

Forschungsbericht FZKA-BWPLUS

Einsatz lacksparender, elektrostatischer
Hochrotationsglocken beim Lackieren von Holz
und Holzwerkstoffen
- praxisgerechte Maßnahmen -

D. Ondratschek, R. Hruschka, I. Chatziapossidis, E. Palandas

Universität Stuttgart

Institut für Industrielle
Fertigung und Fabrikbetrieb

Förderkennzeichen: BWD 20007

Die Arbeiten des Programms Lebensgrundlage Umwelt und ihre Sicherung werden mit Mitteln des
Landes Baden-Württemberg gefördert

Mai 2003

Abschlussbericht zum IFF Projekt-Nr.: BW D 20007

Einsatz lacksparender, elektrostatischer Hochrotationsglocken beim Lackieren von Holz und Holzwerkstoffen - praxisgerechte Maßnahmen -

Zuwendungs-Nr. : BW D 20007

Projektträger: Forschungszentrum Karlsruhe GmbH
Projektträger des Landes Baden-Württemberg
Programm Lebensgrundlage Umwelt
und ihre Sicherung (BWPLUS)

Projektleitung:

Dipl.-Ing. D. Ondratschek

bearbeitet von

R. Hruschka

I. Chatziapossidis

E. Palandas

Mai 2003

Stuttgart

Inhalt	Seite
Zusammenfassung	4
Summary	6
1 Ausgangssituation	7
1.1 Vorarbeiten der Machbarkeitsstudie	11
1.2 IST-Situation der Modellbetriebe	13
1.2.1 IST-Situation bei der Decklackierung von Fensterrahmen	15
1.2.2 IST-Situation bei der Strukturlackierung von Küchenfronttüren	17
1.2.3 IST-Situation bei der Hochglanzlackierung von Kfz-Innenteilen	18
1.3 Versuchsaufbau im Lackiertechnikum des Fraunhofer IPA	20
2 Wissenschaftlicher und technischer Stand	22
2.1 Merkmale von Holz- und Holzwerkstoffen	25
2.2 Beschichtungsstoffe	29
2.3 Wechselwirkungen und Vorgänge beim Lackauftrag	34
2.4 Ablüften und Trocknen	44
3 Weiterentwickelte Prüftechnik für die Holzlackierung	46
3.1 Bestimmung des Auftragswirkungsgrades	47
3.2 Einfaches Verfahren zur Beurteilung der Lackschichtdicke	52
4 Versuchsdurchführung und Ergebnisse	57
4.1 Decklackierung von Fensterrahmen	60
4.2 Strukturlackierung von Küchenfronttüren	69
4.3 Hochglanzlackierung von Kfz-Innenteilen	78
5 Anwendung und wirtschaftliche Bedeutung	87
5.1 Beispielrechnung für die Abschätzung der Amortisation	89
5.2 Abschätzung der Amortisation für die untersuchten Anwenderbetriebe	93
5.3 Resume	96

Zusammenfassung

Ziel dieses Projektes ist, praxisgerechte Maßnahmen zu erproben, die eine breite Anwendung der elektrostatischen Lackiertechnik für Holz und Holzwerkstoffe ermöglichen. Das dabei zugrundeliegende Lackierprinzip „Abführen der Ladungen über die nasse Lackschicht“ wurde bereits in der zuvor bearbeiteten Machbarkeitsstudie (Förder-Nr. BW D 20002) für Holzwerkstoffe überprüft und als geeignet eingestuft. Zur Erprobung praxisgerechter Maßnahmen wurden drei Anwendungsfälle

- * Decklackierung von Fensterrahmen,
- * Beschichtung von Küchenfronten mit Strukturlack und
- * Beschichtung von Kfz-Innentteilen mit Hochglanzlack

erfasst, im Lackiertechnikum nachgestellt (Schichtdicke und –verteilung analog zum Anwendungsfall), und anschließend die Lackierung mit der elektrostatischen Hochrotationsglocke ausgeführt.

Bei den Untersuchungen wurden mittels elektrostatischer Hochrotationszerstäubung unter Verwendung von Wasserlacken wesentliche Verbesserungen im Vergleich zur bisherigen IST-Situation der Anwendungsfälle erzielt (siehe Bild 1).

Die Qualitätsanforderungen Schichtdicke und –verteilung konnten bei elektrostatischer Lackierung ebenso erfüllt werden wie auf den Originalteilen. Die chemischen und physikalischen Beständigkeitswerte der für die elektrostatische Lackabscheidung eingesetzten Wasserlacke weichen systembedingt von den Werten der Originallacke ab.

Die Verschmutzungsneigung der elektrostatischen Applikation wird als unkritisch beurteilt, solange die Anlagendimensionen, die Kabinenluftströmung und die Zerstäubersteuerung angepasst betrieben werden.

Die Lackierung von Holz und Holzwerkstoffen mit elektrostatischen Hochrotationsglocken bietet hohe Einsparpotenziale. Für die erfolgreiche Umsetzung sind Freigabeuntersuchungen der einzusetzenden Wasserlacke erforderlich.

Relative Werte bezogen auf den IST-Zustand

Erzielte Einsparungen bei elektrostatischer Lackierung im Vergleich zum IST-Zustand

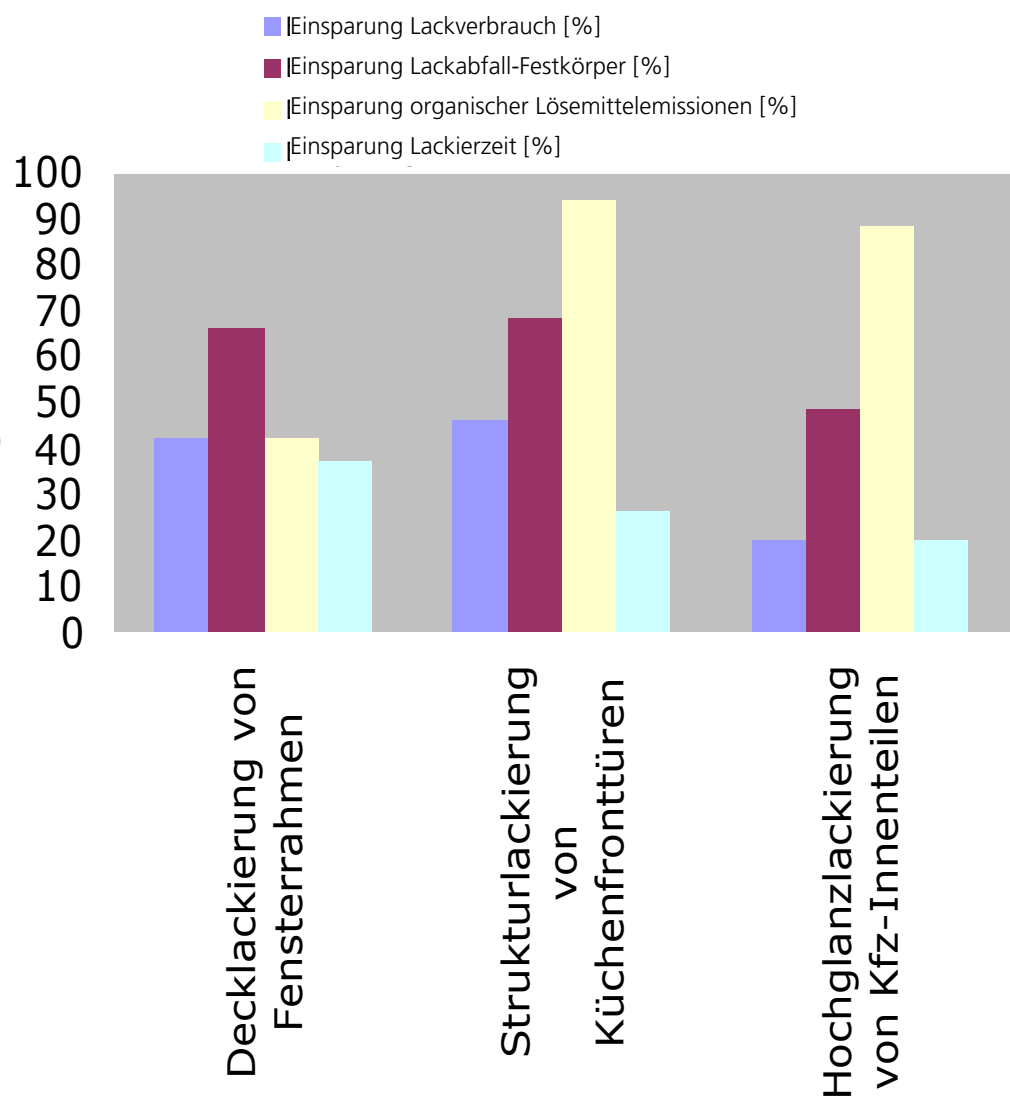


Bild 1: Beispiel für Einsparpotenziale bei elektrostatischer Lackierung

Summary

It is the aim of this project to test practice-oriented procedures that will allow for a broad application of electrostatic coating techniques for wood and wood composites. The underlying coating principle "Electric discharge across the wet paint film" has already been tested in the feasibility study for wood composites (Funding No. BW D 20002), and has been found to be suitable for practical use. For the testing of practice-proof procedures, three examples of application, namely

- * Finish painting of window frames,
- * Textured finishing of kitchen fronts, and
- * High-gloss painting of car interior parts

were acquired, reset in the coating lab of Fraunhofer IPA (average value and distribution of film thickness analog to practice examples), and finally the coating process was carried out with electrostatic high-speed rotational bells.

In the present studies, considerable improvements compared to the current status of the practice examples could be obtained by using electrostatic high-speed rotational atomization for water-based paints. Both, average value and distribution of film thickness could be reproduced as on the original parts.

Chemical and physical resistance of the water-based paints that were used in the electrostatic coating tests, however, differ from the values of the original paints. In the electrostatic application, the soiling tendency has been found to be non-critical, as long as plant dimensions, booth air flow, and atomizer control are operated in an adapted manner.

The coating of wood and wood composites by electrostatic high-speed rotational bells offers high saving potentials. For a successful implementation, clearance tests are required for the water-based paints to be used.

1. Ausgangssituation

Das Lackieren von Holz und Holzwerkstoffen kann folgenden fünf Zielstellungen gerecht werden:

- * Erzielung einer Schutzwirkung z.B. vor Verschmutzung durch Berühren oder Umwelteinflüsse, vor UV-Bestrahlung und vor Feuchteeinwirkung;
- * Aufbringen eines Dekors oder Finish z.B. durch farbliche Beschichtung;
- * Hervorheben einer Oberflächeneigenschaft z.B. Anfeuerung der Maserung durch unpigmentierte Schichten;
- * Strukturierung mit Oberflächeneffekten z.B. Kräusellacke;
- * Stabilisierung des Trägerwerkstoffs z.B. durch Laminieren, Furnieren.

Mit diesen Zielstellungen verbinden sich eine Reihe von Anforderungen, z.B. Fertigungs- und Bauteilspezifikation wie chemische, mechanische Beständigkeit, gute und effektive Verarbeitbarkeit, Umwelt und Gestaltungsfreundlichkeit, gute Reproduzierbarkeit der Prozesse und Bauteileigenschaften bei einem möglichst niedrigen Kostenaufwand. Häufig wird diese Zielstellung durch einen Spritzlackierprozess erreicht, der systembedingt hohe Lackmaterialverluste, Umweltbelastungen und Anlagenbetriebskosten verursacht. Zur Reduzierung der Umweltbelastungen und der Kosten in der Holzverarbeitenden Industrie sind vor allem Maßnahmen zur Erhöhung der Auftragswirkungsgrade von Bedeutung (Die Definition für den Auftragswirkungsgrad und die angewendeten Bestimmungsverfahren sind in Kap. 3 detailliert dargestellt). Maßnahmenmöglichkeiten sind:

- * Beschichtung durch nicht-zerstäubende Lackierverfahren (Tauchen, Gießen, Fluten), sofern die benötigten Schichteigenschaften ein solches Verfahren erlauben.
- * Vermehrt Einsatz von qualitativ hochwertigen 1K-Lackmaterialien in Verbindung mit Recycling-Techniken für Spritzlackierprozesse. Allein durch diese Recycling-Techniken kann der Auftragswirkungsgrad nahezu verdoppelt werden, da nur noch wenig Lackmaterial in den Abfall gelangt.
- * Weitere systematische Maßnahmen wie z.B. Optimierung der Warenträgerflächenbelegung (insbes. mit automatischer Teileerkennung), der FirstRun-Quote, der Farbwechselhäufigkeiten und der Zerstäubergeräteeinstellungen (z.B. Schichtdickenoptimierung zur Reduzierung der Überbeschichtung) erhöhen vor allem beim Einsatz von nicht recyclingfähigen 2-K Materialien den Auftragswirkungsgrad.

Diese systematischen Maßnahmen zur Materialeinsparung können durch den Einsatz von elektrostatischen Lackauftragungssystemen durch deren hohen Auftragswirkungsgrad zusätzlich unterstützt werden. Ein typisches Beispiel für die Anwendung der elektrostatischen Lackauftragungssysteme ist die Automobilbranche mit ihrer hohen Flächenleistung.

Die beim Spritzlackieren von Holz und Holzwerkstoffen häufig eingesetzten Druckluft- und Airlesszerstäuber realisieren je nach Bauart lediglich Werte von 20 % bis 50 % für den Auftragswirkungsgrad. Die Folgen sind Lackmaterialverluste, Emissionen und Abfallentsorgungskosten (siehe Bild 2).

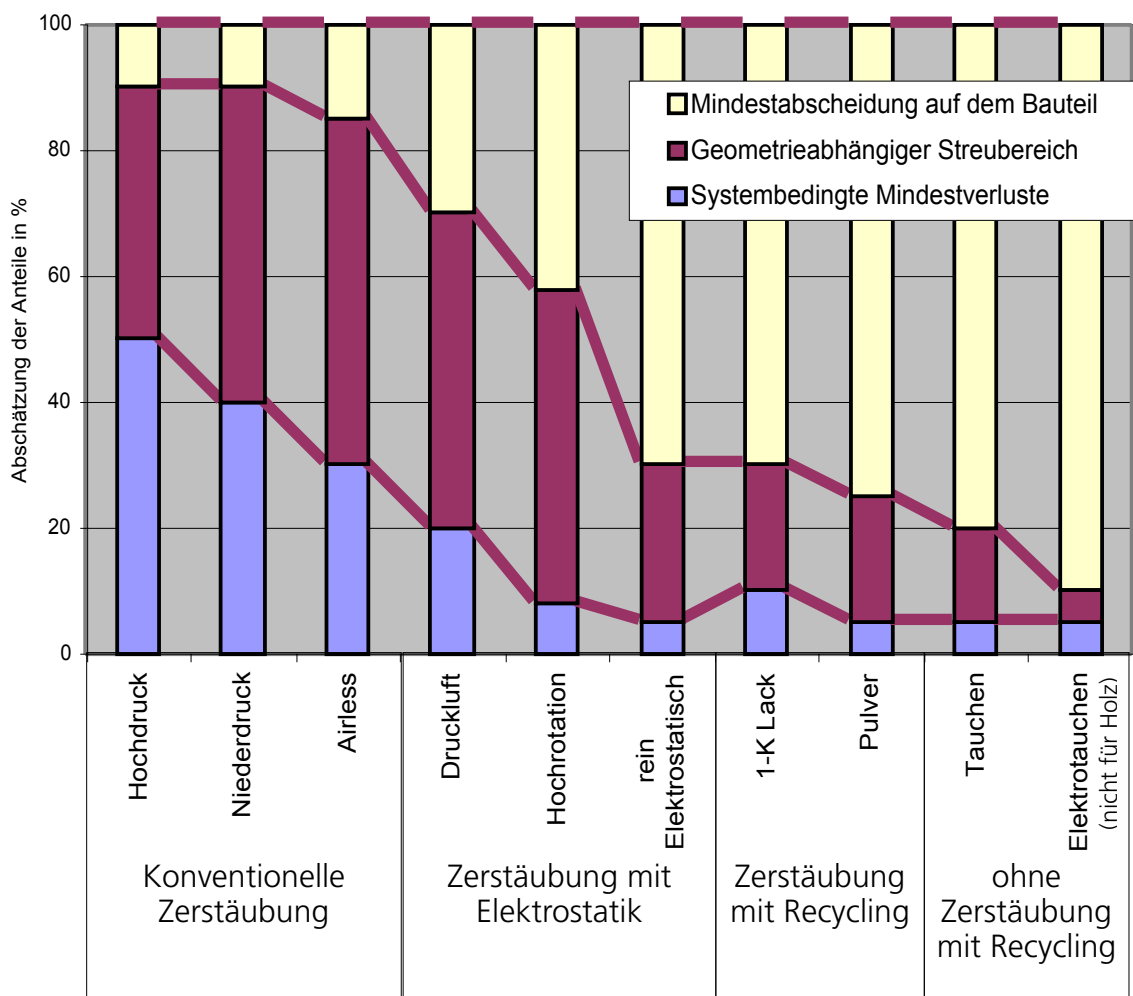


Bild 2: Erfahrungswerte zu systembedingten Lackverlusten bei den häufigsten Lackauftragsverfahren.

Der Einsatz von elektrostatischen Lackierverfahren setzt Werkstücke voraus, die zum hochspannungsführenden Sprühorgan bzw. zu den aufgeladenen Lackpartikeln einen elektrischen Gegenpol bilden, so dass

- * die elektrischen Feldkräfte zum Transport der Partikel zum Werkstück und
- * die Coulombkräfte zwischen den Partikelladungen und ihren influenzierten Spiegelladungen an der leitfähigen, geerdeten Werkstückoberfläche zur Abscheidung des Lackes genutzt werden können, d.h. es ist
- * eine gleichmäßige Felddausbildung zwischen Sprühorgan und Werkstück,
- * eine Erdung der Werkstückoberfläche und damit
- * eine ausreichende Wirkung der Coulombkräfte sowie
- * eine definierte Ladungsableitung zum Erdpotenzial

während der Lackierung erforderlich. Um Holz nicht nur konventionell, also mit pneumatischen oder Airlesszerstäubern, sondern elektrostatisch lackierbar zu machen (siehe Bild 3), muss entweder durch entsprechende Präparation der Teile vor der Beschichtung eine ausreichende Oberflächenleitfähigkeit hergestellt oder durch andere Maßnahmen erreicht werden, dass zumindest während der Beschichtung die elektrischen Feld- und die Coulombkräfte wirken sowie die Ladungen abgeleitet werden können. Da es bei den klein- und mittelständischen Unternehmen der Holzverarbeitenden Industrie bisher noch sehr wenig Erfahrungen im Umgang mit elektrostatischen Zerstäubern gibt, sind die Fragen

- * der Fertigungssicherheit (First-Run Quote),
- * des Aufwandes und
- * der Investitionen

zu beantworten. Bei Großunternehmen werden Holzbauteile (Fensterrahmen) bereits seit mehreren Jahren mit elektrostatischen Hochrotationsglocken erfolgreich lackiert.

Für häufig anzutreffende Lackieranlagen (Flachteilelackieranlage mit horizontal laufendem Bandförderer, Lackieranlage mit Hängeförderer) wurden im Laufe dieses Projektes Musterlösungen geschaffen, aus denen Umsetzungsempfehlungen für unterschiedliche Anforderungen entwickelt wurden.

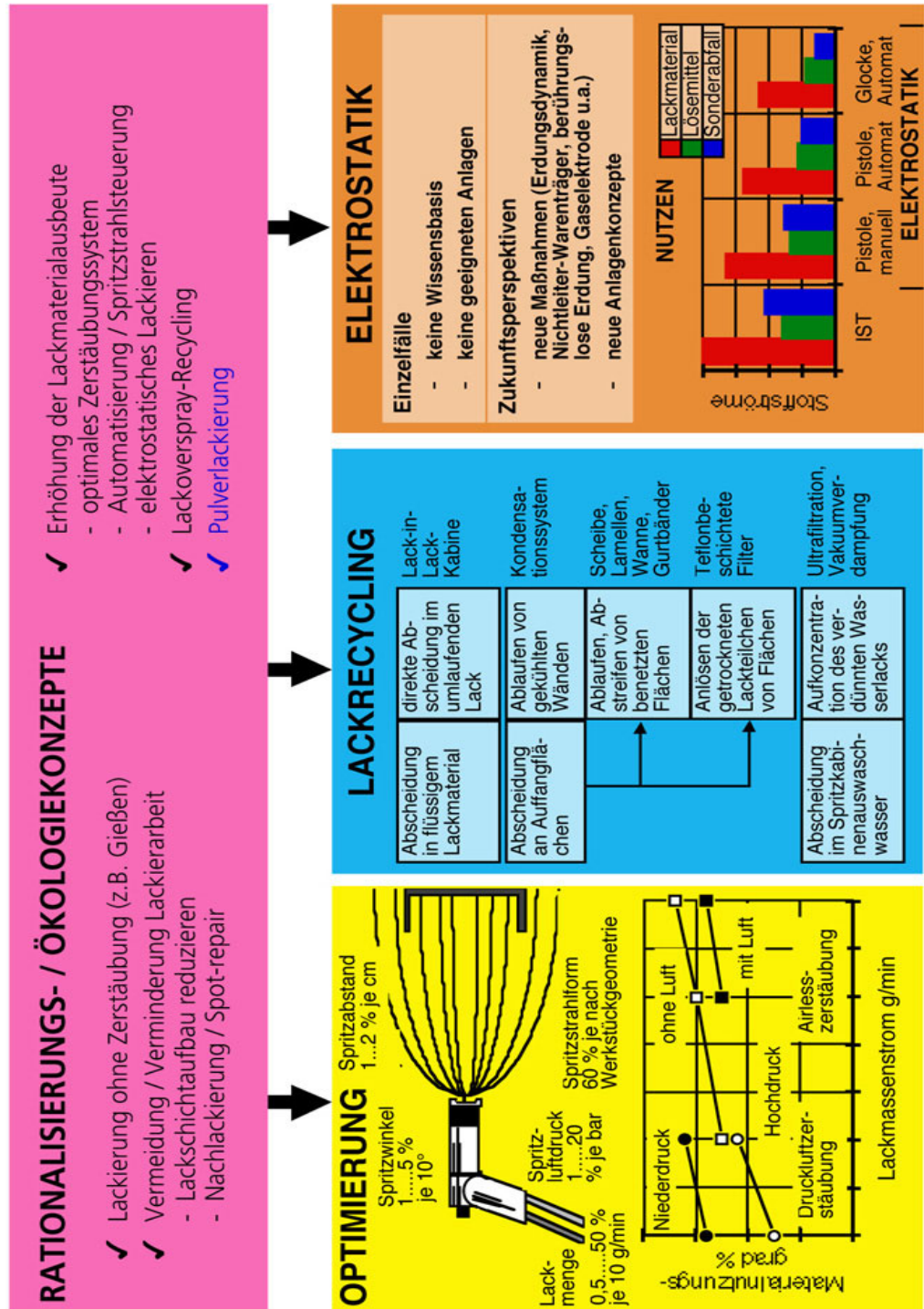


Bild 3: Forschungsbedarf für die Holz-Lackierung

1.1 Vorarbeiten der Machbarkeitsstudie

Um die einsetzbaren Technologien beim Lackieren mit elektrostatischen Hochrotationsglocken für Holzwerkstoffe zu erproben und Aussagen über die Erfolgsaussichten zu erhalten, wurde eine Machbarkeitsstudie durchgeführt (Einsatz lacksparender, elektrostatischer Hochrotationsglocken beim Lackieren von Holz und Holzwerkstoffen Machbarkeitsstudie, ZuwendungsNr.: BWD 20002, Laufzeit: 01.02.2000 - 30.09.2000).

Die Untersuchungen wurden überwiegend nach dem Prinzip "Abführung der Ladungen über den Nasslackfilm" durchgeführt, da dieses Lackierkonzept bei Verwendung leitfähiger Lacke mit einfachen Maßnahmen umsetzbar ist (siehe Bild 4). Die bei diesem Beschichtungsprinzip stattfindenden Vorgänge lassen sich schematisch folgendermaßen beschreiben:

Die bei der Lackverarbeitung den Lackpartikeln mitgegebene elektrostatische Ladung wird beim Benetzen der Werkstückoberfläche mit Wasserlack über den leitfähigen Nasslackfilm zum Erdkontakt hin abgeführt. Diese Vorgehensweise kann durch zusätzliche Maßnahmen (z.B. Einsatz von Gas- und Drücke Elektroden, Werkstückträger aus Nichtleitermaterialien, leitfähige, geerdete Hinterlegung der Werkstücke, Befeuchten der Werkstücke und eine erhöhte Umgebungs-Luftfeuchtigkeit bei der Lackverarbeitung) unterstützt werden.

Dieses Beschichtungsprinzip wurde zuerst im AIF-Vorhaben (Nr. 10820 N/1) "Entwicklung von fertigungstechnischen Maßnahmen zur Anwendung elektrostatischer Lackierverfahren für Kunststoffteile" (01.9.1996 bis 31.05.1998) angewendet und erprobt. In der Machbarkeitsstudie konnte dieses Beschichtungsprinzip für zwei unterschiedliche Anlagentypen, die in der Praxis bei der Lackierung von Holz und Holzwerkstoffen häufig vorkommen (Flachteilelackieranlage mit Bandförderung und Lackieranlage mit Hängeförderer), angewendet und die erwarteten Verbesserungen gegenüber den Spritzlackierverfahren ohne elektrostatische Unterstützung bestätigt werden.

Die untersuchten Maßnahmen bezogen sich auf die Optimierung der Erdungsdynamik (z.B. geeignete Erdungsmaßnahmen) in Verbindung mit einer variablen Parametrierung der Lackieranlage (z.B. Lenkluftvolumenstrom, Sprühabstand, Spannung) hinsichtlich Flächen bzw. Stückzahlleistung und Anlagenverschmutzung.

Die Auftragswirkungsgrade bei der Anwendung elektrostatischer Hochrotationszerstäuber zeigen eine Steigerung von bis zu 35 % im Vergleich zu den Ergebnissen von Lackierpistolen mit Niederdruckluftzerstäubung (HVLP). Konkret wurde

Lackierprinzip: Ladungsabfluss über den Nasslackfilm

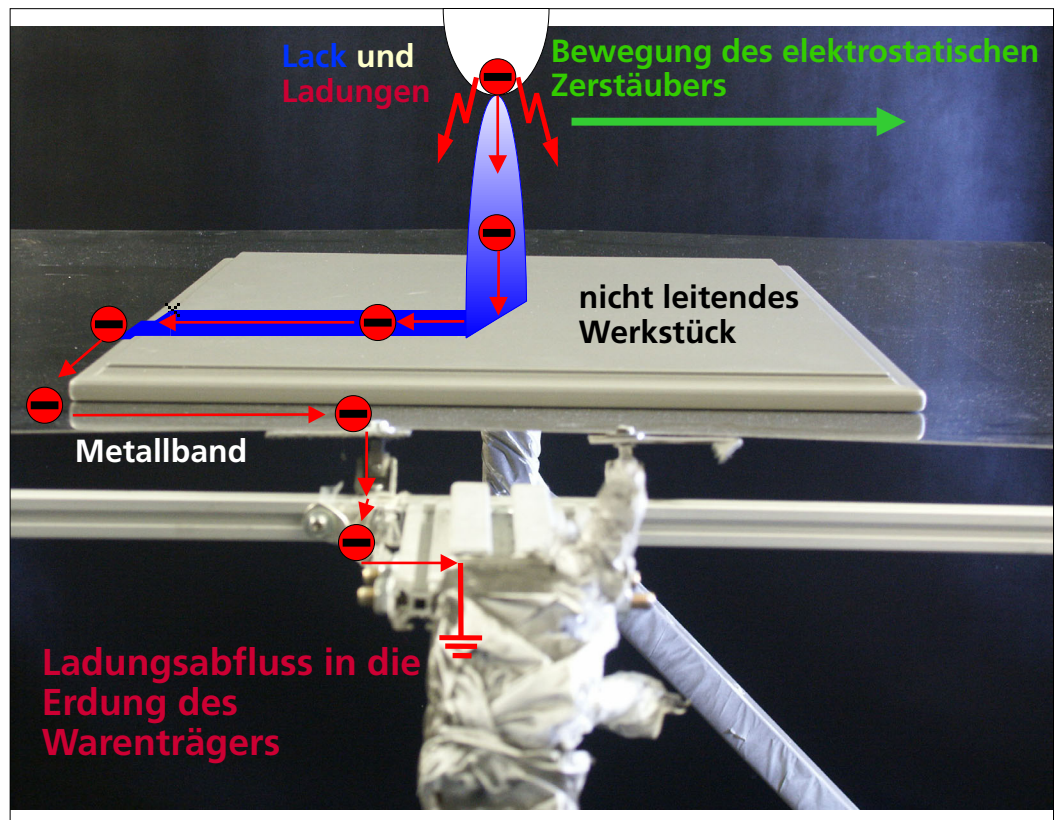


Bild 4: Schematische Darstellung des Lackierprinzips für Nichtleiterwerkstoffe

bei einer offenen Förderbandkonstruktion ein Auftragswirkungsgrad von ca. 93 % erreicht. Der maximal erreichte Auftragswirkungsgrad einer HVLP-Anlage lag dagegen lediglich bei 60 %.

Bei den Untersuchungen wurden mittels elektrostatischer Hochrotationszerstäuber mit Kontaktaufladung folgende Werte erzielt:

- * Erhöhung des Auftragswirkungsgrades um rund 35 %,
- * Reduzierung des Lackverbrauchs um rund 30 % sowie
- * Absenkung des Lackkoagulanfalls um rund 80 %.

Die Ergebnisse der Machbarkeitsstudie bilden für die vorliegenden Untersuchungen eine technologische Basis. Noch verbleibende Aufgabenstellungen, wie z.B.:

- * die Sicherstellung von ausreichenden elektrischen Eigenschaften für den Abscheideprozess (Prozessfenster),
- * die Beeinflussung der Holzfaseraufrichtung und Quellung beim Einsatz von Wasserlacken (Auswahl von geeigneten Vorbehandlungsverfahren und Lacksystemen),
- * der Trockenzeiten von Wasserlackschichten auf Holzwerkstoffen (Auswahl und Erprobung verschiedener Verfahren)

stellen für die Verfahrenstechnik wichtige Kernpunkte zu den darauffolgenden Untersuchungen dar. Hinsichtlich der Zusatzmaßnahmen und Arbeitsschritte, die für elektrostatische Lackauftragssysteme erforderlich sind, konnten konkrete Empfehlungen erarbeitet werden.

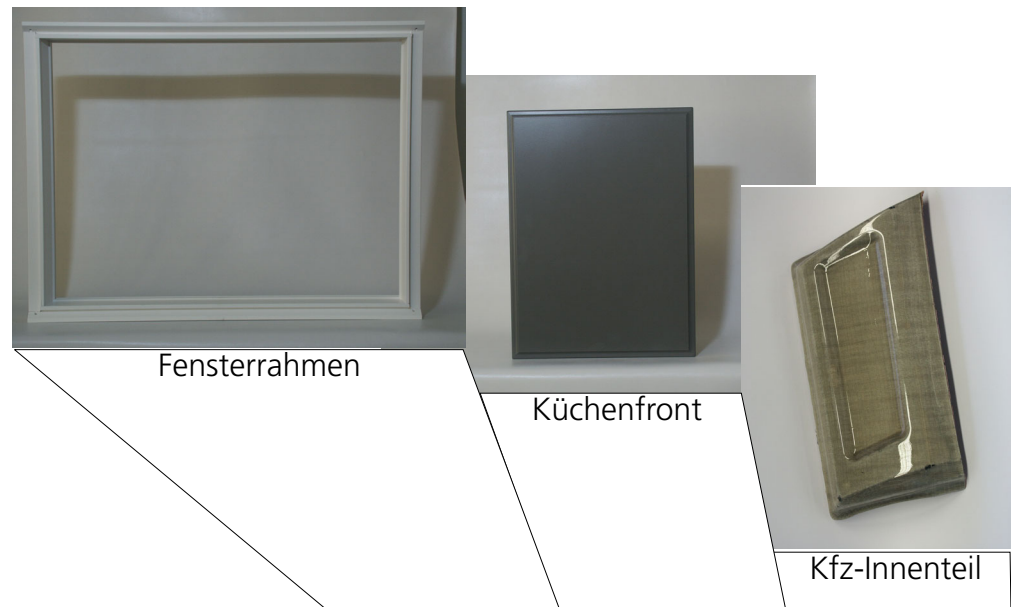
Hinsichtlich der Fertigungssicherheit sind erwartungsgemäß Empfehlungen nur eingeschränkt wirksam, d.h. an die jeweilige Ausführung und Umsetzung gebunden. Hier können vor allem Personalschulungen und Praxiserfahrungen bei der Beseitigung noch bestehender Probleme im Einzelfall helfen.

Als weiterer wichtiger Punkt werden Abschätzungen zu den Kosten und Nutzen beim Lackieren mit elektrostatischen Lackabscheidesystemen ausgeführt.

1.2 IST-Situation der Modellbetriebe

Die Erprobung von praxisgerechten Maßnahmen für die elektrostatische Lackierung von Holzbauteilen setzt eine detaillierte Kenntnis der betrieblichen Praxis unterschiedlicher Betriebe und Lackieraufgaben voraus. Diese erforderlichen Kenntnisse wurden mit umfangreichen IST-Zustandsaufnahmen bei drei Modellbetrieben gewonnen. Aus Gründen der Interessenwahrung dieser Modellbetriebe werden nicht alle internen Angaben erläutert, sondern nur die aus der Sicht des Projektes erforderlichen und für die Umsetzung der elektrostatischen Lackierung notwendigen Rahmenbedingungen (z.B. Dimensionen und Typ der Lackieranlagen, eingesetzte Zerstäuber, Werkstücke, Lacksysteme, Schichteigenschaften der Originalteile).

Auf der Basis der IST-Situationen in den Betrieben wurden drei Lackiersituationen zur Untersuchung ausgewählt, wie sie als häufig anzutreffende Alltagssituation feststellbar sind (Übersicht in Bild 5).



Kriterien (Modellanlagen)	Anwender 1	Anwender 2	HIB Bruchsal
Art der Teile	verleimtes Vollholz	folienbeschichtetes MDF, Kanten gefräst	Echtholz furnierlagen laminiert auf Metallschale
Maße der Teile in mm	950x1150x120	400x700x18	80x235x35
Anordnung Lackierposition	hängend, Kette	liegend, Band	liegend, Band
Teile-Vorbehandlung	gefräst, Sperrgrund flutlackiert	Schliff (180), z.T. automat. Bürsten	Schliff (150/180)
Anzahl Lackaufträge	2	3 - 4	7 - 13
Lackauftrag beim Spritzlackieren	4 autom. Airless-Zerstäuber + 4 Hochrotationsglocken	Flachteileautomat mit 4 Airless-Zerstäubern	Flachteileautomat mit 4 HVLP-Zerstäubern
befeuchtete Zuluft	ja	nein	nein
Lackaufbau	Zweischichtlackierung mit Wasserlacken, keine Zwischenbearbeitung	Sperrgrund, 1 x Farb- bzw. Strukturlack, 1-2 x Klarlack (Lösemittelsysteme), mit Zwischenschliffen	Sperrgrund, Isolierung, 6 - 8 x Klarlack (2 K und 3 K Lösemittelsysteme)
Lackierzeit je Werkstück	176 s	27 s	4 (6) s (je Auftrag)
Auftragswirkungssgrad	32 - 35 %	43 - 52 %	47 - 53 %
Beschreibung der fertigen Lackschicht (Gesamtsystem)	bis 60 µm Farblack, seidenmatt	bis 145 µm, strukturiert, seidenmatt	bis 1000 µm transparent, hochglänzend

In den untersuchten Unternehmen werden jeweils mehrere Lackieranlagen mit z.T. beträchtlichen Abweichungen in der Prozess- und Anlagentechnik betrieben. Die Daten der Zusammenfassung stellen daher Modellanlagen dar !

Bild 5: Übersicht über die IST-Zustandsaufnahme bei den Anwendern

1.2.1 IST-Situation bei der Decklackierung von Fensterrahmen

Werkstückspektrum:

Ausschließlich Fensterprofile und Rahmen aus Kiefer-Vollholz, stabverleimt, gefräst. Die Werkstückdimensionen liegen zwischen 400 * 600 * 50 mm (kleinstes Fenster) und 1400 * 1600 * 200 mm (größter Rahmen).

Lackmaterialien und Lackierverfahren:

Die Fensterprofile werden zweischichtig lackiert. Die erste Schicht besteht aus einem Isoliergrund. Die Beschichtung wird im Flutverfahren in zwei automatischen Durchlaufanlagen mit Hängeförderer aufgetragen (siehe Bild 6). Der Isoliergrund ist ein 1-K Wasserlack, wahlweise weiß oder transparent. Eine Flutanlage ist mit weißem Lack befüllt, eine mit



Bild 6: Aufnahme einer automatischen Spritzlackieranlage mit Hängeförderer (Quelle Fa. Rippert).

transparentem Lack. Der Isoliergrund trocknet bei Raumtemperatur in einem separaten Trockenraum. Es erfolgt kein Zwischenbearbeitungsschritt. Die zweite Schicht besteht aus einem Decklack. Die Beschichtung wird im Spritzverfahren in einer automatischen Durchlaufanlage mit Hängeförderer aufgetragen. Der Decklack ist ein 1-K Wasserlack, wahlweise weiß oder transparent. Beim Spritzlackieren sind je Werkstückseite vier Hubautomaten montiert. Zwei Hubautomaten sind mit Airlesszerstäubern bestückt, zwei weitere mit elektrostatischen Hochrotationsglocken. Dabei sorgt ein Teileerkennungssystem für die Höhenanpassung der Hubbewegungen an die Werkstückgröße und den Farbwechsel. Der Decklack trocknet bei Raumtemperatur in einem separaten Trockenraum. Es erfolgt kein weiterer Bearbeitungsschritt.

Der Lackverbrauch liegt bei etwa 250 t/a, davon etwa 80 t/a Isoliergrund (Flutlack) und 170 t/a Decklack (Spritzlack).

Aus dem Teilespektrum wurde für die vorliegende Untersuchung ein Fensterrahmen mit 950 * 1150 * 120 mm ausgewählt. Der Auftragswirkungsgrad bei der Decklackierung dieses Werkstücks (Kombiniertes Spritzverfahren mit Airlesszerstäubung und elektrostatischer Hochrotationsglocke) wurde mit 32 - 35 % gemessen, der Lackverbrauch liegt bei ca. 780 g / Werkstück. Die Schichtdicke der Decklackschicht beträgt nach der Trocknung 25 µm - 45 µm auf der Fläche, 12 µm - 55 µm an Kanten und Nuten. Die Lackierzeit je Werkstück (176 s) setzt sich aus der Summe der Lackierzeiten der acht Zerstäuber zusammen.

Einmal wöchentlich erfolgen Reinigungsarbeiten.

1.2.2 IST-Situation bei der Strukturlackierung von Küchenfronttüren

Werkstückspektrum:

Überwiegend Flachteile aus gefrästen MDF-Platten. Die Werkstückdimensionen liegen zwischen 100 * 2500 * 12 mm (Blende) und 600 * 750 * 20 mm (Küchenfront).

Lackmaterialien und Lackierverfahren:

Die Bauteile werden dreischichtig lackiert.

Die erste Schicht besteht aus einem Isoliergrund, die zweite Schicht aus einem Struktur- bzw. Farblack, die dritte Schicht aus einem transparenten Decklack. Die Schichten werden im Spritzverfahren in einer automatischen Flachteilelackieranlage mit geschlossenem Förderband aufgetragen (siehe Bild 7). In der Flachteilelackieranlage sind vier Airlesszerstäuber an einem quer zur Förderrichtung arbeitenden Hubautomaten montiert. Dabei sorgt ein Teileerkennungssystem für die Anpassung der Ein- und Ausschaltpunkte der Zerstäuber an die Werkstückgröße. Der Farbwechsel erfolgt manuell durch Auswechseln der Zerstäuber und durch Lackumstellung. Jede Lackschicht trocknet bei 30 - 33 °C in einem separaten Trockenkanal. Nach der Trocknung erfolgt eine visuelle Schichtkontrolle, evtl. ein Zwischenbearbeitungsschritt (Schleifen). Werden beide Werkstückseiten lackiert, durchlaufen die Werkstücke die Lackieranlage zweimal mit manuellem Wenden.

Der Lackverbrauch in der Flachteilelackieranlage liegt bei etwa 210 t/a. Es werden überwiegend 2-K Polyurethanlacke (Lösemittellacke) von mehreren Lackherstellern verarbeitet. Erste Versuche mit Wasserlacksystemen als Alternative zu den Lösemittellacksystemen zeigten zufriedenstellende Ergebnisse (die Schichtdicke, Farbe und der optische Eindruck des Wasserlackes wird dabei mit einem Lösemittellack verglichen).

Aus dem Teilespektrum wurde für die vorliegende Untersuchung eine Küchenfronttür mit 400 * 700 * 18 mm ausgewählt. Der Auftragswirkungsgrad bei der Strukturlackierung dieses Werkstücks wurde mit 43 - 52 % gemessen, der Lackverbrauch liegt bei ca. 140 g / Werkstück. Die Schichtdicke der Decklackschicht beträgt nach der Trocknung 40 µm - 45 µm auf der Fläche, 28 µm - 55 µm an Kanten und Nuten.

Die Lackierzeit je Werkstück (27 s) setzt sich aus der Summe der Lackierzeiten der vier Zerstäuber zusammen.

Zweimal täglich erfolgen Reinigungsarbeiten (z.B. Abrakeln von Lacknebeln bei Schichtbeginn).

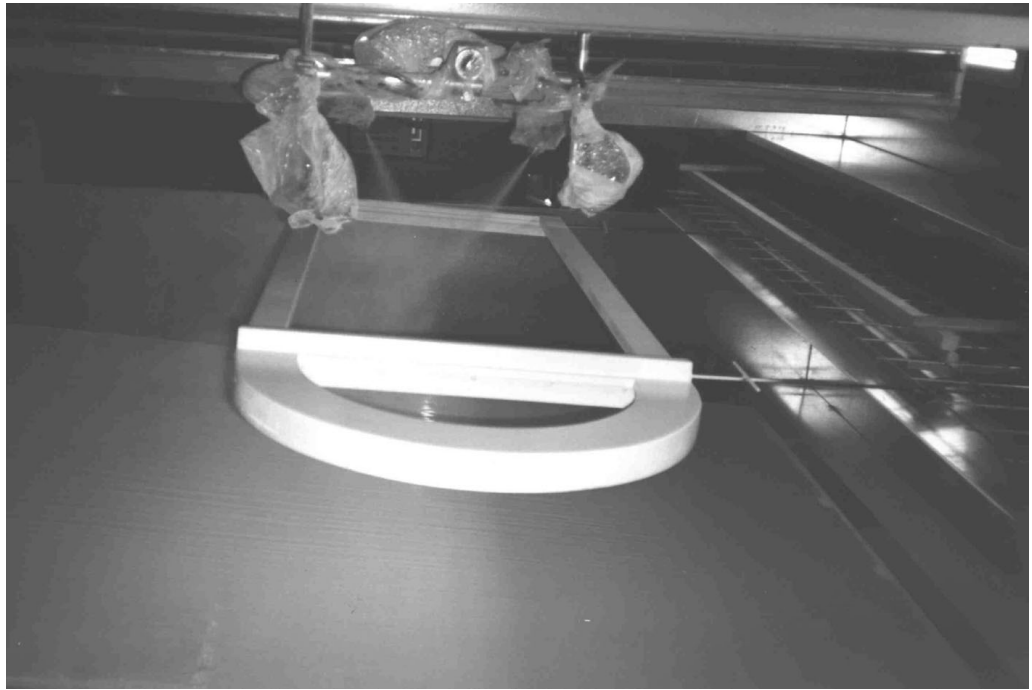


Bild 7: Aufnahme einer automatischen Spritzlackieranlage mit horizontalem Förderband (Flachteilelackieranlage); Quelle: Fa. Venjakob

1.2.3 IST-Situation bei der Hochglanzlackierung von Kfz-Innenteilen

Werkstückspektrum:

Überwiegend flache Formteile aus laminierten Echtholz-Furnierplatten auf Metallträgerrahmen. Die Werkstückdimensionen liegen zwischen 50 * 200 * 20 mm (Aschenbecherabdeckung) und 400 * 1200 * 150 mm (Armaturenbrett).

Lackmaterialien und Lackierverfahren:

Die Bauteile werden aufgrund der hohen optischen Anforderungen sieben- bis dreizehnschichtig lackiert.

Die erste Schicht wird als Grundierung, die zweite Schicht als Isolierung, die dritte bis siebte bzw. dreizehnte Schicht als Decklackschicht bezeichnet. Da in einem Auftragsgang nicht die gesamte Decklackschicht auf einmal läuferfrei aufgetragen wird, durchlaufen die Werkstücke die Decklackierlinien mehrmals (etwa 250 - 300 g/m² Polyesterlack je Auftragsgang). Zwischen den Auftragsgängen erfolgt ein ca. 20 minütiges Zwischenablüften.

Die Grundierung wird in 4 Spritzständen mit manuellen Lackierarbeitsgängen aufgetragen.

Für die Isolierung wird meist eine automatische Flachteile-Lackieranlage genutzt (vergl. Bild 7, besonders schwierig zu lackierende Werkstückbereiche werden ebenfalls von Hand in den Spritzständen isoliert und decklackiert).

Für die Decklackierung mit Polyesterlack stehen zwei automatische Flachteile-Lackieranlagen (vergl. Bild 7) zur Verfügung. Nach der Grundierung ist der Ablauf wie folgt:

1. Trocknen der Grundierung bei Raumtemperatur, alternativ in einem Trockenraum bei 33 °C.
2. Schleifen und Retuschieren, bei Bedarf patinieren.
3. Auftrag der Isolierung, bei komplizierten Geometrien manuell, bei einfacheren Geometrien in der automatischen Flachteilelackieranlage; die Trocknung der Isolierung erfolgt analog zu Punkt 1.
4. Auftrag der Decklackierung, bei komplizierten Geometrien manuell, bei einfacheren Geometrien in einer der automatischen Flachteilelackieranlagen.
5. Trocknung der Decklackierung analog zu Punkt 1.
6. Visuelle Schichtkontrolle, evtl. ein Zwischenbearbeitungsschritt (Schleifen mit Korn 220) und erneut Auftrag weiterer Decklackschichten.
7. Trocknung des Decklacks, manuelles Schleifen bis Korn 600 und Politur.

Der Lackverbrauch in der Lackieranlage liegt bei etwa 290 t/a. Es werden 2-K Polyurethanlack (Grundierung, Isolierung), 1-K Nitro Schellack (im Einzelfall) und 3-K Polyesterlacke (Decklack) verarbeitet.

Aus dem Teilespektrum wurde für die vorliegende Untersuchung eine Türgriffmulde mit 80 * 235 * 35 mm ausgewählt. Der Auftragswirkungsgrad bei der Hochglanzlackierung dieses Werkstücks wurde mit 47 - 53 % gemessen, der Lackverbrauch liegt bei ca. 10 g / Werkstück (je Auftragsgang).

Die Schichtdicke der Decklackschicht beträgt nach der Trocknung
700 µm - 800 µm auf der Fläche,
550 µm - 650 µm an Kanten.

Die Lackierzeit je Werkstück (4 s /Schichtauftrag) setzt sich aus der Summe der Lackierzeiten der vier Zerstäuber zusammen.

Dreimal täglich erfolgen Reinigungsarbeiten (z.B. bei Schichtbeginn).

1.3 Versuchsaufbau im Lackiertechnikum des Fraunhofer IPA

Die Lackierversuche wurden überwiegend im Lackiertechnikum für Flüssiglacke des Fraunhofer IPA, Stuttgart durchgeführt (Bild 8). Die Beschichtungsanlagen des Lackiertechnikums umfassen eine geschlossene Lackierlinie im Automobilmaßstab, verschiedene Spritzstände und einen Klimaspritzraum. Die Lackierlinie ist so ausgeführt, dass Produktionsbedingungen nachgestellt werden können. Zur Applikation sind drei Lackierroboter, ein 3-Achsen Seitenautomat und mehrere Hubautomaten installiert.

Aufgrund von Vorversuchen wurden die Parameter für die Beschichtung entsprechend dem Anwendungsfall erprobt und festgelegt. Beim Versuchsaufbau wurde besonders darauf geachtet, die jeweiligen Kennwerte des IST-Zustandes, wie z.B. Auftragswirkungsgrad, Lackierzeit, Schichteigenschaften, etc., weitestgehend originalgetreu nachzustellen. Für diese Versuche wurde eine automatische Niederdruckpistole LP 90 Jet NR92/HVLP der Fa. Sata und eine Airless-Pistole DR 3 der Fa. Graco eingesetzt.

Der Versuchsaufbau bestand dazu aus einer Lackierzone mit einer Grundfläche von 4 * 6,5 m. In der Lackierzone ist die Zuluft (über Filterdecke) in Geschwindigkeit, Temperatur und Feuchtegehalt regelbar. Die Abluftführung erfolgt über den Boden der Lackierzone, angepasst an die Zuluftmenge. In der Lackierzone befindet sich ein 6-Achsen Lackierroboter (Trallfa TR5002 mit Hollow-Wrist-Handgelenkachsen der Fa. ABB) mit vollständiger Peripheriegeräteausstattung (z.B. Luftmengenregelung, regelbare Lackversorgung, wahlweise modular anschließbare Hochspannungsversorgungen), an den unterschiedliche Zerstäuber bis 4,2 kg montierbar sind.

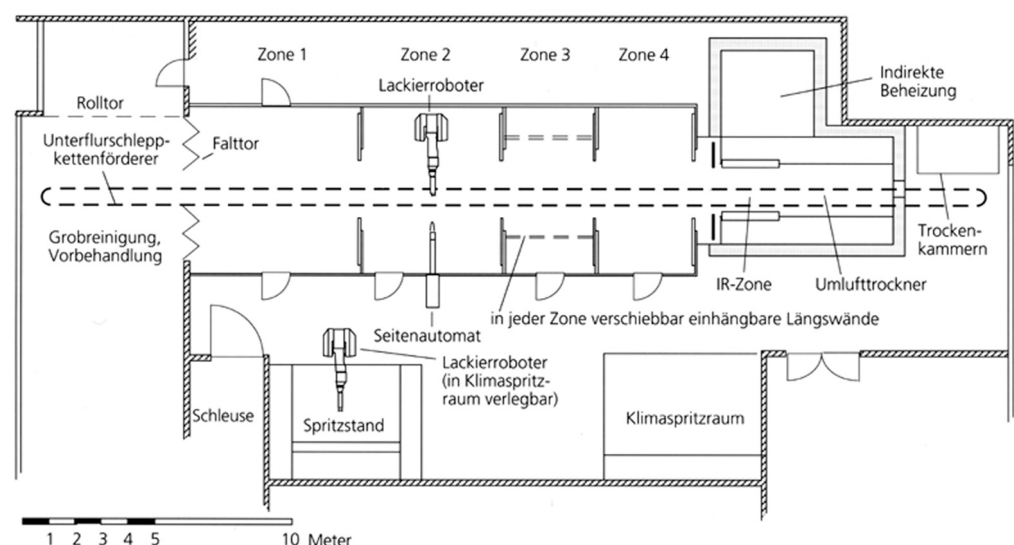


Bild 8: Skizze Lackiertechnikum im Fraunhofer IPA

Zur Werkstückaufnahme wurde eine Metallrahmenkonstruktion entwickelt, die die Simulation sowohl einer Hängeförderanlage als auch einer Flachteileförderung bei unterschiedlichen Werkstückgeometrien erlaubt.

Am Lackierroboter wurde für die Erprobung der elektrostatischen Lackierung eine Hochrotationsglocke (Hochrotationszerstäuber EcoBell für wässrige Lacke mit Innen- und wahlweise Außenaufladung der Fa. Dürr) anstelle des konventionellen Zerstäubers angeschlossen. Mit dieser Hochrotationsglocke wurden die Originalwerkstücke nach dem in Kap. 1.1 erläuterten Lackierprinzip "Ladungsableitung über den Nasslackfilm" beschichtet (Bild 9).

Der Nachweis zum erfolgreichen Einsatz von elektrostatischen Hochrotationszerstäubern bei der Holz- und Holzwerkstofflackierung im Vergleich zu den Anwendungsfällen erfolgt anhand der Bestimmung des Auftragswirkungsgrades und der Schichtdickenmessung (siehe auch Kap. 3).

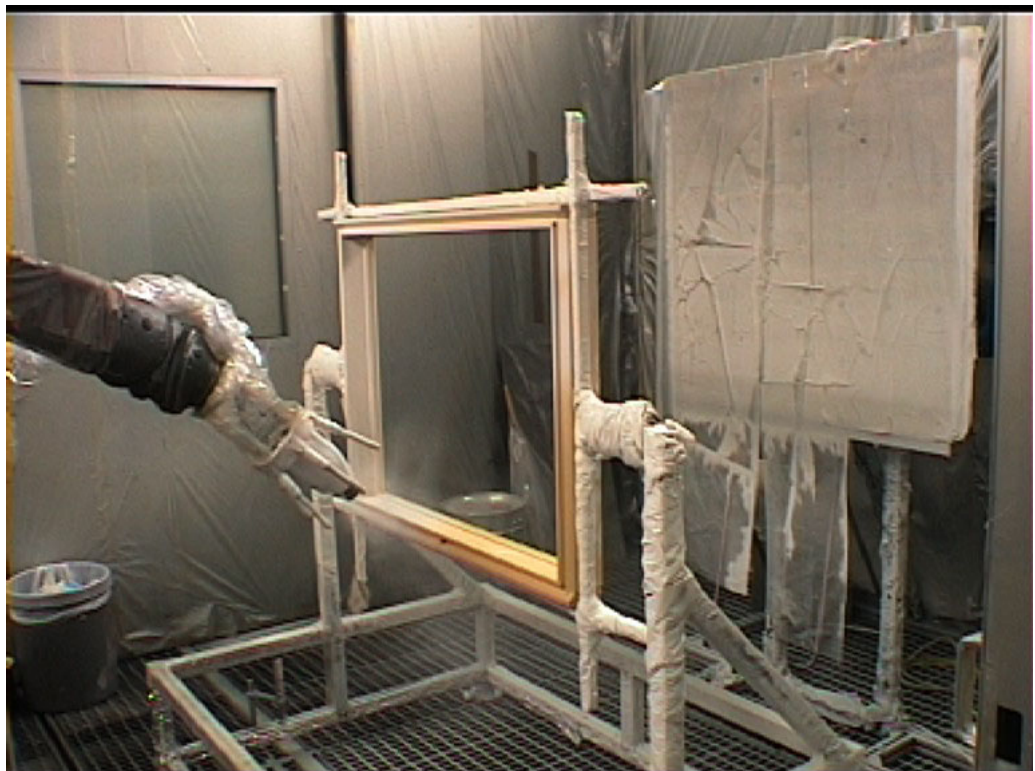


Bild 9: Versuchsanordnung mit elektrostatischer Hochrotationsglocke im Technikum beim Lackieren von Fensterrahmen

2 Wissenschaftlicher und technischer Stand

Bereits eingesetzt werden die elektrostatischen Lackierverfahren in der Holzindustrie bei der Lackierung von Paneelen, Stühlen und Fenstern.

Es bestehen jedoch noch keine umsetzbaren Regeln zur breiteren Anwendung der elektrostatischen Lackierung auf Holzwerkstoffen. Maßnahmen, die eine elektrostatische Lackierung von Holz, Holzwerkstoffen und kunststoffbeschichteten Holzwerkstoffen ermöglichen, sind z.T. seit Jahren bekannt und in wenigen betriebspezifischen Einzelfällen erprobt. Die zahlreichen Einflussgrößen und deren Wechselwirkungen, die sich im Zusammenhang mit den Maßnahmen auf die elektrostatische Lackabscheidung auswirken, wurden bisher nicht systematisch untersucht, so dass die Erkenntnisse bei den realisierten Anwendungsfällen nicht ohne weiteres auf andere Produkte und Anlagen übertragen werden können. Die bisherigen allgemeinen Praxiserfahrungen sowie die Ergebnisse einer Literaturrecherche ergeben folgenden Stand bezüglich der möglichen Maßnahmen zur Durchführung der elektrostatischen Lackierung in der Holzindustrie:

- * Verwendung von Holzwerkstoffmaterial mit eingearbeiteten **leitfähigen Zuschlagstoffen** (z.B. Ruß oder Ammonium-Phosphat in MDF):
Diese Materialmodifikationen sind prinzipiell auch für Folien (folienbeschichtete Holzwerkstoffe) denkbar. Erste Tastversuche wurden von MDF-Herstellern (z.B. Fa. Glunz, Göttingen) durchgeführt, Ergebnisse von systematischen Reihenversuchen liegen nicht vor.
Nach den bisherigen Erfahrungen ist zwar eine permanente hohe Leitfähigkeit einstellbar, es verändern sich dabei jedoch auch die übrigen Eigenschaften der Werkstoffe. Nicht zuletzt aufgrund der erheblichen Mehrkosten bei der Teileherstellung wird diese Maßnahme auf wenige Einzelanwendungen beschränkt bleiben.
- * Auftragen von **leitfähigkeitserhöhenden Lösungen** auf die Teileoberfläche (z.B. Wörostat 61666, Tiger Static Fluid 510), z.B. durch manuelles Wischen oder Sprühen:
Die elektrostatische Lackierung kann, bei entsprechend verträglichen Materialien, direkt auf die noch feuchte Leitlösungsschicht erfolgen. Kritisch ist bei dieser Maßnahme der zusätzliche Materialeinsatz (oft verbunden mit Lösungsmittlemissionen), osmotische Effekte bei der Feuchtigkeitsbelastung des Lackfilms sowie eine nicht konstant bleibende Wirkung. Sinnvoll ist die Erprobung wässriger Leitlösungen in Verbindung mit Wasserlacken, wobei jedoch die Holzfaserquellung zu berücksichtigen ist.
- * Auftragen **leitfähiger Plasmapolymer-Schichten**:
Diese Art von Schichten für Holzoberflächen befindet sich noch in der Entwicklungsphase (Fraunhofer IWS, Dresden). Kritisch sind u.a. der hohe appa-

relative Aufwand bzw. die hohen Mehrkosten sowie die fertigungstechnisch zu langen Beschichtungszeiten, so daß diese Maßnahme nur für wenige Fälle interessant ist, bei denen eine Plasmabeschichtung aus anderen Gründen erforderlich ist.

- * **Auftragen einer Vorbeschichtung**, z.B. in Form einer Grundierung oder Beize mit leitfähigen Inhaltsstoffen, die nach dem Trocknen bzw. Härten eine leitfähige Schicht bilden. Mit dieser Maßnahme ist eine gezielte, permanente Oberflächenleitfähigkeit einstellbar. Bei einer zusätzlichen Vorbeschichtung ist in der Regel ein hoher Arbeits-, Verfahrens- und Kostenaufwand erforderlich. Sinnvoll ist diese Maßnahme nur, wenn eine aus anderen Gründen erforderliche Vorbeschichtung leitfähig eingestellt werden kann. In der vorliegenden Untersuchung wurden Versuchsreihen erfolgreich durchgeführt.
- * Durch die **Erwärmung der Werkstückoberfläche**, z.B. auf 60 °C bis 80 °C, ist eine Absenkung des Oberflächenwiderstandes von Holzoberflächen zu erwarten. Der Umfang der Wirkung bei den unterschiedlichen Substraten ist bisher nur in Einzelfällen bekannt. Vor allem aufgrund der in der Produktionspraxis schwierig zu beherrschenden Teiletemperatur-Zeitfenster wird diese Maßnahme auf Ausnahmefälle beschränkt bleiben.
- * Eine erhöhte **Umgebungs-Luftfeuchtigkeit** führt insbesondere bei den Massiv-Hölzern zu einer Feuchtigkeitsaufnahme und damit zu einem merklichen Absinken des elektrischen Oberflächenwiderstandes (Konditionierung siehe Bild 11).
Bei den Untersuchungsreihen (Machbarkeitsstudie) wurde festgestellt, dass die Wirkung von zahlreichen Randbedingungen, u.a. von der Einwirkdauer, der Luftströmungsgeschwindigkeit und der Lufttemperatur beeinflusst wird. Je nach Holzsorte sind Holzfeuchtigkeiten von 8 bis 12 % ausreichend für eine erfolgreiche elektrostatische Lackierung. Bei vielen Holzwerkstoffen, z.B. folienbeschichteten Holzwerkstoffen, ist diese Maßnahme nicht möglich. Hinzu kommt, dass aus Qualitätsgründen (z.B. Gefahr der Rissbildung) die Holzfeuchten in der Praxis unterhalb von 10 % liegen.
Zu prüfen ist daher der Zusammenhang zwischen der Erhöhung der Holzfeuchte nur im Oberflächenbereich, z.B. durch Bedampfen, der Wirksamkeit der elektrostatischen Lackierung und der Qualität.
- * Die leitfähige, **geerdete Hinterlegung** der Werkstücke ist bei solchen Teilen möglich, die lediglich auf den Außenflächen bzw. nur auf einer Seite elektrostatisch zu lackieren sind. Bei dieser Maßnahme ist kein zusätzlicher Prozessschritt und kein zusätzlicher Materialeinsatz erforderlich. Die Hinterlegung kann z.B. durch geerdete Metallflächen erfolgen (durch entsprechende

Holzart	Oberflächenwiderstand ($10^9 \Omega$)	
	23°C / 30% F _{rel}	23°C / 70% F _{rel}
Weißbuche 1	2,3	1,1
Weißbuche 2	4,1	1,6
Rotbuche 1	2,3	1,2
Rotbuche 2	2	0,6
Ahorn 1	0,9	0,3
Ahorn 2	1,9	0,7
Eiche 1	2,1	1,3
Eiche 2	1,3	0,8
Spanplatte 1	25,4	22,3
Spanplatte 2	26,2	22,9

Bild 11: Elektrischer Oberflächenwiderstand verschiedener Holzarten

Werkstückträger-Gestaltung), wobei ein direktes Anliegen der leitfähigen Hinterlegung am Teil wichtig ist. Beim Anwendungsfall Türgriffmulde liegt ein Werkstück vor, das sich aufgrund seiner metallischen Teilerückseite hervorragend für derartige Kontaktierungen eignet.

- * Das Auftragen einer elektrisch **leitfähigen Schicht auf die Teilerückseite** kann mit flüssigen (z.B. Leitlösungen, Leitlacke) und folienförmigen Systemen (z.B. Al-Folien, leitfähiges Abdeckpapier) erfolgen. Bei der elektrostatischen Lackierung wird der Auftragswirkungsgrad erhöht, es scheiden sich jedoch vermehrt Lacknebel auf der Teilerückseite ab. Werden folienförmige Systeme eingesetzt und diese nach der Lackierung vom Werkstück getrennt, können die Nachteile des "Umgriffes", die Lackoversprayverschmutzung auf der Teilerückseite, vermieden werden. Aufgrund des hohen gerätetechnischen Aufwandes wird diese Maßnahme jedoch auf wenige Anwendungen beschränkt bleiben.
- * Die Wirksamkeit von **Gaselektroden** zur berührungslosen Entladung der Werkstücke und damit zur Verbesserung der elektrostatischen Lackierbarkeit wurde bei Laborversuchen nachgewiesen (AIF-Vorhaben Nr. 10820 N/1). In der Praxis werden Gaselektroden als unterstützende Maßnahme bei der elektrostatischen Leiterplattenbeschichtung eingesetzt. Bei dieser Maßnahme fällt kein zusätzlicher Prozessschritt sowie kein zusätzlicher Materialeinsatz an. In der vorliegenden Untersuchung wurden keine weiteren Versuchsreihen durchgeführt.

2.1 Merkmale von Holz und Holzwerkstoffen und deren Auswirkungen auf die elektrostatische Lackierung

Holz und Holzwerkstoffe haben aufgrund ihres Charakters als nachwachsender Naturstoff für eine hochqualitative Lackierung ungünstige Voraussetzungen. Z.B. liegt bei einem Werkstück aus Kiefer-Vollholz ein Bauteil vor, das hinsichtlich folgender maßgeblicher Eigenschaften vollständig inhomogen ist (sowohl makro- als auch mikroskopisch):

- * Porosität und Saugvermögen,
- * teilweise geringe Härte und Dichte,
- * starke Neigung zu Ausgasungen, bestehend aus Luft, Wasser und Holzinhaltstoffen,
- * Volumenänderung und Quellen bei Änderung der Feuchte,
- * Veränderung der elektrischen Leitfähigkeit bei Feuchteänderung,
- * teilweise geringe Wärmeleitfähigkeit,
- * Neigung zur Faseraufstellung durch Flüssigkeiten und Dämpfe und
- * bleibende Farbveränderung (Anfeuerung) bei Einfluss von Flüssigkeiten und Wärme.

Daher muss ein Lackierkonzept eine ausreichende Flexibilität gewährleisten, um die Holzeigenschaften durch geeignete Vor- und Zwischenbehandlungsverfahren günstig beeinflussen zu können (Wässern, Versiegeln, Imprägnieren, Dämpfen, Konditionieren, Schleifen, Bürsten, Polieren, Thermoreibglätten, Walzen), und ein gelungenes Lackfinish zu erhalten. Üblicherweise wird diese Aufgabenstellung durch einen mehrschichtigen Lackaufbau im Spritzverfahren (Sperrgrund, Füller, Decklack 1, evtl. Decklack 2) mit Zwischenarbeitsgängen (automatische und manuelle Schleifprozesse) erfüllt. Bei dieser Vorgehensweise entstehen jedoch große Lackmaterialverluste und ein hoher maschineller und manueller Aufwand.

Die bereits in Kap. 1.1 beschriebene Möglichkeit für die Sicherstellung des erforderlichen Ladungsabflusses während dem Beschichtungsprozess "Ladungsabfluss über den Nasslackfilm" beruht auf der Verwendung von elektrisch leitfähigen Lacksystemen (Wasserlacke). Eine dieses Lackierprinzip störende Eigenschaft ist die Holzfaseraufstellung und Quellung durch Wasseraufnahme. Daher wurde experimentell ermittelt,

- * welche Voraussetzungen gegeben sein müssen, damit eine elektrostatische Lackierung evtl. mit den bisher eingesetzten Lösemittellacken erfolgreich ist,
- * welche Modifikationen am Lösemittellacksystem notwendig, möglich und sinnvoll sind,

* welche Möglichkeiten bei der Verwendung von Wasserlacken bestehen, die Holzfaseraufstellung und Quellung zu Reduzieren (siehe Kap. 2.3).

Zu diesen Themen sind Prozessfenster für die elektrostatische Lackierung von Kunststoffteilen bereits bekannt. Diese Prozessfenster waren für Holz und Holzwerkstoffe zu überprüfen und anzugeben, welche Rahmenbedingungen die Integration von Systemen zur Sicherstellung der elektrischen Eigenschaften in die üblichen Lackschichtaufbauten erlauben.

In Versuchsreihen mit verschiedenen Kunststoffen wurde systematisch untersucht, in welchem Verhältnis der elektrische Oberflächenwiderstand eines Werkstücks mit der zu erwartenden Beschichtungsstrecke beim elektrostatischen Lackieren mit Lösemittellacken (geringe elektrische Leitfähigkeit von $0,1 \mu\text{S}$) steht. Ein Werkstück, welches einen hohen elektrischen Oberflächenwiderstand besitzt (z.B. ABS, 10^{15} Ohm), kann nur im Bereich des Erdkontaktes bis zu einem Abstand von ca. 10 cm zum Erdkontakt mit einer homogenen Lösemittel-Lackschicht beschichtet werden. Je geringer der elektrische Widerstand des Werkstückes ist (z.B. leitlösungsbeschichtetes ABS, $10^9 - 10^{11} \text{ Ohm}$), desto größer wird die homogen mit Lösemittel-Lack beschichtbare Fläche vom Erdkontakt aus (Bild 12).

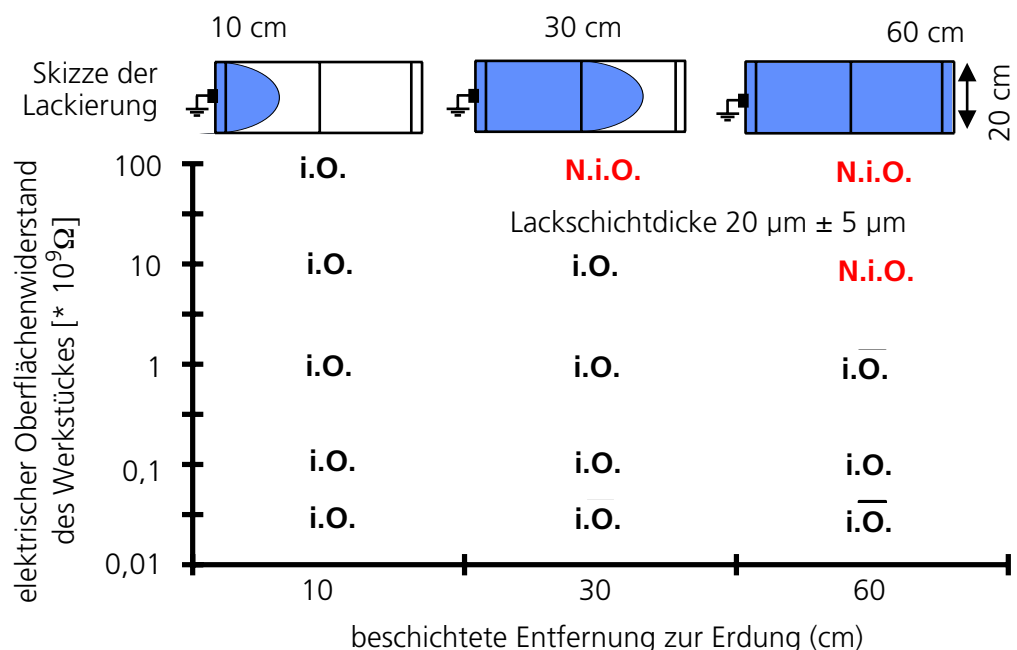


Bild 12: Homogen lackierte Fläche mit gering leitfähigem Lack auf Werkstücken unterschiedlichen elektrischen Widerstandes; (Quelle: AIF-Vorhaben Nr. 10820 N/1)

Für eine sicher funktionierende elektrostatische Lackierung ist ein ausreichend homogener elektrischer Oberflächenwiderstand von $< 10^9$ Ohm erforderlich, wenn die elektrischen Ladungen der Lackpartikel ausschließlich über das Werkstück abfließen sollen. Bei der Lackierung mit Lösemittellacken liegt ein Lackmaterial mit einer geringen elektrischen Leitfähigkeit vor ($0,1 \mu\text{S}$), daher kann die Ladung in diesem Fall nur über das Werkstück abfließen. Eine Überschreitung, auch nur eine partielle Inhomogenität, führt daher häufig zu Störungen der Lackschichtdicke.

Werkstoffe mit einem elektrischen Oberflächenwiderstand $< 10^9$ Ohm, homogen an jeder Stelle der Oberfläche (z.B. feucht-konditioniertes Vollholz), können mit gering leitfähigen Lösemittel-Lacken elektrostatisch beschichtet werden. Die elektrischen Eigenschaften von Holz und Holzwerkstoffen haben somit einen wesentlichen Einfluss auf die elektrostatische Lackierbarkeit mit elektrisch gering leitenden Lösemittel-Lacken.

Die Konditionierbarkeit von Holz und Holzwerkstoffen mit Feuchtigkeit kann immer dann für die Sicherstellung der elektrostatischen Lackierbarkeit genutzt werden, wenn das eingesetzte Lösemittel-Lacksystem mit der erzeugten Holzfeuchte verträglich ist.

Die chemischen und technologischen Merkmale der mit Lösemittellack elektrostatisch beschichteten Werkstückoberflächen gleichen denen der Beschichtung ohne Elektrostatik.

In diesem Zusammenhang müssen die Prozessparameter beim Konditionieren, rel. Luftfeuchte, Temperatur und Geschwindigkeit der Umgebungsluft, Temperatur, Feuchtigkeit und Lagerzeit des Holzes ständig überwacht und eingehalten werden. Unzulässiges Überschreiten der notwendigen Holzfeuchte führt neben Unverträglichkeitsreaktionen mit dem Lacksystem auch zu störendem Quellen des Holzes (Rissbildung) und zur Holzfaseraufstellung (Rauigkeit).

Besitzen die zu beschichtenden Werkstücke einen elektrischen Oberflächenwiderstand $> 10^9$ Ohm, auch nur partiell, und ist eine Beeinflussung der elektrischen Werkstückeigenschaften nicht möglich (leitfähige Grundierung, Konditionierung, Befeuchtung), kann die Ableitung der vom Lack bei der elektrostatischen Beschichtung mitgeführten Ladungen über die nasse Lackschicht erfolgen.

In Versuchsreihen wurde festgestellt, wie die elektrischen Eigenschaften von Lackmaterialien, z.B. durch den Verarbeitungszustand beeinflusst werden (siehe Bild 13). Weiterhin wurden Werkstücke mit hohem elektrischen Widerstand elektrostatisch lackiert und der Auftragswirkungsgrad bei der Lackierung in Abhängigkeit von den elektrischen Eigenschaften der Lacksysteme untersucht (siehe Bild 14).

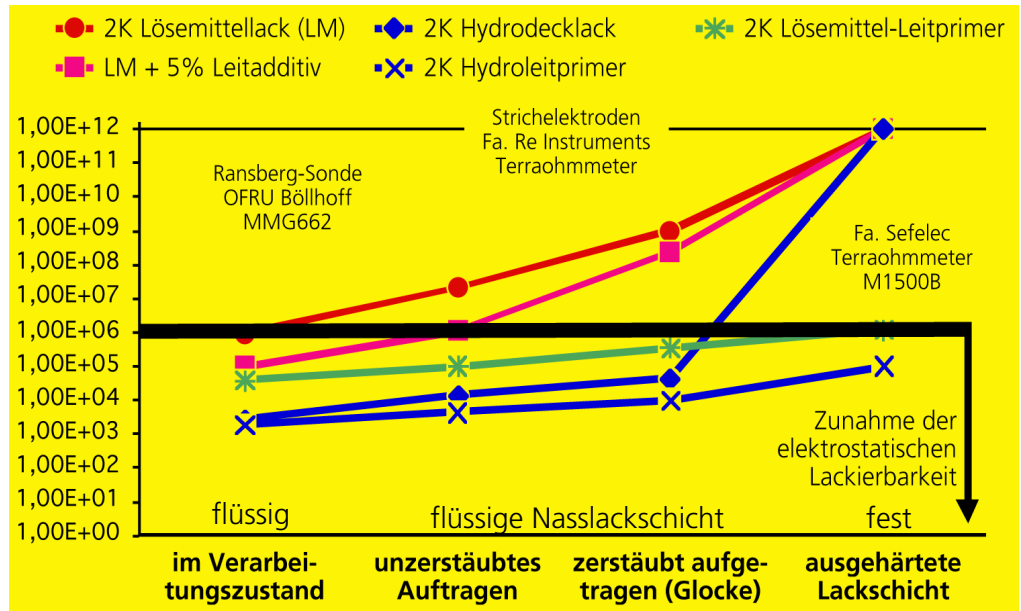


Bild 13: Elektrischer Widerstand unterschiedlicher Lackmaterialien, abhängig vom Verarbeitungszustand; (Quelle: AIF-Vorhaben Nr. 10820 N/1)

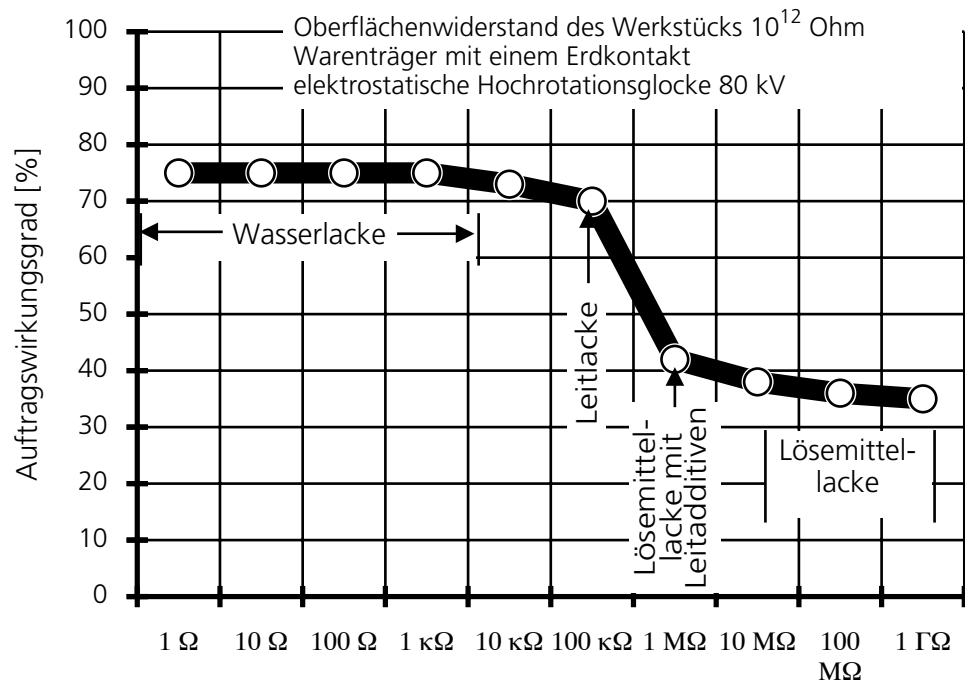


Bild 14: Auftragswirkungsgrad einer elektrostatischen Lackierung in Zusammenhang mit dem elektrischen Durchgangswiderstand verschiedener Lacke; (Quelle: AIF-Vorhaben Nr. 10820 N/1)

Der eingesetzte Lack muss für eine erfolgreiche elektrostatische Lackierung von Werkstücken mit einem hohen elektrischen Widerstand eine Leitfähigkeit von $> 1 \mu\text{S}$ aufweisen und die Lackierbahn muss derart geführt werden, dass zwischen Erdung und Lackauftrag ständig ein geschlossener nasser Lackfilm besteht (siehe Kap. 1.1). Einer der im Rahmen dieser Untersuchung eingesetzten Lösemittellacke (2-K PUR Sperrgrund für MDF, $0,1 \mu\text{S}$) ließ sich durch Zugabe von 5 % Leitlösung (enthält tertiäre Ammoniumsalze) anstelle der üblichen Lackverdünnung modifizieren ($5 \mu\text{S}$), und eine elektrostatische Lackierung mit diesem modifizierten Lacksystem nach dem Lackierprinzip "Abführen der Ladungen über den nassen Lackfilm" ausführen. Die entstandene Lackschicht war auf dem Werkstück (Küchenfront) geschlossen, die Schichtdicke bei 40 - 45 μm , was dem Originalzustand der lackierten Werkstücke entspricht. Allerdings war der Auftragswirkungsgrad mit nur 45 % sehr gering für ein derart flächiges Bauteil. Wird ein solches Bauteil mit Wasserlack elektrostatisch beschichtet, liegt der Auftragswirkungsgrad bei $> 65 \%$.

2.2 Beschichtungsstoffe

Die grundlegende Kenntnis der in der Holzbranche verwendeten Lacksysteme, ihrer wesentlichen Bestandteile und Eigenschaften ist für das Verständnis der in dieser Untersuchung gewonnenen Ergebnisse wesentlich. Bei der Auswahl der Lacksysteme für die Holzlackierung müssen vor allem die Eigenschaften

- * Poren-Benetzbarkeit,
- * Schutz gegen flüchtige Inhaltsstoffe,
- * Elastizität,
- * Füllkraft,
- * Schleifbarkeit und
- * chemisch- technologische Beständigkeit

beachtet werden. Die in der Praxis realisierten Lackschichtaufbauten sind je nach Holzwerkstoff, gewünschtem Erscheinungsbild und betrieblichen Vorbedingungen unterschiedlich und stellen sich grundsätzlich wie folgt dar:

- * Furnier- und Massivholzbeschichtung:
 1. z.T. Isoliergrund
 2. z.T. Beize oder Lasur (Patinierlack)
 3. Klarlack (je nach Anwendung erfolgen 2 bis 6 Klarlackaufträge)

* MDF-Beschichtung:

1. Isoliergrund
2. Füller (je nach Anwendung erfolgen 1 bis 3 Fülleraufträge)
3. z.T. Vorlack (pigmentierter Vorlack oder Metalliclack)
4. Decklack (pigmentierter Lack oder Klarlack)

Für den Isoliergrund werden meist Polyurethan- und CN-Lacke mit organischen Lösemitteln eingesetzt. Zur Füllerbeschichtung werden überwiegend UV-härtende und 2K-Polyesterlacke mit organischen Lösemitteln eingesetzt. Für den Klar- bzw. Decklackbereich werden je nach Anforderungen meist folgende Lacke eingesetzt:

1. Cellulosenitratlacke (CN- Lacke);
2. Polyurethanlacke (PUR- Lacke);
3. säurehärtende Lacke (SH-Lacke);
4. UV- härtende Lacke;
5. Polyesterlacke (UP-Lacke).

Bei der IST-Zustandsaufnahme in den Betrieben wurde die Anwendung der folgenden Lacksysteme festgestellt.

Cellulosenitrat (Nitro-) lacke

Bei Klarlacken beträgt der Anteil an Filmbildner ca. 20 %, der Lösemittel- und Additivanteil beträgt ca. 80 %. Lacke mit einem hohen Anteil an Pigmenten haben einen Feststoffanteil von ca. 30 - 45 %, der Lösemittelgehalt beträgt dann ca. 55 - 70 %.

CN-Lacksysteme stellen auch in der heutigen Zeit noch einen großen Anteil in der Oberflächenbehandlung in Handwerk und Kleinindustrie (z.B. Tischler, Schreiner, Restaurator). Das lässt sich daher erklären, dass diese Lacke einfach und problemlos verarbeitet werden können. Eine gut geschliffene Oberfläche kann nach dem ersten Lackiervorgang schon nach ca. 20 bis 30 Minuten geschliffen und nochmals lackiert werden. Des weiteren weist der Lack die Eigenschaft auf, dass er immer wieder angelöst werden kann, was für den Handwerker eine Arbeitserleichterung bedeutet, wenn Schäden an der Fläche entstanden sind.

Die trockene Lackfläche hat eine mittlere Widerstandsfähigkeit bezüglich mechanischer und chemischer Einflüsse. Bei stark beanspruchten Flächen wie Küchenarbeits- oder Schreibtischplatten ist dieser Lack nicht unbedingt zu empfehlen. Aus diesem Grunde wird dieser Lack größtenteils für nicht zu stark beanspruchte Möbelteile verwendet. Ein Problem weisen CN-Lacksysteme im Hinblick auf die Gesundheitsbelastung durch den hohen Anteil an organischen Lösemitteln auf.

Polyurethanlacke

Polyurethanlacke (PUR- Lacke) sind Reaktionslacke mit einem vielfältigen Anwendungsspektrum. Sie bestehen aus zwei Komponenten, dem Lackharz und einem Härter, die vor der Verarbeitung in einem entsprechendem Verhältnis miteinander zu mischen sind. PUR-Lacke werden im Schreinerhandwerk auch DD- Lacke genannt, was auf die Handelsnamen der Fa. Bayer Desmophene® (Stammlack, Polyol) und Desmodur® (Härter, Isocyanathaltig) zurückzuführen ist. Es wird zwischen aromatischen (nicht lichtbeständig, z.B. für Möbellacke im Innenbereich) und aliphatischen (lichtbeständig, z.B. für den Außenbereich) Typen unterschieden. Konventionelle PUR-Lacke enthalten ca. 55 - 65 % organische Lösemittel, High-Solid Systeme etwa 20 - 30 %.

Bei der Verarbeitung muß beachtet werden, dass nicht ausgehärtete Lacke sehr empfindlich auf Fremdstoffe reagieren. Diese Eigenschaft sollte bei der Verwendung von Beizen oder Bleichmittel unbedingt beachtet werden. Die Zeit des Aushärtens und die Phase der Schleifbarkeit ist bei dieser Art von Lacken etwas länger. Nach ca. 24 Stunden ist der Lack durchgehärtet, eine vollständige Beständigkeit gegen Chemikalien und mechanische Belastungen ist jedoch erst nach etwa 10 Tagen gewährleistet. Diese Lacke werden für stark beanspruchbare Flächen wie zum Beispiel Küchen- und Badmöbel verwendet.

UV- Lacke

UV-Lacke sind Lacke (Polymerisationslacke oder Polykondensationslacke), die mit Hilfe von Photoinitiatoren unter ultravioletter Bestrahlung vergleichsweise schnell aushärten (wenige Minuten bis wenige Sekunden). Diese Photoinitiatoren nehmen Lichtenergie auf und zerfallen in reaktionsfreudige Spaltprodukte (Radikale), die wiederum eine Kettenreaktion auslösen - so lange, bis der Lackfilm vollständig ausgehärtet ist.

Durch den hohen Festkörpergehalt, bzw. die Einpolymerisation von organischen Lösemitteln haben UV-Lacke eine hohe Ergiebigkeit. So können zum Beispiel vier bis fünf mal so große Flächen mit der Lackmenge bearbeitet werden im Vergleich mit CN- Lacken. Für einen Quadratmeter werden vom CN-Lack ca. 300 Gramm benötigt. Der Verbrauch der UV-Lacke liegt bei gleicher Fläche nur um die 60 bis 75 g.

Die Verwendungsbereiche der UV-Lacke sind umfangreich, da die erzielten Beschichtungen sehr unempfindlich sind. Ein interessanter Einsatzbereich der Lacke ist zum Beispiel das Einsatzgebiet der Schulmöbel und Parkette. Für die Großindustrie hat der UV-Lack den großen Vorteil, dass er schnell ausgehärtet ist. Handwerksbetriebe und häufig auch mittelständische Unternehmen scheuen dagegen die Investition der UV-Trocknungsanlage.

Polyesterlacke

Ungesättigte Polyesterlacke (UP- Lacke) sind aus mehreren Komponenten zusammengesetzt. Der Stammlack besteht aus einem in Styrol gelösten ungesättigtem Polyesterharz. Als Zusatzlack oder Härter dienen organische Peroxidverbindungen (radikalische Polymerisation vergl. UV-Lacke). Der Festkörperanteil der UP- Lacke liegt häufig bei über 90 %. Diese Eigenschaft wird bei geschlossenporigen Lackaufbauten genutzt, da schon mit wenigen Arbeitsgängen eine Oberfläche mit hoher Schichtdicke erzielt werden kann. Die ausgehärteten Oberflächen sind kratz- und abriebfest, beständig gegen Lösemittel, sowie resistent gegen Temperatur- und Klimawechsel.

Des Weiteren besitzen UP-Lacke ein hervorragendes Standvermögen an senkrechten Flächen und einen brillanten Hochglanz. Die Lackauftragsmengen sind beim UP- Lack aufgrund des Standvermögens sehr hoch.

Die Nachteile der UP-Lacke sind:

- * die kurze Topfzeit (30 - 60 Minuten),
- * kleine Verarbeitungsfenster bezügl. der Raumtemperatur (20 °C - 25 °C),
- * UP- Lacke reagieren exotherm (Entzündungsgefahr).

Sofern ein Auftrag von zwei Schichten UP-Lack notwendig ist, wird die zweite Schicht Nass in Nass, nach ca. 10 bis 20 Minuten Zwischenablüften, aufgetragen. Ein weiterer Lackauftrag nach dem Ausreagieren (60 - 90 Minuten) ist nur möglich, wenn nach dem völligen Aushärten die Lackschicht sorgfältig angeschliffen wurde. Bis zur vollständigen Durchhärtung der Lackschicht ist eine Beschädigung oder Berührung der Lackschicht zu vermeiden, weil selbst schwache Fingerabdrücke in der fertigpolierten Fläche noch zu erkennen sind.

Wasserlacke

Der in der allgemeinen Industrie feststellbare Trend zum Einsatz von Wasserlack-Systemen hält auch in der Holzbranche unvermindert an. Daher wird angestrebt, Eigenschaften und Vorteile der bisher eingesetzten Lösemittellacke mit Wasserlacken zu erhalten. Die hohen Anforderungen des Gesetzgebers bezügl. der Reinheit der Abluft aus Lackierbetrieben hat weitgehend zur Entwicklung der Wasserlacke beigetragen und deren Einsatz beschleunigt.

Wasserlacke sind heute für vielfältige Anwendungen erhältlich. Für die Holzindustrie relevante Wasserlack-Systeme werden in

- * UV-Systeme,
- * 2-K-PUR-Systeme,

- * 2-K-Systeme mit Aziridin-Härter,
- * PUR-Dispersions-Systeme und
- * Acrylat-Dispersions-Systeme

unterteilt. Wasserlacke beinhalten organische Lösemittel (z.B. als Filmbildehilfsmittel bis zu 15 %), die an die Umwelt abgegeben werden. Speziell der Einsatz von Aminen ist bei der Frage nach Gesundheits- und Umweltbelastungen kritisch zu hinterfragen. Trotz dieser Risiken ist ein starker Anstieg auf dem Markt der Wasserlacke zu erkennen.

Wasserlacke besitzen auch bezüglich ihrer Verarbeitbarkeit andere Eigenschaften als Lösemittellacke. So ist z.B. die Viskosität, Scher- und Lagerstabilität, Anfälligkeit gegenüber Störstoffen und Koagulierbarkeit stark abweichend, was zu erheblichen Problemen bei der Verarbeitung in Lackieranlagen führen kann. Es sind daher nur wenige Ausnahmefälle bekannt, in denen in einer Lackieranlage sowohl Wasser- als auch Lösemittellacke ohne grossen Aufwand verarbeitet werden können (häufig rosten Lackieranlagen und -Baugruppen durch die Wasserdampfbelastung). Zusätzlich erschwert wird die Umstellung von Lösemittel- auf Wasserlacke durch die Unverträglichkeit der beiden Lacksysteme (organische Lösemittel verdrängen häufig Wasser, was zu Kraterbildung und Verklumpung führt).

Aus diesem Grund wird empfohlen, bei einer anstehenden Umstellung von Lösemittel-Lacksystemen auf Wasserlacke die bestehende Lackieranlage hinsichtlich der Möglichkeiten der Getrennthaltung der beiden Lacksysteme gründlich zu überprüfen. Dabei entstehende Neuinvestitionen für getrennte, wasserlackbeständige (korrosionsbeständige) Lackversorgungen und Zerstäuber, Lackierkabinen, Auswaschungssysteme, Ablüftzonen, etc. können in der Grössenordnung einer Neuanlage liegen.

Die Wasserlacke bieten sich, aufgrund ihrer hohen elektrischen Leitfähigkeit (> 1 mS), für die elektrostatische Lackierung auch von Nichtleitermaterialien (und inhomogenen Materialien) an. Das Lackierprinzip "Abführen der Ladungen über den nassen Lackfilm" kann für die Flächen-Beschichtung großer Werkstückbereiche eingesetzt werden, daher bestehen Einsparpotentiale von bis zu 50 % des Lackmaterialbedarfs. Auftretende Problembereiche wie z.B. Hinterschneidungen, Nuten und Kanten sind in ihrem Anteil an der zu lackierenden Fläche gering. Für die Beschichtung dieser Problembereiche bestehen nach dem Stand der Technik bereits unterschiedliche Lackierkonzepte (siehe Kap.2.3).

Das Aushärten von Wasserlackschichten erfolgt durch physikalische Prozesse, selbstvernetzende chemische Reaktionen, Strahlenhärtung. Nach dem Stand der Technik stehen unterschiedliche Systeme zur Verfügung (siehe Kap. 2.4 "Ablüften und Trocknen"), mit denen bereits Ablüft- und Trocknungszeiten, wie sie bei Lösemittellacken bekannt sind, realisiert wurden.

2.3 Wechselwirkungen und Vorgänge beim Lackauftrag

Eine gelungene elektrostatische Lackierung von Holzbauteilen erfordert zum einen das Verständnis der Vorgänge beim konventionellen Lackauftrag und zusätzlich die Beachtung und Einhaltung bzw. Anwendung der Gesetze der Elektrostatik. Daher wird im Folgenden zunächst auf die grundlegenden Vorgänge beim konventionellen Lackauftrag (ohne Elektrostatik) eingegangen.

Flüssige Lacke werden mit unterschiedlichen Verfahren (Konventionell: Gießen, Tauchen, Fluten, Walzen, Airless, HVLP oder Hochdruckspritzen) auf den Untergrundwerkstoff aufgetragen. Bei Spritzverfahren verdunstet bereits beim Zerstäuben ein Anteil des Verdünnungsmittels (org. Lösemittel oder Wasser). Entsprechend den Eigenschaften von Lacksystem und Holzfasern kommt es zu Wechselwirkungen (Bild 15):

- * Lack wird als Flüssigkeit sehr schnell (bereits nach wenigen Sekunden) von Holzfasern aufgesaugt. Dabei quillt der Werkstoff. Der Quellbereich und der Aufsaugbereich sind je nach Holzwerkstoffart und Vorbehandlung (Schliff, Verdichtung, Vorbeschichtung) unterschiedlich stark ausgeprägt, bei gering verdichteten Holzwerkstoffen erfolgt zusätzlich die Holzfaseraufrichtung.
- * Die Konzentration des Verdünnungsmittels im Lack (organische Lösemittel / Wasser) nimmt durch die Verdunstung in die Umgebungsluft ab. Sobald eine bestimmte Verdünnungsmittelmenge verdunstet und ausreichend Energie in der Lackschicht vorhanden ist, setzt die Vernetzung der Lackschicht ein.
- * Bei Wasserlacken kann durch die Anwesenheit von Luft und Licht an der Lackschichtoberfläche eine Hautbildung stattfinden. Wasser als Verdünnungsmittel ist nicht in der Lage, die beginnende Hautbildung durch Rücklösungsprozesse zu verhindern.
- * Die Verdunstung des Verdünnungsmittels verursacht eine Temperaturabsenkung in der lackierten Werkstückoberfläche. Die Stärke der Temperaturabsenkung wird durch die jeweilige Verdunstungsrate beeinflusst. Eine zu starke Temperaturabsenkung vermindert die Vernetzungsreaktion des Lackes.
- * Durch das Aufsaugen des flüssigen Lackes lagern sich flüchtige und feste Lackbestandteile in den Holzporen ab. Dabei wirken die Holzporen wie eine Filtermembran, es kommt zur Selektion der Lackbestandteile. Holzverträgliche Bestandteile (z.B. kleine, flüssige und polare Bestandteile) dringen tiefer in das Holz ein als unverträgliche. Ganz unverträgliche Bestandteile verbleiben an der

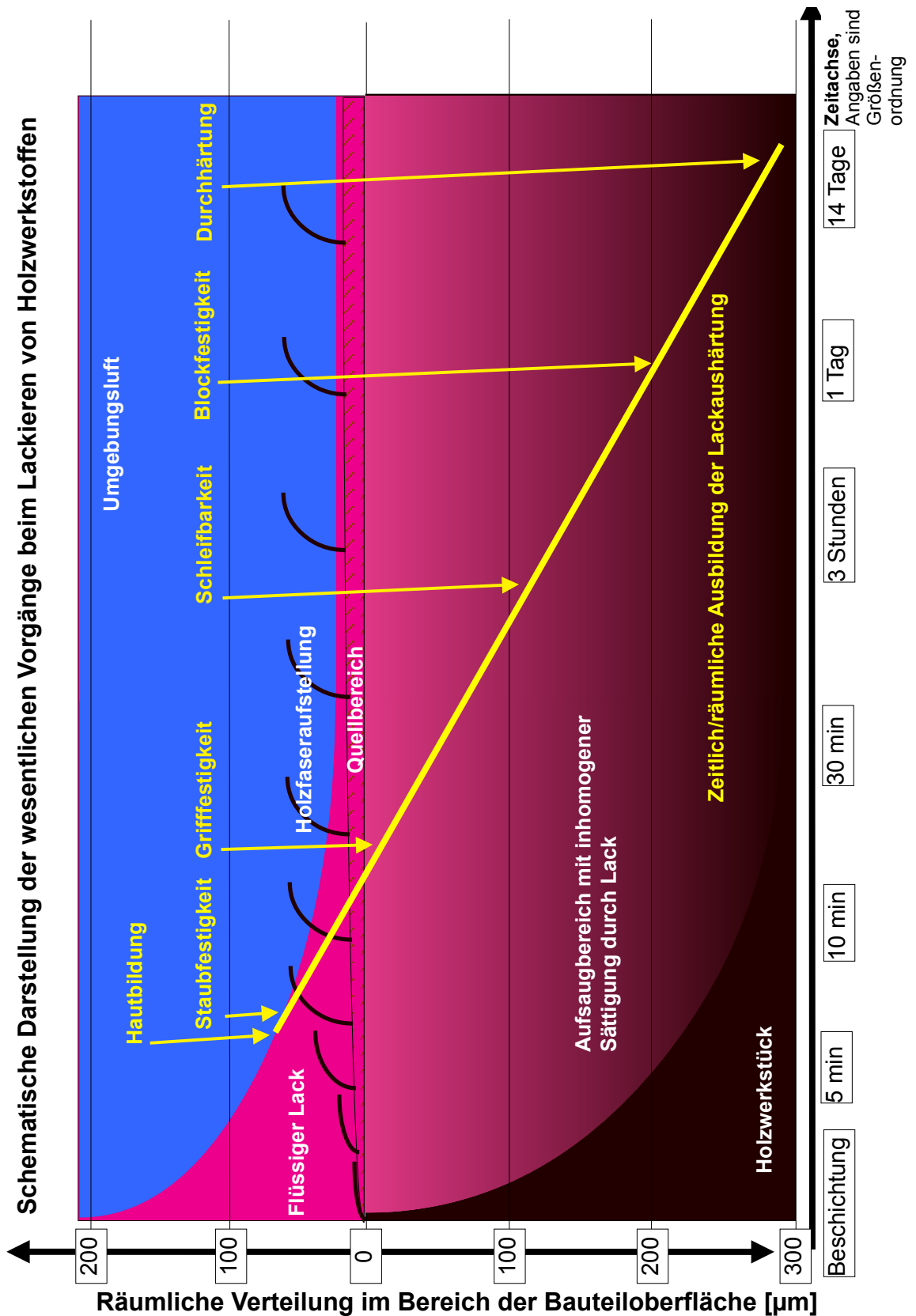


Bild 15: Zeitlich - räumliche Darstellung der Vorgänge beim Lackieren von Holz

Grenzschicht Holzoberfläche / Lack. Durch die unterschiedliche Beweglichkeit der Lackbestandteile in den Holzfasern und ihre Verdunstungsrate kommt es zu osmotischen Effekten (z.B. zeitverzögertes Austreten von Salzen).

Diese Wechselwirkungen treten bei der Beschichtung von Holzwerkstoffen mit flüssigen Lacksystemen immer auf. Nur die Ausprägungsstärke der einzelnen Effekte ist von den Eigenschaften des Holzwerkstoffes, Lacksystems oder dem Beschichtungsprozess beeinflussbar. Die Wechselwirkungen von Lack und Holzfasern werden bei elektrostatischer Lackierung im Vergleich zur konventionellen Spritztechnik ohne Elektrostatik prinzipiell nicht beeinflusst. Da jedoch die elektrostatische Lackierung von nichtleitenden Werkstoffen nach dem Lackierprinzip "Abführen der Ladungen über den nassen Lackfilm" elektrisch leitfähige Lacksysteme erfordert ($>1 \mu\text{S}$), können nicht alle Lösemittel-Lacksysteme, jedoch alle Wasserlacke immer angewendet werden, um Lacknebelverluste zu reduzieren. Sofern Werkstückbereiche mit Nuten, Kanten und Hinterschneidungen vorhanden sind, können in diesen Bereichen Abweichungen der Schichtdicke vom Soll-Wert auftreten. Um dies zu verhindern, gibt es nach dem Stand der Technik folgende Konzepte:

- * Einsatz von Robotern als Bewegungseinrichtungen für die Zerstäuberbewegung anstelle von Hub-, Seiten- und Dachautomaten. Durch die hohe Flexibilität bei der Steuerung der Zerstäuberbewegung wird die Sprühbahn genau an die Werkstückgeometrie angepasst. Mit dieser Technik können spezielle Sprühbahnen (Variation der Sprühstrahlbreite, Lackmenge, Hochspannung und des Sprühwinkels) für einzelne Werkstückbereiche an die Geometrie angepasst werden.
- * Vorspritzen geometrisch komplizierter Werkstückbereiche vor elektrostatischer Lackierung der Flächenbereiche. Dieses Vorspritzen kann manuell oder automatisch mit konventionellen Lackierverfahren erfolgen oder durch eine Beschichtung mit einer Hochrotationsglocke bei ausgeschalteter Elektrostatik.
- * Partielle Sonderbehandlung problematischer Werkstückbereiche. Mit einer leitfähigen Beschichtung (Leitlösung oder Leitlack) auf einzelnen Werkstückbereichen wird an diesen Stellen bei der elektrostatischen Lackierung gezielt mehr Lack abgeschieden. Dasselbe kann auch durch die Verwendung von Gas-elektroden (Besprühen der Werkstückrückseite mit ionisierter Luft) erreicht werden.

In manchen Anwendungsfällen bestehen als Alternative zu den Lösemittellacken noch keine vollständig gleichwertigen Wasserlacke (z.B. Ersatz des Polyesterlackes bei der Lackierung von Kfz-Innenteilen, dickschichtig, polierbar, transparent und hart). In einem solchen Fall kann der Originallack mit seiner geringen

elektrischen Leitfähigkeit ohne Modifikation elektrostatisch appliziert werden, wenn die Ladungen über das Werkstück abfließen können (siehe Kap. 2.1. "Merkmale von Holz und Holzwerkstoffen"). Dazu ist eine Präparation der Werkstücke erforderlich (leitfähige Vorbeschichtung, Konditionierung). Im untersuchten Anwendungsfall konnte die bereits im Originalteil vorhandene Metallschale auf der Werkstückrückseite als Erdung genutzt und das Werkstück konditioniert werden (Kap. 4.3; Fall 2).

Ist eine derartige Teilepräparation nicht möglich, muss der Originallack mit leitfähigkeitserhöhenden Zuschlagstoffen (z.B. tertiäre Ammoniumsalze in organischer Lösung) modifiziert werden. Die Merkmale der lackierten Werkstücke werden durch diese Lackmodifikation negativ beeinflusst, wenn es zu unzulässigen Wechselwirkungen zwischen den eingesetzten Zuschlagstoffen (z.B. osmotische Effekte) kommt, die bei der Verwendung der Originallacke nicht auftreten. Aus diesem Grund ist bei jeder Lackmodifikation (Einsatz von Zuschlagstoffen, z.B. Leitsalzen) wie bei einer Umstellung auf ein neues Lacksystem (Wasserlack anstelle von Lösemittellack) vorzugehen und eine Spezifikationsprüfung / Freigabeuntersuchung auszuführen.

Die Holzfaseraufstellung und die Quellung beim Lackieren mit Wasserlack ist augenscheinlich stärker ausgeprägt als beim Lackieren mit Lösemittellack. Daher wird diese Eigenschaft häufig als wesentliches Hemmnis gegen den Wasserlackeinsatz bei Holz und Holzwerkstoffen aufgeführt. Im Rahmen dieser Untersuchung wurden für einen der Anwendungsfälle (Sperrgrundierung der Küchenfronten) verschiedene Möglichkeiten zur Reduzierung der Holzfaseraufstellung bei Lackierung mit Wasserlack anstelle Lösemittellack untersucht. Folgende technische Methoden wurden erprobt und die Holzfaseraufstellung manuell beurteilt:

- * Ausführung eines feineren Holzschliffes (Korn 360 statt 240)
- * Optimierte Schleiftechnik (Hydroandruckrolle, Fa. Blettler, Ottenbach, CH)
- * Verdichten der Holzoberfläche (Thermoreibglätten, Ultraschallglätten)
- * Einsatz von Quellinhibitoren (Fa. Votteler, Korntal-Münchingen)
- * Verkürzen der Trocknungszeit von 16 auf 4 min. bis zur Staubtrockenheit (gezielte Oberflächenbelüftung)

Jede dieser Methoden reduziert die Holzfaseraufstellung merklich. Welche der Methoden letztendlich als produktionssicher und kostengünstig empfohlen werden kann, erfordert noch eingehendere Untersuchungen. Für die Lackerversuche wurden die Werkstücke bis Korn 360 geschliffen und die Trocknungszeit durch gezielte Belüftung verkürzt. Die Ergebnisse sind sehr zufriedenstellend ausgefallen. Die mit Wasserlack sperrgrundierten Küchenfronten unterschieden sich nur geringfügig von Lösemittellack-Beschichtungen.

Ein Lackauftrag mit elektrostatischen Spritzverfahren erhöht in jedem Fall den Auftragswirkungsgrad im Vergleich zu konventionellen Spritzverfahren. D.h. es wird ein größerer Anteil des zerstäubten Lackmaterials auf dem Bauteil abgeschieden. Um jedoch eine Lackschicht mit denselben technologischen Eigenschaften zu erzeugen (insbes. Schichtdicke und verteilung), wie bei konventionell erzeugten Lackschichten, muss beim elektrostatischen Lackauftrag zusätzlich folgendes beachtet werden:

- * elektrischer Oberflächenwiderstand des Bauteils (siehe Bild 12),
- * elektrische Leitfähigkeit des Lackes (siehe Bild 13),
- * Aufladungsart und Einstellung der Hochspannung (siehe Bild 16),
- * Erdungskontakt (siehe Bild 17),
- * Zusatzmaßnahmen (siehe Bild 18) und
- * Rahmenbedingungen (Lackversorgung, Kabine, Einrichtungen)

Bei der Auswahl der geeigneten Aufladungsart (Kontaktaufladung oder Außenaufladung) spielt die Leitfähigkeit des Lackes eine wesentliche Rolle. Nicht leitfähiger Lack kann mit der Außenaufladung zwar appliziert werden, jedoch erhöht die Kontaktaufladung den Auftragswirkungsgrad deutlich besser. Wasserlack kann demgegenüber nur dann mit Kontaktaufladung verarbeitet werden, wenn geeignete Potenzialtrennsysteme eingesetzt werden. Hochspannungsdurchschläge über die Farbversorgung können insbes. zu Personenschäden führen. Zusätzlich ist zu beachten, dass bei häufigen Farbwechseln das Potenzialtrennsystem zusätzlich zu spülen ist.

Die Einstellung der Hochspannung kann grundsätzlich spannungskonstant (z.B. konstant 60 kV bei variablen 50 - 500 μ A) oder stromkonstant (z.B. konstant 100 μ A bei variablen 30 - 100 kV) erfolgen. Vor der Entscheidung, ob die Hochspannung strom- oder spannungskonstant eingestellt wird, muss für jeden Anwendungsfall zuerst eine Erprobung durchgeführt werden, da sich die Entscheidungskriterien immer gegenseitig beeinflussen. Erst das Lackierergebnis aus produktionsähnlichen Versuchen ist ausschlaggebend für die Hochspannungseinstellung (Bild 16).

Damit die Ladungen vom Bauteil zur Erdung weiterfließen können, muss der Erdkontakt am Bauteil durch geeignete Positionierung, Konstruktion und Kontaktierung einen geringen elektrischen Widerstand aufweisen.

Bei den Untersuchungen wurde festgestellt, dass messerförmige Erdkontakte in engem Kontakt mit der Teileoberfläche die besten Ergebnisse zeigen (siehe Bild 17). Die erforderliche Anzahl der Erdkontakte und die Positionierung am Teil wird auch durch die Teilegeometrie (z.B. große Vertiefungen) bestimmt.

Bei sehr leitfähigen Lacken (z.B. alle Wasserlacke) war bei allen Versuchen auf den zu untersuchenden Teilegeometrien ein Erdkontakt ausreichend. Zu beachten ist, dass bei ungeeigneten Erdkontakten in deren Bereich hofartig Unterbeschichtungen entstehen, die den Erfolg der gesamten Lackierung beeinflussen.

Kriterien	Merkmale			
Lackmenge	konstant	konstant	variabel	variabel
Bauteilgeometrie	komplex	einfach	komplex	einfach
elektrischer Oberflächenwiderstand des Bauteils	hoch	gering	hoch	gering
elektrische Leitfähigkeit des Lackes	hoch	gering	gering	hoch
Sprühstrahlform	eng	breit	eng	breit
Sprühabstand	gering	hoch	variabel	variabel
Einstellungen	Spannungs-konstant	Spannungs-konstant	Strom-konstant	Strom-konstant
Spannung	30 kV	100 kV	30 - 100 kV	30 - 100 kV
Stromstärke	50 - 500 μ A	50 - 500 μ A	100 μ A	500 μ A

Bild 16: Entscheidungstabelle für die Einstellung der Hochspannung (Auszug)

In jedem Anwendungsfall ist zu prüfen, ob die Warenträgerbefestigung (Haken, Klammern, Auflagen) einen ungehinderten Ladungsabfluss sicherstellen können (Prüfung des Erdableitstroms), oder ob Modifizierungen vorgenommen werden müssen.

Die Bewegung des Zerstäubers (z.B. elektrostatische Hochrotationsglocke) und die Parameter der Lackverarbeitung müssen derart gesteuert werden, dass der angebrachte Erdkontakt direkt möglichst mit einer hohen Lackmenge und zunächst möglichst niedriger Ladung angespritzt wird. Innerhalb einer Sekunde kann dann, falls erforderlich, die Lackmenge gedrosselt und die Ladung (über die Hochspannung) für eine effizientere elektrostatische Beschichtung erhöht werden.

Elektrostatische Lackierverfahren können bei Bedarf durch Zusatzmaßnahmen zur Steuerung des elektrostatischen Feldes (Bild 18) ergänzt werden.

Zur Abführung der Ladungen über Luftionen wurden Gaselektroden bereits im Vorlaufprojekt untersucht. Bei den Gaselektroden werden über einen Hochspannungsgenerator Luftionen erzeugt und mit einem Luftstrom auf die zu lackierende Teilerückseite gelenkt. Diese Luftionen können die Ladungen der gerade auf dem Werkstück aufgetroffenen Lackpartikel zu geerdeten Kabinenbauteilen bzw. einrichtungen wegtragen. Bei den Gaselektroden, die in der Praxis zur elektrostatischen Entladung von Kunststoffteilen vor dem Lackauftrag eingesetzt werden (Ionisationspistolen), werden bipolare Luftionen erzeugt. Weiterhin ist bei den

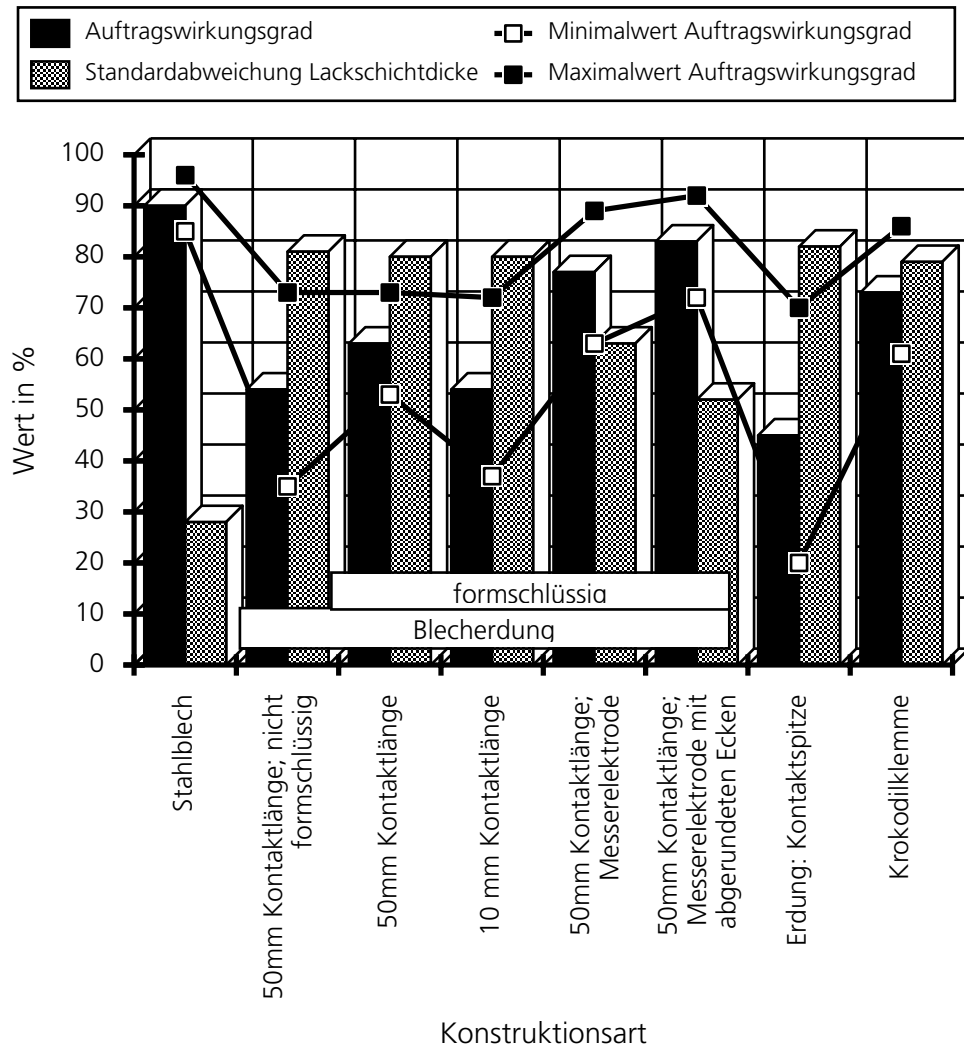


Bild 17: Auswirkung der Konstruktionsarten des Erdungskontaktes auf die Beschichtungsmerkmale bei elektrostatischer Lackierung; (Quelle: AIF-Vorhaben Nr. 10820 N/1)

auf dem Markt befindlichen Geräten die Hochspannung deutlich niedriger als bei der Lackzerstäubung. Aus diesem Grund können solche Gaselektroden nur als unterstützende Maßnahme herangezogen werden. Werden mit einem leistungsfähigen Hochspannungsgenerator (z.B. 60 kV) unipolare Luftionen erzeugt, ist eine vollständige "berührungslose Erdung" erzielbar. Dadurch können unipolare Luftionen sehr wirkungsvoll bei der elektrostatischen Lackierung von Kunststoffteilen mit hochohmigen Lacken und in Verbindung mit Warenträgern aus Nichtleitermaterial (z.B. Kunststoff) eingesetzt werden. Aufgrund der hohen Materialdicken (bis 18 - 100 mm), bzw. der metallischen Hinterlegung der untersuchten Holzbauteile konnte bei der vorliegenden Untersuchung jedoch keine Erhöhung des Auftragswirkungsgrades festgestellt werden.

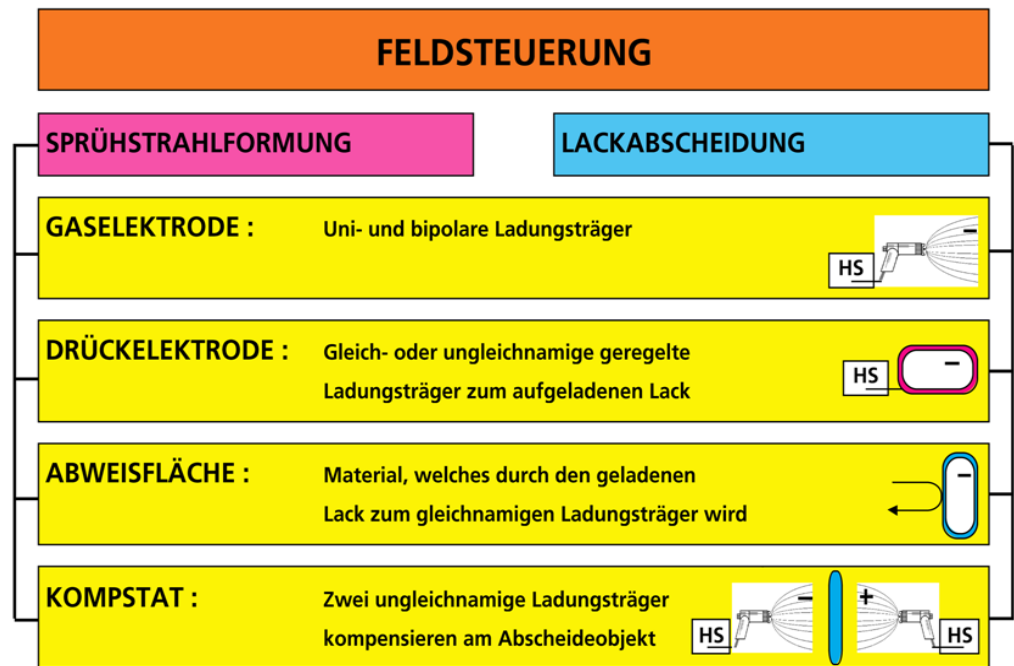


Bild 18: Zusatzmaßnahmen zur Steuerung des elektrostatischen Feldes; (Quelle: AIF-Vorhaben Nr. 10820 N/1)

Drückerlektroden zur Sprühstrahlformung (kombinierte Aufladung: Kontakt und Außenaufladung) werden in der Praxis bereits eingesetzt. Beim Vorhaben wurden zwei getrennt regelbare Hochspannungserzeuger eingesetzt, d.h. die Hochspannung von Innen und Außenaufladung wird je nach Teilegeometrie getrennt geregelt. Hierdurch kann die Sprühstrahlbreite den jeweiligen Anforderungen angepasst werden (Bild 19 und 20). Bei der Decklackierung von Fensterrahmen führte die elektrostatische Sprühstrahlformung zu einem deutlich verbesserten Auftragswirkungsgrad (siehe Kap. 4.1).

Abweisflächen, z.B. aus Kunststoff, sind aus der Pulverlacktechnologie bekannt (z.B. Kunststoffkabine). Beim AIF-Vorhaben Nr. 10820 N/1 wurden Abweisflächen auch zur Verbesserung der Lackabscheidung auf dem Werkstück untersucht. Hierzu werden diese Abweisflächen aus Kunststoff im Bereich der Werkstücke angeordnet. Versuche an Fensterrahmenabschnitten zeigen, dass Verbesserungen bzgl. des Auftragswirkungsgrades prinzipiell erreicht werden, dass aber für die Umsetzung in die Praxis noch weitere Optimierungen erforderlich sind.

Eine Weiterentwicklung zu den Gaselektroden ist das Kompstat-Verfahren. Bei diesem Verfahren wird die Teilver- und -rückseite gleichzeitig elektrostatisch lackiert. Die sich gegenüberstehenden Zerstäuber laden den jeweiligen Sprüh-

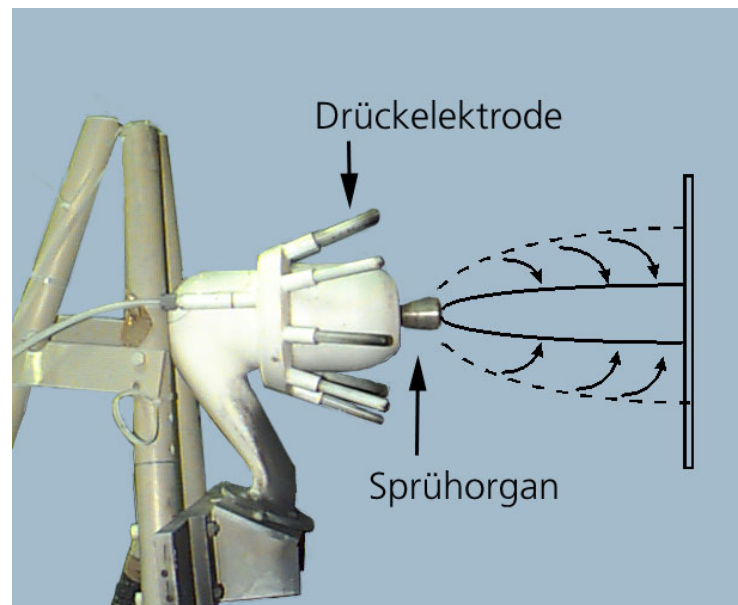
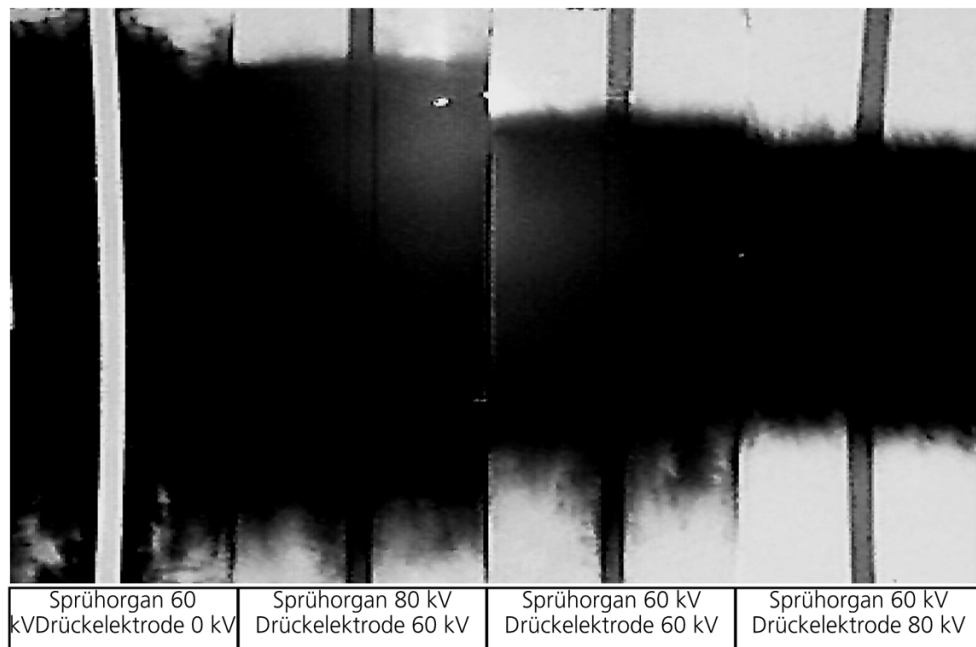


Bild 19: Elektrostatische Sprühstrahlformung durch kombinierte Aufladung



Wasserlack Ettograu / Sprühorgan Lactec 30.000 U/min / Sprühabstand 200 mm, starr auf Teilmittte positioniert
 Teilegröße u. -bewegung: ABS 200x1000 mm; Transport 1 m/min

Bild 20: Darstellung unterschiedlicher Sprühbilder bei Verwendung von Drückelectroden; (Quelle: AIF-Vorhaben Nr. 10820 N/1)

strahl ungleichnamig auf. Da sich entgegengesetzte Ladungen anziehen, bewegen sich die Lackpartikel aufeinander zu und treffen auf das Teil, an dem sich die Ladungen kompensieren. Die Laborversuche zeigen hinsichtlich der Lackabscheidung sehr gute Ansätze, dieses vom zu untersuchenden abweichende Lackierverfahren wurde jedoch nicht weiter verfolgt.

Elektrostatische Lackierverfahren können nur dann erfolgreich eingesetzt werden, wenn folgende Rahmenbedingungen erfüllt werden:

- * Die Lackversorgung (insbes. die Ringleitung) darf bei der Verwendung von leitfähigen Lacken nicht mit der Hochspannung kontaktiert werden. So ist z. B. bei der Verwendung von Wasserlacken ein geeignetes Potenzialtrennsystem oder die Außenaufladung einzusetzen.
- * Die Lackierkabine muss ausreichend groß dimensioniert sein, um Sicherheitsabstände, evtl. auch Schutzabschaltungen zu ermöglichen.
- * Die Einrichtungen in der Lackierkabine, z.B. Roboter, Abweisflächen, Förderer, müssen sicher geerdet sein und in Intervallen überprüft werden.
- * Das Lackierpersonal ist für den Umgang mit elektrostatischen Lackierverfahren hinsichtlich Arbeitssicherheit und Fertigungssicherheit zu schulen.

2.4 Ablüften und Trocknen

Das Trocknungsverhalten von Wasserlacken stellt einen wesentlichen hemmenden Faktor für deren Einsatz in Betrieben (z.B. Schreinereien, auch große Küchenmöbelhersteller) dar. Vor allem die im Vergleich zu Lösemittellacken langen Trocknungszeiten werden von vielen Betreibern nicht akzeptiert. So kann es unter normalen Trocknungsbedingungen durchaus 45 bis 60 Minuten dauern, bis ein mit Wasserlack beschichtetes Werkstück so weit abgelüftet ist, dass sich kein Staub mehr auf seiner Oberfläche festsetzt.

Die Trocknung von Wasserlacken ist schwieriger als bei Lösemittel-Lacksystemen, da Wasser eine hohe Verdampfungswärme und Siedetemperatur sowie eine hohe Oberflächenspannung besitzt. Die Verdampfungswärme von Wasser ist mit 2,3 kJ/g etwa um den Faktor 23 höher als bei konventionellen organischen Lösemitteln. Hinzu kommt eine Neigung zur Hautbildung bei Wasserlacksschichten, die das Austreten des Wassers zusätzlich erschweren kann. Lange Trocknungszeiten erfordern darüber hinaus einen großen Platzbedarf oder die Investition geeigneter Trocknungsanlagen (z.B. Kombination aus IR und Kälte/Sorptionstrocknung).

Ein einfaches und kostengünstiges Verfahren zur Trocknung von Wasserlacken lässt sich durch den Einsatz von belüfteten Hordenwagen realisieren. Am Fraunhofer IPA wurde ein entsprechender Prototyp im Rahmen eines vom Ministerium für Umwelt und Verkehr, Baden Württemberg, geförderten Projektes "Förderung des Wasserlackeinsatzes im Schreinerhandwerk durch optimierte Trocknungssysteme" gebaut. Der Projektbericht ist beim Umweltzentrum für Handwerk und Mittelstand e.V. in Freiburg erhältlich. Er enthält neben Untersuchungsergebnissen zum Trocknungsverhalten von Wasserlacken auf Holz eine detaillierte Bauanleitung und die Prozessfenster zum Betrieb einer Hordenwagenbelüftung. Die Belüftung des Hordenwagens erfolgt über eine regelbare Druckluftversorgung, die eine Luftströmungsgeschwindigkeit von 0,5 - 2 m/s an der Teileoberfläche sicherstellt. Die Luftaustrittsöffnungen an den Druckluftschläuchen sind ca. 25 mm über der Werkstückoberfläche angebracht. Es besteht die Möglichkeit zur Konditionierung der Luft (staubfrei, Volumen regelbar, Lufterwärmung, möglichst geringe Feuchte). Der Verbrauch an Druckluft liegt beim Prototyp in der Größenordnung 250 Liter pro Minute. Um unabhängig von Druckluft zu arbeiten, kann die Belüftung auch mit Hilfe eines Gebläselüfters erfolgen.

Mit Hilfe eines solchen Trocknungssystems lassen sich zum Beispiel die Trocknungszeiten von mit 1K-Wasserlack beschichteten Holzplatten auf etwa ein Fünftel verkürzen (siehe Bild 20).

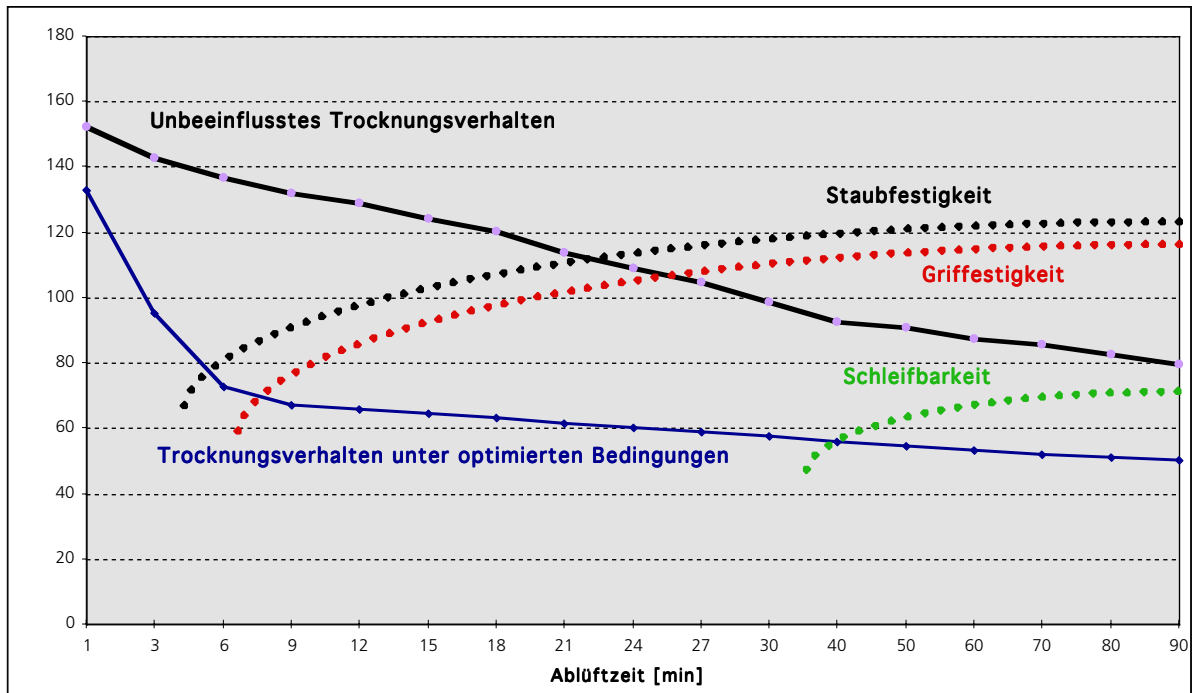


Bild 20: Verkürzung der Trocknungszeiten durch optimierte Umgebungsbedingungen; (Quelle: Projektbericht "Förderung des Wasserlackeinsatzes durch optimierte Trocknung", Ministerium für Umwelt und Verkehr Baden-Württemberg)

In vielen Anwendungsfällen kann die Staubtrockenheit der Lackschichten in weniger als zehn Minuten, die Schleifbarkeit in weniger als 50 Minuten erreicht werden. Die Bildung von Rissen in der Lackoberfläche (bei zu hoher Strömungsgeschwindigkeit der Luft) und andere Lackfilmschäden lassen sich durch Einhalten eines definierten Prozessfensters vermeiden. Zur Erzielung eines befriedigenden Trocknungsergebnisses sollten die Prozessparameter etwa in den folgenden Bereichen liegen:

Luftgeschwindigkeit in Bauteilhöhe:	0,5 m/s - 2 m/s
Lufttemperatur:	20 °C - 40 °C
Luftfeuchte:	40 % - 70 %

3 Weiterentwickelte Prüfverfahren für die Holzlackierung

Die Effizienz eines Lackierverfahrens wird nach dem Stand der Technik durch die Bestimmung des Auftragswirkungsgrades nachgewiesen (VDMA 24366). Für dieses Bestimmungsverfahren wird

- * der Festkörpergehalt des Lackes gravimetrisch bestimmt,
- * die beim Lackieren versprühte Festkörpermenge des Lackes, und
- * die Festkörpermenge des auf dem Werkstück abgeschiedenen Anteils der versprühten Lackmenge

ermittelt. Anschließend wird das Verhältnis von auf dem Werkstück abgeschiedenem Lackfestkörper zum versprühten Lackfestkörper errechnet und in Prozentwerten als Auftragswirkungsgrad angegeben.

Die Bestimmungsmethode des Auftragswirkungsgrades nach VDMA 24366 wird auf ebenen, plattenförmigen Metallwerkstücken durchgeführt. Der Auftragswirkungsgrad ist daher eine Kennzahl für den untersuchten Zerstäuber und dessen Beschichtungsparameter, unabhängig von der Werkstückgeometrie.

Um die Werkstückgeometrie zu berücksichtigen, besteht die Möglichkeit in Anlehnung an die VDMA 24366 den Auftragswirkungsgrad bei der Beschichtung realer Bauteile zu bestimmen. Die Vorgehensweise zur Bestimmung des Auftragswirkungsgrades wird dabei beibehalten, jedoch das plattenförmige Werkstück wird durch ein reales Bauteil ersetzt und die gravimetrische Massenbestimmung an dem Bauteil durchgeführt. Da reale Bauteile häufig kleiner, bzw. schmaler als der Sprühstrahl sind, liegt deren Auftragswirkungsgrad üblicherweise unterhalb demjenigen nach VDMA 24366.

Dieses sehr genaue und zuverlässige Verfahren beruht jedoch auf der Tatsache, dass die flüchtigen Lackbestandteile vor dem gravimetrischen Bestimmen des Festkörpergehaltes durch Trocknungsprozesse entfernt werden. Bei hygroskopischen Werkstücken und Werkstücken, die permanent flüchtige Inhaltsstoffe (z.B. Holz enthält bis zu 15 % Wasser und 8 % Harze, Terpene und Aromate) enthalten, ist die exakte Bestimmung des auf dem Werkstück abgeschiedenen Lackfestkörperanteils kaum möglich. Beim Trocknen des Lackes werden die flüchtigen Holzinhaltsstoffe mit den flüchtigen Lackbestandteilen ausgetrieben, was zu einer unzulässigen Verfälschung des Ergebnisses führt. Versuche mit vortrockneten Hölzern schlugen ebenfalls fehl, weil eine zu starke Trocknung die elektrischen Eigenschaften des Werkstücks beeinflusst.

Daher wurde ein spezielles Verfahren entwickelt, das sowohl die Feststellung des Auftragswirkungsgrades als auch die Wirkung der Elektrostatik bezüglich der Holzeigenschaften berücksichtigt (siehe Kap. 3.1).

Holz und Holzwerkstoffe bilden naturgemäß keine klar abgegrenzte Schicht zwischen Oberfläche und Lack aus. Daher lässt sich zwar durch das Aufkleben und Überlackieren eines thermostabilen Klebebandes auf ein Werkstück die Dicke der abgeschiedenen Lackschicht bestimmen, aber es lassen sich dadurch noch keine Aussagen über die tatsächlich auf dem Holzteil verbleibende Schicht treffen. Um festzustellen, wie hoch der Anteil des vom Holzwerkstoff aufgesaugten Lackes an der abgeschiedenen Lackmenge ist, oder wie der Übergangsbereich beschaffen ist, werden bisher aufwändige Mikroskopieverfahren eingesetzt. Um Lösemittellackschichten mit Wasserlackschichten eingehender vergleichen zu können, sind eine große Anzahl derartiger Untersuchungen erforderlich. Basierend auf die Paint-Borer-Methode hat das Fraunhofer IPA ein einfaches Färbeverfahren entwickelt, um pigmentierte und transparente Lackschichten auswerten zu können und auch eine Charakterisierung des Aufsaugbereiches zu ermöglichen (siehe Kap. 3.2).

3.1 Bestimmung des Auftragswirkungsgrades

Um zu verhindern, dass die flüchtigen Holzinhaltsstoffe das Messergebnis bei der Bestimmung der Massenverhältnisse des Lackfestkörpers beeinträchtigen, müssen zusätzliche Arbeitsschritte ausgeführt werden (Bilder 21 - 26), die die Bestimmung des Auftragswirkungsgrades ermöglichen.

Zuerst wird das Werkstück in Aluminiumfolie formschlüssig eingepackt. Sowohl das Werkstück als auch die Aluminiumfolie sind dabei mit Streifen aus hitzebeständigem Klebeband partiell beklebt. Das Werkstück ($m_{\text{roh,Holz}}$) und die Aluminiumfolie ($m_{\text{roh,Alu}}$) werden getrennt auf 0,01 g genau gewogen.

Anschließend wird das eingepackte Werkstück beschichtet. Dabei kann jedes Beschichtungsverfahren eingesetzt werden.

Sofort nach der Lackierung wird das Werkstück ohne Beschädigung der Lackschicht ausgepackt, und die noch nasse, auf der Aluminiumfolie abgeschiedene Lackmenge ($m_{\text{nass,Alu}}$) gewogen. Die Lackschicht auf der Aluminiumfolie wird gehärtet und erneut gewogen ($m_{\text{trocken,Alu}}$).

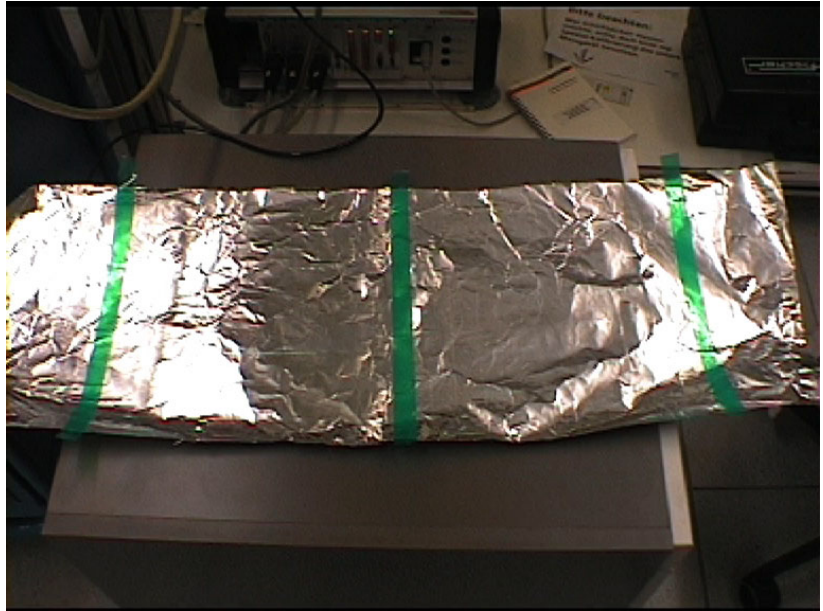


Bild 21: Bekleben und Wiegen der Aluminiumfolie

Während die Lackschicht auf der Aluminiumfolie trocknet, wird das rohe Holzbauteil beschichtet, und die auf dem Holzbauteil abgeschiedene nasse Lackschicht ($m_{\text{nass,Holz}}$) gewogen.



Bild 22: Werkstück, formschlüssig in Aluminiumfolie eingepackt

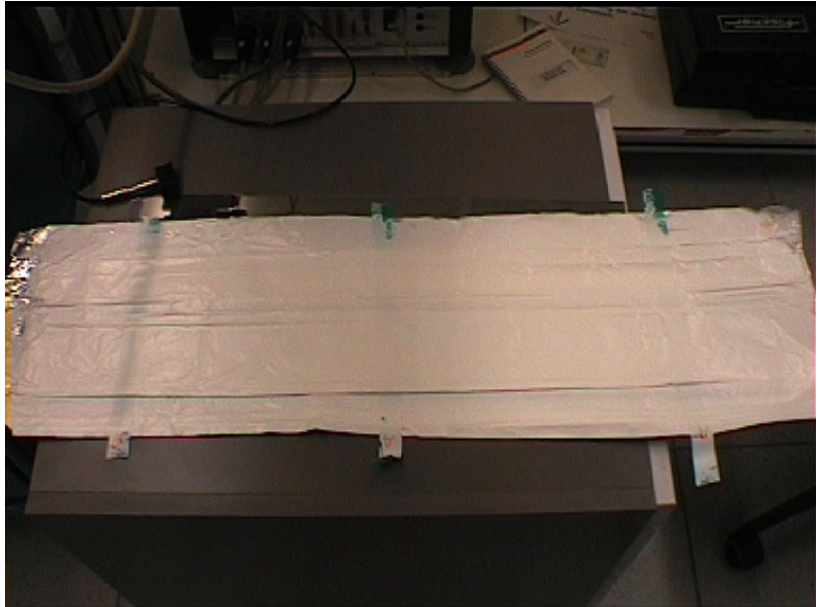


Bild 23: Überlackierte Aluminiumfolie, vom Werkstück abgezogen, trocken

Nach dem Wiegen des lackierten Holzbauteils wird die Lackschicht getrocknet. Bei der lackierten Aluminiumfolie lässt sich der Auftragswirkungsgrad der Beschichtung nach Vorschrift errechnen. Da zusätzlich das Gewicht der nassen, auf der Aluminiumfolie abgeschiedenen Lackschicht festgehalten wurde, und das Gewicht der nassen, auf dem Holzwerkstück abgeschiedenen Lackschicht bekannt ist, können die abgeschiedenen Lackmengen verglichen werden.



Bild 24: Nasse Lackschicht auf einem soeben lackierten Holzwerkstück

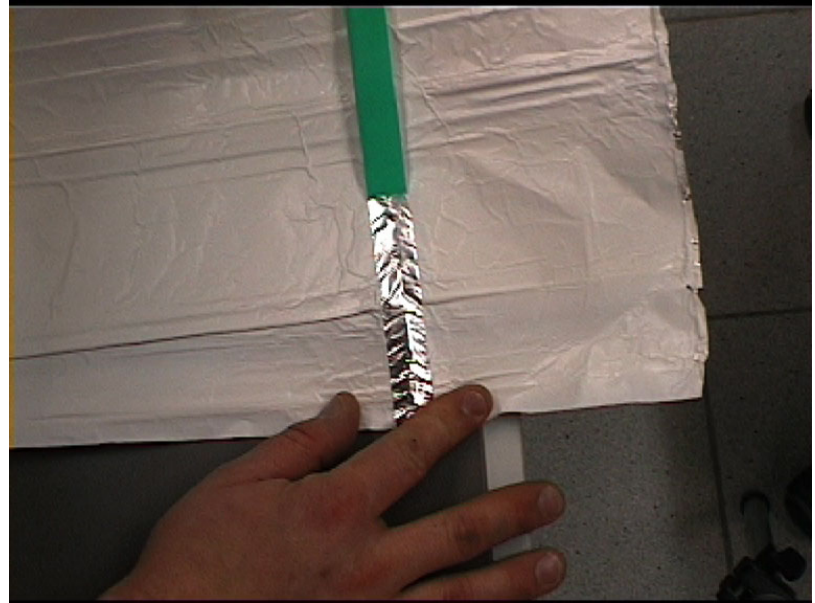


Bild 25: Abziehen des überlackierten Klebebandes, hier von der Aluminiumfolie

Um sicherzugehen, dass bei ähnlicher abgeschiedener nasser Lackmenge auch die Schichtdickenverteilung vergleichbar ist, werden die Schichtdicken wie folgt bestimmt:

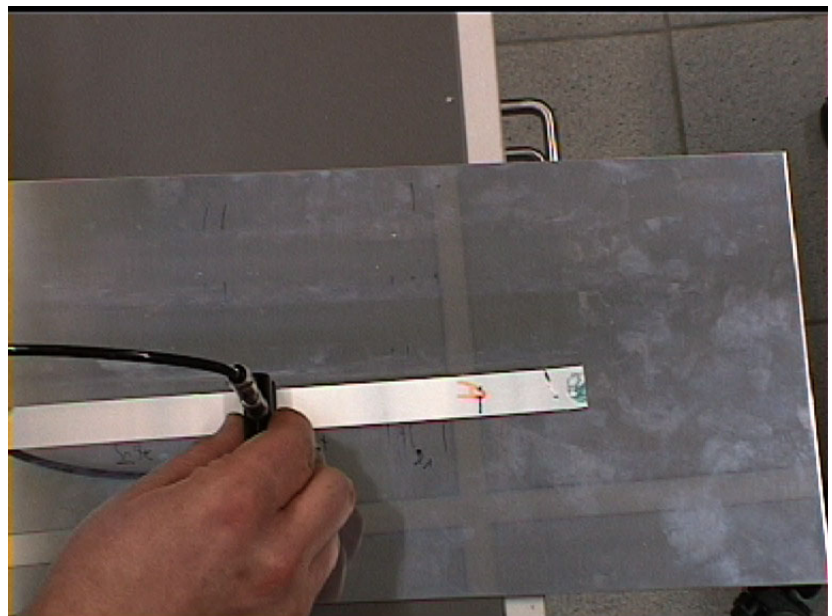


Bild 26: Magnetisch induktive Messung der Lackschichtdicke

Von der Aluminiumfolie und vom Holzbauteil werden die überlackierten Klebebandstreifen abgezogen und auf ein Metallblech geklebt. Da das Klebeband eine gleichmäßige Dicke besitzt, kann die Schichtdicke der darauf abgeschiedenen Lackschicht magnetisch induktiv gemessen werden.

Werden die Klebebandstreifen auf der Aluminiumfolie und auf dem Werkstück an denselben Stellen befestigt, können Schichtdickenunterschiede bestimmt werden.

Bei den Untersuchungen wurde festgestellt, dass die auf dem Aluminium abgeschiedene Lackmenge und die Schichtdickenverteilung mit der auf dem Holzbauteil bei folgenden Beschichtungsverfahren übereinstimmt:

- * konventionelle Zerstäubung ohne Elektrostatik (Hochdruck, HVLP, Airless),
- * Zerstäubung mit der Hochrotationsglocke ohne Elektrostatik,
- * Elektrostatische Zerstäubung von Wasserlack mit der Hochrotationsglocke, bei der Beschichtung von Werkstücken mit einem Oberflächenwiderstand $< 10^9 \Omega$.

Die elektrostatische Zerstäubung von Wasserlack mit der Hochrotationsglocke bei der Beschichtung von Werkstücken mit einem Oberflächenwiderstand $> 10^9 \Omega$ zeigte Unterschiede in der Schichtdickenverteilung an Hinterschneidungen, Nuten und Kanten (Überbeschichtung an vorstehenden, spitzen Kanten, Unterbeschichtung in Vertiefungen). Die abgeschiedene Lackmenge war jedoch gleich hoch.

Dadurch wird deutlich, dass sich bei Werkstücken mit einem hohen elektrischen Oberflächenwiderstand ein elektrostatisches Feld aufbaut, das sich von dem elektrisch leitfähiger Werkstücke unterscheidet. Die leitfähige Lackschicht kann jedoch durch Zusatzmaßnahmen an die Bauteilgeometrie angepasst werden (siehe Kap. 2.3).

Die elektrostatische Zerstäubung von gering leitfähigem Lösemittellack ($< 0,1 \mu S$) mit der Hochrotationsglocke bei der Beschichtung von Werkstücken mit einem Oberflächenwiderstand $< 10^9 \Omega$ zeigte Unterschiede in der Schichtdickenverteilung an Hinterschneidungen, Nuten und Kanten (Überbeschichtung an vorstehenden, spitzen Kanten, Unterbeschichtung in Vertiefungen). Die abgeschiedene Lackmenge auf der Aluminiumfolie war etwas (ca. 5 - 10 %) höher als auf dem rohen Werkstück.

Diese Effekte werden dadurch erklärbar, dass die zuerst abgeschiedene, gering leitfähige Lackschicht zwischen leitfähigem Untergrund und geladenen Lackpartikeln als Isolator wirkt und somit die Lackabscheidung reduziert.

Die elektrostatische Zerstäubung von gering leitfähigem Lösemittellack ($< 0,1 \mu\text{S}$) mit der Hochrotationsglocke bei der Beschichtung von nichtleitenden Werkstücken (Oberflächenwiderstand $> 10^9 \Omega$) zeigt erwartungsgemäss deutliche Unterschiede zur Beschichtung der Aluminiumfolie. Die abgeschiedene Lackmenge auf dem nichtleitenden Werkstück lag bei 35 - 40 %, auf der Aluminiumfolie wurden bis zu 75 % abgeschieden. Die Schichtdicke auf dem nichtleitenden Werkstück reduziert sich von z.B. $40 \mu\text{m}$ in Erdungsnähe auf 5 - $10 \mu\text{m}$. Geladene Lackpartikel werden vom nichtleitenden Werkstück weggezogen und auf geerdeten, leitfähigen Kabinenbereichen und Bauteilen abgeschieden (siehe Kap. 2.1).

3.2 Einfaches Verfahren zur Beurteilung der Lackschichtdicke

Flüssiger Lack wird von saugfähigen Untergrundwerkstoffen schnell aufgenommen.

Gesicherte Lackschichtdickenmessungen sind auf Holz und Holzwerkstoffen kaum möglich, da Holzfasern saugend sind und diese Eigenschaft je nach Holzart und Verarbeitungszustand stark differiert. In den häufigsten Fällen bildet sich ein Übergangsbereich zwischen Lackschicht und Untergrund, in dem die Konzentration des Lackes im Holz inhomogen verteilt ist (siehe Bild 15). Es bestehen zur Messung der Schichtdicke mehrere Möglichkeiten, z.B.

- * Ultraschallmessung,
- * Wärmewellenmessung,
- * Schlifferstellung mit optischer Vermessung und
- * Paint-Borer-Methode.

Alle Messverfahren sind durch den Übergangsbereich von Lack zu Holz (Aufsaugbereich) in ihrer Aussage eingeschränkt.

Sind Lackierungen mit mehreren pigmentierten Lackschichten auf dem Bauteil vorhanden, bleiben zur Prüfung nur noch die Schlifferstellung oder der Paint-Borer übrig.

Ein transparenter Lackschichtaufbau kann bisher nur mit aufwändigen Analysemethoden (z.B. EDX, IR-Mikroskopie) vermessen werden.

Bei einer Auftragsmenge von 280 g/m^2 , einem Festkörpergehalt von 33,5 % und einem Auftragswirkungsgrad von 40 % wird rein rechnerisch eine Trockenschichtdicke von $31,3 \mu\text{m}$ unter Berücksichtigung der Trockenschichtdichte von $1,2 \text{ g/cm}^3$ erwartet. Die messtechnisch erfasste Trockenschichtdicke liegt im Mittel bei $19 \mu\text{m}$, daher ist davon auszugehen, dass ca. 40 % des Lackmaterials bei der ersten Lackierung vom Holzwerkstoff (Kiefer) aufgesaugt werden (Bild 27).

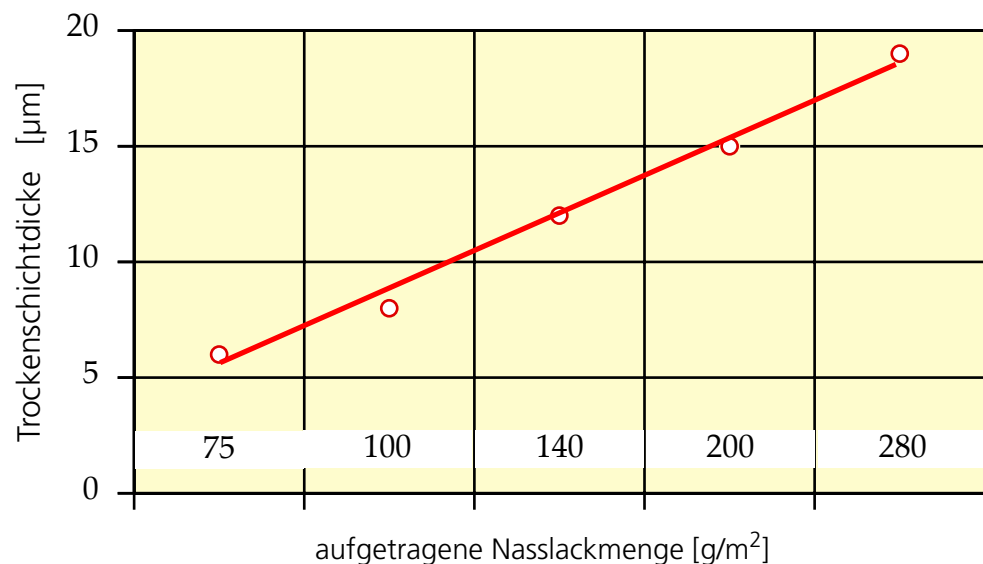


Bild 27: Zusammenhang zwischen aufgetragener Nasslackmenge und Trockenschichtdicke auf Kieferholz beim ersten Lackauftrag

Mit Hilfe der folgenden Methode (Bild 28 - 35) lassen sich innerhalb kurzer Zeit gute Messungen der tatsächlichen Lackschichtdicke erzielen, der Zusammenhang zwischen aufgetragener Nasslackmenge und entstehender Trockenlackschicht auf Holzwerkstoffen bestimmen und bei Bedarf zusätzliche Aussagen über den Aufsaugbereich treffen.

Für die Bildauswertung wurde ein Mikroskop mit 50-facher Vergrößerung eingesetzt. Dadurch war es möglich, bei Lackschichten, die eine auffallend gute Haftung auf dem Untergrund haben, visuell Schichtunterschiede nachzuweisen zu Lackschichten mit auffallend schlechter Haftung. Diese Methode eröffnet evtl. Möglichkeiten zur Erfassung weiterer Lackfilmeigenschaften wie z.B. der Haftfestigkeit, der Zwischenschichthaftung, etc.

1. Schritt:

Einfärben der lackierten
Oberfläche mit einem
roten wasserfesten
Faserschreiber.



Bild 28

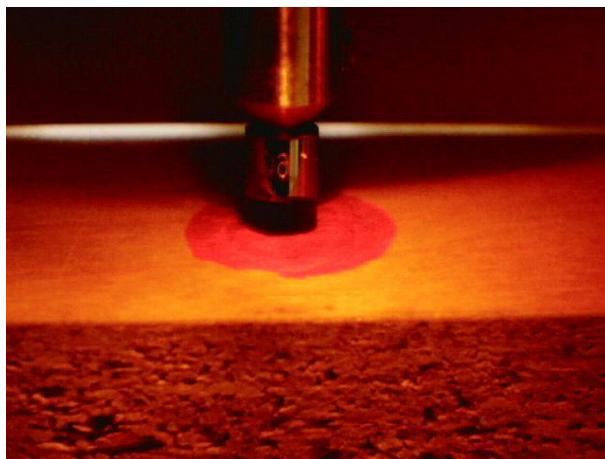


Bild 29

2. Schritt

Der Paint- Borer wird auf
diesem roten Bereich
angesetzt und vorsichtig
mit der Bohrung
begonnen.

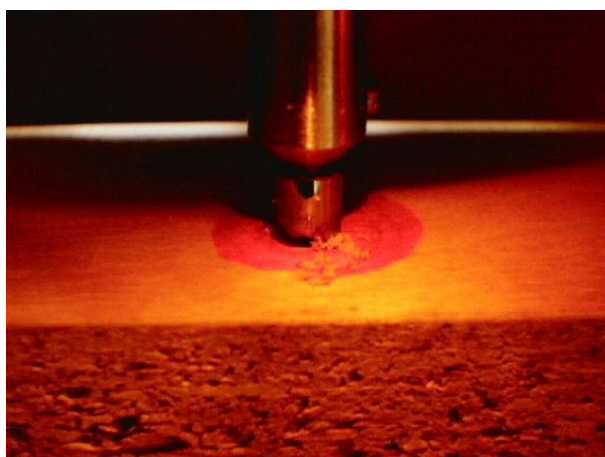


Bild 30

Es wird gebohrt, bis die
Lackschicht in der Mitte
durchbrochen ist (s. Abb.
31). Es muss beachtet
werden, dass die
Außenkante des Bohrers
nie ganz durch den Lack
gebohrt wird, da sich
sonst die Messwerte ver-
fälschen. (s. Bild 32)

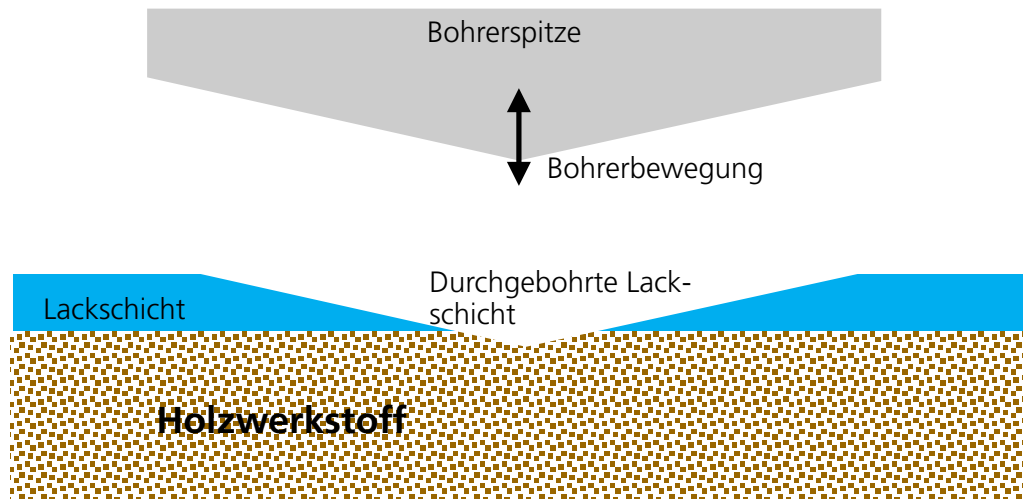


Bild 31: korrekt ausgeführte Bohrung

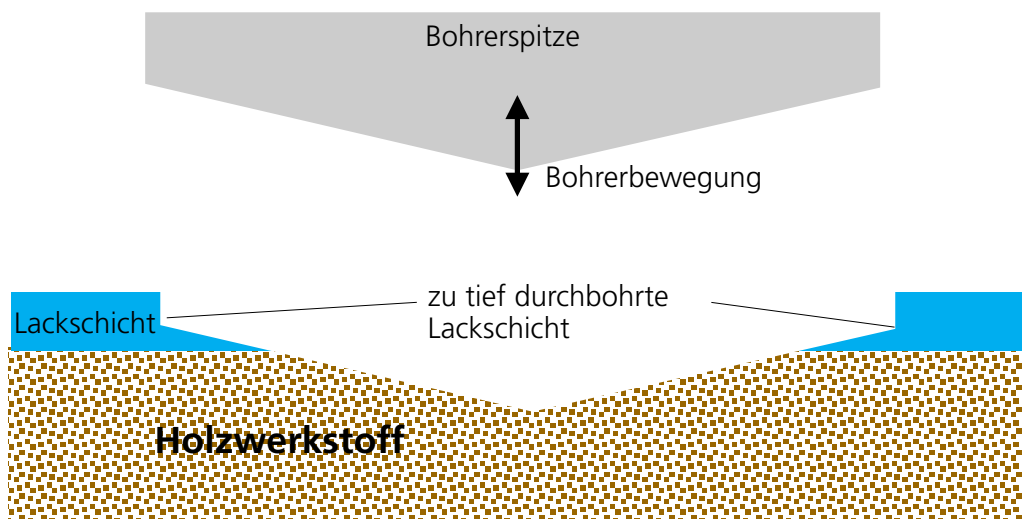


Bild 32: falsch ausgeführte Bohrung

3. Schritt

Hier wird mit einem dünnen blauen wasserlöslichen Stift die durchbohrte Stelle markiert.
Die wasserlösliche Farbe wird vom Holz an der durchbohrten Stelle aufgesaugt.

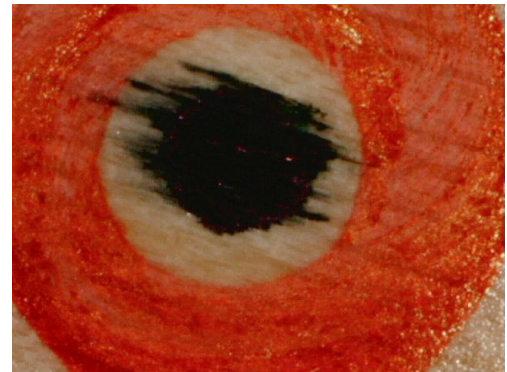


Bild 33

4. Schritt

Nun kann mit Hilfe der eingebauten Lupe, die eine Skala enthält (1 SE = 2 µm) die Schichtdicke gemessen werden.



Bild 34

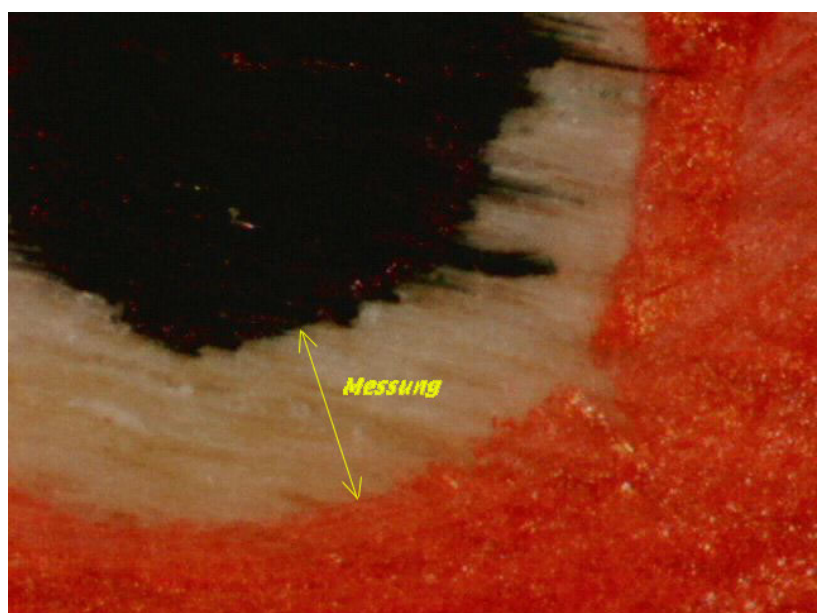


Bild 35: Schichtdickenmessung zwischen dem äusseren und dem inneren Farbrand.

4 Versuchsdurchführung und Ergebnisse

Basierend auf der IST-Zustandsaufnahme bei den Anwendern (s. Kap. 1.2) wurde im Lackiertechnikum des Fraunhofer IPA ein Versuchsaufbau erstellt (s. Kap. 1.3 und Bild 36). Mit diesem Versuchsaufbau konnte sowohl eine Lackierung von Fensterrahmen mit Hängekettenförderer als auch eine Flachteilespritzlackieranlage für die Lackierung von Küchenfronten und Kfz-Innenteile simuliert werden. Um dies zu ermöglichen, wurde ein spezieller Warenträger entwickelt, der eine flexibel drehbare Lackierlage erlaubt, Werkstücke unterschiedlicher Teilegeometrie und Dimension tragen kann und eine große Vielzahl an Möglichkeiten für die Erdungskontaktierung und Lackierbahnsteuerung erlaubt. Als Bewegungseinrichtung für die Zerstäuber wurde ein 6-Achs-Lackierroboter gewählt, an den die erforderlichen konventionellen Zerstäuber ebenso anschließbar sind wie elektrostatische Hochrotationsglocken. Die Einstellung der Parameter für die Lackierversuche erfolgte über handelsübliche Steuereinrichtungen, wie sie bei den Anwendern häufig angetroffen werden.

Zerstäubergeräte:

Sata Automatik HVLP NR 2000
 Graco Airless DR 3
 Dürr EcoBell Hochrotationsglocke,
 wahlweise mit Kontakt und / oder
 Außenaufladung

Versorgung und Steuerung :

Roboterprogrammsteuerung Robtalk v. 3.6.3 c5.3 :
 - Sprühstrahlverstellung (Druck)
 - Lackmengensteuerung
 (Zahnrad-dosierpumpe)
 - Glocken-Drehzahl
 - Hochspannungs- und Stromstärkensteuerung
 Lackversorgung : isolierter Aufbau mit Zwangs-dosierung

Lackierautomat :

6-Achsen-Roboter :
 ABB-Trallfa 5002
 7-Achsen-Roboter :
 ABB-Trallfa 5003

Lackierkabinen :

Großanlage (befeuchtete Zuluft)
 Klimakabine (klimatisiert)
 Kleinkabine (ohne befeuchtete Zuluft)

Warenträger :

metallische Warenträger
 der Unternehmen
 Warenträger aus
 Isolationswerkstoff

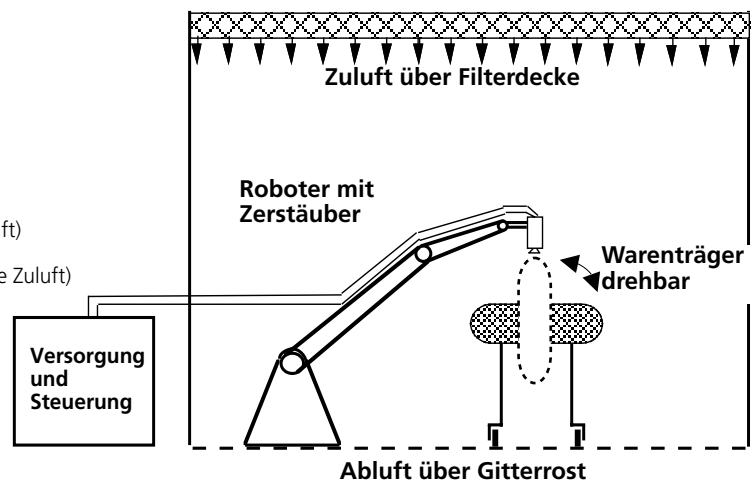


Bild 36: Skizze des Versuchsaufbaus / Geräteoptionen

Grundsätzlich war der Ablauf der Versuchsdurchführung bei allen drei Anwendungsfällen derselbe:

1. Nachstellen des IST-Zustandes, z.B. Positionierung des Werkstücks,
2. Anschließen konventioneller Zerstäuber,
3. Steuerung der Roboterbewegung analog zum IST-Zustand (z.B. Sprühabstand, Geschwindigkeit),
4. Konventionelles Beschichten der Originalteile mit Originallacken. Die Schichtmerkmale (z.B. Schichtdicke, Verlauf, Struktur), die Lackierzeit und der Lackverbrauch sollten nahe am IST-Zustand liegen.
5. Umrüsten auf elektrostatische Hochrotationsglocke als Zerstäuber.
6. Beschichten der Originalteile zunächst mit Originallacken, dabei Optimierung der Geräte- und Zerstäubereinstellung. Die Schichtmerkmale mussten dem IST-Zustand entsprechen, Lackierzeitverkürzung oder Lackeinsparungen wurden dokumentiert.
7. Beschichten der Originalteile, falls erforderlich, mit modifiziertem Lack oder Wasserlack anstelle des Originallackes. Die Schichtmerkmale sollten nahe am IST-Zustand liegen, Lackierzeitverkürzungen und Lackeinsparungen wurden dokumentiert.

Folgende Parameter waren zu untersuchen und an den jeweiligen Anwendungsfall anzupassen:

Beeinflusste Größen

- * Werkstück-Oberflächeneigenschaften: Oberflächenwiderstand, Oberflächenspannung, Auf-/Entladungsverhalten
- * Beschichtungsergebnis: Auftragswirkungsgrad, Lackschichtdickenverteilung, Lackfilmhaftung, optische Lackfilmeigenschaften (Verlauf; Glanz; Farbton; Effekte)
- * anlagen- und prozesstechnischer Aufwand: Platzbedarf, Kostenaufwand, Personalbedarf; z.B. für zusätzliche Prozessschritte (Abschätzung)
- * Umweltverträglichkeit: Energie- und Materialeinsatz, Emissions- und Abfallaufkommen

Beeinflussende Größen

- * Werkstück-Präparation (Material- und Prozessparameter)
- * Werkstückträgergestaltung (Geometrie, Werkstoffe)
- * Erdungsmaßnahmen bzw. Ladungsableitung (Erdelektroden, ionisierte Luft)
- * Prozessführung (Umgebungsbedingungen, Einstellung der Elektrostatik-Sprühorgane)

Bild 37: Festlegung der zu untersuchenden Parameter

Für die Sicherung der Untersuchungsergebnisse mussten umfangreiche Prüfungen an den Werkstücken, Lacken, Geräteeinstellungen und Lackierparametern durchgeführt werden. Die in Bild 38 aufgelistete Mess- und Prüftechnik wurde neben den in Kap. 3 beschriebenen Methoden nach dem Stand der Technik eingesetzt:

Gebiet	Prüfkriterium	Prüfverfahren/-methode
Werkstück	Oberflächenwiderstand	DIN 53 482 (Terohmmeter M 1500 P)
	Oberflächenspannung	Randwinkelmessverfahren
	Oberflächenladung	Feldstärke (E-Feldmeter)
	Oberflächenrauigkeit	Tastschnitt
Lackmaterial	Dynamische Viskosität	Rotationsviskosimeter DIN 51550
	Festkörpergehalt	gravimetrisch, DIN 53215
	Dichte	Pyknometer DIN 51757
	Leitfähigkeit	Randsburg-Sonde OFRU
	pH-Wert	pH-Meter WTW
	Oberflächenspannung	Dynometer
	Lackschicht	Schichtdicke
Härte		Steinschlagprüfung
Kratzbeständigkeit		Clemen Kratzprüfer
Vergilbung		UV-Prüflampe
Verlauf		Tastschnitt
Haftung		Gitterschnitt mit Tesa DIN 53151
Schwitzwassertest		Konstantklima DIN 50018
chemische Beständigkeit		Anlehnung an DIN 68861 T 1
Oberflächenwiderstand		DIN 53 482 (Terohmmeter M 1500 P)
Präparation		Leitlacke wie Lackmaterial
	Leitlösung: Oberflächenwiderstand	DIN 53 482 (Terohmmeter M 1500 P)
Warenträger	Oberflächenwiderstand	DIN 53 482 (Terohmmeter M 1500 P)
	Lackabscheidung	gravimetrisch
Applikation	Zustand der Zerstäuber	visuell, mikroskopisch
	Teilchengrößen im Spritzstrahl	Partikelgrößenmessgerät (Laserbeugung)
	Spritzbild	Spritzbildanalyse nach Fraunhofer IPA
	Restlösemittelgehalt	gravimetrisch
	Lackmassenstrom	Zwangsdosierung / Auslitern
	Luftvolumenströme	Luftvolumenstrom-Meßgerät (Sensycon)
	Roboter-Bewegungsbahn	Robotersteuerung
	Glocken-Drehzahl	Robotersteuerung und Messung
	Hochspannung	Robotersteuerung und Messung
	Sprühstrom	Robotersteuerung und Messung
Anlagentechnik	Erdableitstrom	Microamperemeter
	Auftragswirkungsgrad	gravimetrisch gem Kap. 3.1
	Luftsinkgeschwindigkeit in der Kabine	Anemometer, Testo, Rauchröhrchen
	Klima (Lackierkabine, Teilelagerung)	Klimaaufzeichnungsgeräte

Bild 38: Angewendete Mess- und Prüftechnik

4.1 Decklackierung von Fensterrahmen



Bild 40: Für die Untersuchung ausgewähltes Werkstück

In Kap. 1.2.1. werden die wesentlichen Eckdaten der IST-Situation bei der Beschichtung von Fensterrahmen beschrieben, im folgenden sind diese vervollständigt dargestellt:

Teiledimension: Fensterrahmen mit 950 * 1150 * 120 mm.

Zweischichtige Lackierung mit 1-K Wasserlacken.

Erste Schicht:

Grundierung mit 1-K Wasserlack im Flutverfahren, nicht zwischenbearbeitet

Zweite Schicht:

Spritzlackierung (Kombiniertes Spritzverfahren mit Airlesszerstäubung und elektrostatischer Hochrotationsglocke).

Auftragswirkungsgrad bei der Decklackierung dieses Werkstücks :

32 - 35 %.

Lackverbrauch beim Spritzlackieren: ca. 780 g / Werkstück.

Die Schichtdicke der Decklackschicht beträgt nach der Trocknung

65 µm - 85 µm auf der Fläche,

39 µm - 105 µm an Kanten und Nuten.

Die Lackierzeit je Werkstück setzt sich aus der Summe der Lackierzeiten der acht Zerstäuber zusammen: 176 s.

Einmal wöchentlich erfolgen Reinigungsarbeiten in den Lackierkabinen.

Der Lackverbrauch in der Lackiererei liegt bei etwa 250 t/a, davon etwa 80 t/a Isoliergrund (Flutlack) und 170 t/a Decklack (Spritzlack).

Die Prüfung der chemischen und technologischen Schichteigenschaften der lackierten Fensterrahmen ergab die in Bild 40 dargestellten Ergebnisse. Beim Einsatz der elektrostatischen Hochrotationszerstäubung im Technikum des Fraunhofer IPA wurden mindestens gleichwertige Ergebnisse erzielt.

Schichteigenschaften der decklackierten Originalteile beim IST-Zustand	
Schichtdicke der Decklackierung	min 65 µm, max 85 µm auf der Fläche; min 39 µm, max 105 µm an Kanten und Nuten
Verlauf (Hommel-Taster)	Langwelligkeit 1,8 mm/cm und Kurzwelligkeit 80 µm/mm Rauhtiefe 30 µm
Glanzgrad (visuell)	seidenmatt
Oberflächenspannung (Testtinten)	Bereich von 45 bis 52 mN/m
Farbe (visuell)	Reinweiß 9010
Chemische Beständigkeit (Einwirkzeit 16 h)	Aceton CH 1, alkal. Reiniger CH 1, Rotwein CH 4, Essig CH 2, Isopropanol CH 0, Kaffee CH 3, Farbstift CH 3
Vergilbung (16 h; 254 nm; 1,6 W/ cm ² ; 1 cm)	UV 1
Lackhaftung (Gitterschnitt; mit Klebebandabzug)	Gt 4
Kondenswasser Konstantklima (168 h ; 40 °C; 98 % r.F)	Blasen 1 mm, ganze Fläche; Unterwanderung 3 [mm], Gt 4
Kratzbeständigkeit (Clemen Kratzprüfgerät)	Clemen 4 (weich)
Steinschlag (30 s; 0,7 bar; Moränensplitt 5 – 8 mm)	S 3 (Schicht vollständig zerstört)

Bild 40: Ergebnisse der Bauteileprüfung

Die Aufgabe bei den Untersuchungen war, Prozessfenster zu bestimmen, innerhalb derer eine Decklackierung der Fensterrahmen mit der elektrostatischen Hochrotationsglocke an einem Roboter fertigungssicher auszuführen ist. In weiteren Untersuchungsreihen wurden Optionen erprobt, bei deren Anwendung der Auftragswirkungsgrad weiter verbessert werden kann.

Die Prozessdaten des IST-Zustandes und die bei den Untersuchungen im Technikum festgestellten Prozessdaten weichen teilweise voneinander ab, da im Technikum ein 6-Achs Lackierroboter und ein spezieller Warenträger eingesetzt wurde (Bild 41).

Ermittelte Prozessdaten des IST-Zustandes (Ausgangssituation):	Ermittelte Prozessdaten für die elektrostatische Hochrotationszerstäubung im Technikum:
Eigenschaften des Werkstücks vor der Spritzlackierung (kann nach Option 1 modifiziert werden):	
Grundiert mit 1-K Wasserlack im Flutverfahren, nicht zwischenbearbeitet	
elektrischer Oberflächenwiderstand $10^7 - 10^8 \Omega$; partiell bis $10^{10} \Omega$	
elektrischer Durchgangswiderstand $10^3 \Omega/\text{cm}$	
Oberflächenspannung $> 56 \text{ mN/m}$	
Eigenschaften des eingesetzten 1-K Wasserlackes (musste nicht modifiziert werden):	
Elektrische Leitfähigkeit: 1 mS	
Auslaufzeit DIN 4: 30 s	
Thixotrope Flüssigkeit	
Werkstückaufnahme (Warenträger):	
Deckenförderkette im Durchlauf	Metallrahmenkonstruktion zum Einspannen der Werkstücke (Bild 9, Kap. 1.3.)
Werkstücke werden mit 2 Haken je Werkstück angehängt	Erdungskontaktierung: Jedes Werkstück wird mit zwei Eindringdornen am Metallrahmen befestigt (Bild 42). Der Metallrahmen ist mit einem Erdungskabel 10 mm zur Erdung hin kontaktiert.
Anlagen- und Gerätedaten:	
Durchlaufanlage mit 4 Hubautomaten je Seite, bestückt mit	Simulierte Durchlaufanlage mit 6-Achs-Roboter,
2 Airlesszerstäuber und	1 elektrostatische Hochrotationsglocke
2 elektrostatische Hochrotationsglocken	
Teilerkennungssystem für die Ein- und Ausschaltpunkte der Zerstäuber	
Beschichtungsparameter:	
Sprühstrahlbreite 200 mm (Airless), Lackmenge 280 g/min (Airless),	Drehzahl 15000 min^{-1}
Sprühstrahlbreite 350 mm (Glocke), Lackmenge 240 g/min (Glocke);	Sprühstrahlbreite 220 mm (ohne Optionen) Lackmenge 230 g/min
Beschichtungszeit 120 s je Werkstück (2 Stationen)	Beschichtungszeit 160 s je Werkstück (1 Station mit Werkstückdrehung)
Lackierzeit 176 s , 22 s je Zerstäuber (insg. 8),	Lackierzeit 128 s (ohne Optionen)

Bild 41 / Teil 1: Ergebnisse der Prozessdatenermittlung

Einstellparameter für die Elektrostatik:	
Spannungskonstant 65 kV	Spannungskonstant 55 kV
Strom 150 – 300 μ A	Strom 150 – 350 μ A
Aufladungsart Außenaufladung	Aufladungsart Außenaufladung
Maßnahmen und Optionen:	
	Lackierbahn linear an das Werkstück angepasst, Sprühabstand 120 - 150 mm.
	Option 1: Der zuerst aufgetragene Flutlack wird mit Leitlösung zur Verbesserung der Ladungsableitung modifiziert ($10^8 \Omega$).
	Option 2: Eine Sprühstrahlformung durch kombinierte Kontakt- und Außenaufladung zur weiteren Einengung des Sprühstrahls bis auf 180 mm

Bild 41 / Teil 2: Ergebnisse der Prozessdatenermittlung

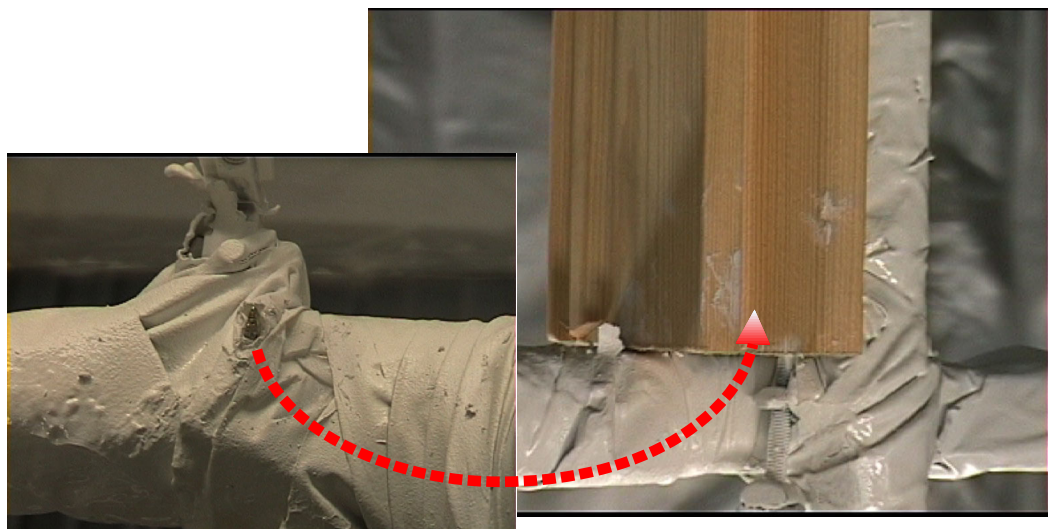


Bild 42: Einer der Eindringdorne zur Erdung der Fensterrahmen

Im Vergleich zum IST-Zustand kann bei ausschließlich elektrostatischer Lackierung mit der Hochrotationsglocke und einem Lackierroboter (**Fall 1**) ein erheblich höherer Auftragswirkungsgrad bei der Decklackierung von Fensterrahmen realisiert werden (bis 50 %). Dabei ist zu beachten, dass der Erdungskontakt über das elektrisch leitfähige Werkstückinnere (Eindringdorne) erfolgt und die Spritznebelverluste durch einen schmalen Sprühstrahl (220 mm \varnothing durch geeignete Lenklufteinstellung und geringen Sprühabstand, 120 - 150 mm) minimiert werden.

Die elektrostatische Lackierung kann mit bis zu 55 kV erfolgen. Oberhalb dieses Wertes treten an Stellen, die einen partiell hohen Oberflächenwiderstand ($> 10^9 \Omega$) aufweisen, unzulässige Schichtdickenschwankungen auf. Insbesondere in Nuten treten Unterbeschichtungen (partiell $< 30 \mu\text{m}$) bei zu hoch eingestellter Hochspannung (z.B. 70 kV) auf.

Dieses Verhalten wird dadurch erklärt, dass die erste Lackschicht nach dem Trocknen ihre im flüssigen Zustand hohe Leitfähigkeit verliert und als Isolator zwischen leitfähigem Werkstückinneren und geladenen Lackpartikeln wirkt (siehe Bild 13). Inhomogenitäten im Holz verstärken den Effekt zusätzlich. Daher ist die Wirksamkeit der Elektrostatik zwar deutlich feststellbar, aber nicht vollständig und unproblematisch umzusetzen. Auch die Verwendung von Kunststoffwarenlägern anstelle von Metallwarenlägern brachte keine messbare Beeinflussung der Schichtdickenverteilung.

Dieses Ergebnis lässt sich durch Zusatzmaßnahmen (optional) weiter verbessern (Bild 43 und 44):

Einsparpotenziale bei elektrostatischer Lackierung von Fensterrahmen

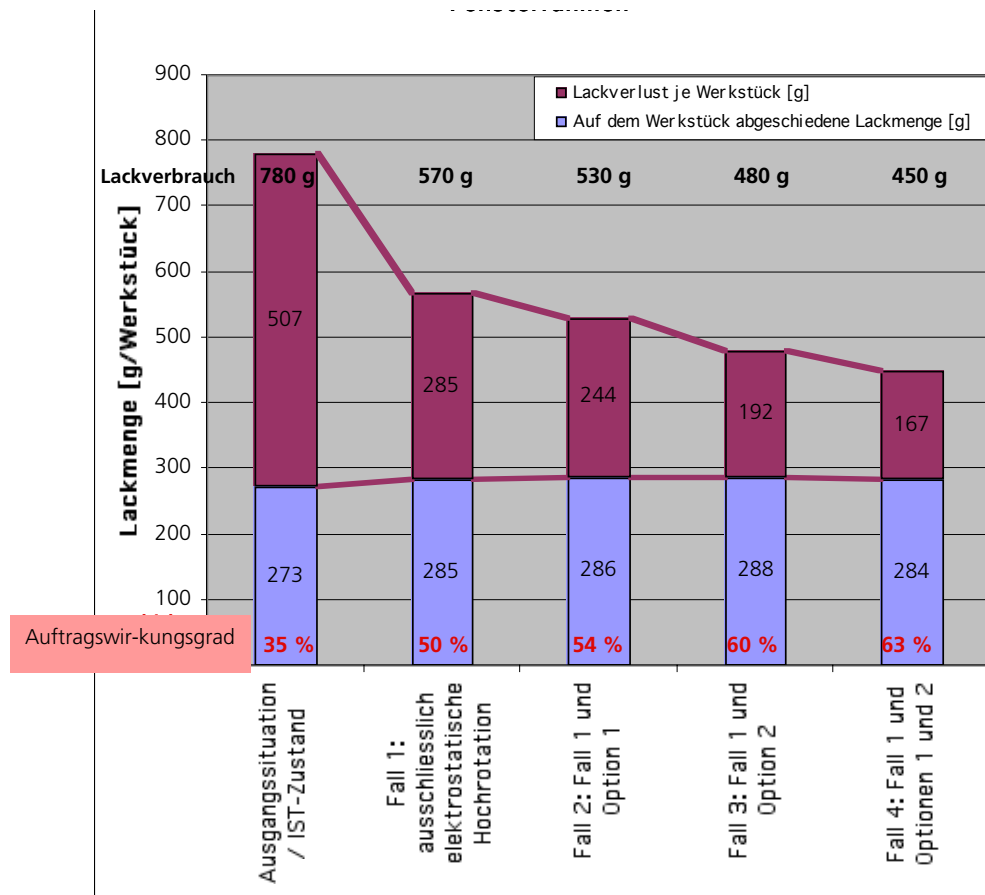


Bild 43: Einsparpotenziale im Zusammenhang mit dem Auftragswirkungsgrad

Fortschritte für die Prozessqualität						
	IST-Zustand	Fall 1	Fall 2	Fall 3	Fall 4	Einsparung
Auftragswirkungsgrad [%]	32 - 35	45 - 50	52 - 55	57 - 62	62 - 65	
Benötigte Lackmenge [g/Werkstück] (35 % Festkörper)	nass: 780 - 800	ca. 570	ca. 530	ca. 480	ca. 450	210 - 350 (26 - 44%)
auf dem Werkstück abgeschiedene Lackmenge [g/Werkstück]	nass: 270 - 290 (trocken: 94 - 103)	nass: 270 - 290	nass: 270 - 290	nass: 270 - 290	nass: 270 - 290	gleiche Schichtqualität
Lackverlust [g/Werkstück]	nass 500 trocken 175	nass 300 trocken 105	nass 250 trocken 88	nass 200 trocken 70	nass 170 trocken 60	200 - 330 (40 - 67%)
Menge der flüchtigen organischen Lösemittel [g/Werkstück]	40	29	27	24	23	11 - 17 (28 - 42%)
Benötigte Lackierzeit [s]	176	128	121	114	110	48 - 66 (27 - 38%)
Schichtdickenverteilung [μm] auf der Fläche: an Nuten und Kanten:	65 - 85 39 - 105	60 - 85 37 - 110	65 - 85 40 - 100	67 - 85 40 - 100	67 - 80 40 - 95	annähernd gleiche Qualität

Bild 44: Fortschritte für die Prozessqualität bei der Lackierung von Fensterrahmen

Fall 2: Fall 1 und Option 1: Der zuerst aufgetragene Flutlack wird, z.B. mit Leitlösung, zur Verbesserung der Ladungsableitung modifiziert. Dadurch wird erreicht, dass auf der Oberfläche des Werkstücks ein homogener Oberflächenwiderstand von $10^8 \Omega$ vor dem Spritzlackierprozess ausgebildet wird und die Lackschicht die Ladungen ans Werkstückinnere weiterleitet. Infolge dessen kann die elektrostatische Lackierung mit bis zu 75 kV erfolgen, ohne dass unzulässige Unterbeschichtungen in Nuten des Werkstücks auftreten. Der erreichte Auftragswirkungsgrad liegt bei 54 %.

Fall 3: Fall 1 und Option 2: Eine elektrostatische Sprühstrahlformung durch kombinierte Kontakt- und Außenaufladung (Bild 19 / 20, Kap. 2.3.) zur weiteren Einengung des Sprühstrahls bis auf 180 mm. Da das Werkstück eine geringe Breite von 120 mm besitzt, und die Sprühstrahlbreite des Zerstäubers bauartbedingt

nicht weniger als 220 mm beträgt, werden große Anteile des zerstäubten Lackmaterials zuerst am Werkstück vorbeigespritzt.

Die elektrostatische Sprühstrahlformung wird genutzt, um unabhängig von der bauartbedingten Grenze eine weitestgehende Einengung der Sprühstrahlbreite zu erzwingen. Zu diesem Zweck werden zwei unabhängig voneinander steuerbare Hochspannungserzeuger eingesetzt. Einer wird mit der Glocke kontaktiert (Kontaktaufladung), der zweite mit dem außenliegenden Elektrodenring (Außenaufladung). Die Spannung der Außenaufladung wird um ca. 5 kV höher eingestellt als die Spannung der Kontaktaufladung. Der erreichte Auftragswirkungsgrad liegt bei 60 %.

Fall 4: Die Optionen 1 und 2 lassen sich kombinieren, was zu optimierten Ergebnissen für diesen Anwendungsfall führt. Der höchste Auftragswirkungsgrad bei der Lackierung von Fensterrahmen wird bei 75 kV Kontaktaufladung und 80 kV Außenaufladung in Kombination mit einer leitfähig eingestellten Vorbeschichtung gemessen. Der Auftragswirkungsgrad lässt sich von 35 % (IST-Zustand) auf 63 % steigern unter Beibehaltung der Schichtdickenverteilung.

Auswirkungen:

Durch den hohen Auftragswirkungsgrad sinkt der Lackverbrauch beim Lackieren von 780 g/Werkstück (IST-Zustand) auf 450 g/Werkstück (Optimalfall).

Als direkte Folge kann je Werkstück bis zu 330 g Lack (42 %) eingespart werden.

Als indirekte Folge fallen je Werkstück nur 167 g Lackabfall im Optimalfall gegenüber 507 g im IST-Zustand an (Lackabfall-Einsparung 67 %). Daher wird auch der Einsatz der benötigten Koaguliermittel reduziert und z.B. die Standzeit einer Nassauswaschung oder Trockenabscheidung erhöht.

Eine weitere indirekte Folge ist, dass die geringere benötigte Lackmenge in kürzerer Lackierzeit aufgetragen werden kann (Lackierzeitverkürzung von 176 s im IST-Zustand auf 110 s im Optimalfall; 37 %). Die Lackierzeitverkürzung erfolgt durch höhere Verfahrensgeschwindigkeiten des Lackierroboters bei gleichbleibender Lackausstoßmenge des Zerstäubers. Bedingt durch die geometrischen Eigenschaften des Werkstücks, die maximalen Verfahrensgeschwindigkeiten des Roboters und die maximal mögliche Durchflussmenge beim Zerstäuben werden hier Grenzen erreicht, sobald die Schichtdickenverteilung unzulässig schwankt.

Wird die Lackausstoßmenge des Zerstäubers beim Lackieren gedrosselt, kann die Schichtqualität (z.B. besserer Verlauf durch feinere Zerstäubung) und die Schichtdickenverteilung unter Beibehaltung der Lackierzeit verbessert werden.

Bei den Untersuchungen wurden neben den Schichteigenschaften die Geräte- und Anlagenverschmutzung, die Anlagenstörungen und mögliche Gegenmaßnahmen hinsichtlich der Fertigungssicherheit des Prozesses mitbetrachtet. Die systematische Fertigungssicherheit (Anlagen- und Verarbeitungsseite) ist aus der

Automobillackierbranche ausreichend bekannt. Aus diesen Erfahrungen heraus wurde der Versuchsaufbau im Technikum des Fraunhofer IPA unter Berücksichtigung folgender Kriterien erstellt:

1. Personen-, Ex- und Brandschutzrichtlinien.
2. Anlagendimensionierung und Gerätepositionierung (Präventiv gegen Verschmutzung, günstig für die Luftströmung und Zugänglichkeit).
3. Eingesetzte Materialien und Arbeitsausführung (Lösemittelbeständig und Durchschlagsicher, bei Wasserlack kontinuierliche Potenzialtrennung zur Erdung).
4. Grenzen für die Gerätesteuerung (Abstände, Geschwindigkeiten).

Es kam während der Untersuchungen zu keiner systembedingten Störung, daher wird erwartet, dass eine Fertigungssicherheit wie in der Automobillackierbranche erreicht werden kann. Systembedingte Störungen und die daraus resultierenden Anlagenstillstandszeiten liegen dann unter 3 % der Anlagennutzungszeit.

Die situationsbedingte Fertigungssicherheit (Störungen durch nicht vorhersehbare Effekte) hängt von den eingesetzten Materialien (Lack und Spüllösung), den angewendeten Prozessparametern (Zerstäuberbewegungsbahn, Spülzyklen), dem angewendeten Sauberkeitskonzept (Reinigungs- und Kontrollzyklen für Bauteile, Geräte, Werkstücke und Hilfsmaterial) und den Erfahrungen des Bedienpersonals ab.

Während der Untersuchungen traten folgende Störungen auf:

- * Verschmutzung des Glockentellers,
- * Verschmutzung des Außenaufladungsrings,
- * Verstopfung in der Farbleitung des Zerstäubers,
- * Ausfall der Hochspannung bei elektrostatischer Sprühstrahlformung.

In allen Fällen wurde die Störung innerhalb weniger Minuten erkannt und Gegenmaßnahmen erfolgreich eingeleitet:

- * Modifizierung des Kurzspülprogramms für die Sauberhaltung des Glockentellers,
- * Anpassung der Zerstäuberbewegungsbahn zur Vermeidung von Lacknebel durchfahrten / Zerstäuberverschmutzung,
- * Verdünnen und kontinuierliches Rühren des Lackmaterials zur Vermeidung von Verstopfungen in der Farbversorgung. Zusätzlich nach jedem Lackiervorgang Freispülen der Glocke.

- * Erprobung der geringst möglichen Sprühabstände bei elektrostatischer Sprühstrahlformung zur Vermeidung von Hochspannungsausfällen. Mit diesen Werten wurde die Roboterbewegung korrigiert.

Es kam zu keiner Wiederholung der selben Störung, die Anlagenstillstandszeiten lagen unter 5 % bezüglich der Nutzungsdauer. Die aus der Automobillackierbranche bekannten Anlagenstillstandszeiten durch situationsbedingte Störungen liegen ebenfalls in dieser Größenordnung.

Im IST-Zustand werden in wöchentlichen Reinigungszyklen alle Lackierkabinen manuell von Lacknebel gereinigt. Die Warenträger (Haken) werden wöchentlich einmal ausgetauscht und durch Strahlen gereinigt. Diese Reinigungszyklen können bei ausschließlich elektrostatischer Lackierung mit einem Lackierroboter (wie in Fall 1 bis 4) beibehalten werden.

Bei den Untersuchungen im Technikum wurde der Metallrahmen zur Werkstückaufnahme und der Warenträger mit einer Kunststoffhülle (PE-Folie) vor Lacknebeln geschützt. Diese Kunststoffhülle war nach 60 Lackierungen dick überlackiert (bis 7 mm) und wurde ausgetauscht. Es sind bei den Untersuchungen keine störenden Lack-Abplatzer vom Warenträger auf den Werkstücken festgestellt worden. Die metallischen Eindringdorne waren ständig blank und einsatzbereit. Die Standzeit der kunststoffumhüllten Warenträgerkonstruktion und der Aufwand zur Sauberhaltung liegt in einem vertretbaren Rahmen. Weitere Optimierungsmöglichkeiten (z.B. Schnellverschluss an der Kunststoffhülle, Abziehlacke) bestehen. Bei Bedarf können hierzu weiterführende Untersuchungen durchgeführt werden.

4.2 Strukturlackierung von Küchenfronttüren



Bild 46: Für die Untersuchung ausgewählte Küchenfronttür

In Kap. 1.2.2. werden die wesentlichen Eckdaten der IST-Situation bei der Lackierung von Küchenfronttüren beschrieben, hier werden zusätzlich Detailangaben aufgelistet:

Teiledimension: Küchenfronttür mit 400 * 700 * 18 mm.

Dreischichtige Lackierung mit 2-K Polyurethan-Lösemittellacken.

Erste Schicht:

Isolierung mit 2-K Polyurethan-Isoliergrund im Spritzfahren (Airlesszerstäubung in einer automatischen Flachteilespritzlackieranlage).

Zwischenbearbeitung nach dem Trocknen des Isoliergrunds durch teilautomatisierte Schleifprozesse.

Zweite Schicht:

Auftrag des 2-K Polyurethan-Strukturlackes im Spritzverfahren (Airlesszerstäubung in einer automatischen Flachteilespritzlackieranlage).

Keine Zwischenbearbeitung nach dem Trocknen des Strukturlackes, es erfolgt eine visuelle Teilekontrolle auf Lackschichtstörungen.

Dritte Schicht:

Auftrag des transparenten 2-K Polyurethan-Decklackes im Spritzverfahren (Airlesszerstäubung in einer automatischen Flachteilespritzlackieranlage).

Keine Endbearbeitung nach dem Trocknen des Decklackes, es erfolgt eine visuelle Teilekontrolle auf Lackschichtstörungen.

Werden Werkstücke beidseitig lackiert, erfolgt jeweils nach dem Trocknen der betreffenden Schicht ein manuelles Wenden und ein erneuter Durchlauf durch die Lackieranlage. Zweimal täglich erfolgen Reinigungsarbeiten in den Lackierkabinen.

Der Gesamt-Lackverbrauch in der Lackiererei liegt bei etwa 210 t/a.

Der zu untersuchende Prozessschritt war der Auftrag der zweiten Schicht. Auftragswirkungsgrad bei der Strukturlackierung dieses Werkstücks : 42 - 45 %.

Lackverbrauch beim Strukturlackieren: ca. 140 g / Werkstück, der Strukturlack hat einen Festkörpergehalt von 38 %.

Die Schichtdicke der Strukturlackschicht beträgt nach der Trocknung 40 µm - 45 µm auf der Fläche, 28 µm - 55 µm an Kanten und Nuten.

Die Lackierzeit je Werkstückseite (27 s) setzt sich aus der Summe der Lackierzeiten der vier Zerstäuber zusammen.

Die Prüfung der Schichteigenschaften der im fertigen Zustand dreischichtig lackierten Küchenfronttüren ergab die in Bild 46 dargestellten Ergebnisse. Bei den Beschichtungsversuchen im Technikum des Fraunhofer IPA wurden mindestens gleichwertige Ergebnisse wie bei der Verwendung des Original-Lösemittellackes erzielt.

Schichteigenschaften der decklackierten Originalteile beim IST-Zustand		Schichteigenschaften der mit Wasserlack strukturlackierten Werkstücke
Schichtdicke der Decklackierung	Min 40 µm, Max 45 µm auf der Fläche; Min 28 µm, Max 55 µm an Kanten und Nuten	Min 40 µm, Max 45 µm auf der Fläche; Min 25 µm, Max 65 µm an Kanten und Nuten
Verlauf (Hommel-Taster)	Langwelligkeit 3 mm/cm und Kurzwelligkeit 10 µm/mm Rauhtiefe 5 µm	Langwelligkeit 4 mm/cm und Kurzwelligkeit 12 µm/mm Rauhtiefe 7 µm
Glanzgrad (visuell)	matt	matt
Oberflächenspannung (Testtinten)	Bereich von 52 bis 56 mN/m	Bereich von 52 bis 56 mN/m
Farbe (visuell)	Basaltgrau RAL 7012	Basaltgrau RAL 7012

Bild 46 / Teil 1: Ergebnisse der Bauteilprüfung

Chemische Beständigkeit (Einwirkzeit 16 h)	Aceton CH 1, alkal. Reiniger CH 0, Rotwein CH 0, Essig CH 0, Isopropanol CH 0, Kaffee CH 0, Farbstift CH 1	Aceton CH 1, alkal. Reiniger CH 0, Rotwein CH 0, Essig CH 0, Isopropanol CH 0, Kaffee CH 0, Farbstift CH 1
Vergilbung (16 h; 254 nm; 1,6 W/cm ² ; 1 cm)	UV 0	UV 0
Lackhaftung (Gitterschnitt; mit Klebebandabzug)	Gt 0	Gt 0
Kondenswasser Konstantklima (168 h ; 40 °C; 98 % r.F)	Keine Blasen; Unterwanderung 1 [mm], Gt 1-2	Partiell Blasen, 1 mm; Unterwanderung 2 [mm], Gt 2-3
Kratzbeständigkeit (Clemen Kratzprüfgerät)	Clemen 10 (sehr hart)	Clemen 10 (sehr hart)
Steinschlag (30 s; 0,7 bar; Moränensplitt 5 – 8 mm)	S 2 (Schicht partiell durchschlagen)	S 2 (Schicht partiell durchschlagen)

Bild 46 / Teil 2: Ergebnisse der Bauteileprüfung

Bei der Verwendung eines Wasser-Strukturlackes anstelle des Originallackes wurden abweichende Schichteigenschaften beim Lackfilmverlauf und beim Kondenswasser-Konstantklima festgestellt.

Die Aufgabe bei den Untersuchungen war, die Prozessfenster zu bestimmen, innerhalb derer eine Strukturlackierung der Küchenfronttüren mit Wasserlacken und der elektrostatischen Hochrotationsglocke fertigungssicher auszuführen ist. Die Prozessdaten des IST-Zustandes und die bei den Untersuchungen im Technikum festgestellten Prozessdaten weichen voneinander ab, da für eine elektrostatische Lackierung im Technikum ein Wasser-Strukturlack anstelle des Lösemittel-Strukturlackes, ein 6-Achs Lackierroboter und ein spezieller Warenträger mit metallischem Auflageblech eingesetzt wurde (Bild 47).

Ermittelte Prozessdaten des IST-Zustandes (Ausgangssituation):	Ermittelte Prozessdaten für die elektrostatische Hochrotationszerstäubung im Technikum:
Eigenschaften des Werkstücks vor der Spritzlackierung	
Grundiert mit weißem 2-K Lösemittel Isoliergrund im Spritzverfahren, Zwischenschliff mit Korn 220	Grundiert mit weißem 2-K Lösemittel Isoliergrund im Spritzverfahren (kann leitfähig modifiziert werden), Zwischenschliff mit Korn 220
elektrischer Oberflächenwiderstand $10^{10} \Omega$	elektrischer Oberflächenwiderstand $10^{10} \Omega$ (modifiziert $10^9 \Omega$)
elektrischer Durchgangswiderstand $>10^5 \Omega/\text{cm}$	elektrischer Durchgangswiderstand $>10^5 \Omega/\text{cm}$
Oberflächenspannung $> 56 \text{ mN/m}$	Oberflächenspannung $> 56 \text{ mN/m}$
Eigenschaften des 2-K Strukturlackes (Originallack):	Eigenschaften des 2-K Wasser-Strukturlackes:
Elektrische Leitfähigkeit: $0,1 \mu\text{S}$	Elektrische Leitfähigkeit: $0,8 \text{ mS}$
Auslaufzeit DIN 4: 22 s	Auslaufzeit DIN 4: 30 s
Newtonsche Flüssigkeit, Festkörper 38%	Thixotrope Flüssigkeit, Festkörper 45%
Werkstückaufnahme (Warenträger):	
Durchlaufanlage mit geschlossenem Horizontalförderband aus Kunststoff, elektrischer Oberflächenwiderstand $> 10^9 \text{ Ohm}$	geschlossenes Metallblech horizontal zum Auflegen der Werkstücke
Unterschiedliche Warenträgerbelegungsichte, abhängig von der Werkstückgeometrie, bei den Fronttüren ca. 70 %	Erdungskontaktierung: Das Metallblech ist mit dem geerdeten Metallwarenträger verschraubt.
Anlagen- und Gerätedaten:	
Durchlaufanlage mit Horizontalhubautomat, bestückt mit 4 Airlesszerstäubern, Teileerkennungssystem für die Ein- und Ausschaltpunkte der Zerstäuber	Simulierte Durchlaufanlage mit 6-Achs-Roboter, bestückt mit 1 elektrostatischen Hochrotationsglocke
Beschichtungsparameter:	
Sprühstrahlbreite 220 mm, Lackmenge 310 g/min je Zerstäuber, Sprühabstand 225 mm, Sprühwinkelüberlappung, Beschichtungsleistung max. $4 \text{ m}^2/\text{min}$ Lackierzeit 27 s/Fronttür	Sprühstrahlbreite 220 mm, Lackmenge 230 g/min, Sprühabstand 180 mm, Drehzahl 30000 min^{-1} Lackierzeit 20 s/Fronttür
Einstellparameter für die Elektrostatik:	
Keine Elektrostatik im Einsatz	Spannungskonstant 55 kV, Strom 150 - 200 μA , Kombinierte Aufladung

Bild 47: Prozessparameter bei der Lackierung von Küchenfronttüren

Im Vergleich zum IST-Zustand (43 - 45 %) kann bei elektrostatischer Lackierung mit der Hochrotationsglocke und einem Lackierroboter ein erheblich höherer Auftragswirkungsgrad realisiert werden (**Fall 1**: bis 63 %). Dabei ist zu beachten, dass das Lackierprinzip "Abführen der Ladungen über den Nasslackfilm" für diesen Anwendungsfall angewendet wird, und nur in Verbindung mit Wasserlack funktioniert (Bild 48).

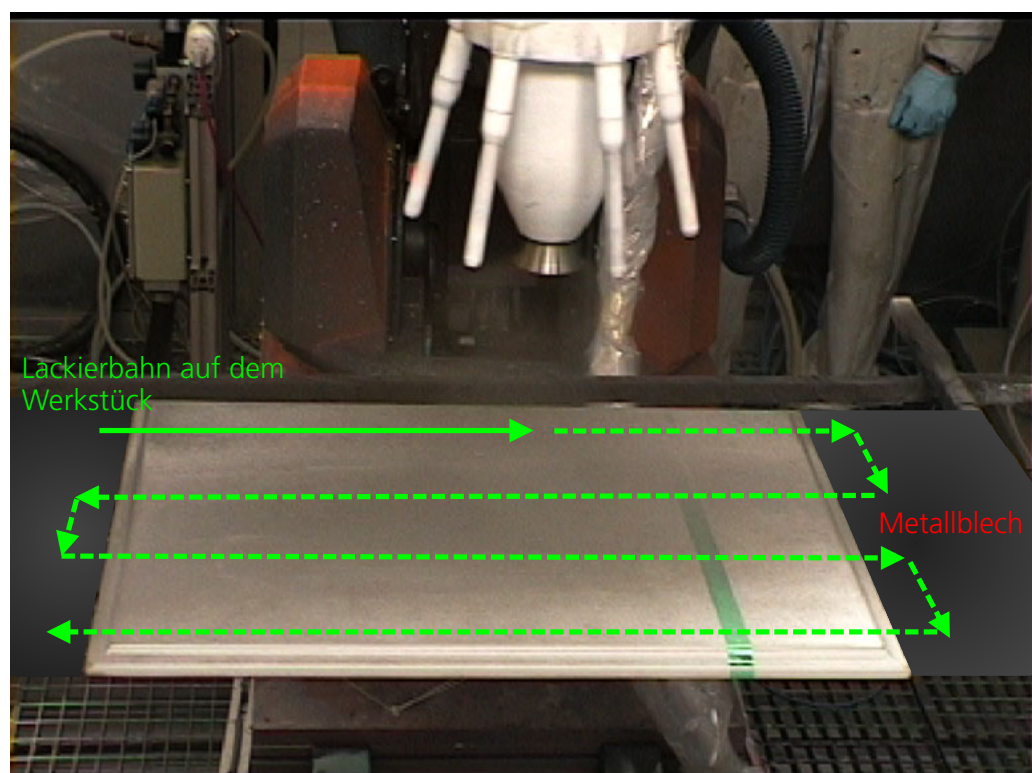


Bild 48: Beschichtungsversuch im Technikum (Wasserlack)

Versuche mit Originallack, leitfähiger Vorbeschichtung der Werkstücke und leitfähiger Modifikation des Originallackes erbrachten keine zufriedenstellenden Resultate. Z.B brachte eine leitfähige Modifikation des Isoliergrundes als alleinige Massnahme keine ausreichende Sicherstellung der Schichtqualität (siehe Bild 49) für die elektrostatische Lackierung mit Lösemittellack.

Nur bei der Verwendung von Wasserlack kann die geforderte Mindestschichtdicke auf der Werkstückfläche sicher erzeugt werden.

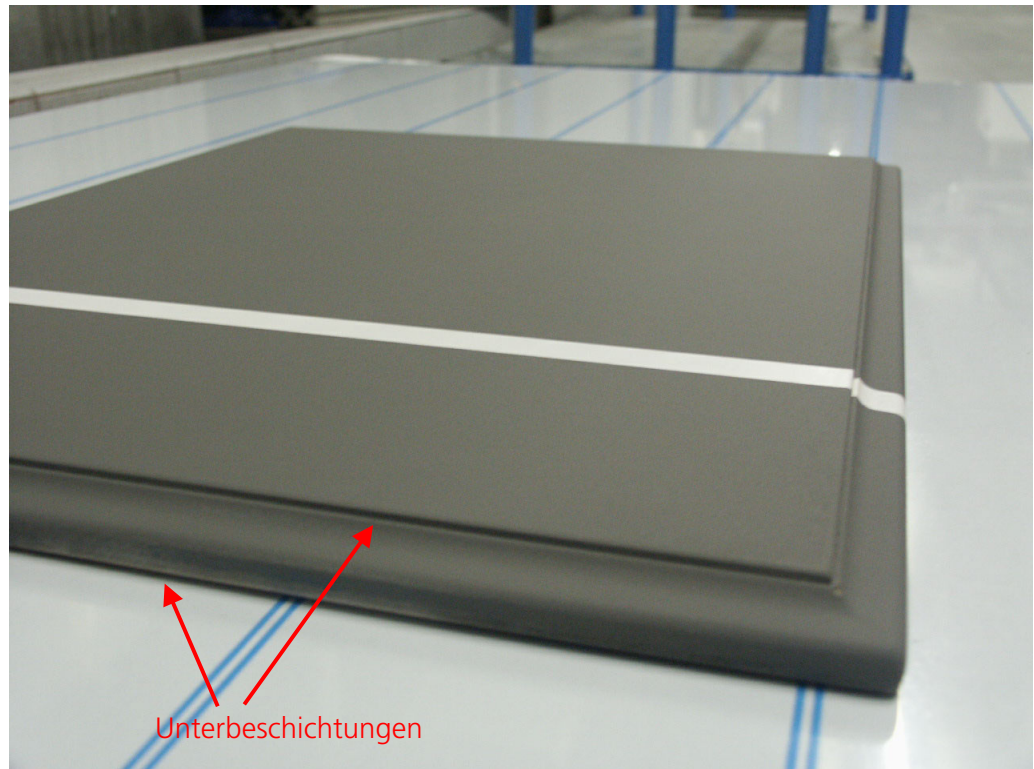


Bild 49: Fehlgelagerte elektrostatistische Beschichtung

Die elektrostatistische Lackierung erfolgt mit bis zu 55 kV. Insbesondere in Nuten der gefrästen Werkstückkanten treten Unterbeschichtungen (partiell $< 30 \mu\text{m}$) bei zu hoch eingestellter Hochspannung (z.B. 70 kV) auf.

Dieses Verhalten wird dadurch erklärt, dass das Werkstück als Isolator zwischen leitfähigem Metallblech und geladenen Lackpartikeln wirkt. Nur die Werkstückbereiche, die unmittelbar von nassem Lackmaterial getroffen werden, werden mit einer ausreichend hohen Schichtdicke lackiert. Daher ist die Wirksamkeit der Elektrostatik deutlich feststellbar, aber durch strömungsungünstige Bauteilbereiche beeinträchtigt. Höhere Verfahrensgeschwindigkeiten zur Verkürzung der Lackierzeit unter 20 s sind aufgrund von Abrissen der Luftströmung (Turbulenzen) nicht sinnvoll.

Die Verwendung von Kunststoffwarenrägern anstelle von Metallwarenrägern brachte eine ungünstigere Schichtdickenverteilung an den Werkstückkanten.

Die elektrostatistische Sprühstrahlformung kann in diesem Anwendungsfall zwar den Auftragswirkungsgrad weiter erhöhen (bis 67 %), jedoch übersteigt die Lackierzeit durch die geringere Sprühstrahlbreite dann die Lackierzeit des IST-Zustandes.

Der Auftragswirkungsgrad lässt sich durch folgende Zusatzmaßnahme (optional) weiter verbessern (Bild 50 und 51):

Fall 2: Fall 1 und Option 1: Der elektrische Oberflächenwiderstand wird durch geeignete Massnahmen, z.B. Besprühen mit Wasser, KCl-Lösung oder Leitlösung abgesenkt. Dadurch wird erreicht, dass auf der Oberfläche des Werkstücks ein homogener Oberflächenwiderstand von $<10^9 \Omega$ vor dem Spritzlackierprozess ausgebildet wird. Infolge dessen kann die elektrostatische Lackierung mit bis zu 70 kV erfolgen, ohne dass unzulässige Unterbeschichtungen in Nuten des Werkstücks auftreten. Der erreichte Auftragswirkungsgrad liegt bei 70 %, die Lackierzeit bei 20 s.

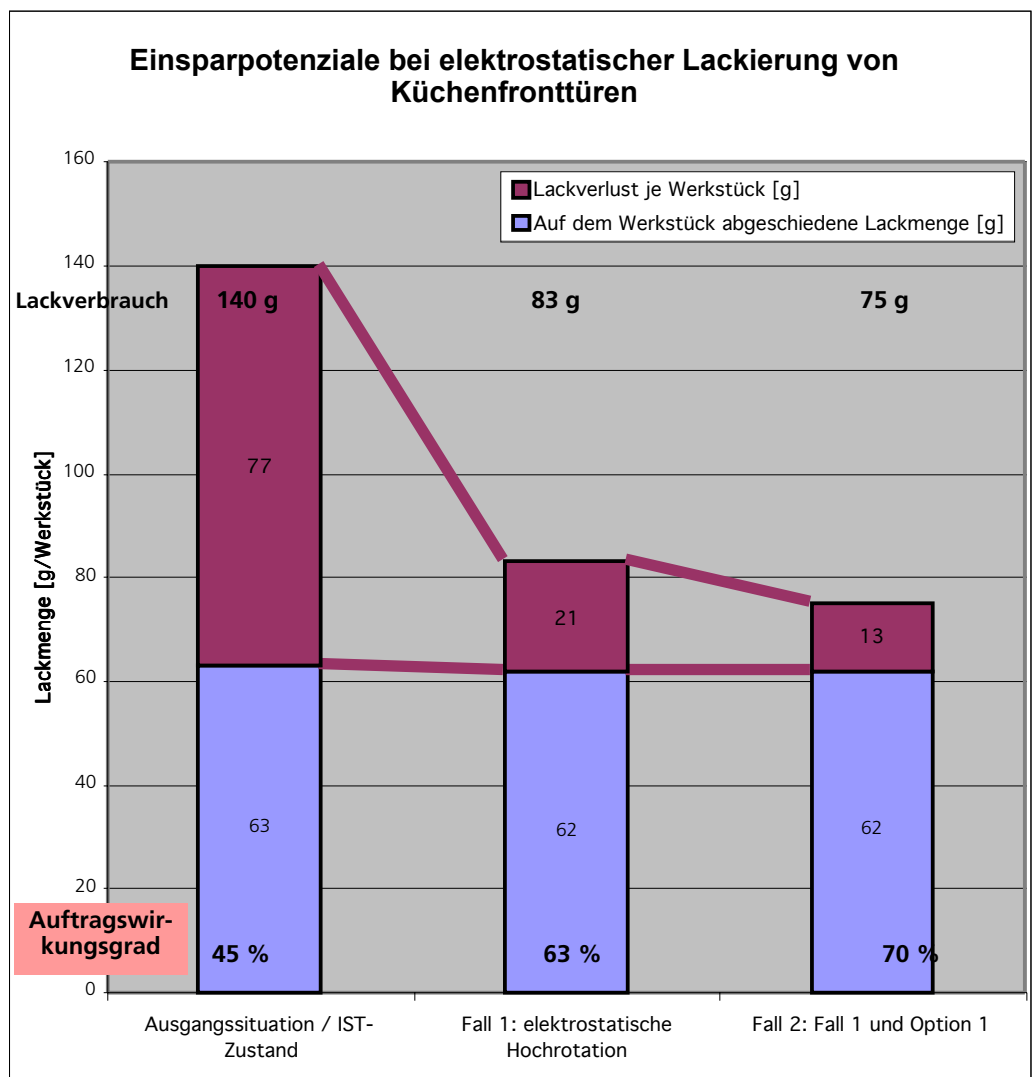


Bild 50: Einsparpotenziale durch die Erhöhung des Auftragswirkungsgrades

Fortschritte für die Prozessqualität				
	IST-Zustand	Fall 1	Fall 2	Einsparung
Auftragswirkungsgrad [%]	43 - 45	57 - 62	68 - 71	
Benötigte Lackmenge [g/Werkstück]	nass: 140 - 145 Lösemittel- lack (FK 38%)	nass: ca. 83 Wasserlack (FK 45 %)	nass: ca. 75 Wasserlack (FK 45 %)	57 - 65 (40 - 46%)
auf dem Werkstück abgeschiedene Lackmenge [g/Werkstück]	nass: ca. 60 (trocken: 23 - 24)	nass: ca. 51 (trocken: ca 24)	nass: ca. 52 (trocken: ca. 25)	gleiche Schicht- qualität
Lackverlust [g/Werkstück]	nass ca.80 trocken ca. 31	nass ca. 32 trocken ca. 14	nass ca. 23 trocken ca. 10	17 - 21 (55 - 68%)
Menge der flüchtigen organischen Lösemittel [g/Werkstück]	70	4,3	3,8	ca. 65 (93 %)
Benötigte Lackierzeit [s]	27	20	20	7 (26 %)
Schichtdickenverteilung [µm] auf der Fläche: an Nuten und Kanten:	40 - 45 28 - 55	40 - 45 25 - 65	40 - 45 28 - 57	annähernd gleiche Qualität

Bild 51: Fortschritte für die Prozessqualität bei der Lackierung von Küchenfronttüren

Durch den hohen Auftragswirkungsgrad sinkt der Lackverbrauch beim Lackieren von 140 g/Werkstück (Lösemittellack im IST-Zustand) auf 83 g/Werkstück (Fall 1, Wasserlack), bzw. auf 75 g/Werkstück (Fall 2, Wasserlack).

Somit kann je Werkstück bis zu 65 g Lackmasse (46 %) eingespart werden.

Als indirekte Folge fallen je Werkstück nur 10 g Lackabfall (Wasserlack, trocken) im Optimalfall gegenüber 31 g Lösemittellackabfall, trocken, im IST-Zustand an (Lackabfall-Einsparung 68 %). Daher wird auch der Einsatz der benötigten Koaguliermittel reduziert und z.B. die Standzeit einer Nassauswaschung erhöht. Zusätzlich dazu wird die Lösemittlemission von 70 g/Werkstück (Lösemittellack im IST-Zustand) auf 3,8 g/Werkstück (Wasserlack im Optimalfall) reduziert, was einer Emissionsminderung von 94 % entspricht.

Eine weitere indirekte Folge ist, dass die geringere benötigte Lackmenge in kürzerer Lackierzeit aufgetragen werden kann (Lackierzeitverkürzung von 27 s im IST-Zustand auf 20 s im Optimalfall; 26 %). Die Lackierzeitverkürzung erfolgt durch höhere Verfahrensgeschwindigkeiten des Lackierroboters bei gleichbleibender

Lackausstoßmenge des Zerstäubers. Bedingt durch die geometrischen Eigenschaften des Werkstücks, die maximalen Verfahrensgeschwindigkeiten des Roboters und die maximal mögliche Durchflussmenge beim Zerstäuben werden hier Grenzen erreicht, sobald die Schichtdickenverteilung unzulässig schwankt oder die Luftströmung abreißt (Turbulenzen).

Wird die Lackausstoßmenge des Zerstäubers beim Lackieren gedrosselt, kann die Schichtqualität (z.B. besserer Verlauf durch feinere Zerstäubung) und die Schichtdickenverteilung unter Beibehaltung der Lackierzeit verbessert werden.

Bei den Untersuchungen wurden neben den Schichteigenschaften die Geräte- und Anlagenverschmutzung, die Anlagenstörungen und mögliche Gegenmaßnahmen hinsichtlich der Fertigungssicherheit des Prozesses mitbetrachtet. Die systematische und die situationsbedingte Fertigungssicherheit (Anlagen- und Verarbeitungsseite) wurden in Kapitel 4.1. beschrieben. Es kam auch bei dieser Untersuchungsreihe zu keiner systembedingten Störung.

Während der Untersuchungen traten folgende situationsbedingte Störungen auf:

- * Verstopfung in der Farbleitung des Zerstäubers,
- * Agglomerateinlagerung in die Lackschicht des Wasserlackes.

In beiden Fällen wurde die Störung innerhalb weniger Minuten erkannt und Gegenmaßnahmen erfolgreich eingeleitet:

- * Verdünnen und kontinuierliches Rühren des Lackmaterials zur Vermeidung von Verstopfungen in der Farbversorgung. Zusätzlich nach jedem Lackiervorgang Freispülen der Glocke.
- * Gründliches Spülen der Farbversorgung bei der Wasserlackbeschichtung zunächst mit unpolarer Spüllösung, gefolgt von einem Spülprozess mit Isopropanol, und einem Spülprozess mit wässriger Spüllösung. Die bei der Lackumstellung von Lösemittelack auf Wasserlack in der Farbleitung verbliebenen Lösemittelreste konnten dadurch entfernt werden.

Es kam zu keiner Wiederholung der selben Störung, die Anlagenstillstandszeiten lagen unter 3 % bezüglich der Nutzungsdauer.

Im IST-Zustand werden in täglichen Reinigungszyklen die Bauteile in der Lackierkabine manuell von Lacknebel gereinigt. Das Transportband wird kontinuierlich von Lacknebel gereinigt (Rakel und Lösemittelwäscher). Diese Reinigungszyklen können bei elektrostatischer Lackierung mit einem Lackierroboter beibehalten werden.

4.3 Hochglanzlackierung von Kfz-Innenteilen

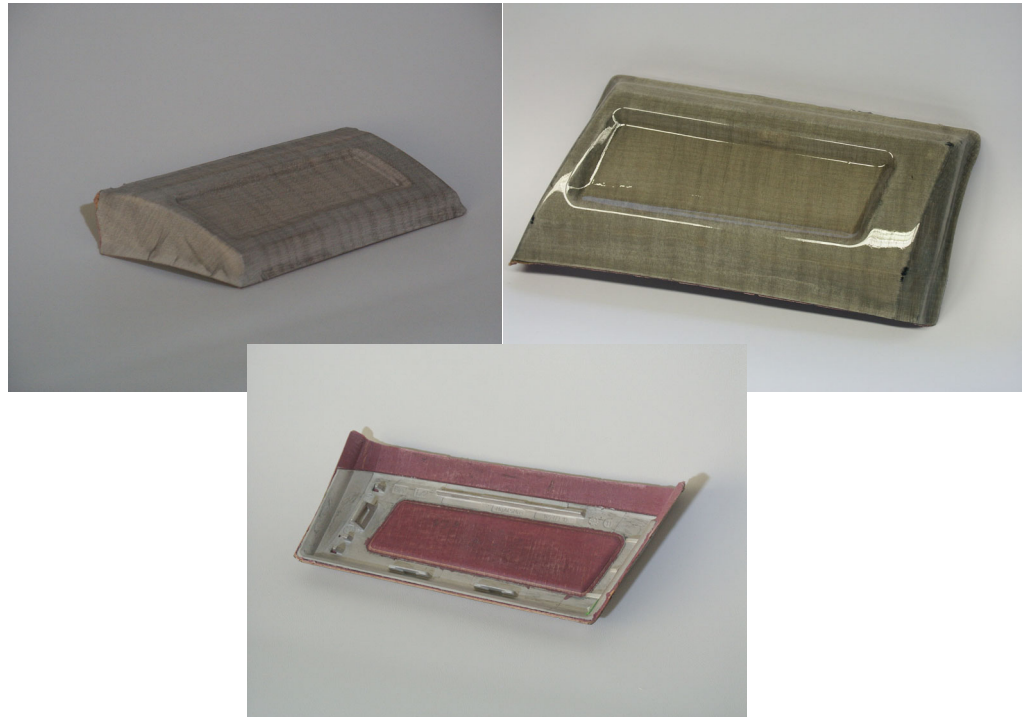


Bild 52: Für die Untersuchung ausgewählte Türgriffmulde

In Kap. 1.2.3. werden die wesentlichen Eckdaten der IST-Situation bei der Lackierung von Kfz-Innenteilen beschrieben, hier werden zusätzlich Detailangaben aufgelistet:

Aus dem Teilespektrum wurde für die vorliegende Untersuchung eine Türgriffmulde mit 80 * 235 * 35 mm ausgewählt. Bei diesem Werkstück handelt es sich um ein Formteil aus laminierten Echtholz-Furnierlagen auf einem Metallträgerrahmen.

Die Lackierung erfolgt im IST-Zustand in 7 bis 13 Schichten mit 2-K Polyurethanlack (Grundierung, Isolierung) und 3-K Polyester-Lösemittellacken.

Der Gesamt-Lackverbrauch in der Lackiererei liegt bei etwa 290 t/a, davon entfallen ca. 50 t/a auf den Polyurethanlack (Festkörpergehalt 26 %), 30 t/a auf die Patinierung (Festkörpergehalt 22 %) und 210 t/a auf den Decklack (Festkörpergehalt 50 %).

Der zu untersuchende Prozessschritt war der Auftrag der Decklackschicht.

Der Auftragswirkungsgrad bei der Hochglanzlackierung (mindest. fünfschichtige Decklackierung mit Zwischenablüften) dieses Werkstücks wurde mit 47 - 53 % gemessen, der Lackverbrauch liegt bei ca. 10 g / Werkstück (je Auftragsgang).

Die Schichtdicke der Decklackschicht beträgt nach der Trocknung 700 µm - 800

µm auf der Fläche, 550 µm - 650 µm an Kanten.

Die Lackierzeit je Werkstück (4 s /Schichtauftrag) setzt sich aus der Summe der Lackierzeiten der vier Zerstäuber in der automatischen Flachteile-Lackieranlage zusammen. Täglich erfolgen Reinigungsarbeiten (z.B. bei Schichtbeginn).

Die Prüfung der Schichteigenschaften der Originalteile ergab die in Bild 53 dargestellten Ergebnisse. Bei den Beschichtungsversuchen im Technikum des Fraunhofer IPA wurden mindestens gleichwertige Ergebnisse bei der Verwendung des Original-Lösemittellackes erzielt.

Die Aufgabe bei den Untersuchungen war, die Prozessfenster zu bestimmen,

Schichteigenschaften der mit Polyester-Lösemittellack decklackierten Originalteile beim IST-Zustand		Eigenschaften der mit 2-K PUR Wasserlack decklackierten Teile
Schichtdicke der Decklackierung	Min 700 µm, Max 800 µm auf der Fläche; Min 550 µm, Max 650 µm an Kanten	Min 700 µm, Max 800 µm auf der Fläche; Min 550 µm, Max 700 µm an Kanten
Verlauf (Hommel-Taster)	Langwelligkeit und Kurzwelligkeit nicht messbar, da poliert, Rauhtiefe < 0,1 µm	Langwelligkeit 3 mm/cm Kurzwelligkeit 300 µm, nicht poliert, Rauhtiefe < 0,3 µm
Glanzgrad (visuell)	brillanter Hochglanz	Hochglanz
Oberflächenspannung (Testtinten)	Bereich von 36 bis 45 mN/m	Bereich von 45 bis 52 mN/m
Farbe (visuell)	transparent, leicht gelblich	opak-transparent, leicht bläulich
Chemische Beständigkeit (Einwirkzeit 16 h)	Aceton CH 1, alkal. Reiniger CH 0, Rotwein CH 0, Essig CH 0, Isopropanol CH 0, Kaffee CH 0, Farbstift CH 0	Aceton CH 0, alkal. Reiniger CH 0, Rotwein CH 0, Essig CH 0, Isopropanol CH 0, Kaffee CH 0, Farbstift CH 0
Vergilbung (16 h; 254 nm; 1,6 W/cm ² ; 1 cm)	UV 0	UV 0
Lackhaftung (Gitterschnitt; mit Klebebandabzug)	Gt 0	Gt 0
Kondenswasser Konstantklima (168 h ; 40 °C; 98 % r.F)	Keine Blasen; Unterwanderung 0,5 [mm], Gt 0	Blasen 0,5 mm, partiell; Unterwanderung 1,5 mm, Gt 2; milchige Trübung
Kratzbeständigkeit (Clemen Kratzprüfgerät)	Clemen 8 (hart)	Clemen 6 (mittel)
Steinschlag (30 s; 0,7 bar; Moränensplitt 5 – 8 mm)	S 1 (Schicht angegriffen, jedoch nicht durchschlagen)	S 2 (Schicht angegriffen, teilweise durchschlagen)

Bild 53: Festgestellte Schichtmerkmale der lackierten Originalwerkstücke

innerhalb derer eine Decklackierung der Kfz-Innenteile mit der elektrostatischen Hochrotationsglocke fertigungssicher auszuführen ist.

Die Prozessdaten des IST-Zustandes und die bei den Untersuchungen im Technikum festgestellten Prozessdaten weichen voneinander ab, da für eine elektrostatische Lackierung im Technikum ein 6-Achs Lackierroboter und ein spezieller Warenträger mit metallischem Auflageblech eingesetzt wurde (Bild 54):

Im Vergleich zum IST-Zustand (Auftragswirkungsgrad 47 - 53 %) kann bei elek-

Ermittelte Prozessdaten des IST-Zustandes (Ausgangssituation):	Ermittelte Prozessdaten für die elektrostatische Hochrotationszerstäubung mit Wasserlack im Technikum:
Eigenschaften des Werkstücks vor der Spritzlackierung	
Grundiert mit transparentem 2-K PUR Lösemittel Isoliergrund im Spritzverfahren, Zwischenschliff mit Korn 220, (kann leitfähig modifiziert werden)	
elektr. Oberflächenwiderstand $10^{10} \Omega$	elektr. Oberflächenwiderstand $10^{10} \Omega$
elektr. Durchgangswiderstand ca. $10^8 \Omega/\text{cm}$	elektr. Durchgangswiderstand ca. $10^8 \Omega/\text{cm}$
Oberflächenspannung > 56 mN/m	Oberflächenspannung > 56 mN/m
Eigenschaften des Originallackes (3-K Lösemittel Polyesterlack):	
Elektrische Leitfähigkeit: 0,05 μS	Elektrische Leitfähigkeit: 0,5 mS
Auslaufzeit DIN 4: 22 s (verdünnt)	Auslaufzeit DIN 4: 32 s
Newtonsche Flüssigkeit, Festkörper 50 %	Thixotrope Flüssigkeit, Festkörper 45%
Werkstückaufnahme (Warenträger):	
Durchlaufanlage mit geschlossenem Horizontalförderband aus Kunststoff, elektr. Oberflächenwiderstand > $10^{15} \Omega$	geschlossenes Metallblech horizontal zum Auflegen der Werkstücke
Unterschiedliche Warenträgerbelegungsichte, abhängig von der Werkstückgeometrie, bei den Türgriffmulden ca. 60 %	Erdungskontaktierung: Das Metallblech ist mit dem geerdeten Metallwarenträger verschraubt.
Anlagen- und Gerätedaten:	
Durchlaufanlage mit Horizontalhubautomat, bestückt mit 4 HVLP-Zerstäubern, Teileerkennungssystem für die Ein- und Ausschaltpunkte der Zerstäuber	Simulierte Durchlaufanlage mit 6-Achs-Roboter, bestückt mit 1 elektrostatischen Hochrotationsglocke
Beschichtungsparameter:	
Sprühstrahlbreite 240 mm, Lackmenge 160 g/min je Zerstäuber, Sprühabstand 235 mm, Sprühwinkelüberlappung, Beschichtungsleistung max. 3 m^2/min Lackierzeit 4 s/Türgriffmulde	Sprühstrahlbreite 220 mm, Lackmenge 155 g/min, Sprühabstand 180 mm, Drehzahl 30000 min^{-1} bis 55000 min^{-1} Lackierzeit 3,1 s/Türgriffmulde
Einstellparameter für die Elektrostatik:	
Keine Elektrostatik im Einsatz	Spannungskonstant 70 kV, Strom 250 - 350 μA , Kombinierte Aufladung

Bild 54: Prozessdaten für die Lackierung von Türgriffmulden

trostatischer Lackierung mit der Hochrotationsglocke und einem Lackierroboter ein höherer Auftragswirkungsgrad realisiert werden. Das Lackierprinzip "Abführen der Ladungen über den Nasslackfilm" erfordert für einen erfolgreichen Lackierprozess den Einsatz von Wasserlacken (Bild 55). Beschichtungsversuche nach diesem Lackierprinzip mit 2-K PUR-Wasserlack machten deutlich, dass ein Auftragswirkungsgrad von 70 % bei der vorliegenden Bauteilgeometrie realisierbar ist (**Fall 1,**).

Der eingesetzte Wasserlack ist jedoch nicht vollständig mit dem Original-Polyesterlack vergleichbar. Es besteht aufgrund der hohen optischen und physikalischen Anforderungen (Stehvermögen, Schleifbarkeit, Temperaturwechselbeständigkeit, brillanter Hochglanz nach dem Polieren, permanente Transparenz) an die lackierten Bauteile derzeit keine Möglichkeit, einen Wasserlack einzusetzen, der nach dem Härten die Eigenschaften des Originallackes besitzt. Die maximal mögliche Auftragsmenge beim eingesetzten Wasserlack ist auf 120 g/m^2 begrenzt, der Glanz- und Farbeindruck des Wasserlackes unterscheidet sich stark, bei hohen Schichtstärken wirkt der Wasserlack opak, im Kondenswasser-Konstantklima Test erweicht die Lackschicht und wird milchig.

Versuche, den Original-Polyesterlack mit Leitsalzen zu modifizieren, um das Lackierprinzip "Abführen der Ladungen über den Nasslackfilm" umzusetzen, scheiterten an auftretenden Unverträglichkeiten (Krater, Trübung).

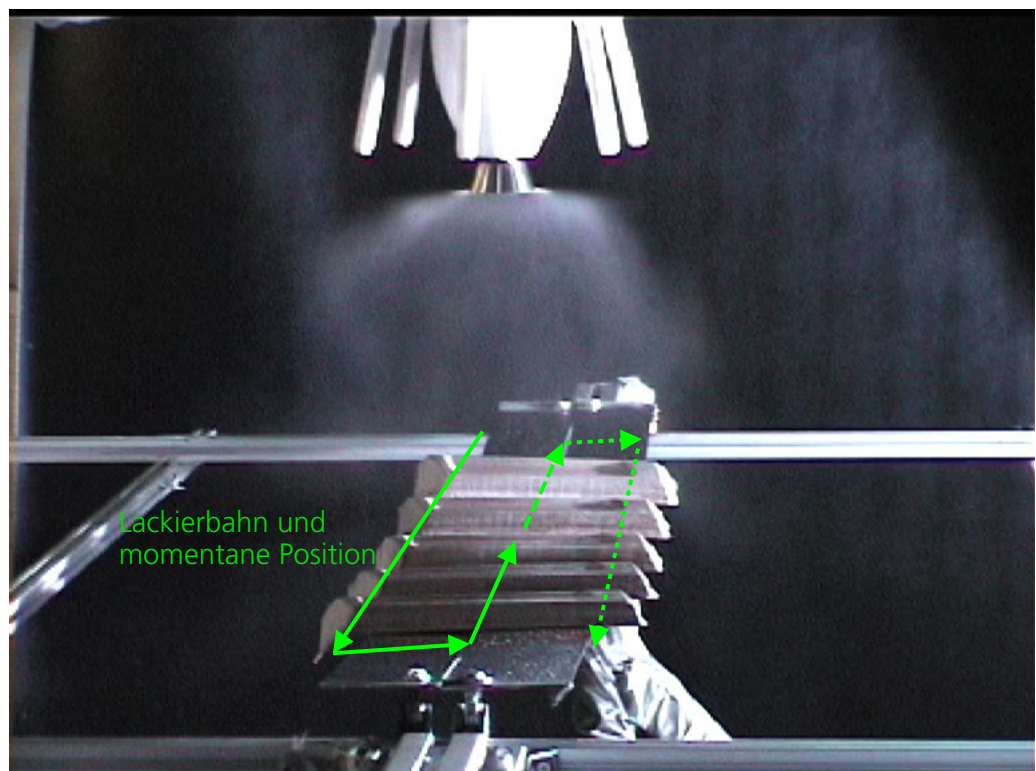


Bild 55: Elektrostatistische Lackierung von Türgriffmulden mit 2-K PUR Wasserlack

Es wurden zusätzlich zu den Untersuchungen mit Wasserlack weiterführende Versuchsreihen mit dem Original-Lacksystem ausgeführt.

Dazu wurde ein anderes Lackierprinzip gewählt, mit dem die Werkstücke elektrostatisch mit dem Original-Polyesterlack lackierbar sind:

"Abführen der Ladungen über das leitfähige Werkstückinnere".

Die Werkstücke wurden vor der Lackierung auf 8 % Inhaltsfeuchte konditioniert (24 h, 80 % rel. Feuchte, 28 °C). Der elektrische Durchgangswiderstand liegt nach der Konditionierung bei $10^4 \Omega/\text{cm}$, der Feuchtegehalt beeinträchtigt die erste Lackschicht (Polyurethanlack) nicht. Beim Lackieren wurde die Metallschale auf der Teilerückseite auf ein geerdetes Metallband gelegt. Durch den geringen elektrischen Durchgangswiderstand war somit das Werkstückinnere geerdet (Bild 56).

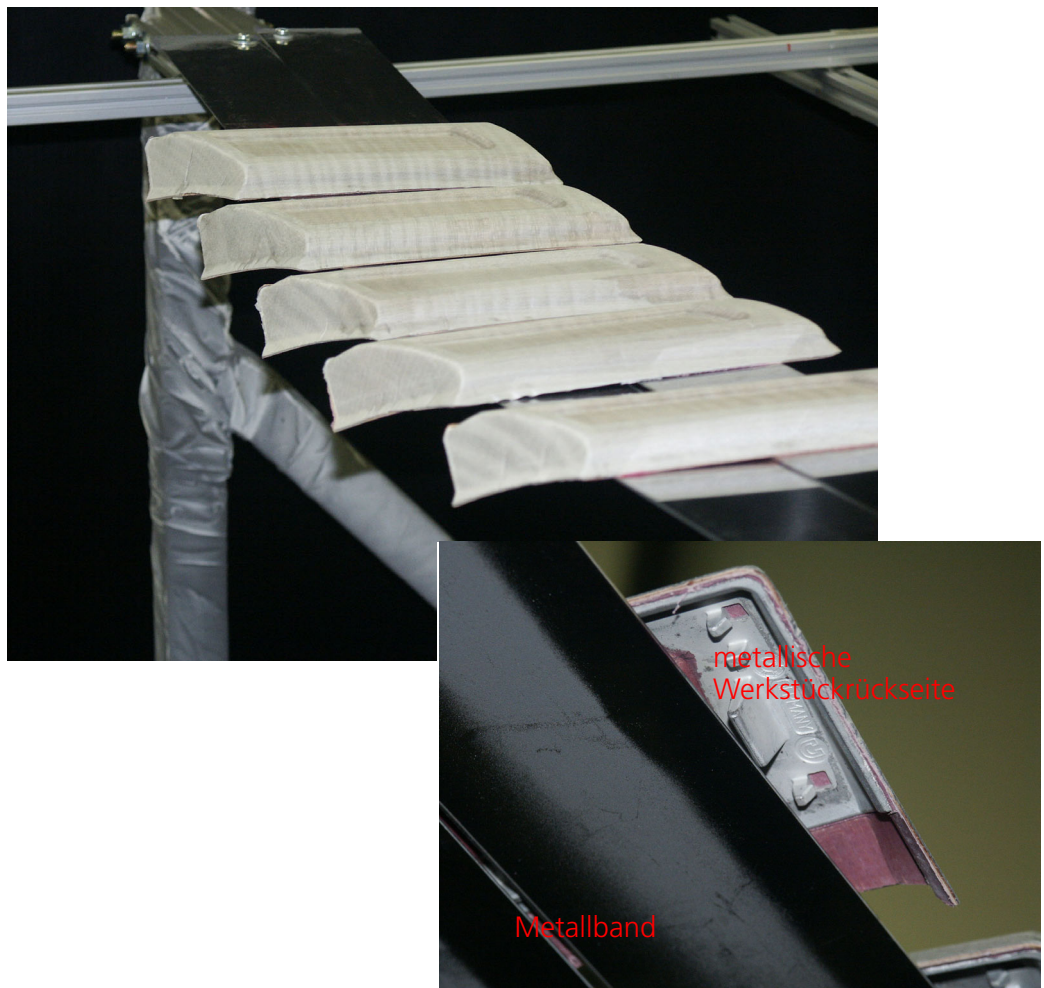


Bild 56: Lackierlage und Erdung über die Werkstückrückseite (Fall 2)

Die Aufladung des Polyesterlackes erfolgt mit bis zu 100 kV (Höchstleistung des Hochspannungserzeugers) mit Kontakt- und Aussenaufladung. Die geladenen Lackpartikel werden vom Werkstück angezogen. Beim Auftreffen der geladenen Lackpartikel auf das Werkstück schlagen die Ladungen durch die elektrisch nicht leitfähige Werkstückoberfläche zur Erdung an der Werkstückrückseite hin durch. Bei den Beschichtungsversuchen nach dem beschriebenen Lackierprinzip wurde ein Auftragswirkungsgrad von ca. 60 % erreicht, unter Beibehaltung der Schichtmerkmale des IST-Zustandes (**Fall 2**, Bilder 57 und 58).

Die Verwendung eines Kunststoffbandes im Fall 2 anstelle des Metallbandes als Werkstückauflage erhöht bei diesem Lackierprinzip den Auftragswirkungsgrad zusätzlich (auf ca. 65 %). Dabei muss jedoch jedes einzelne Werkstück an der Teilerückseite mit einem Erdungskabel verbunden werden (Steckverbindung). Dadurch steigt der Handlingsaufwand vor und nach der Lackierung an.

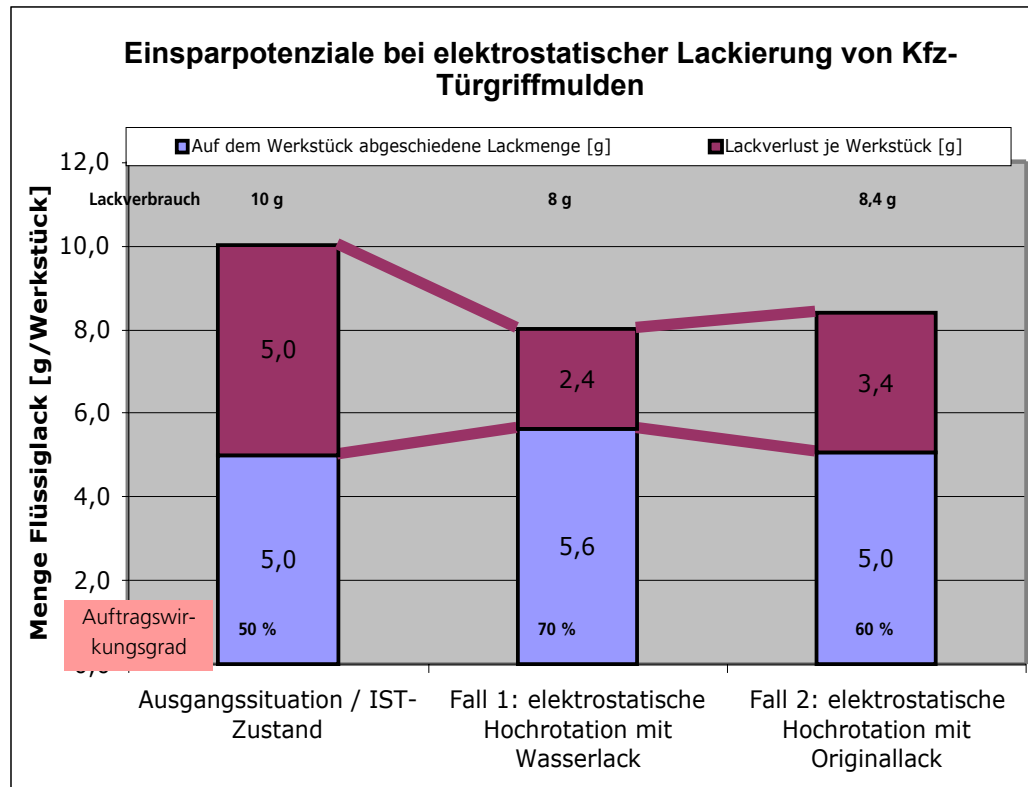


Bild 57: Einsparpotenziale durch die Erhöhung des Auftragswirkungsgrades

Fortschritte für die Prozessqualität				
	IST-Zustand	Fall 1	Fall 2	Einsparung / Δ
Auftragswirkungsgrad [%]	47 - 52	67 - 71	58 - 61	Δ 6 - 24
Benötigte Lackmenge [g/Werkstück]	nass: 10 Lösemittel- lack	nass: 8 Wasserlack	nass: 8,4 Lösemittel- lack	2 g Wasser- lack (20 %) 1,6 g Lömi- lack (16 %)
auf dem Werkstück abgeschiedene Lackmenge [g/Werkstück]	nass: ca. 5,0 (trocken: ca.2,5)	nass: ca.5,6 (trocken: ca 2,6)	nass: ca.5,0 (trocken: ca. 2,5)	gleiche Schicht- menge
Lackverlust (Abfall) [g/Werkstück]	trocken ca.2,5	trocken ca.1,3	trocken ca.1,7	1,2 g WL (52 %) 0,8 g LL (32 %)
Menge der flüchtigen organischen Lösemittel [g/Werkstück]	5,0	0,6	4,2	4,4 g bei WL (88 %) 0,8 g bei LL (16 %)
Benötigte Lackierzeit [s/St]	4,0	3,2	3,5	0,5 - 0,8 (12-20 %)
Schichtdickenverteilung [μ m]				annähernd gleiche Qualität
auf der Fläche:	700 - 800	700 - 800	700 - 800	
an Nuten und Kanten:	550 - 650	550 - 700	550 - 650	

Bild 58: Fortschritte für die Prozessqualität bei der Beschichtung von Türgriffmulden

Die elektrostatische Sprühstrahlformung wird in diesem Anwendungsfall eingesetzt (Kombinierte Kontakt- und Außenaufladung mit 100 kV), um Lacknebelrückschläge zum Zerstäuber oder Lackierroboter zu unterdrücken. Eine weitere Einengung des Sprühstrahls erbrachte keine Verbesserungen bezüglich des Auftragswirkungsgrades.

Der Auftragswirkungsgrad lässt sich im Fall 2 durch eine Absenkung des elektrischen Oberflächenwiderstandes (Besprühen mit Leitsalzlösungen vor der Lackierung) auf bis zu 68 % erhöhen. Es wurde jedoch bei der Prüfung der Schichteigenschaften festgestellt, dass Lackhaftungsprobleme nach einer Kondenswasser-Konstantklima-Belastung auftreten. Als Ursache werden osmotische Effekte vermutet. Daher wird bis zur Klärung des Zusammenhangs vom Einsatz der Leitlösungen bei Polyesterlacken abgeraten. Der Auftrag der Leitlösungen stellt außerdem einen zusätzlichen Arbeitsschritt mit entsprechendem Aufwand dar.

Durch den Auftragswirkungsgrad (**Fall 1:** 70 % bei elektrostatischer Lackierung mit Wasserlack, **Fall 2:** 60 % bei elektrostatischer Lackierung mit dem Originallack) sinkt der Lackverbrauch beim Lackieren von 10 g/Werkstück (Auftragswirkungsgrad beim IST-Zustand ca. 50 %) auf 8 g Wasserlack/Werkstück im Fall 1 (45 % Festkörpergehalt des Wasserlackes ist berücksichtigt). Im Fall 1 kann je Werkstück bis zu 2,0 g Flüssig-Lack (20 % Einsparung gegenüber dem IST-Zustand) eingespart werden. Je Werkstück fallen dann nur 1,3 g Lackabfall (Wasserlack, trocken) an gegenüber 2,5 g (Lösemittelack, trocken) im IST-Zustand (Lackabfall-Einsparung ca. 48 %).

Der Einsatz der benötigten Koaguliermittel wird somit reduziert und z.B. die Standzeit einer Nassauswaschung erhöht.

Da im Fall 1 anstelle des Polyesterlackes ein Wasserlack mit 8 % Gehalt an organischen Lösemitteln eingesetzt wird, reduziert sich die Lösemittellemission. Im IST-Zustand werden je Werkstück 5 g organische Lösemittel emittiert, im Fall 1 0,6 g / Werkstück. Die Emission an organischen Lösemitteln wird in diesem Fall um 88 % reduziert.

Eine weitere Folge des erhöhten Auftragswirkungsgrades ist, dass die geringere benötigte Lackmenge in kürzerer Lackierzeit aufgetragen werden kann (Lackierzeitverkürzung von 4 s im IST-Zustand auf 3,2 s). Die Lackierzeitverkürzung erfolgt durch höhere Verfahrgeschwindigkeiten des Lackierroboters bei gleichbleibender Lackausstossmenge des Zerstäubers. Bedingt durch die geometrischen Eigenschaften des Werkstücks, die maximalen Verfahrgeschwindigkeiten des Roboters und die maximal mögliche Durchflussmenge beim Zerstäuben werden hier Grenzen erreicht, sobald die Schichtdickenverteilung unzulässig schwankt oder die Luftströmung abreisst (Turbulenzen).

Wird die Lackausstossmenge des Zerstäubers beim Lackieren gedrosselt, kann die Schichtqualität (z.B. besserer Verlauf durch feinere Zerstäubung) und die Schichtdickenverteilung unter Beibehaltung der Lackierzeit verbessert werden.

Im Fall 2 (elektrostatische Lackierung mit dem Original-Polyester Lack) wird der Lackverbrauch beim Lackieren von 10 g/Werkstück (Auftragswirkungsgrad beim IST-Zustand ca. 50 %, im Fall 2 ca. 60 %) auf 8,4 g Polyesterlack/Werkstück im Fall 2 reduziert.

Im Fall 2 kann je Werkstück bis zu 1,6 g Flüssiglack (16 % Einsparung gegenüber dem IST-Zustand) eingespart werden. Je Werkstück fallen dann nur 1,7 g Lackabfall (Polyesterlack, trocken) an gegenüber 2,5 g Polyesterlack, trocken, im IST-Zustand (Lackabfall-Einsparung ca. 32 %).

Im IST-Zustand werden je Werkstück 5 g organische Lösemittel emittiert, im Fall 2 ca. 4,2 g / Werkstück (Reduzierung um ca. 16 %).

Die Lackierzeit kann von 4 s im IST-Zustand auf 3,6 s im Fall 2 verkürzt werden. Durch die feinere Zerstäubung, die bei geringerer Lackausstoßmenge möglich ist, verdampfen bereits vor dem Auftreffen auf dem Werkstück große Anteile des enthaltenen Lösemittels. Da der Polyesterlack trockener auf dem Werkstück an-

kommt, erhöht sich das Stehvermögen der Lackschicht. Es ist bei den Beschichtungsversuchen gelungen, bis zu 290 g Polyesterlack / Auftragsgang läuferfrei zu applizieren (Lackierzeit 4 s, Glockendrehzahl 55000 min^{-1}), wobei nach der Schichttrocknung kein qualitativer Unterschied (z.B. Glanzgradunterschiede, Verlaufsunterschiede) feststellbar war. Daher ist davon auszugehen, dass die Anzahl der aufeinanderfolgenden Auftragsgänge bei der Verwendung einer elektrostatischen Hochrotationsglocke deutlich reduziert werden kann (z.B. 3 Auftragsgänge je 290 g/m^2 anstelle der bisher 5 Auftragsgänge je 200 g/m^2).

Bei den Untersuchungen wurden neben den Schichteigenschaften die Geräte- und Anlagenverschmutzung, die Anlagenstörungen und mögliche Gegenmaßnahmen hinsichtlich der Fertigungssicherheit des Prozesses mitbetrachtet. Die systematische und die situationsbedingte Fertigungssicherheit (Anlagen- und Verarbeitungsseite) wurde in Kapitel 4.1. beschrieben. Beim Versuchsaufbau wurde die sehr kurze Topfzeit des Polyesterlackes (20 min.) besonders berücksichtigt. Die Lackkomponenten wurden getrennt zum Zerstäuber gefördert und erst unmittelbar vor der Zerstäubung gemischt. Die Spülprozesse wurden so ausgelegt, dass die kurze Farbleitung mit fertig gemischtem Lackmaterial bei längerer Versuchspause als 5 min. freigespült wurde. Es kam bei dieser Untersuchungsreihe zu keiner system- oder situationsbedingten Störung.

Im IST-Zustand werden in täglichen Reinigungszyklen die Bauteile in der Lackierkabine manuell von Lacknebel gereinigt. Das Transportband wird kontinuierlich von Lacknebel gereinigt (Rakel und Lösemittelwäscher). Diese Reinigungszyklen können bei elektrostatischer Lackierung mit einem Lackierroboter beibehalten werden.

5 Anwendung und wirtschaftliche Bedeutung

Die anwendungsorientierten Untersuchungen im Fraunhofer IPA Oberflächentechnikum wurden überwiegend nach dem Prinzip "Abführung der Ladungen über den gerade erzeugten Nasslackfilm" durchgeführt. Die Umsetzung dieses Lackierprinzips ist bei der Anwendung leitfähiger Lacke mit einfachen Maßnahmen möglich. Eine dazu ausreichende Lackleitfähigkeit liegt bei allen Wasserlacken vor. Bei sehr vielen Lösemittellackanwendungen ist eine ausreichende Lackleitfähigkeit durch die Zugabe von leitfähigen Verdünnungsmitteln oder Leitadditiven einstellbar. Bei Lösemittellackanwendungen, bei denen (z.B. aus Qualitätsgründen) keine ausreichende Lackleitfähigkeit eingestellt werden kann, muss das Lackierprinzip durch den Ladungsabfluss über leitfähig präparierte Werkstücke ersetzt werden. Hier sind jedoch auch Einschränkungen beim Ergebnis zu erwarten. Demnach ist die Realisierbarkeit des elektrostatischen Lackauftrages auf Holz und Holzwerkstoffen in dazu geeigneten Lackieranlagen mit Bewegungseinrichtungen sehr hoch. In einigen bestehenden Lackieranlagen können Umbaumaßnahmen zur Erfüllung der Randbedingungen (z.B. Luftströmung, Abstände zu Kabinenbauteilen, Sicherheitstechnik) erforderlich sein. Die Schwerpunkte der Untersuchungen beim Vorhaben waren der elektrostatische Auftrag von Decklackierungen bei einem 2-Schichtaufbau, die elektrostatische Strukturlackierung bei einem 3-Schichtaufbau und die Hochglanzlackierung bei einem 5-Schichtaufbau. In der Praxis wird nur bei der 3-Schicht Strukturlackierung eine größere Anzahl von Farbtönen verarbeitet. Aus diesem Grund beziehen sich die beim Vorhaben ermittelten Einsparpotenziale gegenüber den aufgenommenen IST-Zuständen auf eine Kontakt- und kombinierte Aufladung der Lacke. Bei alleiniger Anwendung der Außenaufladung ist bekanntermaßen mit reduzierten Einsparpotentialen zu rechnen.

Bei Anwendung elektrostatischer Hochrotationsglocken (Kontakt- und Außenaufladung) wurden bei den untersuchten Anwendungen folgende Maximalwerte (je nach Anwendung, siehe Bild 59) erzielt:

- * Erhöhung des Auftragswirkungsgrades um 40 % bis 80 %,
- * Reduzierung des Lackverbrauchs um 20 % bis 48 % (betrachtet wird nur der zerstäubte Lackmaterialanteil ohne Lackreste und Reinigungsverluste),
- * Minderung des Lösemiteleinsatzes um 40 % bis 94 % (betrachtet wird nur der zerstäubte Lösemittelanteil ohne Reste und Reinigungsverluste),
- * Absenkung des Lackabfalls um 50 % bis 70 % sowie
- * Verkürzung der Lackierzeit um 20 % bis 38 %.

Eine vergleichbare oder höhere Effektivität ist nur über den Einsatz von Lackoverspray-Recyclingverfahren denkbar. Diese Verfahren werden aber wegen den

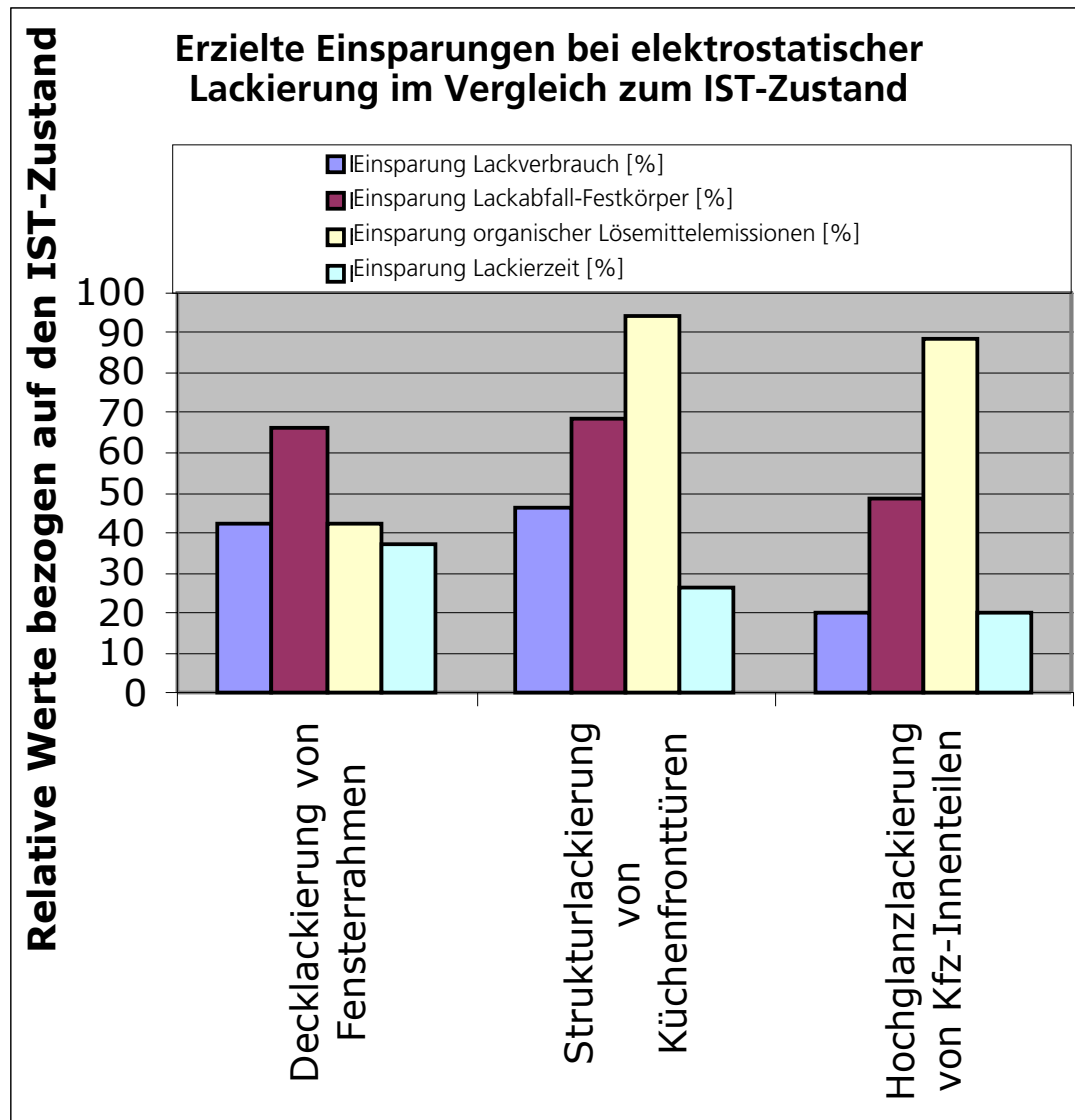


Bild 59: Einsparpotenziale bei elektrostatischer Lackierung

in der Holzindustrie häufigen Lacksystemwechseln, dem Einsatz von 2K-Lacken usw. relativ begrenzt bleiben. Weitere Einsparpotenziale mit dem Einsatz elektrostatischer Lackierverfahren bestehen durch eine teilweise mögliche

- * Absenkung der Nacharbeits- und Ausschusskosten durch Lackoverspray,
- * Absenkung der Anzahl von Lackauftragsgängen,
- * Energieeinsparungen (z.B. Luftdurchsatz in der Kabine) und
- * Planung und Umsetzung von kostengünstigeren Lackieranlagen (z.B. Verzicht auf die Nassauswaschung und deren periphere Anlagentechnik).

5.1 Beispielrechnung für die Abschätzung der Amortisation

Elektrostatische Hochrotationsglocken werden beim Holzlackieren bisher nur in wenigen Einzelfällen eingesetzt. Das liegt neben der technischen Neuheit und Unsicherheit beim Umstieg von pneumatischen Zerstäubern auf diese Beschichtungstechnik auch an den höheren Investitionskosten.

Das Fraunhofer IPA untersucht die unterschiedlichen elektrostatischen Hochrotationsglocken seit vielen Jahren in engem Zusammenhang mit industriellen Anwendungen. Bisher wurden neben Metallbauteilen auch Kunststoffe, Holzwerkstoffe und Keramiken mit hoher Effektivität beschichtet.

Basierend auf diesen Erfahrungswerten erstellt das Fraunhofer IPA Entscheidungshilfen für den Anwender. Diese Entscheidungshilfen erlauben es, die Investitionskosten gegen die zu erwartenden Einsparungen abzuschätzen und evtl. noch bestehende Unsicherheiten auszuräumen.

Eine Entscheidungshilfe muß immer dem einzelnen Anwendungsfall angepasst werden. Im folgendem Beispiel ist dies exemplarisch dargestellt:

Investitionskosten 150.000 EURO:

Anschaffung einer Hochrotationsglocke mit Steuerung ca. 30.000 EURO,
Anpassung der Lackversorgung ca. 35.000 EURO,
Umrüsten der Lackierkabine ca. 35.000 EURO,
Personalschulung 20.000 EURO,
Entwicklungskosten 30.000 EURO.

1. Einsparungen durch geringeren Lackkoagulanatfall bei elektrostatischer Lackierung (im Beispiel um 45 % reduziert)

Mit konventioneller Lackierung:

1 t Lösemittellack (2KPUR) führt zu ca. 0,47 t Gesamtabfall
(Annahmen für die Fallabschätzung: 50 % Auftragswirkungsgrad und 50 % Lackfestkörpergehalt + 10 % Koaguliermittel = 0,28 t Festkörperabfall, bei einem Festkörpergehalt von ca. 60 % des Abfalls).

1 t Abfall kostet ca. 250 EURO

1 t Lösemittellack führt also zu 117 EURO Abfallkosten

Davon lassen sich bei elektrostatischer Lackierung ca. 45 % der Kosten einsparen (53 EURO / t).

2. Einsparungen durch geringeren Lackverbrauch (im Beispiel um 25 % reduziert)

Mit konventioneller Lackierung:

1 t Lösemittellack 2-K PUR kostet ca. 8.000 EURO (8 EURO/ kg)

Mit 1 t Lösemittellack werden 1125 m² Werkstückfläche beschichtet

(Annahmen für die Fallabschätzung: bei 200 g/m² Verbrauch, Festkörpergehalt 50 %, Auftragswirkungsgrad 45 %).

				Unterschiede	
		Anfangsdaten	Wunschzustand	auf Anfangsdaten bezogen [%]	Absolutwerte
Schichtdicke	[µm]	38	38	0,00	0
Fläche /Stück	[m ²]	1	1	0,00	0
Stückzahl / Tag	[St/d]	1000	1000	0,00	0
Festkörpergehalt	[%]	50	50	0,00	0
Dichte	[g/cm ³]	1,19	1,19	0,00	0
Sollverbrauch naß/Stück	[g]	90,44	90,44	0,00	0
Auftrags- wirkungsgrad	[%]	45	60	33,33	15
Durchsatz (Stückzahl/Zeit)	[h ⁻¹]	60	64,29	7,14	4,29
Benötigte Lackmenge (nass)/Stück	[g]	200,98	150,73	-25,00	-50,24
Lackabfall/Stück	[g]	110,54	60,29	-45,45	-50,24
Lackierzeit / Stückzahl	[h]	16,67	16	-6,67	-1
Gesamtverbrauch	[kg]	200,98	150,73	-25,00	-50,24
Gesamtabfall	[kg]	110,54	60,29	-45,45	-50,24

Bild 60: Beispielrechnung für die Beeinflussung der Prozessdaten durch Veränderung des Auftragswirkungsgrades

Bei einem Auftragswirkungsgrad von 60% können diese 1125 m² mit 750 kg Nasslack lackiert werden.

Kosten: 6000 EURO; Einsparung: 2.000 EURO/t bei gleicher Flächenleistung.

Schlussbetrachtung:

Je t bisherigem Lösemittellack-Verbrauch erfolgt insgesamt eine Einsparung in Höhe von 2.053 EURO/ t. Des weiteren besteht die Möglichkeit der Durchsatz-erhöhung und der Verbesserung der Schichtqualität.

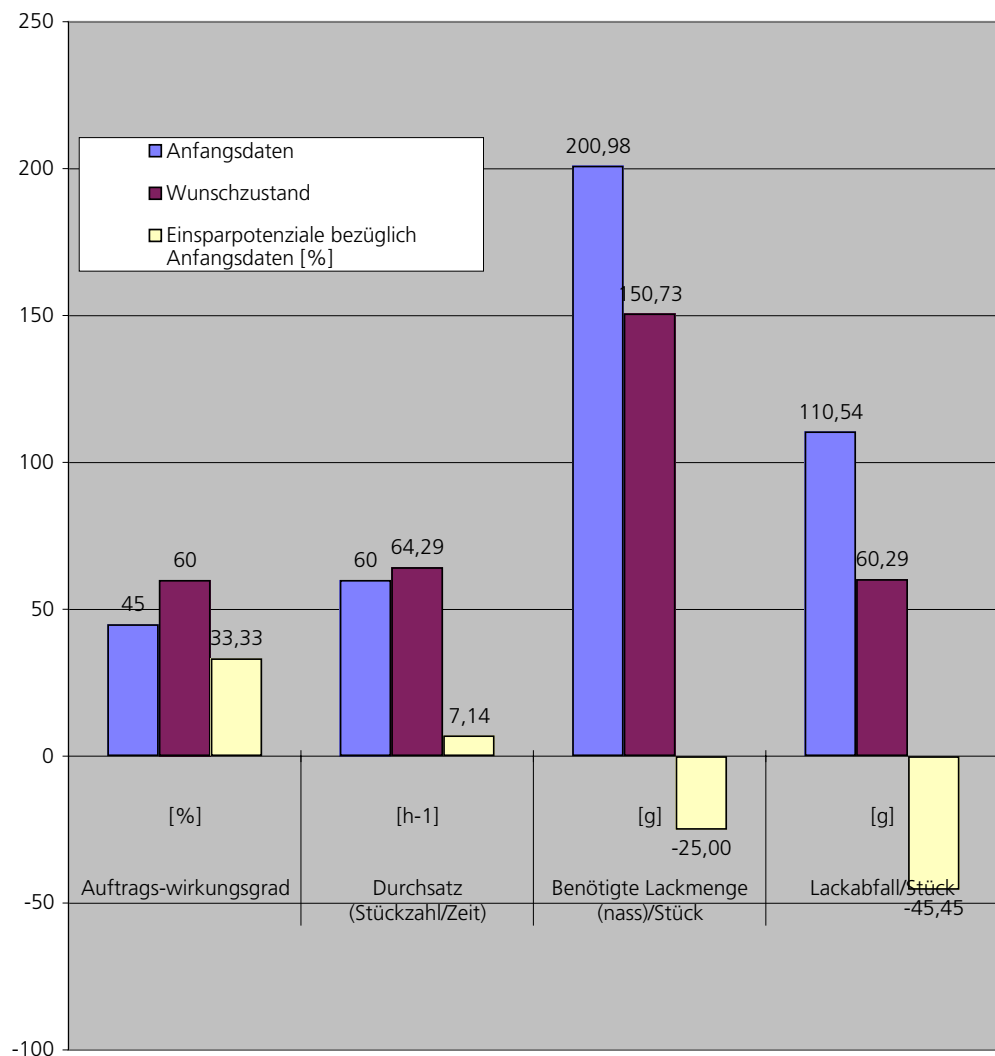


Bild 61: Beispieldiagramm zur Veränderung des Auftragswirkungsgrades

Aus den Daten lässt sich die Amortisationszeit (t_A) nach folgender Formel errechnen:

$$t_A = \frac{\log(E/I) - \log(E/I - Z/100)}{\log(1 + Z/100)}$$

mit: E = Einsparung [EURO / a];
im Bsp. ca. 154.000 EURO/a bei 75 t Jahresverbrauch
I = Investition [EURO];
Z = derzeitige Umlaufrendite (4 %)

Einsparung	153984	EURO/a
Investition	150000	EURO
derzeitige Umlaufrendite	4	%/a
IST-Lackverbrauch / Jahr	75	t/a
Lackpreis	8000	EURO/t
Auftragswirkungsgrad IST	45	%
Auftragswirkungsgrad SOLL	60	%
Amortisationszeit:		
t_A	1,01	Jahre

Bild 62: Berechnung der Amortisation anhand eines Beispiels

Aus dieser Beispielrechnung ist deutlich erkennbar, dass eine Steigerung des Auftragswirkungsgrades eine Verbesserung der Lackausnutzung zur Folge hat. Für die Abschätzung der Lackausnutzung muss neben dem Auftragswirkungsgrad, auch die First-Run Quote, die Warenträgerflächenbelegung, die Überbeschichtung und die Farbwechselhäufigkeit mit berücksichtigt werden. Insofern Lackrecyclingverfahren, z.B. bei 1-K Wasserlack, angewendet werden, muss die zurückgewonnene Lackmenge mit berücksichtigt werden. Es liegt im Ermessen des jeweiligen Anwenders, die aus der Tabelle ersichtlichen Bereiche mit eigenen Erfahrungswerten zu ergänzen, bzw. zu erweitern. Werden für verschiedene Lacke z.B. unterschiedliche Lackauftragsverfahren eingesetzt, müssen etwaige Mittelwerte abgeschätzt werden.

5.2 Abschätzung der Amortisation für die untersuchten Anwenderbetriebe

Bei den untersuchten Anwenderbetrieben sind die für die Abschätzung der Amortisation notwendigen Basisdaten aus der IST-Zustandsaufnahme bekannt. Die zu erwartenden Investitionen für die Anschaffung und Installation der benötigten Gerätetechnik kann anhand der jeweiligen Lackiersituation grob abgeschätzt werden. Die zu erwartenden Einsparungen bei elektrostatischer Lackierung im Vergleich zum IST-Zustand können anhand der im Projekt ermittelten Werte ebenfalls grob abgeschätzt werden.

Für den Anwendungsfall Fensterrahmenlackierung ergibt sich unter Berücksichtigung einer Investition für vier Zerstäubergeräte und vier Lackierroboter (Bild 63 *1) eine Amortisationszeit von ca. 2,5 Jahren. Angenommen wurde bei dieser Abschätzung der in Kap. 4.1 beschriebene Fall 2. Die Kosten für die Umrüstung auf Eindringdorne als Erdungskontakt (Bild 42) wurden nicht mitberücksichtigt.

Einsparung	507682	EURO/a
Investition *1	1200000	EURO
derzeitige Umlaufrendite	4	%/a
IST-Lackverbrauch / Jahr	170	t/a
Lackpreis	8000	EURO/t
Auftragswirkungsgrad IST	35	%
Auftragswirkungsgrad SOLL	55	%
Lackeinsparung	494545	EURO/a
Abfallreduzierung / Jahr	62	t/a
Abfallkosten / t	250	EURO/t
Abfallfaktor für Feststoffgehalt	0,85	
Abfallkosten / Jahr	13136	EURO/a

Amortisationszeit:

t_A	2,53	Jahre
-------	------	-------

Bild 63: Abschätzung der Amortisation für den Anwendungsfall
Fensterrahmenlackierung

Zur Verbesserung der Vergleichbarkeit der Ergebnisse wurde der Lackpreis und die Abfallkosten am derzeitigen Marktpreis orientiert und für alle Abschätzungen in gleicher Höhe belassen (Der Abfallfaktor berücksichtigt den geschätzten Wassergehalt des Lackschlamm-Abfalls).

Die Umsetzung der unter Fall 2 beschriebenen Beschichtungstechnik kann als rentabel betrachtet werden.

Für den Anwendungsfall Lackierung von Küchenfronttüren ergibt sich unter Berücksichtigung einer Investition in Höhe von 1,5 Mio EURO (für die Erstellung einer für Wasserlack geeigneten Lackierkabine mit zwei Zerstäubergeräten und zwei Lackierrobotern, Bild 64 *1) eine Amortisationszeit von ca. 3 Jahren. Angenommen wurde bei dieser Abschätzung der in Kap. 4.2 beschriebene Fall 2.

Es wird bei der Abschätzung der Amortisation davon ausgegangen, dass geeignete Wasserlacksysteme für diesen Anwendungsfall zur Verfügung stehen und die Lackierung auf diese Lacksysteme umgestellt wurde.

Einsparung	530654	EURO/a
Investition *1	1500000	EURO
derzeitige Umlaufrendite	4	%/a
IST-Lackverbrauch / Jahr	210	t/a
Lackpreis	8000	EURO/t
Auftragswirkungsgrad IST	45	%
Auftragswirkungsgrad SOLL	65	%
Lackeinsparung	516923	EURO/a
Abfallreduzierung / Jahr	65	t/a
Abfallkosten / t	250	EURO/t
Abfallfaktor für Feststoffgehalt	0,85	
Abfallkosten / Jahr	13731	EURO/a

Amortisationszeit:

t_A	3,06	Jahre
-------	------	-------

Bild 64: Abschätzung der Amortisation für den Anwendungsfall Lackierung von Küchenfronttüren

Zur Verbesserung der Vergleichbarkeit der Ergebnisse wurden die Abfallkosten am derzeitigen Marktpreis orientiert und in gleicher Höhe belassen (Der Abfallfaktor berücksichtigt den geschätzten Wassergehalt des Lackschlamm-Abfalls). Der Lackpreis (in der Abschätzung 8000 EURO/t) kann erst berücksichtigt werden, wenn feststeht welche Wasser-Lacksysteme einzusetzen sind, welcher Lackhersteller der Lieferant ist und die Lieferkonditionen verhandelt wurden. Die Umsetzung der unter Fall 2 beschriebenen Beschichtungstechnik kann als rentabel betrachtet werden, wenn der Lackpreis der Wasserlacksysteme nicht wesentlich von dem des Lösemittellackes abweicht. Änderungen beeinflussen die Rentabilität wesentlich und müssen in die Abschätzung der Amortisation aufgenommen werden.

Für Fa. HIB ergibt sich unter Berücksichtigung einer Investition in Höhe von 900.000 EURO (für die Installation von vier Zerstäubergeräten und drei 3-Achsen-Bewegungsautomaten, Bild 65 *1) eine Amortisationszeit von ca. 3,5 Jahren. Angenommen wurde bei dieser Abschätzung der in Kap. 4.3 beschriebene Fall 2, da derzeit noch keine Wasserlacksysteme als Alternative für die Polyesterlacke auf dem Markt erhältlich sind. Sobald ein geeignetes Wasserlack-System zur Verfügung steht, kann für die Abschätzung der Amortisation der Fall 1 zugrundegelegt werden.

	Fall 2		Fall 1
Einsparung	287438	EURO/a	492750
Investition *1	900000	EURO	1500000
derzeitige Umlaufrendite	4	%/a	4
IST-Lackverbrauch / Jahr	210	t/a	210
Lackpreis	8000	EURO/t	8000
Auftragungswirkungsgrad IST	50	%	50
Auftragungswirkungsgrad SOLL	60	%	70
Lackeinsparung	280000	EURO/a	480000
Abfallreduzierung / Jahr	35	t/a	60
Abfallkosten / t	250	EURO/t	250
Abfallfaktor für Feststoffgehalt	0,85		0,85
Abfallkosten / Jahr	7438	EURO/a	12750

Amortisationszeit:

t_A	3,41	Jahre	3,31
-------	------	-------	------

Bild 65: Abschätzung der Amortisation für Fa. HIB

In dieser Abschätzung wurden keine zusätzlichen Investitionskosten für den Umbau der bestehenden Lackieranlage entsprechend den Erfordernissen bei elektrostatischer Lackiertechnik (z.B. für den Fall 2: Vergrößerung der Anlagen-dimension zur Einhaltung der Sicherheitsabstände, für den Fall 1: Umrüstung der Anlage auf wasserlackbeständige Materialien) mit berücksichtigt. Aufgrund der hohen zusätzlichen Investitionskosten erscheint die elektrostatische Lackiertechnik nur bei Neuanlagenplanungen rentabel.

5.3 Resume

Bei der Abschätzung der Amortisation wurde bisher nicht berücksichtigt, dass die erzielte Verkürzung der Lackierzeiten durch die Erhöhung der Produktivität und die Reduzierung der Nacharbeitskosten aufgrund geringerer Overspraybelastung der Kabinenbauteile einen wesentlichen Einfluss auf die Amortisationszeit haben.

Für den **Anwendungsfall Fensterrahmenlackierung** bedeutet das, dass die zur Amortisation notwendige Stückzahl lackierter Werkstücke bereits 27 % (im Fall 1) bis 38 % (im Fall 4) schneller produziert werden kann und es wird erwartet, dass sich die Nacharbeits- und Ausschussquote um 10 % bezüglich dem Ausgangswert verbessert. Daher ist für diesen Anwendungsfall eine **Amortisationszeit von 1,8 bis 1,6 Jahren** anstelle der in Kap. 5.2 abgeschätzten 2,53 Jahre zu erwarten.

Für die **Lackierung von Küchenfronttüren** verkürzt sich die Lackierzeit um 26 % und die erwartete Absenkung der Nacharbeits- und Ausschussquote beträgt 10 % bezüglich dem Ausgangswert. Daher ist eine **Amortisationszeit von 2,3 Jahren** anstelle der in Kap. 5.2 abgeschätzten 3,06 Jahre zu erwarten.

Für die **Lackierung von Fahrzeuginterieurteilen** bei Fa. HIB verkürzt sich die Lackierzeit im Fall 1 um 20 % und die erwartete Absenkung der Nacharbeits- und Ausschussquote beträgt 15 % bezüglich des Ausgangswertes. Daher ist im Fall 1 eine **Amortisationszeit von 2,6 Jahren** anstelle der in Kap. 5.2 abgeschätzten 3,31 Jahren zu erwarten. Für den Fall 2 verkürzt sich die Lackierzeit um 12 %, und die erwartete Absenkung der Nacharbeits- und Ausschussquotequote beträgt 10 % bezüglich des Ausgangswertes. Daher ist im Fall 2 eine Amortisationszeit von 3,0 Jahren anstelle der in Kap. 5.2 abgeschätzten 3,41 Jahre zu erwarten.