuss pro Jahr</i>	23.698 Stück	7.899 Stück
<i>Ausschuss pro Jahr</i>	6,49 Tonnen	2,16 Tonnen
<p>Umwelteffekt: Verbesserung der Ausschussquote um 66 Prozent beim Referenzprodukt „Außenspiegel“, was substantielle Einsparungen entlang der Wertschöpfungskette nach sich zieht.</p>		
Filtermaterial Absaugung		
<i>Entsorgung Filtermaterial pro Tag</i>	18 Quadratmeter	6,8 Quadratmeter
<i>Entsorgung Filtermaterial pro Jahr</i>	800 Kilogramm	300 Kilogramm
<p>Umwelteffekt: Durch die Reduzierung des Oversprays und die gezielte Beschichtung der Bauteile kann die Filterstandzeit der Anlage verlängert werden. Infolgedessen kann die als Sondermüll zu entsorgende Menge an Filtermaterial pro Jahr um ca. 500 Kilogramm verringert werden.</p>		
Energieverbrauch thermisch		
<i>pro Jahr</i>	333.000 Kilowattstunden	205.657 Kilowattstunden
<p>Umwelteffekt: Verringerung des thermischen Energiebedarfs um 124.343 Kilowattstunden. Bei Berücksichtigung der CO₂-Äquivalente von Erdgas und Öl entspricht dies einer Reduzierung klimaschädlicher Treibhausgase in Höhe von ca. 55.097 Kilogramm.</p>		
Energieverbrauch elektrisch		
<i>pro Jahr</i>	116.085 Kilowattstunden	84.327 Kilowattstunden
<p>Umwelteffekt: Reduzierung des Strombedarfs trotz der umfangreicheren Robotik und Anlagenfunktionalität um jährlich 31.758 Kilowattstunden, was einem CO₂-Äquivalent von 15.943 Kilogramm entspricht.</p>		

Tabelle 5: Umweltbilanz auf Basis des Referenzprodukts Außenspiegel

Anhand der vorangehend dargestellten Umweltbilanz werden die erheblichen Einsparpotenziale insbesondere in den Bereichen Ausschussquote, Lackverbrauch sowie hiermit einhergehend des Lösemittelseinsatzes deutlich. Vor dem Hintergrund des angestrebten Zweischichtbetriebs können die angezeigten Einsparungen entsprechend hochkalkuliert werden. Des Weiteren hat sich im Rahmen des Serienbetriebs der Anlage gezeigt, dass durch die Präzision des Lackiersystems weitere ökologische Vorteile erzielt werden können. Die Lackierung des vorangehend bereits aufgezeigten V-Fußes, welcher aus zwei Bauteilen besteht, unterteilte sich beim Stand der Technik in zwei separate Beschichtungsprozesse. Mit Umsetzung des Investitionsvorhabens kann der bereits montierte V-Fuß hingegen in einem Beschichtungsprozess lackiert werden, da innenliegende Flächen gezielt beschichtet werden können. Infolgedessen konnte die benötigte Taktzeit nicht nur von 55 Sekunden auf 28 Sekunden reduziert werden, sondern darüber konnte ein Beschichtungsprozess vollständig eingespart werden.

C.4 Wirtschaftlichkeitsanalyse

Wie vorangehend bereits skizziert, soll auf Grundlage des aktuellen Auftragsbestands das neue Lackiersystem ab 2019 im Zweischichtbetrieb unter Vollauslastung betrieben werden. Unter Berücksichtigung der Kosten für Material, Personal, Wartung und Instandhaltung etc. wird dabei ein jährlicher Deckungsbeitrag der Anlage in Höhe von 370.000 Euro angestrebt. Die Investitionskosten der Lackieranlage belaufen sich auf 2.326.935 Euro. Auf dieser Basis ist in der nachfolgenden Tabelle eine Amortisationsrechnung unter Berücksichtigung der erhaltenen Zuwendung aus dem Umweltinnovationsprogramm aufgezeigt.

Amortisationsrechnung	
Anlagenbezogener Deckungsbeitrag	370.000 Euro
- Kapitalkosten (4 %)	93.077 Euro
= anlagenbezogener Gewinn p. a.	276.923 Euro
Investitionskosten	2.326.935 Euro
- Zuwendung aus dem UIP	533.708 Euro
= Tatsächliche Investitionskosten	1.793.227 Euro
Amortisationszeit	6,5 Jahre

Tabelle 6: Wirtschaftlichkeitsbetrachtung Investitionsvorhaben

Anzumerken ist an dieser Stelle, dass die aufgezeigten Umweltentlastungen auch unmittelbar zu wirtschaftlichen Vorteilen gegenüber konventionellen Anlagentechniken führen. So ist die Reduzierung des Lackeinsatzes beispielsweise nicht nur unter ökologischen Gesichtspunkten wichtig, sondern ist bei einem durchschnittlichen Einkaufspreis in Höhe von ca. 19 Euro pro

Kilogramm auch wirtschaftlich von enormer Bedeutung. Gleiches gilt diesbezüglich ebenfalls für die aufgezeigten Strom- und Öleinsparungen.

Des Weiteren kann im Vergleich zu konventionellen Lackieranlagen die gesamte Peripherie, unter anderem das Abluftkonzept sowie die thermische Nachverbrennung, effizienter und somit kostengünstiger ausgelegt werden. Mit Blick auf die Anlagenperipherie ist dabei ebenfalls entscheidend, dass in dem neuartigen Anlagenkonzept vollständig auf eine nasschemische Bauteilreinigung verzichtet werden kann. Eingesetzt wird im neuen Anlagenkonzept erstmals ein Dampfwascher in Kombination mit einer Trockeneisreinigung. Chemische Reinigungsmittel werden bei dieser Anlagenkonzeptionierung nicht benötigt, wobei darüber hinaus nur geringe Wassermengen eingesetzt werden müssen. Die Abwasseraufbereitung kann infolgedessen deutlich wirtschaftlicher bei geringeren Anschaffungskosten betrieben werden. Ein weiterer wesentlicher Vorteil des innovativen Lackiersystems ist die kompakte Bauweise sowie die hiermit einhergehende Platzersparnis. Durch den Einsatz einer vereinzelter Teileförderung und die hierauf abgestimmten Komponenten Reinigung und Trocknung kann der benötigte Platzbedarf auf ca. ein Drittel des Stands der Technik reduziert werden.

Hinsichtlich der Wirtschaftlichkeitsbetrachtung des Investitionsvorhabens gilt es abschließend festzuhalten, dass die Möglichkeit, maskierungsfrei Mehrfarbenlackierungen und Schriftzüge auftragen zu können, von wesentlicher Bedeutung ist. Mit Blick auf die zunehmende Marktanforderung, Fahrzeuge individuell zu gestalten und in Form von mehrfarbigen Lackierungen voneinander abzugrenzen, wird das maskierungsfreie Lackieren zukünftig zunehmend wichtiger für die Branche. Dabei können wir mit der erfolgreichen Umsetzung des Vorhabens eine Vorreiterrolle in diesem Bereich einnehmen und frühzeitig Erfahrungswerte und Know-how aufbauen. Grundsätzlich ermöglicht das neuartige Anlagenkonzept diesbezüglich eine hohe Flexibilität. Die innovativen Applikationstechnologien können zwar für das maskierungsfreie Lackieren eingesetzt werden, zugleich ermöglicht aber bereits die hohe Präzision der Automatisierungstechnik die erhebliche Reduzierung des Oversprays. Demzufolge kann die Applikationstechnik produkt- bzw. auftragsbezogen ausgewählt werden, so dass sowohl bei Ein- als auch bei Mehrfarbenlackierungen immense Umweltentlastungen erzielt werden können.

C.5 Technischer Vergleich zu konventionellen Verfahren

Die zentrale Herausforderung und das größte Optimierungspotenzial der Lackierbranche liegen in der grundsätzlich erreichten Ressourceneffizienz des Beschichtungsprozesses. Dabei wurde im Rahmen des Investitionsvorhabens eine hochpräzise Lackierung realisiert, welche hinsichtlich der erzielten Materialeffizienz neue Branchenmaßstäbe setzt. Die erreichte Genauigkeit des Industrieroboters hinsichtlich Bahnführung, Bewegungsablauf und Steuerung ermöglicht in Kombination mit der innovativen Teileförderung des Weiteren den erstmaligen großtechnischen Einsatz der piezobasierten Mikrodosierung sowie des InkJet-Verfahrens. Grundlage hierfür ist das definierte Steuern des Industrieroboters entlang der Oberflächenkontur des Bauteils in geringem Abstand. Auf Basis dieses innovativen Technologiefortschritts kann der Einsatz dieser hoch präzisen und effizienten Lackierverfahren erstmals in einer großtechnischen Anlage realisiert werden. Dabei zeigt die Umsetzung des Investitionsvorhabens, wie Innovationen aus der Grundlagenforschung über praxisnahe Entwicklungsvorhaben in erstmalige Anwendungen der Industrie transportiert werden.

Darüber hinaus wurde im Rahmen des Investitionsvorhabens die Umsetzung eines neuartigen Dampfwaschers realisiert. Dieser ermöglicht in Kombination mit einer Trockeneisreinigung den vollständigen Verzicht auf nasschemische Verfahren. Die Energieeffizienz kann dabei im Vergleich zum Stand der Technik maßgeblich verbessert werden, wobei des Weiteren auf chemische Entfettungs- oder Reinigungsmedien verzichtet werden kann. In Kombination mit optimal auf das Verfahren ausgelegten Fördertechniken und Trocknungsprozessen konnte dabei ein hoch innovatives Lackiersystem realisiert werden, welches als technologisches Demonstrationsvorhaben Optimierungspotenziale in der Lackierbranche aufzeigt.

D. Übertragbarkeit

D.1 Erfahrungen aus der Praxiseinführung

Zum aktuellen Zeitpunkt gilt es hinsichtlich der Erfahrungen aus der Praxiseinführung festzuhalten, dass das Lackiersystem nach den durchgeführten anlagenseitigen Optimierungen äußerst stabil läuft, was sich auch in der erheblich reduzierten Ausschussquote widerspiegelt. Die angestrebten Umweltbelastungen bestätigten sich bislang bzw. konnten zum Teil sogar übertroffen werden. Die im Rahmen der Inbetriebnahme aufgetretenen Schwierigkeiten, beispielsweise in Form von Bauteilkollisionen bedingt durch eine fehlerhafte Anlagenprogrammierung oder ungenügenden Beschichtungsergebnissen aufgrund der skizzierten Problemstellungen im Bereich der Lackförderung, waren ohne konzeptionelle Anpassungen des Anlagenkonzepts zu beheben. Bei der erfolgten Umstellung auf Zweischichtbetrieb kam es anschließend zu keinen weiteren Schwierigkeiten. Die angestrebte Volllastung der Anlage ab 2019 kann somit aus technischer Sicht zum heutigen Zeitpunkt wie geplant realisiert werden.

Hinsichtlich der Einführung der neuartigen Applikationstechniken galt es, die Aufnahmepräzision der Teileförderung zu optimieren. Eine gleichbleibende und präzise Aufnahme und Ausrichtung der Bauteile auf dem Fördersystem ist für den Einsatz der Technologien von wesentlicher Bedeutung. Nach der erfolgten Optimierung traten keine weiteren technischen Problemstellungen auf. Mit der piezobasierten Mikrodosiertechnologie sowie die InkJet-Technologie lassen sich präzise Linien, Punkte oder Logos in Mehrfarbenlackierungen ohne Lackverluste und Maskierungsmaterial auftragen. Infolgedessen können zukünftig personalisierte Beschichtungen automatisiert und umweltschonend realisiert werden. Dabei ging der erstmaligen großtechnischen Umsetzung dieses Lackiersystems ein Forschungsprojekt in Kooperation mit dem Fraunhofer Institut für Produktionstechnik und Automatisierung voraus, für welches beide Kooperationspartner mit dem Deutschen Rohstoffeffizienz-Preis 2017 des Bundesministeriums für Wirtschaft und Energie geehrt wurden. Für eine großflächige Anwendung sind diese Technologien aufgrund der geringen Flächenleistung erwartungsgemäß Stand heute noch nicht geeignet.

D.2 Modellcharakter und Übertragbarkeit

Der Einsatzbereich des realisierten neuartigen Verfahrens wurde bislang auf die Beschichtung von Kunststoffteilen der Automobilindustrie bezogen (z. B. Außenspiegelgehäuse). Grundsätzlich steht den eingesetzten Technologien und Anlagenkomponenten aber ein deutlich breiterer Anwendungsbereich offen. Während das präzise Lackierverfahren grundsätzlich für zahlreiche Bereiche in Klein- und Mittelserien eingesetzt werden kann, liegt es aufgrund der bislang erreichten Flächenleistung der neuartigen Applikationssysteme nahe, diese

Technologien für Schriftzüge, Linien, kleinere andersfarbige Komponenten und Sonderfertigungen einzusetzen. Mit weiteren Entwicklungsarbeiten in diesem Bereich könnte das Lackiersystem zukünftig auch auf größere Stückzahlen adaptiert werden. Die Kommunikation in diesem Bereich findet hauptsächlich über das Fraunhofer Institut für Produktionstechnik und Automatisierung statt, welches in der Branche die neu aufgezeigten Möglichkeiten dargestellt. Dabei wurde das gemeinsame Kooperationsprojekt mit dem Deutschen Rohstoffeffizienz-Preis geehrt, was für die Kommunikation unterstützend verwendet werden kann.

Zusätzlich zu den Applikationstechnologien ist es des Weiteren nicht nur möglich, das Gesamtverfahren auf weitere Produktreihen, Branchen und Anwendungsfelder zu übertragen, sondern darüber hinaus auch einzelne Anlagenkomponenten in bereits bestehende Lackiersysteme zu übernehmen. Denkbar wäre dies z. B. für den innovativen Reinigungsvorgang sowie das optimierte Flurfördersystem. Das realisierte Vorhaben soll dabei hinsichtlich der erreichten Umweltentlastungen als Referenzobjekt und Maßstab für die Marktteilnehmer aber auch für das eigene Unternehmen dienen und Anreize zur Erschließung von Optimierungspotenzialen setzen. Kommuniziert wurden die erzielten Ergebnisse bislang vorwiegend im direkten Kontakt mit Kunden und Interessenten, wobei zukünftig darüber hinaus die Darstellung auf Messen angestrebt wird. Grundsätzlich ist dabei von entscheidender Bedeutung, dass die Lackindustrie ein wesentlicher wirtschaftlicher Faktor in Deutschland. Der Verband der deutschen Lack- und Druckfarbenindustrie ermittelte für das Jahr 2018 eine inländische Produktionsmenge von 478.752 Tonnen für den Bereich lösemittelhaltiger Lacke. Infolgedessen bestehen aus heutiger Sicht zahlreiche Übertragungsmöglichkeiten unseres Investitionsvorhabens. Beispielhaft zu nennen wären diesbezüglich die folgenden Potenziale: die Anpassung eigener Anlagen, der Einsatz des Verfahrens in anderen Branchen und Marktsegmenten sowie die Ableitung weiterer Forschungsvorhaben und Technologieentwicklungen auf Grundlage der gewonnenen Praxisdaten und -erfahrungen.

E. Zusammenfassung / Summary

Vor dem Hintergrund globaler Entwicklungen wie weltweiter Ressourcenverknappung und Klimawandel stellt der effiziente Einsatz von Energie und Material aus Sicht der Produktionsforschung eine besondere Herausforderung dar. Dabei steht die Lackierbranche vor der zentralen Herausforderung, mit Blick auf die angestrebte Ressourceneffizienz den Overspray möglichst zu minimieren. Vor diesem Hintergrund wurde im Rahmen des Investitionsvorhabens ein Lackiersystem realisiert, welches aus ökologischer Sicht einen maßgeblichen Entwicklungsschritt für die Branche darstellt. Aufgrund der Präzision des Lackierverfahrens und des Applikationssystems kann dabei zum einen grundsätzlich das Overspray erheblich reduziert werden und zum anderen wurde erstmalig die technologische Voraussetzung geschaffen, das InkJet-Verfahren bzw. die piezobasierte Mikrodosiertechnik im Bereich der Industrielackierung einzusetzen, welche eine vollständig oversprayfreie Lackierung ermöglichen. Die marktseitigen Tendenzen im Bereich der Mehrfarbenlackierungen entwickeln sich zwar aktuell nicht wie ursprünglich geplant, zugleich bietet das realisierte Lackiersystem aber eine maximale Flexibilität und technische Funktionalität, um auf zukünftige Kundenanfragen und Branchenentwicklungen reagieren zu können.

Mit Blick auf die Material- und Ressourceneffizienz des Gesamtprozesses ist darüber hinaus von entscheidender Bedeutung, dass unabhängig von Beschichtungskomplexität der Bauteile erhebliche Verbesserungen im Bereich der Ausschussquoten realisiert werden konnten. Die erzielten Verbesserungen haben dabei unmittelbare ökologische Auswirkungen auf die gesamte Effizienz der Wertschöpfungskette, da der Ressourceneinsatz für Ausschussware vollständig entfällt.

An dieser Stelle gilt es festzuhalten, dass die Umsetzung des Investitionsvorhabens hinsichtlich der erreichten Ressourceneffizienz im Lackierprozess zahlreiche Optimierungspotenziale im Vergleich zu konventionellen Lackieranlagen aufzeigt. In Kombination mit der erzielten Anlagenfunktionalität definiert das realisierte Lackiersystem dabei unter ökologischen und ökonomischen Gesichtspunkten einen neuen Branchenmaßstab.

With global developments such as a worldwide depletion of resources and climate change, the efficient use of energy and materials represents a special challenge from the perspective of production research. Here, the coating industry is faced with the central challenge of reducing overspray as much as possible in order to achieve the desired resource efficiency. Against this background, a highly precise coating system was implemented as part of the investment plans, which represents a major ecological evolution for the entire industry. On the one hand, the precision of the coating process and the application system allows for a significant overall reduction of overspray. On the other hand, this system has, for the first time, created the technological basis for implementing inkjet processes and piezo-based microdosing in the field of industrial coating, which would allow for zero overspray coating. While the market tendencies in the area of multi-color coating are currently not trending the way originally envisioned, the coating system we implemented offers maximum flexibility and the technological functionality needed to react to future customer requests and developments within the industry.

Beyond that, a crucial factor regarding the efficiency of materials and resources within the overall process is that, regardless of the coating complexity level of the parts, significant improvements were made concerning rejection rates. The improvements achieved here have an immediate ecological effect on the overall efficiency of the value chain, as the resource input for rejected goods is completely eliminated.

Here, it is important to note that the implementation of the investment plans has demonstrated a high number of opportunities for optimization with regard to the resource efficiency achieved in comparison to conventional coating lines. In combination with the line functionality that was achieved, the implemented coating system has set a new industry standard in terms of its ecological and economical aspects.

F. Literatur

Mit Blick auf die realisierten Möglichkeiten zur oversprayarmen Beschichtung und maskierungsfreien Lackierung sind im Folgenden Artikel und Veröffentlichungen genannt, welche den technologischen Hintergrund und den bisherigen Stand der Technik in der Industrie beleuchten.

Fraunhofer Institut für Produktionstechnik und Automatisierung IPA und Hertfelder Lackierwerk GmbH: *Automatisierte maskierungsfreie Zweifarbenlackierung für Spiegelgehäuse*, 2016, abrufbar unter: <https://www.dbu.de/OPAC/ab/DBU-Abschlussbericht-AZ-31404.pdf>.

Innovationsallianz Green Carbody Technologies – InnoCaT: *Ergebnisse Broschüre der Innovationsallianz*, 2013, abrufbar unter: www.greencarbody.de.

LCS Life Cycle Simulation GmbH: *Lackierverfahren ökonomisch und ökologisch optimieren*, Kongress 2014, abrufbar unter: <https://www.lcslcs.de/publikationen.html>.

Tiedje, Oliver: *Randscharfe Technologien sicher und effizient einsetzen*, besser lackieren. Nr. 4 (2012).

Tiedje, Oliver und Ye, Qiaoyan: *Oversprayarme Beschichtung – Aktuelle Forschung zur Ressourcen-Effizienz*, Journal für Oberflächentechnik, Volume 52 (2012), Seiten 28-30.