

BEWILLIGUNGSEMPFÄNGER



Abschlussbericht zum Förderprojekt

***Hochpräzise Regelungstechnik und Technologie für die
Temperierung und HV-Anwendung in der Luftaufbereitung
zur material- und energieeffizienten Lackapplikation im
Bereich der Industrie- und Automobillackierung sowie der
allgemeinen Oberflächenveredelung
- PreciseAirCoating -***

Art des Berichtes:

Abschlussbericht zum Vorhaben mit dem Aktenzeichen 33518/01-21/2,
gefördert durch die Deutsche Bundesstiftung Umwelt

gefördert durch



Deutsche
Bundesstiftung Umwelt

www.dbu.de

Verfasser: Thomas Mayer

Altheim, 30.08.2019

06/02		Projektkennblatt der Deutschen Bundesstiftung Umwelt			
Az	33581/01	Referat	21/2	Fördersumme	188.008 €
Antragstitel		Hochpräzise Regelungstechnik und Technologie für die Temperierung und HV-Anwendung in der Luftaufbereitung zur material- und energieeffizienten Lackapplikation im Bereich der Industrie- und Automobillackierung sowie der allgemeinen Oberflächenveredelung			
Stichworte					
Laufzeit	Projektbeginn	Projektende	Projektphase(n)		
29 Monate	19.12.2016				
Zwischenberichte	halbjährlich				
Bewilligungsempfänger	ensutec Products GmbH Keltenstraße 13 88499 Altheim			Tel	+49 7371 96664-0
				Fax	+49 7371 96664-29
				Projektleitung Thomas Mayer	
			Bearbeiter		
Kooperationspartner	Hochschule Esslingen Kanalstraße 33 73728 Esslingen am Neckar				
Zielsetzung und Anlass des Vorhabens					
<p>Der Bedarf der Industrie nach Ansätzen zur Verbesserung der Lackiertechnologie ist bereichsübergreifend hoch, da teure Ressourcen in Form hochkomplexer polymerer Lacksysteme verarbeitet werden. Jeder Prozentpunkt eingesparter Lack verringert nachhaltig die CO₂-Emission, die Emission von VOCs (bei lösemittelhaltigen Lacken) und den Rohstoffeinsatz und verbessert somit die Wirtschaftlichkeit in den einzelnen Unternehmen.</p> <p>Im Projekt „PreciseAirCoating“ wird ein neuartiger Ansatz zur Effizienzsteigerung und Qualitätsverbesserung von bei Lackier- und Beschichtungsvorgängen grundlegend untersucht. und ein skalierbares, für unterschiedlichste Aufgabenstellungen adaptierbares System entwickelt werden, um die Lackeffizienz merklich zu steigern.</p>					
Darstellung der Arbeitsschritte und der angewandten Methoden					
<p>Der Lackierprozess soll im Hinblick auf unterschiedlichste Prozessparameter untersucht werden, um die Reproduzierbarkeit bislang nur in punktuellen Versuchen erhaltener Ergebnisse sicherzustellen und postulierte Kausalitätsbeziehungen zwischen statischen Ladungseffekten und der Beschichtungs- bzw. Lackierqualität empirisch zu bestätigen.</p> <p>Die erhobenen Daten werden dann zur Ableitung entsprechender Steuerungs- und Regelungskonzepte für ein einfach in Lackieranlagen integrierbares System verwendet. Mittels einer mehrstufigen Aufbereitungseinheit für die Druckluft können Prozessparameter wie Luftdruck, statische Ladung der Luft sowie Temperatur hochpräzise geregelt und so ein optimales Lackierergebnis erzielt werden.</p>					
Deutsche Bundesstiftung Umwelt • An der Bornau 2 • 49090 Osnabrück • Tel 0541/9633-0 • Fax 0541/9633-190 • http://www.dbu.de					

Ergebnisse und Diskussion

Im Rahmen des Projekts konnten zunächst die Grundannahmen zur durch das System realisierbaren Energieeinsparung bestätigt und spezifischen Einflussparametern auch quantitativ zugeordnet werden. Insbesondere zeigt sich eine direkte Korrelation zwischen der Absenkung der Feldstärke innerhalb der zerstäubten Partikel und Effizienzgewinnen in der Lackapplikation.

Diese Erkenntnisse konnten im weiteren Projektverlauf bestätigt und in konkrete Ansätze zur Optimierung der Konstruktion sowie der Steuerung des Systems „airmatic“ überführt werden. Auch eine automatisierte Regelung der Prozessparameter konnte im Rahmen des Entwicklungsprojekts erfolgreich realisiert werden. Diese Systeme wurden nicht nur im Technikum der Projektpartner untersucht, sondern werden und wurden nun auch in den Markt eingeführt. Die Projektziele wurden damit vollumfänglich erreicht.

Obwohl für einfachere Anwendungen wie insbesondere die Öltröpfchenzerstäubung im Bereich der Minimalmengenschmierung die Korrelation von Effizienzsteigerung und Hochspannungsbehandlung demonstriert werden konnte, wäre eine noch genauere auch ortsauflösende Vermessung der elektrostatischen Felder während der Zerstäubung wünschenswert. Erste wissenschaftliche Arbeiten zu diesem im Rahmen von Abschlussarbeiten sind mit Beginn des Q4 2019 an der Hochschule Esslingen als Weiterführung des Projekts auf eigene Kosten geplant.

Zur quantitativen und ortsauflösenden Vermessung der Felder auch im Bereich der Lackzerstäubung sind umfangreiche Entwicklungsarbeiten auch zur Realisierung speziell angepassten Messequipments notwendig.

Öffentlichkeitsarbeit und Präsentation

Die öffentliche Präsentation der Ergebnisse wurde bereits durch die Markteinführung des vollständig überarbeiteten Systems sowie durch die Präsentation der Projektergebnisse in Fachgremien, insbesondere im Fachverband der Deutschen Forschungsgesellschaft für Oberflächenbeschichtungen begonnen. Die Ergebnisse konnten auch in Kooperation mit Lackherstellern in deren Technikum bestätigt und auf entsprechenden Messen sowie bei Treffen mit Kunden der Lackhersteller aus der Lackierbranche dargestellt werden.

Fazit

Im Ergebnis konnten nicht nur die Grundannahmen des Projekts für vielfältige Anwendungen bei Lackierbetrieben in unterschiedlichen Bereichen und bei diversen Verfahren, bei Zerstäubungsvorgängen mit Öl sowie bei Beschichtungsvorgängen Effizienzsteigerungen von durchschnittlich 15 % erzielt werden. Die Oberflächengüte der beschichteten Oberflächen konnte ebenfalls maßgeblich verbessert und die Reinigungsintensität der verwendeten Anlagen vermindert werden.

Inhaltsverzeichnis

PROJEKTKENNBLETT	1
1. ZUSAMMENFASSUNG	6
2. EINLEITUNG	7
3. ENTWICKLUNGSARBEITEN UND ERREICHTE ERGEBNISSE	10
Ergebnisse der Vorversuche als Darstellung des IST- Zustands bei Projektstart	10
Projektkonzeption und Projektplanung	12
Aufbau einer Demonstratoranlage	13
Umfassende Analyse der Lackierleistung unter Berücksichtigung der Luftmengen sowie des Zerstäubungsverhaltens	14
Ergebnisse	16
Übertragung der Ergebnisse der Demonstrationsanlage auf weitere Anlagen und Versuchsreihen	19
Validierung der Ergebnisse im Technikum eines Forschungsinstituts	19
Untersuchung eines Systems zur Minimalmengenschmierung mit Ölen in zerspanenden Prozessen	20
Weiterführende Versuche im Technikum: Reproduktion der Ergebnisse der Demonstrationsanlage	22
Weitere Untersuchungen an unterschiedlichen Prozessen in der Praxis.....	25
Weiterentwicklung des innovativen airmatic- Systems	26
Modifikation des Systemaufbaus	26
Entwicklung einer neuartigen Regelungstechnologie	28
4. FAZIT	29
5. DANKSAGUNG	30

Verzeichnis von Bildern, Zeichnungen, Grafiken und Tabellen

Abbildungsverzeichnis:

Abbildung 1:	Mikroskopische Untersuchung der Homogenität der Lack-Schichtdicke im Vergleich zwischen einer Lackierung mit normaler Druckluft (oben) und mit airmatic-System (unten). Die Schichtbeauftragung wurde mittels eines Hochrotationszerstäubers ESTA durchgeführt.	8
Abbildung 2:	Steigerung des Auftragswirkungsgrades und somit der Lack-Schichtdicke im Vergleich zwischen einer Lackierung mit normaler Druckluft (bis zum 7.10.) und mit dem airmatic-System. Die Schichtbeauftragung wurde mittels Becherpistolen mit Hand durchgeführt. Durch die Inbetriebnahme zeigten sich ein reduzierter Overspray und eine deutlich erhöhte Schichtbeauftragung bei gleichen Prozesseinstellungen (deutliche Abweichung der Schichtdicke über den oberen Grenzwert (OG)). In Folge musste der Luftdruck zur Lackapplikation reduziert werden, wodurch auch der Materialeinsatz verringert werden konnte, um wieder gleiche Schichtdicken wie vor der airmatic-Installation zu erreichen.9	9
Abbildung 3:	Ergebnisse der Versuchsreihen mit der Zerstäubung von Öltröpfchen – 37 (blau, 39(orange): Ohne Airmatic; 49, 61, 63: Mit airmatic. Klar ersichtlich ist die Verlagerung der Durchmesser-Verteilung hin zu kleineren Partikeldurchmessern	12
Abbildung 4:	Neu aufgebautes Versuchssystem der Hochspannungseinheit EMP 2.1	13
Abbildung 5:	Aufbau der Demonstrationsanlagen im Technikum von Bix (links) und am IPA (rechts)	14
Abbildung 6:	Roboterapplikatoren der Demonstrationsanlage im Technikum von Bix (links) und am IPA (rechts)	14
Abbildung 7:	Verwendete Objektträger mit Kunststoff (links) und Metall(rechts)- Objekten.....	15
Abbildung 8:	Radiale Tröpfchengrößenverteilung	16
Abbildung 9:	Darstellung der mittleren Schichtdicke in Abhängigkeit der Achsposition	17
Abbildung 10:	Kunststoff-Teil ▪ ohne Airmatic ▪ aktive Airmatic ; Metall-Teil ▪ ohne Airmatic ▪ aktive Airmatic	17
Abbildung 11:	Direkter Vergleich der Lackiererergebnisse in Demonstrationsanlage mit & ohne airmatic-System (grafische Darstellung).....	18
Abbildung 12:	Darstellung der Mittleren Partikeldichte in Abhängigkeit des Partikeldurchmessers einer Minimalmengenschmierung. Durch die Integration des airmatic- Systems (orange, 34: ein EMP- System, grau, 45: zwei EMP- Systeme) kann die Partikelanzahl deutlich gesteigert werden.	21
Abbildung 13:	Darstellung der Ölmengendichte in Abhängigkeit des Partikeldurchmessers. Die übertragene Ölmenge kann durch die Absenkung der Feldkräfte um ca. 13,6% um ca. 13% erhöht werden.....	21
Abbildung 14:	Reproduktion der Versuche auf Demonstrationsanlage, im Technikum des IPA: Darstellung DV 90.....	23
Abbildung 15:	Untersuchung des Einflusses unterschiedlicher Luftkappen auf die Lackapplikation – Dv 50	23
Abbildung 16:	Untersuchung des Einflusses unterschiedlicher Luftkappen auf die Lackapplikation – Dv 90	24
Abbildung 17:	Untersuchung des Einflusses unterschiedlicher Hornluftmengen auf die Lackapplikation – Dv 50.....	24
Abbildung 18:	Untersuchung des Einflusses unterschiedlicher Luftkappen auf die Lackapplikation – Dv 90	25
Abbildung 19:	Detailansicht des Heizsystems nach Überarbeitung: Steuerung mit 35 °C Zieltemperatur, der Hochspannungseinheit nachgeschaltetes Heizsystem	27
Abbildung 20:	Gesamtansicht des Systems. Heizsystem ist dem Hochspannungs-System nachgeschaltet	27

Tabellenverzeichnis:

Tabelle 1: Übersicht über Versuchsparameter der im Technikum des IPA durchgeführten Versuche. 19

1. Zusammenfassung

Der Bedarf der Industrie nach Ansätzen zur Verbesserung der Lackiertechnologie ist bereichsübergreifend hoch, da teure Ressourcen in Form hochkomplexer polymerer Lacksysteme verarbeitet werden. Jeder Prozentpunkt eingesparter Lack verringert nachhaltig die CO₂-Emission, die Emission von VOCs (bei lösemittelhaltigen Lacken) und den Rohstoffeinsatz und verbessert somit die Wirtschaftlichkeit in den einzelnen Unternehmen.

Im Projekt „PreciseAirCoating“ wurde ein neuartiger Ansatz zur Effizienzsteigerung und Qualitätsverbesserung von bei Lackier- und Beschichtungsvorgängen grundlegend untersucht. Aufbauend auf einer grundlegenden Erforschung des Einflusses unterschiedlicher Prozessparameter im Allgemeinen und den Einfluss statischer Ladungseffekte im Speziellen auf die Effizienz von Lackier- und Beschichtungsvorgängen wurde dann ein skalierbares, für unterschiedlichste Aufgabenstellungen adaptierbares System entwickelt, welches einfach in Lackieranlagen integrierbar ist und die Lackeffizienz merklich steigert.

Die Realisierung dieser Ergebnisse konnte erreicht werden durch die Kombination zweier Lösungsansätze:

1. In umfassenden Grundlagenuntersuchungen wurde der Lackierprozess zunächst im Hinblick auf unterschiedlichste Prozessparameter untersucht, um die Reproduzierbarkeit bislang nur in punktuellen Versuchen erhaltener Ergebnisse sicherzustellen und postulierte Kausalitätsbeziehungen zwischen statischen Ladungseffekten und der Beschichtungs- bzw. Lackierqualität empirisch zu bestätigen.
2. Die in den Grundlagenuntersuchungen erhobenen Daten wurden zur Ableitung entsprechender Steuerungs- und Regelungskonzepte für ein einfach in Lackieranlagen integrierbares System verwendet. Mittels einer mehrstufigen Aufbereitungseinheit für die Druckluft können Prozessparameter wie Luftdruck, statische Ladung der Luft sowie Temperatur hochpräzise geregelt und so ein optimales Lackierergebnis erzielt werden.

Im Ergebnis konnten für vielfältige Anwendungen bei Lackierbetrieben in unterschiedlichen Bereichen und bei diversen Verfahren, wie z. B. bei Zerstäubungsvorgängen mit Öl, Effizienzsteigerungen von durchschnittlich 15 % erzielt werden. Die Oberflächengüte der beschichteten Oberflächen konnte ebenfalls maßgeblich verbessert und die Reinigungsintensität der verwendeten Anlagen vermindert werden.

2. Einleitung

Die Firma ensutec vertreibt ein in den letzten Jahren entwickeltes Gerät zur Aufbereitung von Druckluft, mit dem die Applikationsprozesse beim Lackieren deutlich verbessert werden können. Diese unter dem Namen "airmatic" angebotene Lösung wird als Baugruppe zwischen die Druckluftversorgung und die Lackierpistole in den Druckluftstrang integriert. Mithilfe einer ionisierenden Zerstäuberdruckluft sowie einer Druckluffterwärmung und einer definierten Filterung kann der Auftragswirkungsgrad extrem gesteigert werden. Overspray wird so reduziert und nachgewiesen sind typischerweise 10 % Lackeinsparung, aber auch Einsparung an Druckluft, da z. B. mit reduziertem Zerstäuberdruck gearbeitet werden kann. Applikationen sind für alle gängigen Lacke (UV-, Wasser-, Lösemittel- oder Pulverlacke) möglich.

Die bisherigen Erfahrungen mit dem System zeigen, dass wesentlich höhere Einsparungen möglich wären, wenn die Prozesstechnik zur Aufbereitung der Druckluft eine präzise Regelung der Temperierung und der Hochspannungseinbringung ermöglichen würde. An diesem Punkt setzt das vorgeschlagene Projekt an. Es sollen die grundlegenden Regelprozesse untersucht und besser verstanden werden und dann in eine optimierte Anlagentechnik überführt werden.

Der Bedarf der Industrie nach verbesserten Lackiertechnologien ist in vielen Bereichen nach wie vor hoch, da teure Ressourcen in Form hochkomplexer polymerer Lacksysteme verarbeitet werden. Jeder Prozentpunkt eingesparter Lack verringert nachhaltig die CO₂-Emission, die Emission von VOCs (bei lösemittelhaltigen Lacken) und den Rohstoffeinsatz und verbessert somit die Wirtschaftlichkeit in den einzelnen Unternehmen.

Daher besteht ein hohes Interesse an speziellen Technologien, um speziell bei bestehenden Prozessen und Anlagen eine Verbesserung zu erreichen. Die aktuelle Technologie der Firma ensutec wird von vielen großen Herstellern und Anwendern von Lackiertechnologien genutzt. Mögliche Anwendungsbereiche gehen von der Luft-unterstützten hydraulischen Zerstäubung, über konventionell luftzerstäubende Pistolen bis hin zu HVLP, ESTA, Hochrotationszerstäubern, Handapplikationsgeräte (Pistolen), Automatanlagen sowie Roboterlackieranlagen und Flächenautomaten. Das System ist einfach in bestehende Anlagen nachrüstbar und umfasst verschiedenste Anwendungsmöglichkeiten: Flüssiglackierung (Hydro-, Lösemittel-, UV-Lacke etc.), Pulverbeschichtung, Klebstoffauftrag, Trennmittelsprühen, Emaillieren, Industrie-Anwendungen, Karosseriereparaturalackierung, Möbel- und Holz-Lackierung, Kunststoffe der Automobilzulieferer sowie Lederbeschichtungen.

Das "airmatic" – System wurde bereits von unterschiedlichen namhaften Beschichtungsunternehmen im Vergleich mit konventionellen Systemen ausführlich getestet. Bei den Auswertungen zeigte sich zwar beim Einsatz der neuen Anlagentechnik meist eine deutliche Lackeinsparung von mindestens 10% bei reduziertem Zerstäuberdruck (um 10 bis 20%); eine besondere Herausforderung beim Lackieren stellen aber beispielsweise Materialien dar, die

sich schnell und stark aufladen und damit den Schmutz verstärkt anziehen. Die statische Aufladung der Kunststoffteile kann durch die ionisierte Luft neutralisiert werden, wodurch eine wesentlich bessere Oberflächenqualität bei der Bearbeitung erreicht und die Nacharbeiten beim Lackieren teilweise sogar um 60 bis 70 % reduziert werden können.

Qualitative Vorteile ergeben sich zudem durch einen deutlich besseren Verlauf auf der Material-Oberfläche und ein besseres Eindringverhalten in Ecken und Kanten. Die hohe Qualität und Homogenität der Lackbeschichtung von Kunststoffen im Vergleich zu einer Lackierung mit normaler Druckluft zeigt sich deutlich in mikroskopischen Schichtdickenauswertungen (siehe Abbildung 1).

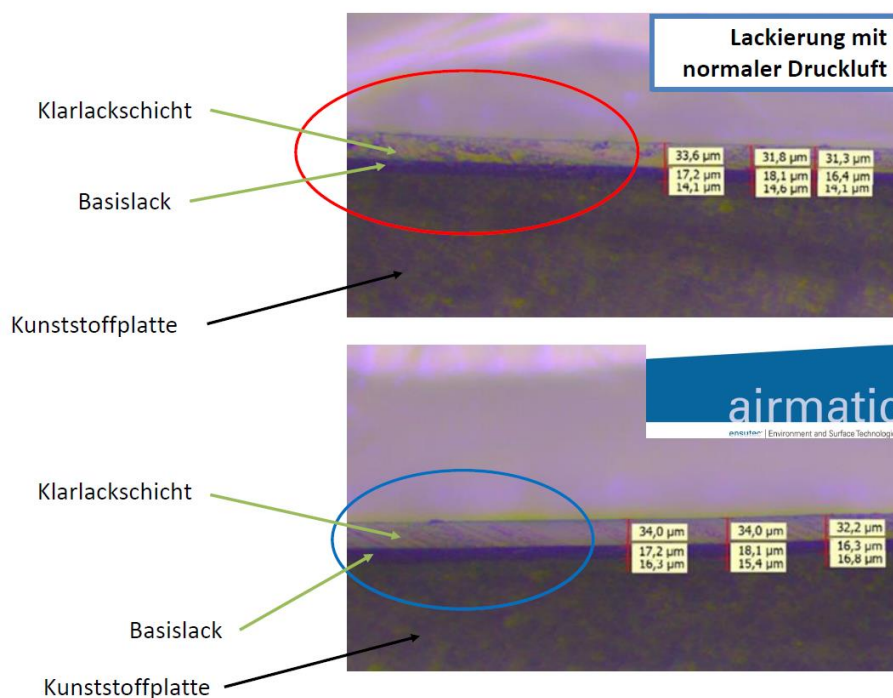


Abbildung 1: Mikroskopische Untersuchung der Homogenität der Lack-Schichtdicke im Vergleich zwischen einer Lackierung mit normaler Druckluft (oben) und mit airmatic-System (unten). Die Schichtbeauftragung wurde mittels eines Hochrotationszerstäubers ESTA durchgeführt.

Die Vorteile der Anlagentechnik machen sich vor allem bei Beschichtungsaufträgen von Objekten mit komplexen Geometrien, Vertiefungen und Hinterschneidungen durch die Erzielung eines beträchtlich höheren Auftragswirkungsgrads bemerkbar (siehe Abbildung 2). So zeigt sich auch bei der Lackierung von metallischen Oberflächen, wie z.B. die Kühlrippen von Elektromotoren, eine erhebliche Verbesserung der Eindringtiefe in Ecken und Kanten.

Obwohl das Verfahren somit prinzipiell funktioniert, waren zum Projektstart insbesondere noch 3 Fragestellungen offen, die einen breiten Einsatz der Systeme in großen Anlagen sowie in den vielen kleinen Lackierbetrieben entgegenstanden:

- Das System verfügte über keine Möglichkeit zur Regelung von Temperatur und Hochspannung. Dadurch ergaben sich beachtliche Nachteile durch Ungenauigkeiten sowie ein überhöhter Energieeinsatz bei der Temperierung der durch das System geleiteten Luft. Sie traten beispielsweise beim Starten des Sprühvorgangs sowie durch Änderungen während des Beschichtungsvorganges (z.B. Brushes) sowie Start- und Stopzeiten auf und führten zu einem unterschiedlichen Auftragsverhalten und somit zu Unregelmäßigkeiten in der Schichtbeauftragung. Darüber hinaus kam es zu einem unterschiedlichen Trocknungsverhalten und damit zu Qualitätsverlusten und notwendigen Nacharbeiten.
- Das System konnte nicht automatisiert auf unterschiedliche Luftmengen eingestellt werden. Die Aufbereitung der Zerstäuberluft war daher größtenteils nicht optimal
- Obwohl phänomenologische Untersuchungen die Wirksamkeit des Systems zu Projektstart nahelegten, fehlten grundlegende physikalisch-technische Untersuchungen, um die Wirkmechanismen des Luftaufbereitungssystems unter den unterschiedlichen Aspekten Ionisierung, Temperierung, Klimatisierung, Strömungsgeschwindigkeit, Auftragsverfahren, Sprühmaterial und -zusammensetzung usw. zu beschreiben und zu erfassen und so eine geschlossene Regelung aufbauen zu können.

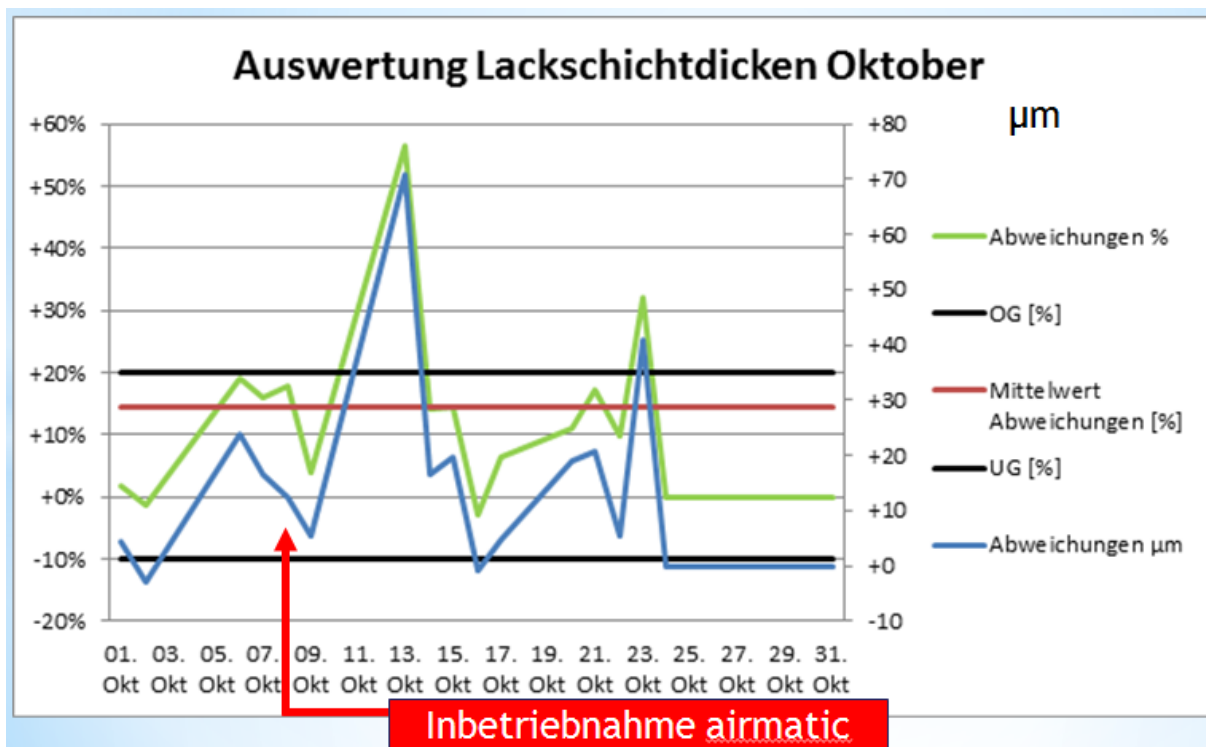


Abbildung 2: Steigerung des Auftragswirkungsgrades und somit der Lack-Schichtdicke im Vergleich zwischen einer Lackierung mit normaler Druckluft (bis zum 7.10.) und mit dem airmatic-System. Die Schichtbeauftragung wurde mittels Becherpistolen mit Hand durchgeführt. Durch die Inbetriebnahme zeigten sich ein reduzierter Overspray und eine deutlich erhöhte Schichtbeauftragung bei gleichen Prozesseinstellungen (deutliche Abweichung der Schichtdicke über den oberen Grenzwert (OG)). In Folge musste der Luftdruck zur Lackapplikation reduziert werden, wodurch auch der Materialeinsatz verringert werden konnte, um wieder gleiche Schichtdicken wie vor der airmatic-Installation zu erreichen.

Ziel des Projekts war es daher, durch eine detaillierte Aufklärung der grundlegenden Prinzipien den Systemwirkungsgrad auf der Basis fundierter Berechnungsgrundlagen weiter zu optimieren und letztlich auf die unterschiedlichen Lackierungssysteme, Systemtechnologien und Anwendungsverfahren technisch bestmöglich auszulegen.

Im Anschluss sollten die ermittelten Zusammenhänge zur Entwicklung einer auf die variierenden Luftmengen abgestimmte Technik sowie Mess- und Regelungstechnik sowohl für die Temperierung als auch die Hochspannungseinheit eingesetzt werden.

So sollte letztendlich eine Luftvolumen-stabile Aufbereitung der Druckluft (Temperatur, Ionisierung) realisiert und der Systemwirkungsgrad erheblich gesteigert werden, was direkte Auswirkungen auf die Energie- und Materialeffizienz bei der Lackierung insgesamt hat. Durch eine verbesserte Verteilung des Lackes auf dem Substrat sollen weiterhin die Qualität gesteigert sowie zeit- und kostenaufwändige Nacharbeiten minimiert werden.

Als zusätzlicher Effekt sollte auch die Lackiergeschwindigkeit deutlich erhöht werden, da beispielsweise Trocknungsprozesse, aufgrund der Erwärmung der Druckluft, weniger Zeit benötigen und beispielsweise eine Reduzierung der notwendigen Ofenenergie erlauben. Durch die Einsparung von Material und Energie wird letztlich eine beachtliche Entlastung der Umwelt erreicht. Die leichtere Verarbeitbarkeit der Lacke ermöglicht es darüber hinaus, die Volumenanteile der in den Lacken enthaltenen VOC-relevanten Lösemittel zusätzlich reduzieren.

3. Entwicklungsarbeiten und erreichte Ergebnisse

Die Entwicklungsarbeiten wurden zunächst durch umfassende Vorversuche, die in einer weiteren Projektplanung und –Konzeption mündeten, begonnen. Ziel dieser Versuche war es einerseits eine definierte Referenz als Vergleichsbasis für weiterführende Entwicklungen zu definieren sowie andererseits eine spezifische Beurteilung des Einflusses verschiedener Prozessparameter auf das Lackierergebnis zu ermöglichen.

Ergebnisse der Vorversuche als Darstellung des IST- Zustands bei Projektstart

Gemeinsam mit den beiden Projektpartnern Lothar Bix und der Hochschule Esslingen wurde eine ausführliche Prüfliste erstellt, um mögliche Einflüsse des airmatic-Systems auf das Lackiererergebnis festzulegen.

Ziel der Versuche war es, die wichtigsten Einflussparameter zu identifizieren und die Vergleichbarkeit der späteren Ergebnisse sicherzustellen.

Übersicht über die möglichen Einflussparameter:

Lack- & Luftführung zur Pistole

- Pumpen
- Schlauchart
 - Durchmesser
 - Leitfähigkeit
- Länge der Leitungen
- Kontur der Verlegung
- Umgebung der Verlegung (in Roboter, außerhalb, Strom-/Spannungsquellen)
- Position der Proportionalventile-Ventile
- Art der Proportionalventile
- Luftaufbereitung / Feuchtegehalt

Lackierparameter / Lackierbild

- Drücke
- Menge
- Tröpfchengröße
- Lackiergeschwindigkeit
- Lackaustrag / Min
- Luftkappen / Düsen / Nadel

Lack

- Viskosität
- Temperatur
- Leitfähigkeit
- Wasserlack/Lösemittellack
- Dichte
- Pigmentart / Pigmentgröße
- Lösemittel

Lackierumgebung

- Feuchtigkeit
- Temperatur
- Luftströmung

Bauteil

- Kontur
- Fläche
- Ladung
- Material / Substrat

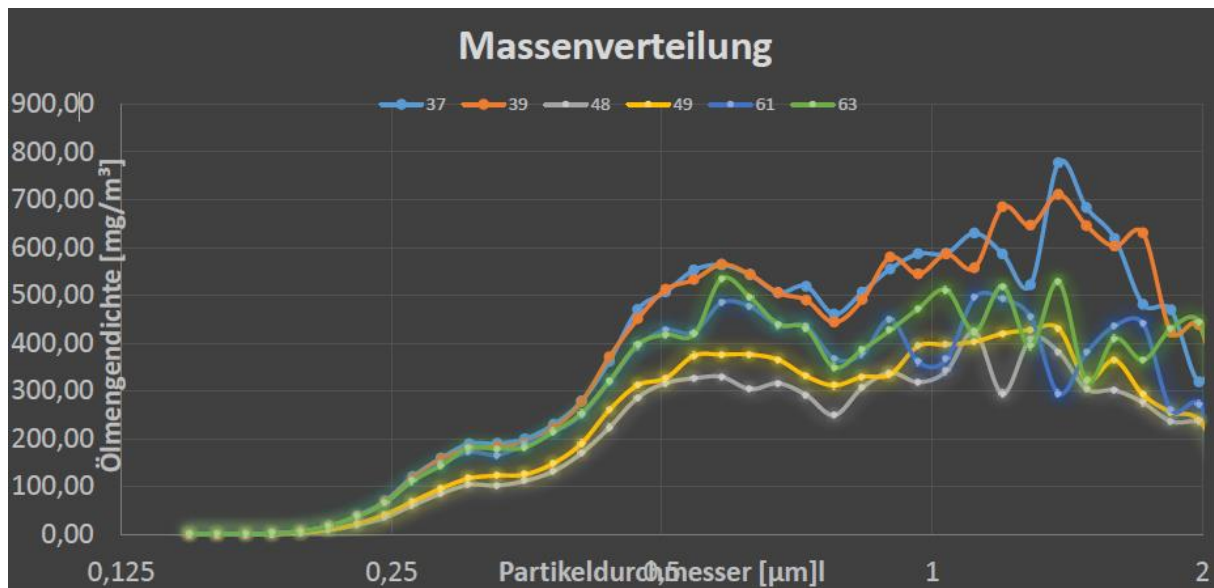


Abbildung 3: Ergebnisse der Versuchsreihen mit der Zerstäubung von Öltröpfchen – 37 (blau), 39 (orange): Ohne Airmatic; 49, 61, 63: Mit airmatic. Klar ersichtlich ist die Verlagerung der Durchmesser-Verteilung hin zu kleineren Partikeldurchmessern

Im Zuge der Vorversuche erfolgten darüber hinaus Zerstäubungsversuche an Öltröpfchen mit der aktuellen Generation des Systems. Mithilfe von Streulichtmessungen kann die Verteilung der Partikeldurchmesser der Tröpfchen relativ einfach gemessen und so die Wirkung des airmatic Systems auf die Verteilung gezeigt werden. In der Abbildung 3 sind einige Versuchsreihen dargestellt, wobei die Parameter sukzessive optimiert wurden und eine deutliche Verbesserung hin zu kleineren Tröpfchengrößen erreicht werden konnte. Die beiden Versuchen mit der Nummer 37 und 39 sind ohne das airmatic System durchgeführt worden. Wichtig war hier eine gleichmäßige Benetzung einer Oberfläche zu erreichen, was schlussendlich mit dem letzten Versuch Nummer 63 mit einer deutlich geringeren Ölmenge (60%) im Vergleich zum Ausgangszustand gelingt. Schon zu Projektbeginn lag damit nahe, dass die Tröpfchen ein deutlich besseres Benetzungsverhalten auf der Oberfläche unter Einsatz des ensutec Systems haben

Projektkonzeption und Projektplanung

Ein Ziel des Projekts bestand in der direkten Messung des Zerstäubungsverhaltens unterschiedlicher Applikationssysteme (Handpistole, Lackierautomat, Flächenautomat) in der Lackierkabine. Dieses Ziel sollte durch eine strategische Versuchsplanung in Kooperation mit dem Fraunhofer-Institut aus Stuttgart erreicht, welches über messtechnisches Equipment wie Hochgeschwindigkeitskameras und Partikelgrößenanalytiken verfügt.

Dabei wurde die folgende Anordnung als zielführend definiert:

- In einer oder zwei Spritzkabinen werden für die Technologie relevante Messdaten aufgenommen, gemäß dem Ergebnis einer vor-Ort Analyse des aktuellen Zustands. Darunter fallen Luftströmung, Kabinentemperatur, -feuchte, elektrostatische Ladung auf dem Bauteil, Beurteilung der Bauteilerdung und Schichtdicken.
- Mittels Laserbeugungsspektrometer werden dann die Tröpfchengrößenverteilungen bestimmt. Damit kann herausgefunden werden, ob bzw. wie die Ionisierung den Zerstäubungsprozess beeinflusst.

Basierend auf der dargestellten Versuchsplanung wurde auch eine Grundkonzeption der weiterführenden Entwicklung des Hochspannungssystems/EMP- Generators vorgenommen. Das System wurde bereits zu Beginn des Projekts umfassend modifiziert und dann als Basis für die weitergehenden Versuche bei den Anwendungspartnern genutzt (siehe Abbildung 4). Das neue System bietet insbesondere die Möglichkeit, mehrere Generatoren zusammen zu schalten, um auch große, automatisierte Anlagen ausrüsten zu können.

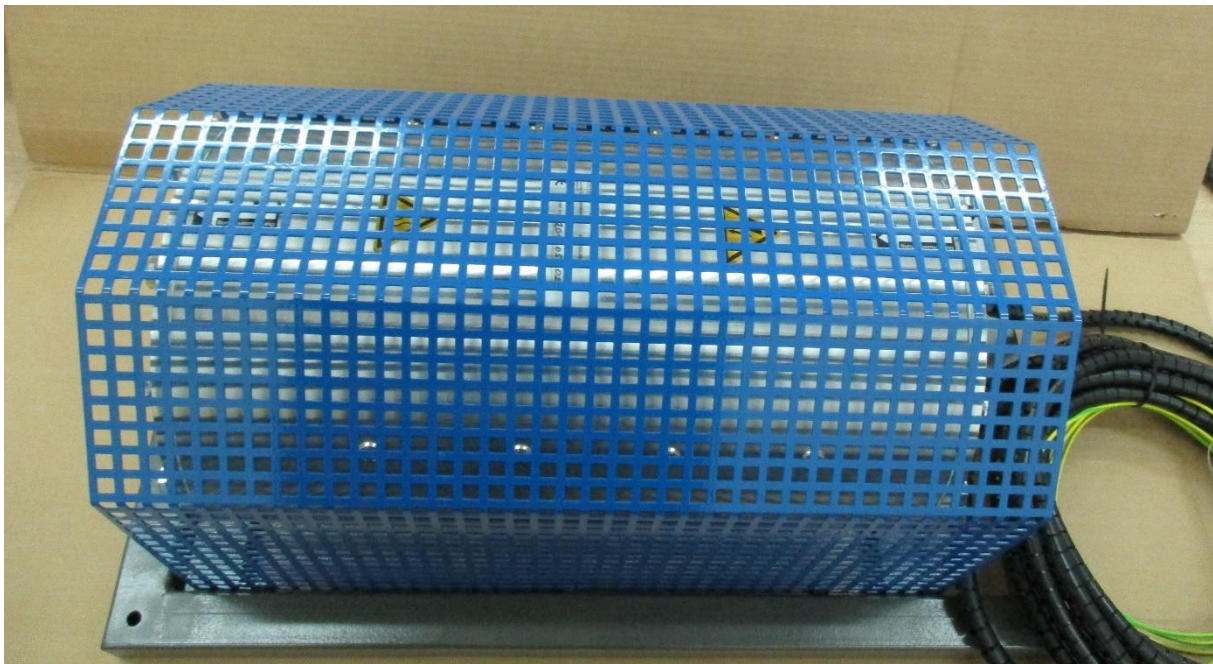


Abbildung 4: Neu aufgebautes Versuchssystem der Hochspannungseinheit EMP 2.1

Aufbau einer Demonstratoranlage

Basierend auf dem erstellten Projektkonzept wurde zunächst eine Demonstratoranlage im Technikum der Fa. Bix aufgebaut, um umfassende Untersuchungen durchzuführen. Die Komponenten Filterung, Heizung, Hochspannungs/EMP- Einheit wurden einzeln optimiert und zur Demonstrationsanlage kombiniert. Dabei wurde insbesondere die EMP- Einheit entwickelt, die schon hier in Version „EMP 2.1“ integriert wurde.:



Abbildung 5: Aufbau der Demonstrationsanlagen im Technikum von Bix (links) und am IPA (rechts)



Abbildung 6: Roboterapplikatoren der Demonstrationsanlage im Technikum von Bix (links) und am IPA (rechts)

Umfassende Analyse der Lackierleistung unter Berücksichtigung der Luftmengen sowie des Zerstäubungsverhaltens

In enger Kooperation mit der HS Esslingen wurden dann Kenndaten typischer relevanter Applikationsfälle aufgenommen und gezielt mit den Ergebnissen von Lackiersversuchen ohne airmatic- System verglichen.

Die umfangreichen Versuche wurden in Kooperation der Partner ensutec, HS Esslingen und Bix durchgeführt. Dabei wurden die Auswirkungen des airmatic- Systems auf die praxismgerechte Applikation eines Klarlacks bei Kunststoff- und Metallsubstraten evaluiert.

Folgende Parameter und Zielgrößen wurden ermittelt:

- Primäre Zerstäubereigenschaften:
 - Veränderung der Verteilung der mittleren Tropfengröße (Volumenmedian $Dv,50$)
 - Veränderung des $Sb50$ (Spritzstrahlbreite bei halbem Schichtdickenmaximum)
 - Auftragswirkungsgrad (AWG)
- Eigenschaften des applizierten Lackfilms:
 - Veränderung der mittleren Schichtdicke
 - Appearance

Sämtliche Versuche wurde mit Luftzerstäubern durchgeführt, wobei die Luftmengen in folgenden Bereichen variiert wurden:

Hornluft: 88-106NI/min

Zerstäuberluft 109-135 NI/min

Die Farbmenge des verarbeiteten Lacks blieb für alle Versuche konstant.

Für die Versuche wurden Warenträger mit jeweils 30 Objekten verwendet. Abbildung 7 zeigt exemplarisch einen Versuchsträger. Die Applikation erfolgte mittels Roboter.



Abbildung 7: Verwendete Objektträger mit Kunststoff (links) und Metall(rechts)- Objekten

Im Anschluss wurden Messungen zu sämtlichen Parametern durchgeführt.

Ergebnisse

Verteilung der mittleren Tropfengröße in der Demonstrationsanlage.

Die Messung erfolgte mittels Laserbeugungsspektrometrie. Es wird deutlich, dass sich bei Einsatz des airmatic-Systems die radialen Verteilungen der mittleren Tropfengrößen deutlich homogenisieren. Eine zunehmende Verfeinerung des Sprays zum Rand hin findet nicht mehr statt.

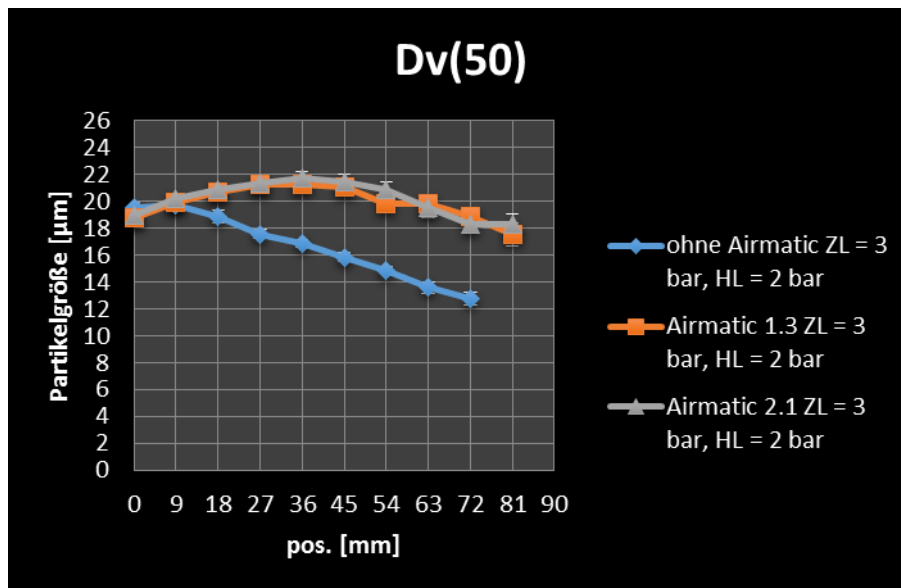


Abbildung 8: Radiale Tröpfchengrößenverteilung

Aufgrund der Veränderung der Zerstäubung kommt es auch zu einer Veränderung der Schichtdickenverteilungen, d. h. die charakteristischen Strahlbreiten S_{b50} der erhaltenen dynamischen Spritzbilder erhöhen sich bei airmatic-Einsatz. Mit Hilfe paralleler Volumenstrommessungen konnte ausgeschlossen werden, dass die Veränderungen der Zerstäubung und der dynamischen Spritzbilder aus veränderten Luftmengen resultieren. Die Luftmengen blieben beim Einsatz der airmatic im Rahmen der Messgenauigkeit (ca. $\pm 2\%$) konstant.

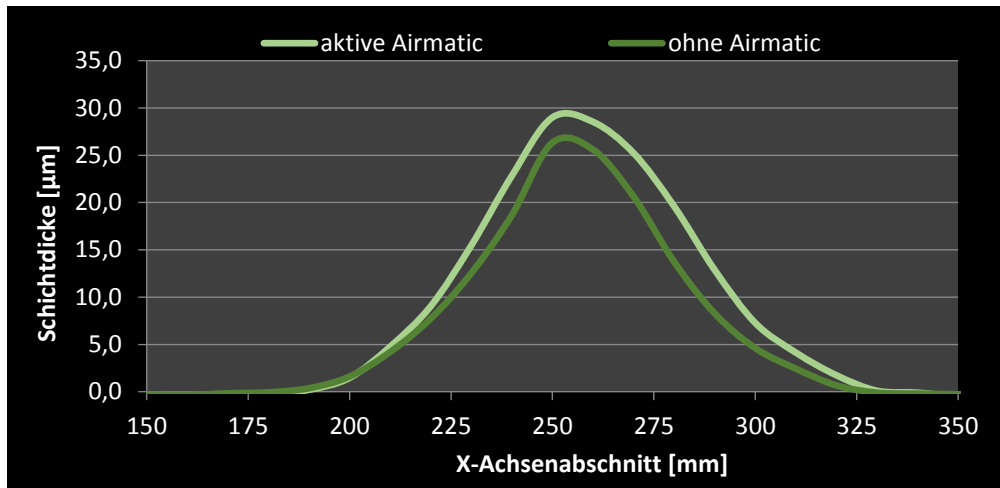


Abbildung 9: Darstellung der mittleren Schichtdicke in Abhängigkeit der Achsposition

Auftragswirkungsgrad und Schichtdicke:

Infolge der Veränderung der Sprayeigenschaften haben sich trotz der breiteren Schichtdickenverteilungen die Auftragswirkungsgrade signifikant erhöht. Auch die mittleren Schichtdicken stiegen um 5 % bis 15 % an. Dies bietet das Potential für eine Reduktion der Farbmenge um den gleichen Prozentsatz bei Einsatz der airmatic.

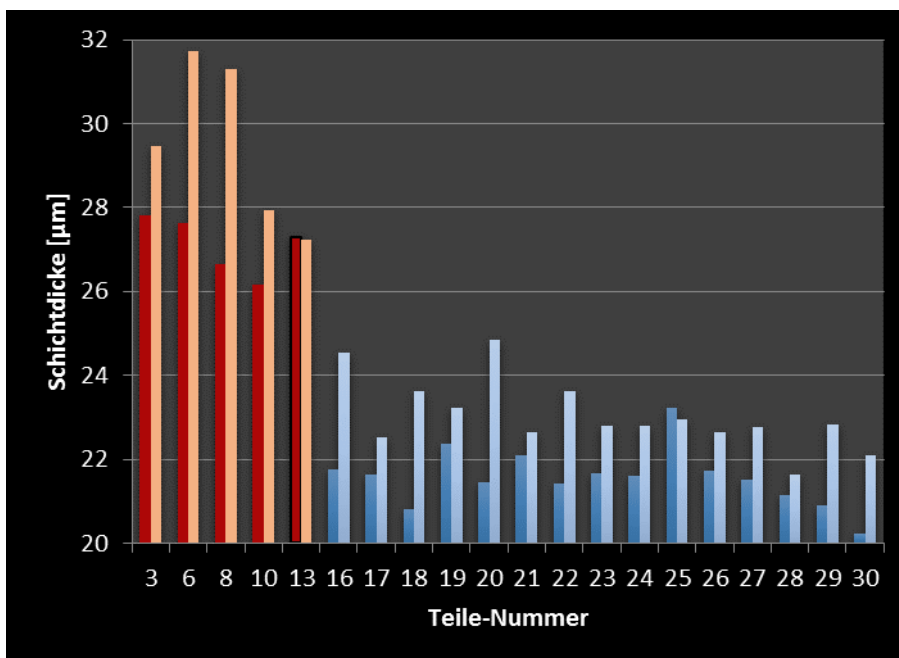


Abbildung 10: Kunststoff-Teil ■ ohne Airmatic ■ aktive Airmatic ; Metall-Teil ■ ohne Airmatic ■ aktive Airmatic

Zusammenfassend konnte durch den Einsatz der airmatic an der Demonstrationsanlage gezeigt werden (Vergl. auch Abbildung 11– optische Gegenüberstellung durch Datenfusion)

- Das Lackspray in Bezug auf den mittleren Durchmesser deutlich gleichmäßiger
- verbreitern sich dynamische Spritzbilder um ca. 15 %-25 %
- erhöhen sich die Auftragswirkungsgrade bei Kunststoffsubstraten um 56,5 %
- erhöhen sich die mittleren Schichtdicken bei Kunststoffsubstraten um 10 %, bei Metallsubstraten um 7 %
- entsteht keine merkliche Veränderung der Lackstruktur/Appearance.

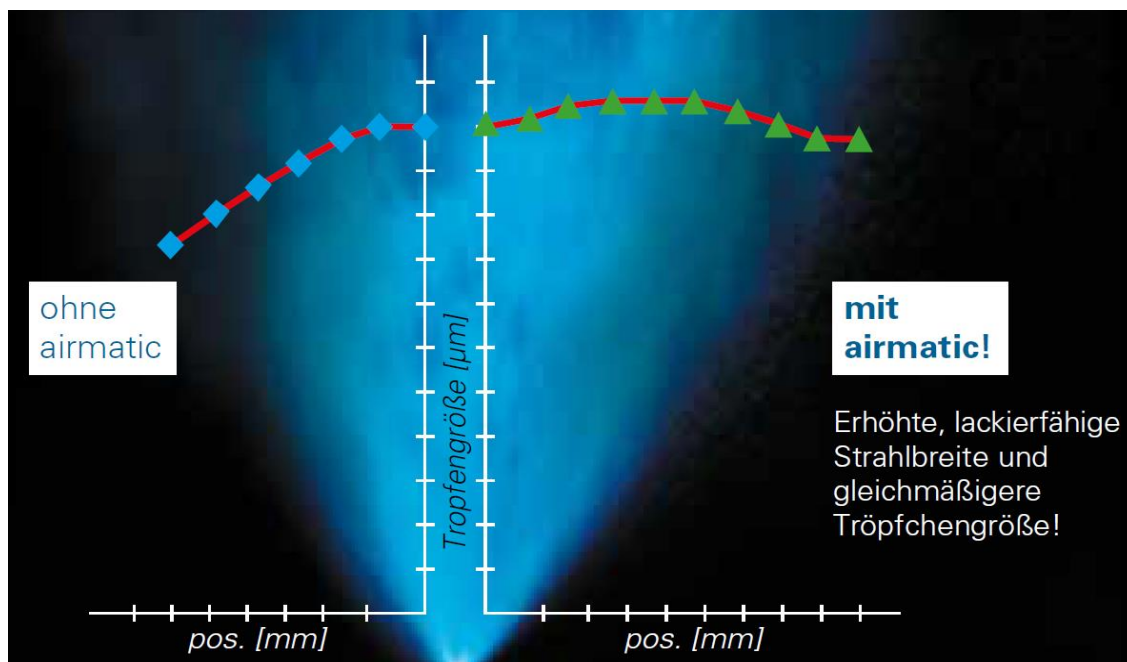


Abbildung 11: Direkter Vergleich der Lackierergebnisse in Demonstrationsanlage mit & ohne airmatic- System (grafische Darstellung)

Die Ergebnisse konnten unabhängig von den eingestellten Applikationsparametern des Lacks erzielt werden, sodass eine hervorragende Übertragbarkeit auf andere Anwendungsfälle zu erwarten war.

Durch die Installation der airmatic wurde keine Veränderung eventuell voreingestellter Luftvolumenströme beobachtet.

Die dargestellten Versuche zeigen potentielle Lackeinsparmöglichkeiten durch das System im Bereich zwischen 5 % und 15 % je nach Substratmaterial.

Übertragung der Ergebnisse der Demonstrationsanlage auf weitere Anlagen und Versuchsreihen

Nach den vielversprechenden Messungen an der Demonstrationsanlage wurden weitere Anlagen am Fraunhofer IPA, an der Hochschule Esslingen, im Technikum eines Lackherstellers sowie mehreren weiteren Lackierunternehmen aufgebaut, um die Messungen zu bestätigen. Dabei zeigte sich einerseits eine äußerst komplexe Abhängigkeit der Lackierergebnisse von unterschiedlichsten Prozessparametern und andererseits Optimierungspotential für die Überarbeitung der Systeme. Die Ergebnisse der Messungen sind hier zunächst chronologisch an einigen ausgewählten Beispielen dargestellt.

Validierung der Ergebnisse im Technikum eines Forschungsinstituts

In einem ersten Schritt wurden in Kooperation mit der HS Esslingen sowie dem Fraunhofer IPA typische Anwendungsfälle weiter untersucht und dabei auch die eingesetzten Luftmengen sowie die Lacksysteme variiert. Explizit wurden 3 Lacke/Lacksysteme untersucht: Die Parameter dieser Versuchsreihen sind in Tabelle 1 zusammengestellt:

Tabelle 1: Übersicht über Versuchsparameter der im Technikum des IPA durchgeführten Versuche

Lacke:	Remmers Holzlack – wasserbasierend Hesse Holzlack – Lösemittelsystem BIX Füller	
Farbmenge:	150 ml/min	
Luft:	Zerstäuberluft (NL/min)	Hornluft (NL/min)
	100	90
	160	150
	280	260
Applikationstechnik	SATA-Zerstäuber mit Robotertechnik REITER-Zerstäuber mit Robotertechnik	
Vorgehensweise	10 mm Raster, Startpunkt Strahlmitte (Y =0); halber Strahl 5 s Sprühen, 1 s Pause / Verfahren an nächsten Punkt	

Bei der Wahl identischer Versuchsparameter im Vergleich zu jenen der Versuche in der Testanlage zeigten sich nur einige kleinere Abweichungen bei den Ergebnissen der Versuche im Technikum.

Untersuchung eines Systems zur Minimalmengenschmierung mit Ölen in zerspanenden Prozessen

Nach den vielversprechenden Ergebnissen an der Demonstrationsanlage sowie mit den Holzlacken sowie parallel zu den Messungen im Technikum des IPA wurde das ensutec airmatic- System auch an einem System zur Minimalmengenschmierung mit Ölen untersucht. Dazu wurde das airmatic- System direkt vor die Einspeisung in die Mischkammer integriert; genau an dem Punkt, an dem Luft und Öl nach der Förderung durch getrennte Zuleitungen vermischt werden. Die Mischung wird durch das Einspritzen des Öls unter Hochdruck in die geförderte Luft realisiert. Das Öl/Luftgemisch durchströmt dann im Anschluss

- Drehdurchführung
- Das feststehende Spindelrohr
- Die Werkzeugaufnahme
- Das Werkzeug selbst
- und tritt dann durch die Kühlkanäle des Werkzeugs an der Bearbeitungsstelle aus.

Abbildung 12 zeigt die gemessenen Partikelverteilungen für drei exemplarische Messungen. Die Messkurve 4 (blau) zeigt als Referenz die Partikelverteilung bei Standardkonfiguration und 8bar/50ml/h. Im Anschluss an diese Referenzmessung wurde zunächst ein airmatic-EMP- System angeschlossen und die Partikelverteilung erneut gemessen. Messkurve 35 (orange) zeigt eine deutlich höhere Partikeldichte, insbesondere bei Partikeldurchmessern von ca. 0,28 µm. Das Ergebnis kann durch die Parallelschaltung einer zweiten EMP-Einheit mit jeweils 6 kV noch einmal deutlich verbessert werden (Messung 45- graue Kurve).

Die Anwendung der Zerstäubung von Öltröpfchen eignet sich darüber hinaus auch für grundlegende Messungen der Feldkräfte, die durch die Integration der EMP- Generatoren in das System deutlich verändert werden. Mittels eines Elektrofelmeters konnten in allen drei Konfigurationen die Feldkräfte am Ausgang des Zerstäubers vermessen werden. Sie betragen

- 411V/m für Messung 4 ohne EMP- Generator
- 368 V/m für Messung 34 mit einem eingeschalteten EMP- Generator und
- 355 V/m für Messung 45 mit zwei parallelgeschalteten EMP- Generatoren.

Die statische Ladung der Öltröpfchen kann damit durch das Anliegen der airmatic- Anlage messbar und deutlich reduziert werden; wobei der Effekt bei Parallelschaltung zweier Anlagen nicht linear skaliert. Sie übertragbare Ölmenge konnte durch die airmatic- Technologie um ca. 13% erhöht werden. Überraschender Weise korrespondiert dies hervorragend zur Absenkung der Feldkräfte um ca. 13,6% bei Betrieb beider paralleler EMP- Generatoren.

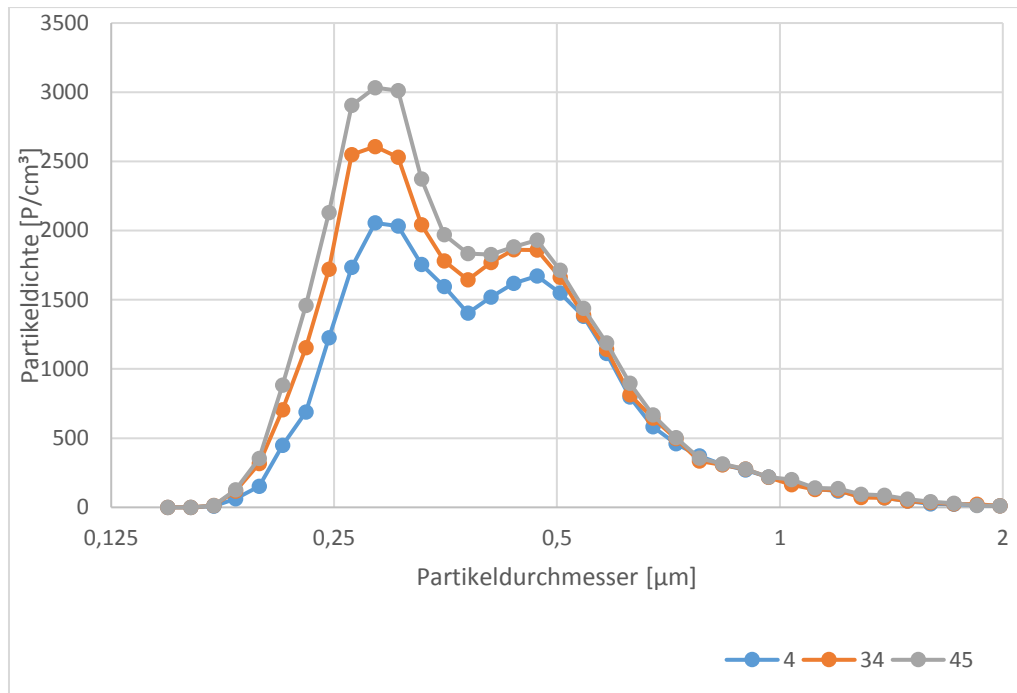


Abbildung 12: Darstellung der Mittleren Partikeldichte in Abhängigkeit des Partikeldurchmessers einer Minimalmengenschmierung. Durch die Integration des airmatic- Systems (orange, 34: ein EMP- System, grau, 45: zwei EMP- Systeme) kann die Partikelanzahl deutlich gesteigert werden.

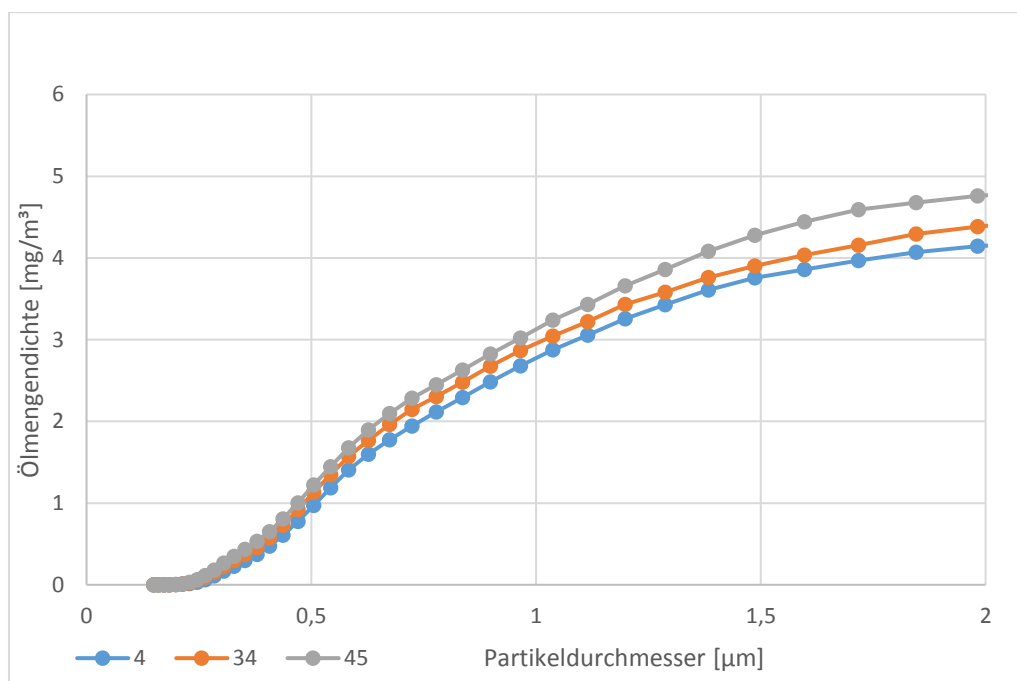


Abbildung 13: Darstellung der Ölmengendichte in Abhängigkeit des Partikeldurchmessers. Die übertragene Ölmenge kann durch die Absenkung der Feldkräfte um ca. 13,6% um ca. 13% erhöht werden.

Weiterführende Versuche im Technikum: Reproduktion der Ergebnisse der Demonstrationsanlage

Aufbauend auf dem klaren Ergebnis, dass die Änderung der Feldkräfte innerhalb der zerstäubten Partikel direkt mit der Erhöhung der Übertragungseffizienz korrelieren, wurden erneute Versuche zur Reproduktion der Ergebnisse aus der Demonstrationsanlage im Technikum des Fraunhofer Instituts unternommen. Dabei wurden insbesondere unterschiedliche Luftkappen sowie die Auswirkung einer Variation der Hornluft untersucht. Abbildung 14 zeigt zunächst die erfolgreiche Reproduktion der Ergebnisse der Demonstrationsanlage auch im Technikum bei unterschiedlichen Luftmengen.

Abbildung 15 und Abbildung 16 illustrieren exemplarisch dann den Einfluss unterschiedlicher Luftkappen auf die Partikeldichteverteilung und insbesondere auf die Peakbreite. Obwohl die Kurven der Messungen im Technikum im Vergleich zu den Ergebnissen mit der Demonstrationsanlage eine höhere Varianz und Dynamik insgesamt aufweisen, können sie mindestens qualitativ, in Summe auch quantitativ bestätigt werden.

Dies bestätigen auch die Messungen zur Variation der Hornluft in Abbildung 17 und Abbildung 18. Essentiell zur zuverlässigen Reproduktion sowie zur Bestätigung pauschaler Aussagen über Effizienzsteigerung sowie Verbesserungen des Lackbildes ist damit eine hochpräzise Regelung mindestens der Einflussgrößen „Luftmenge“; „Hornluft“, „Luftfeuchtigkeit“; „Temperatur“; „EMP-Spannung“. Diese Erkenntnisse müssen bei der weiteren Überarbeitung der Anlagen durch die Realisierung einer Regelung von Temperatur bzw. Klimatechnik sowie des Gesamtsystems berücksichtigt werden. Auch zeigen die mehrfach durchgeführten Untersuchungen im Technikum, dass die Prozessbeherrschung durch den Kunden einen direkten Einfluss auf die durch Integration des airmatic- Systems realisierbaren Effizienz- und Qualitätssteigerungen haben.

Aufbauend auf diese Messungen erfolgte in Kooperation mit dem Partner HS Esslingen die Definition weiterer grundlegender Untersuchungen, die eine genaue Charakterisierung des Prozesses ermöglichen. Dazu gehören unter anderem Fragen zur speziellen Installation (Schlauchmaterialien, Schlauchlängen etc.), zur Luftfeuchte in der Applikationszone und zur Druckluftqualität. Sowie weitergehende Untersuchungen zur Ladung und zum Zerstäubungsverhalten auf Basis geeigneter Partikel (insbesondere Pulver und Öltröpfchen).

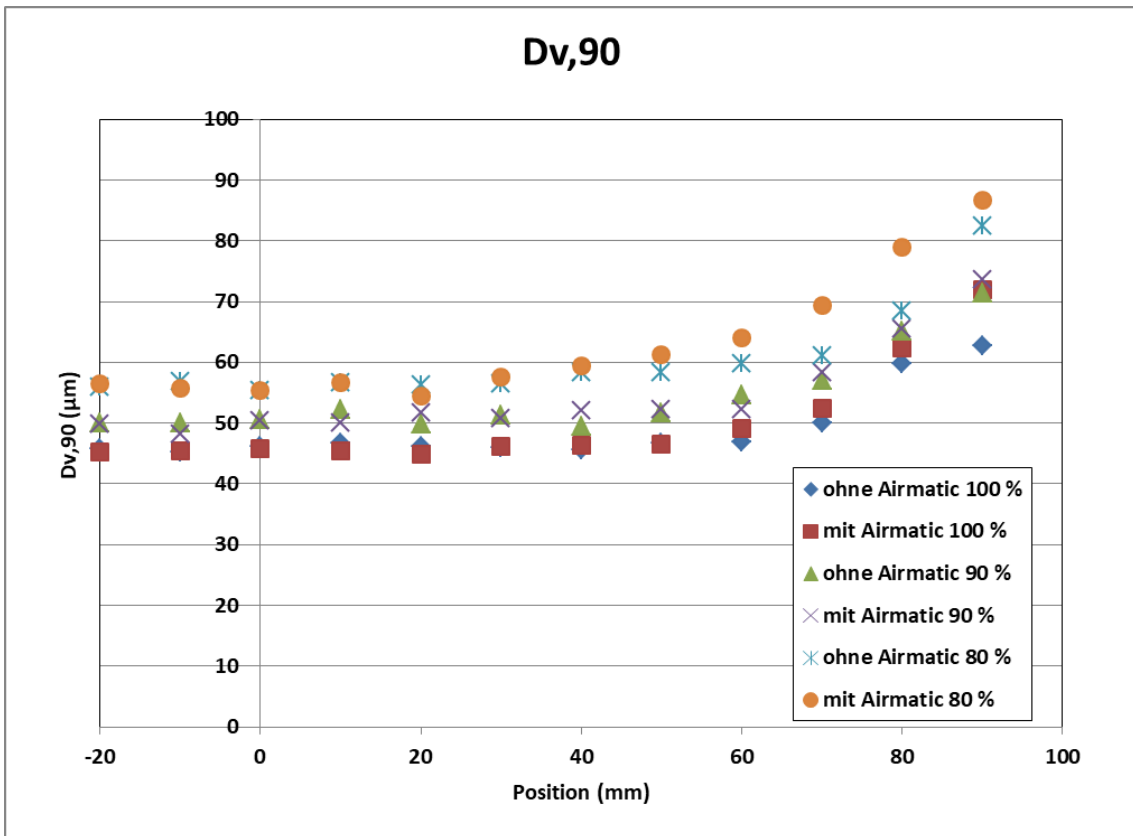


Abbildung 14: Reproduktion der Versuche auf Demonstrationsanlage, im Technikum des IPA: Darstellung DV 90

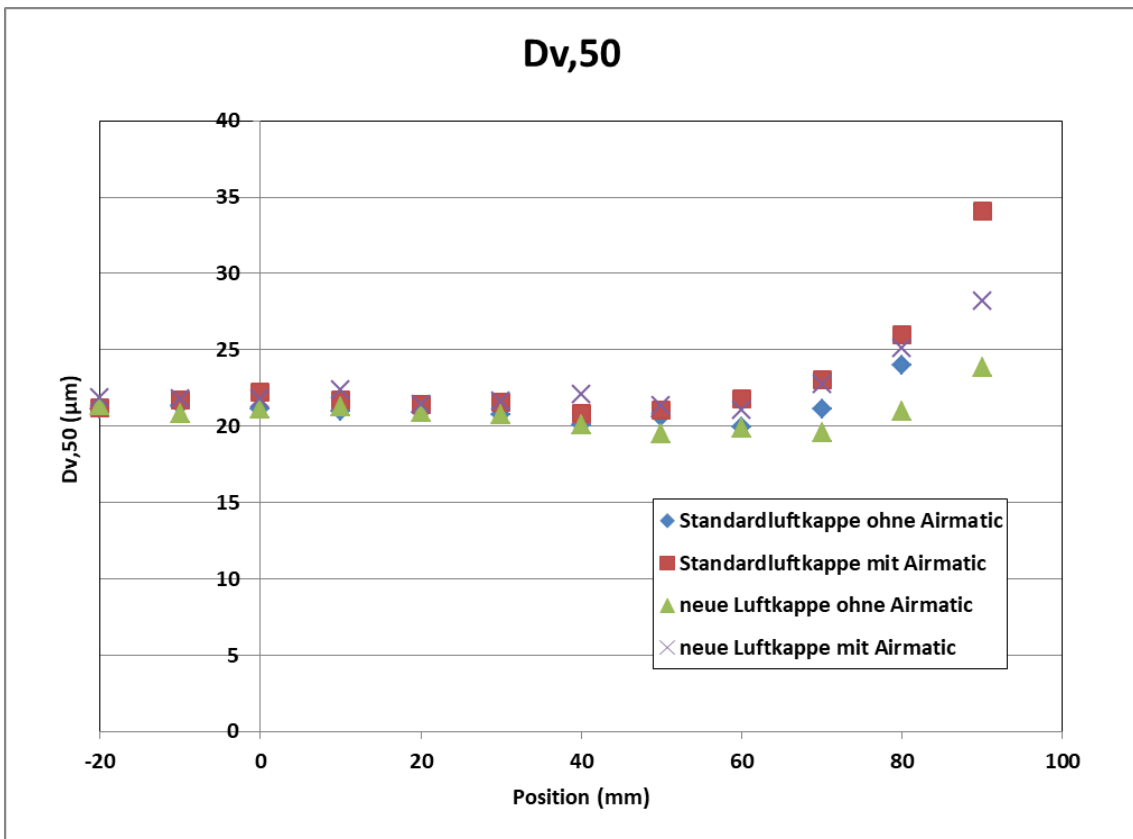


Abbildung 15: Untersuchung des Einflusses unterschiedlicher Luftkappen auf die Lackapplikation – Dv 50

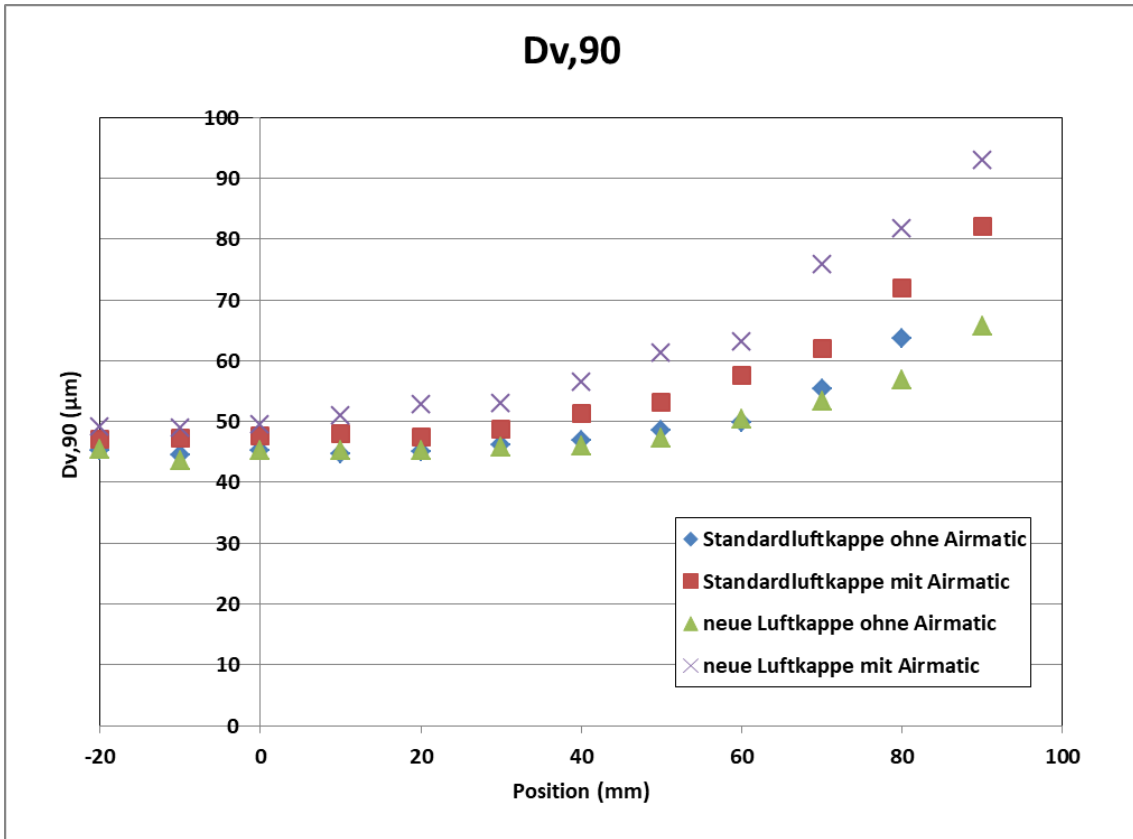


Abbildung 16: Untersuchung des Einflusses unterschiedlicher Luftkappen auf die Lackapplikation – Dv 90

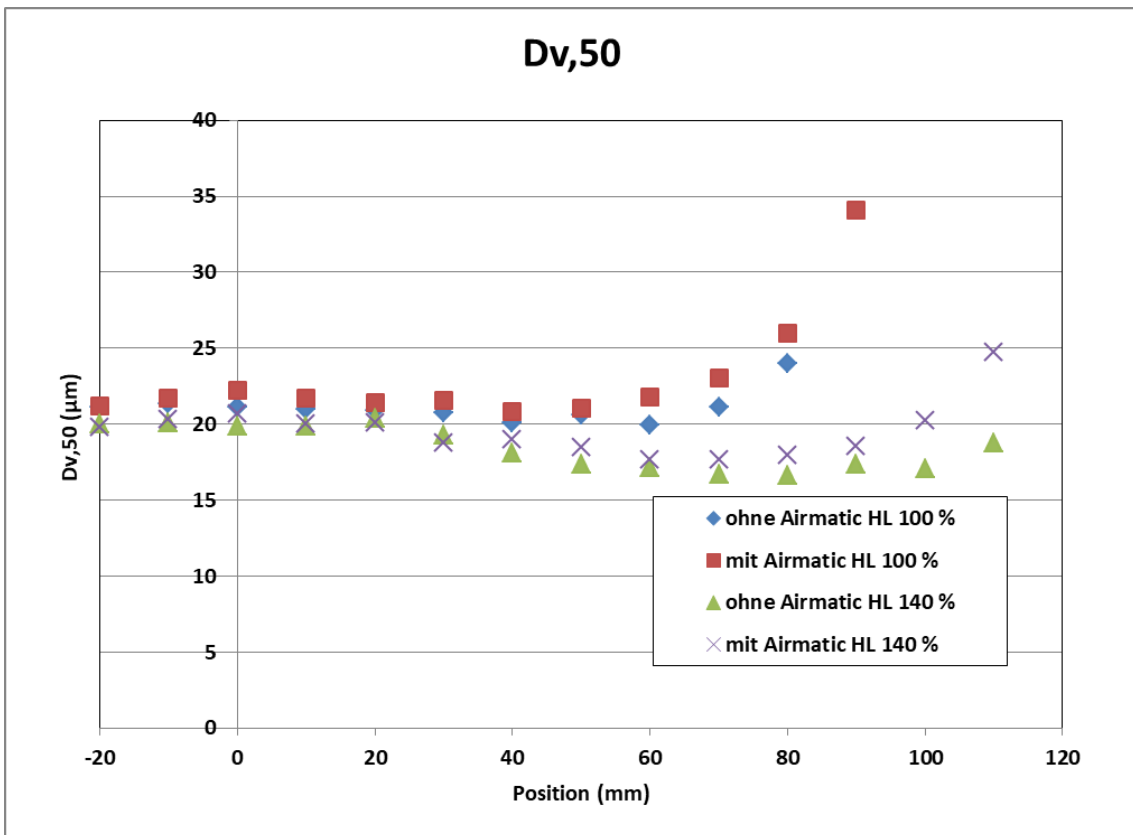


Abbildung 17: Untersuchung des Einflusses unterschiedlicher Hornluftmengen auf die Lackapplikation – Dv 50

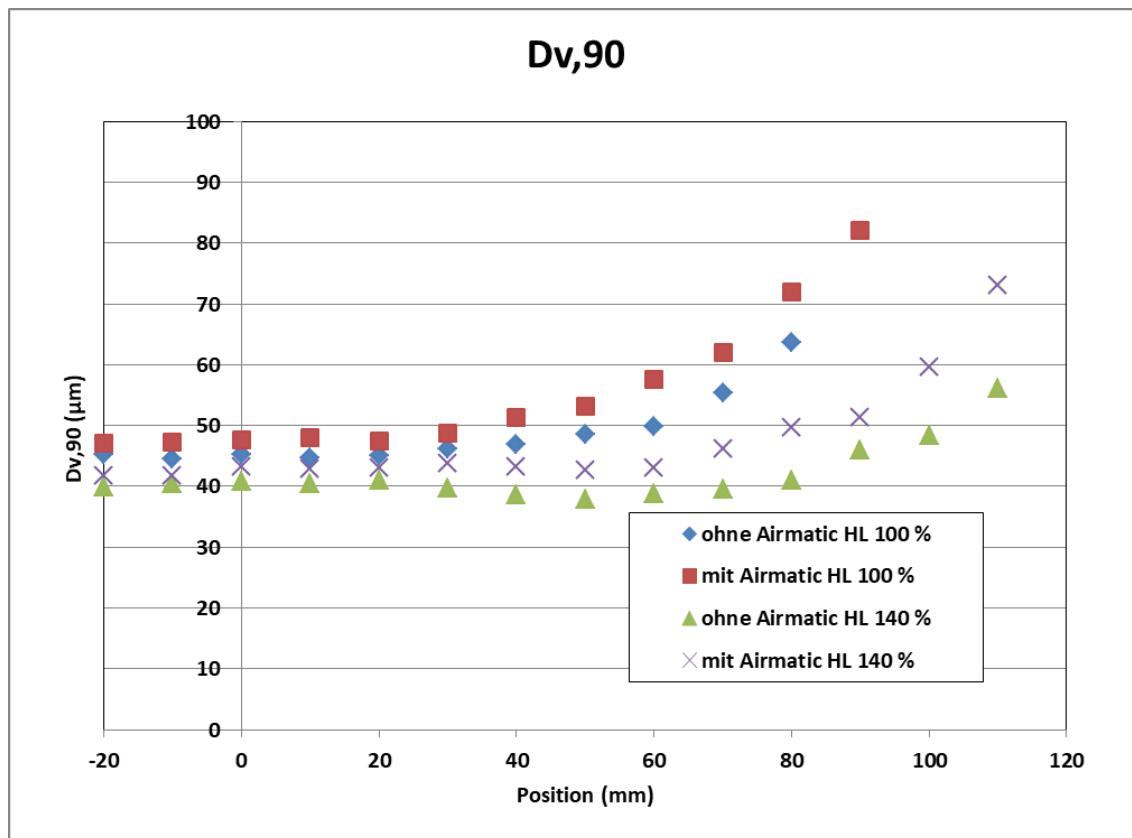


Abbildung 18: Untersuchung des Einflusses unterschiedlicher Luftkappen auf die Lackapplikation – Dv 90

Weitere Untersuchungen an unterschiedlichen Prozessen in der Praxis

Zur Bestätigung der grundsätzlichen Ergebnisse im Technikum wurden insbesondere im letzten Jahr der Projektlaufzeit auch unterschiedlichste Lackierprozesse in vielfältigen Branchen untersucht. Dabei konnten beispielsweise

- bei der Analyse eines Lackierprozesses in der Möbelindustrie eine Effizienzsteigerung von ca. 15% bei der Roboterapplikation von Lack auf Möbelschränke aus Holz erreicht werden. Diese Einsparungen gingen einher mit einer Erhöhung der Lackiergeschwindigkeit, der Realisierung eines besseren Lackierergebnisses durch die Verbesserung der Kantenschärfe und Eindringtiefe sowie einer reduzierten Reinigungsintensität für Kabinen und Filter um ca. 1/3.
- Im Bereich der Karosserielackierung ebenfalls Effizienzsteigerungen von ca. 15 % realisiert werden bei geringeren Trocknungszeiten und höherer Lackqualität. Hier konnten sowohl Roboterbasierte Systeme als auch Handpistolen ausgerüstet werden und die Ergebnisse in mehreren unterschiedlichen Betrieben bestätigt werden.

- Es konnten auf unterschiedlichen Substraten Einsparungen, Effizienz- und Qualitätssteigerungen demonstriert werden.

Darüber hinaus konnte in Kooperation mit namhaften Lackherstellern und Pistolenherstellern im Technikum der Lackentwickler eine Verbesserung des Lackbildes durch das airmatic-System bestätigt werden. Diese Hersteller empfehlen inzwischen ihren Kunden den Einsatz des airmatic- Systems und bestätigen die Ergebnisse und die Kompatibilität ihrer Produkte mit dem airmatic- System.

Weiterentwicklung des innovativen airmatic- Systems

Modifikation des Systemaufbaus

Um die im vorherigen Kapitel dargestellten Messungen zu ermöglichen, erfolgte die Weiterentwicklung des Heizungs- und Elektrostatik-Systems. Dabei wurde der Aufbau des Systems grundsätzlich verändert: Über ein neuartiges Heizschlauch-System kann die Luft erst nach der Elektrostatik-Einheit erwärmt werden, ohne dass dies die Ladungsverteilung, die Elektrostatik oder das Lackbild verändern würde. Dies ermöglicht eine wesentlich effizientere Lufterwärmung: So konnten die Energie- und Wärmeverluste auf dem Weg zur Lackierpistole minimiert werden, um die für die Lackierung optimalen ca. 35 °C am Austrittspunkt zu erreichen.

Ein Darstellung des neuen Systems findet sich in Abbildung 19.

In Abbildung 20 finden sich die Komponenten des überarbeiteten Systems: Einmal die Steuerung im Schrank, mit einer Zieltemperatur von 38 °C, und eine Ansicht des Gesamtsystems. Die Heizung befindet sich in und über dem roten Element.



Abbildung 19: Detailansicht des Heizsystems nach Überarbeitung: Steuerung mit 35 °C Zieltemperatur, der Hochspannungseinheit nachgeschaltetes Heizsystem



Abbildung 20: Gesamtansicht des Systems. Heizsystem ist dem Hochspannungs-System nachgeschaltet

Entwicklung einer neuartigen Regelungstechnologie

Praxisversuche zeigten, dass insbesondere die Prozessparameter, die die Druckluft betreffen, einen maßgeblichen Einfluss auf die tatsächlich erreichbaren Effizienzsteigerungen und Qualitätsverbesserungen durch das System haben. Aus diesem Grund wurde eine neuartige Regelungstechnik für die Vorbehandlung der Druckluft entwickelt und in die airmatic- Systeme integriert werden kann.

Das System ermöglicht es, durch die Überwachung und gegebenenfalls Einstellung der Luftfeuchtigkeit der Luft durch Zusetzen eines entsprechenden Additivs sowie Erwärmung bzw. Kühlung auf eine vordefinierte Temperatur ein optimales Lackierergebnis. Durch die Einhaltung einer nahezu beliebigen Luftfeuchtigkeit, die gezielte Erwärmung sowie die Hochspannungsbehandlung können Trocknungszeiten stark reduziert und forcierte Trocknungsprozesse in der Regel eingespart werden.

Die systematischen Untersuchungen im Rahmen des Projekts konnten in einem automatisierten Konfigurationstool zusammengefasst werden, das seit April 2019 gemeinsam mit dem vollständig überarbeiteten airmatic- System in den Markt eingeführt werden konnte.

4. Fazit

Im Rahmen des Projekts konnten zunächst die Grundannahmen zur durch das System realisierbaren Energieeinsparung bestätigt und spezifischen Einflussparametern auch quantitativ zugeordnet werden. Insbesondere zeigt sich eine direkte Korrelation zwischen der Absenkung der Feldstärke innerhalb der Zerstäubten Partikel und Effizienzgewinnen in der Lackapplikation.

Diese Erkenntnisse konnten im weiteren Projektverlauf bestätigt und in konkrete Ansätze zur Optimierung der Konstruktion sowie der Steuerung des Systems „airmatic“ überführt werden. Auch eine automatisierte Regelung der Prozessparameter konnte im Rahmen des Entwicklungsprojekts erfolgreich realisiert werden. Diese Systeme wurden nicht nur im Technikum der Projektpartner untersucht, sondern werden und wurden nun auch in den Markt eingeführt. Die Projektziele wurden damit vollumfänglich erreicht.

Obwohl für einfachere Anwendungen wie insbesondere die Öltröpfchenzerstäubung im Bereich der Minimalmengenschmierung die Korrelation von Effizienzsteigerung und Hochspannungsbehandlung demonstriert werden konnte, wäre eine noch genauere auch ortsauflösende Vermessung der elektrostatischen Felder während der Zerstäubung wünschenswert. Erste wissenschaftliche Arbeiten zu diesem im Rahmen von Abschlussarbeiten sind mit Beginn des Q4 2019 an der Hochschule Esslingen als Weiterführung des Projekts auf eigene Kosten geplant.

Zur quantitativen und ortsauflösenden Vermessung der Felder auch im Bereich der Lackzerstäubung sind umfangreiche Entwicklungsarbeiten auch zur Realisierung speziell angepassten Messequipments notwendig.

5. Danksagung

Die ensutec Products GmbH sowie die Kooperationspartner und das beteiligte Projektteam bedanken sich bei der Deutschen Bundesstiftung Umwelt und ihrem Ansprechpartner, Herrn Dr. Michael Schwake für die Förderung und Betreuung des vorliegenden Entwicklungsprojektes.