

## 6 Die Pulverlackierung

Die elektrostatische Feldkraft wird seit einigen Jahren in der Lackiertechnik genutzt. Bei typischen Nasslackanwendungen [198, 20, 192] dient sie zur Reduktion des Oversprays, indem eine zusätzliche Kraft die Tropfen in Richtung der Lackieroberfläche lenkt, wo sie bei Auftreffen ihre Ladung sofort wieder abgeben. Bei der Pulverlackierung hingegen hat die Ladung der Pulverlackpartikel eine doppelte Funktion. Neben der Reduktion des Oversprays und der Unterstützung bei der Bildung einer homogenen Schicht ermöglicht die Partikelladung diese Form der Trockenlackierung, indem sie für die notwendigen Haftkräfte bis zum Aufschmelzvorgang verantwortlich ist. Daher können mit dieser lösungsmittelfreien Technik nur elektrisch leitende Oberflächen lackiert werden. Da der trockene Pulverlack relativ einfach aufgefangen und unter bestimmten Umständen wieder verwendet (in der Praxis oft erschwert durch Verschmutzung und Farbvermischung [39]) oder gar im Kreislauf gefahren werden kann [46], ist der entstehende Overspray weniger störend als bei Nasslackanwendungen. Es besteht die Möglichkeit, zugunsten des einfacheren und gefahrloseren Handlings auf die elektrische Feldkraft zu verzichten. Die notwendige Aufladung des Pulverlacks erfolgt dann tribologisch im Inneren des Sprühorganes. Ein Nachteil dieser Technik liegt in der schlechten Kontrolle der Ladungsmenge, da diese ausschließlich von den Materialeigenschaften und der Innengeometrie des Sprühorganes abhängt. Der häufig vorgebrachte Vorteil einer höheren Partikelladung gegenüber der Coronaaufladung konnte bei den hier vorgestellten Messungen nicht bestätigt werden. Zuweilen scheint eher das Gegenteil einzutreten (Abb. 2.4). Der wesentliche Unterschied der beiden Techniken liegt in der Quantität: Sollen große Flächen in kurzer Zeit beschichtet werden, kann auf die Corona schwer verzichtet werden. Ist eine langsamere Beschichtung erwünscht, und gibt es eventuell zusätzlich Hohlräume im Werkstück, ist die Tribotechnik meist von Vorteil. Für einen guten Auftragswirkungsgrad sollte der Pulvermassenstrom bei Tribo 10 kg/h und bei Corona 30 kg/h nicht überschreiten [39]. Andererseits erreicht man bei langsam beschichteten Objekten zum Teil bessere Ergebnisse mit der Tribotechnik [159, 148, 17].

Die Idee zur Pulverlackierung stammt aus den USA und kam in den 50er Jahren auf. Die erste Anwendung in der Beschichtungsindustrie erfolgte in den frühen 60ern in England. Zu Beginn der 60er Jahre kam es durch die Einführung des kontinuierlichen Extruders in der Herstellung thermoplastischer Pulver und die Entwicklung der elektrostatischen Sprühorgane zur Verbreitung der Pulverbeschichtung. Der Einsatz von Polyesterharzen ermöglichte den weltweiten Durchbruch. Heutzutage werden die meisten metallischen Oberflächen, die starker Verwitterung oder hoher mechanischer Belastung ausgesetzt sind, pulverbeschichtet. Die Automobilindustrie hatte schon lange ein hohes Interesse an der Pulverlackierung [79, 57, 63]. Wegen der schwierigen Prozessführung zum Erhalt sehr gleichmäßiger Schichtdicken kam es allerdings erst in den letzten Jahren zum Einsatz in der Serienproduktion von LKWs [96] und PKWs [226, 161, 22, 69, 76, 199].

Der Pulverlackierprozess lässt sich in drei unabhängige Teile gliedern. In der ersten Phase werden die Pulverpartikel aufgeladen, in der zweiten zu der zu beschichtenden Oberfläche transportiert und in der letzten Phase wird dort eine Schicht aufgebaut, die später mittels thermischer Behandlung zu einer resistenten Oberflächenbeschichtung verschmolzen wird. Das Pulver besteht aus Epoxidharzen, Polyester oder einer Mischung aus beiden

(sogenannte Hybridpulver). Bei Pulverbeschichtungen gibt es zwischen den sogenannten thermoplastischen und den thermostatischen Pulverbeschichtungen einen wesentlichen Unterschied. Die thermoplastischen Pulver bestehen beispielsweise aus Polyethylen, Nylon oder Polyestern und bleiben nach dem Schmelzen flexibel unter Beibehaltung ihrer Schmelztemperatur. Die anderen und für die meisten Anwendungen interessanteren Pulver (Epoxid, Hybrid, Polyester, TGIC, Acryle) vernetzen beim Aufschmelzen und verändern ihre chemische Eigenschaft zu einer besonders harten und festen Oberflächenbeschichtung. Einer weiteren thermischen Behandlung gegenüber bleiben sie resistent. Der Vorgang der Partikelaufladung wurde in Kapitel 2.4 beschrieben, ebenso wie die Ergebnisse der Messungen von Küttner et al. [121, 120] und anderer Autoren. Die Partikelladung selbst bestimmt das Lackierergebnis wesentlich [17, 222, 28]. Eine Minimalladung von  $0,2\text{--}0,5 \mu\text{C/g}$  [191] bildet dabei die unterste Grenze, um ausreichende Haftkräfte für eine durchgängige Schicht zu erhalten. Eine hohe Ladung erscheint wünschenswert, sie wird aber durch den Effekt des Gegenfeldes, das mit wachsender Schicht entsteht, begrenzt. Zusätzlich können stark geladene Partikel zu Ladungsüberschlägen kurz vor der Oberfläche führen („backcorona“), die sich durch kleine Krater in der Lackschicht bemerkbar machen [17, 222, 129, 86]. Im Allgemeinen wird eine solch starke Aufladung mit den üblichen Sprühorganen jedoch nicht erreicht. Bei einer tribologischen Aufladung kann, einen ausreichenden Wandkontakt und eine entsprechend weite Innengeometrie vorausgesetzt, die Grenzladung (Kapitel 2.4, Gleichung 2.24) erreicht werden [107]. Messungen der erzielten Partikelladung und die Erfahrung in der Praxis zeigen, dass ein deutlich geringerer Wert zu erwarten ist. Ebenso weicht der Grad der Aufladung bei den beiden Techniken nur wenig voneinander ab.

Für die Berechnungen in dieser Arbeit wurden die ausführlichen Messungen von Küttner [121, 120] verwendet, da diese an den modellierten Sprühorganen erfolgten. Die Aufladung war hier für alle Größenklassen geringer als 10 % der Grenzladung. Die feinsten Partikel ( $< 20 \mu\text{m}$ ) trugen hierbei erwartungsgemäß die verhältnismäßig größte Ladungsmenge (Abb. 2.6, Seite 24). Neben den spezifischen Merkmalen der Sprühorgane, die vor allem bei der tribologischen Aufladung wesentlich sind [107], haben die chemischen Eigenschaften des verwendeten Pulvers einen ganz wesentlichen Einfluss auf die Ladungsmenge und auf das Lackierergebnis [149]. Ein weiterer wesentlicher Einflussfaktor ist die Partikelgrößenverteilung [70, 86], vor allem im Hinblick auf die Erzeugung extrem dünner Schichten oder Schichten mit hoher Schichtdickenkonstanz [39, 129]. Wird eine direkte Rückführung des Oversprays angestrebt, ist die Größenverteilung der entscheidende Faktor [46, 45], da beim Beschichten eine Größenseparierung (Klassierung) erfolgt [10]. Dieser Umstand deutet auf die Dominanz der Widerstandskraft im zweiten Teil des Lackierprozesses beim Transport der Partikel zum Objekt hin. Die Bewegung der Partikel wird ab einer Gasgeschwindigkeit von etwa  $2 - 3 \text{ m/s}$  von der Gasströmung bestimmt [13, 4, 1, 86]. Untersuchungen, bei denen die Gasströmung vernachlässigt wird, bleiben daher zwangsläufig auf geringe Düsengeschwindigkeiten beschränkt [3, 1]. Die Abstoßung der Partikel untereinander und die Beschleunigung durch die elektrische Feldkraft bleiben im Freistrahle der Düse eher unbedeutend, wie bereits aus der Diskussion der Kraftterme (Kap. 2.3) hervorgeht, und was sich mit den Berechnungen von Adamiak et al. [3] deckt. Das elektrische Hochspannungsfeld bewirkt eine gewisse Konditionierung der Pulverwolke und eine erhöhte Adhäsionskraft der Pulverpartikel, ist aber nicht maßgeblich für den „Umgriff“ - die Beschichtung der Leeseite des Objektes - verantwortlich [86]. Für eine gute Beschichtung

auch der Leeseite ist zunächst die An- und Umströmung des Rohres wesentlich. Die Partikel müssen nahe genug an das Substrat herangetragen werden, ehe die elektrostatischen Kräfte stark genug sind, die Deposition zu unterstützen. Man geht allgemein davon aus [17, 39, 86, 129, 222], dass die Partikelladung und die elektrische Feldkraft erst in der direkten Umgebung des Substrates, kurz vor der Deposition, bedeutend wirksam werden. Den letzten und wesentlichen Schritt der Pulverlackierung stellt die Deposition der Partikel auf der Oberfläche und der Aufbau der Pulverschicht dar. Die entstehende Schichtdicke und die Ladungsverteilung haben dabei einen ganz entscheidenden Einfluss auf die Homogenität der resultierenden Schicht [79, 71, 191, 57]. Die Feldstärkeverteilung in der Schicht ist dabei verantwortlich für Umschichtungen nach der Deposition und für die entstehende Packungsdichte, die sich folglich gerade bei der Coronabeschichtung mit der erzielten Schichtdicke verändert [215, 70]. Dieser Umschichtungsprozess könnte neben dem Ionenstrom durch die Oberfläche mit eine Ursache für die höheren Adhäsionskräfte bei der Coronabeschichtung [41, 43, 209] gegenüber der Tribobeschichtung darstellen. Eine numerische Modellierung des Schichtaufbaus ist denkbar und müsste in ähnlicher Weise, wie bereits erfolgreich für Filterkuchen auf Filtermedien eingesetzt [85, 175, 111, 114], erfolgen. Der Effekt der Feldkräfte in der und des Ionenstromes durch die Schicht ist bei dem derzeitigen Kenntnisstand schwer zu berücksichtigen. Es gibt zwar einige modellhafte Ansätze zur analytischen Berechnung des Feldstärkeverlaufs in der Schicht [215, 79, 71, 191, 57] Kriterien für das Partikelverhalten lassen sich daraus jedoch nicht ableiten.

Die bei der Pulverlackierung wesentliche Größe ist neben der Oberflächenqualität der Auftragswirkungswirkungsgrad. Seine Bedeutung erlangt er, da jede Form von Rückgewinnung (entweder Rückführung zum Rohpulver, Entsorgung [64] oder Wiederverwendung) aufwändiger und kostspieliger ist als direkt zu beschichten [86]. Ein verbesserter Auftragswirkungswirkungsgrad ist daher das häufigste Ziel von Optimierungsbemühungen. Die üblicherweise angegebenen Werte weit über 90 % beziehen sich dabei meist auf ideale Bedingungen und nur sehr bedingt auf eine industrielle Beschichtungsaufgabe [97, 130].

In der Literatur ist eine größere Zahl an experimentellen und numerischen Arbeiten zur Pulverbeschichtung zu finden. Die experimentellen Arbeiten lassen sich grob in zwei Bereiche einteilen: Diejenigen, die sich mit der Sprühwolke und dem Partikeltransport beschäftigen und diejenigen, die den Schichtaufbau und den Einfluss der Partikeleigenschaften untersuchen. Die Ersteren nutzen hierzu meist optische Messtechniken wie Laserlichtschnitt [1, 13] und Particle Tracking [10]. Die Düsengeschwindigkeiten lagen bei diesen Testfällen allerdings deutlich unter denen, die bei den hier vorgestellten Sprühorganen auftreten. Die Untersuchung der Schichteigenschaften bezieht sich zum einen auf die Adhäsionskräfte [41, 19, 209, 107], aber auch auf den gesamten Schichtaufbau [191, 70, 57]. Bei den theoretischen und numerischen Arbeiten überwiegt (ebenso wie in dem numerisch eng verwandten Problem der Nasslackierung [78, 56, 192]) der Einsatz der finite-Elemente-Methode zur Berechnung der Feldkräfte und die Vernachlässigung der Strömungsverhältnisse [1, 10, 7, 221, 6, 3, 4, 8]. Die Partikelgeschwindigkeiten bei den Pulverberechnungen sind meistens gering gehalten (0,38 m/s [1, 7], 1-2 m/s [6]), um den Einfluss der Feldkräfte untersuchen zu können und / oder um die Strömungsverhältnisse so einfach wie möglich zu gestalten.

## 6.1 Der Versuchsaufbau im Lackiertechnikum

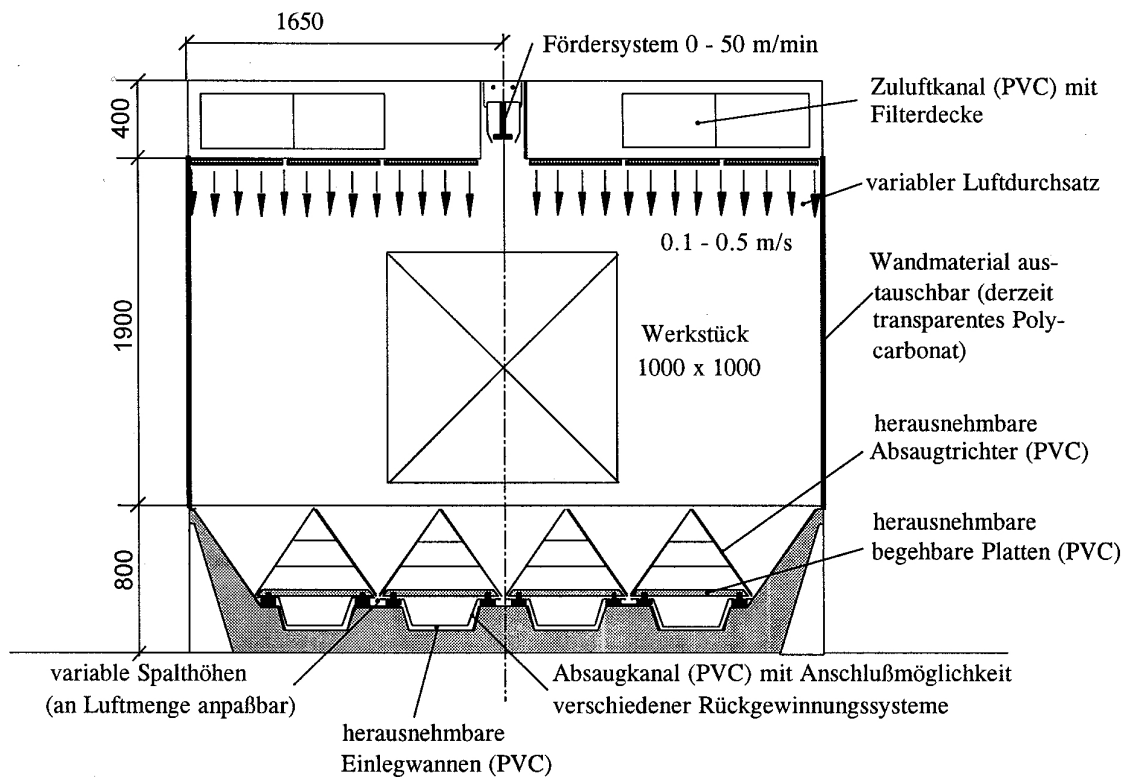


Abbildung 6.1: Schematischer Schnitt durch die Pulverbeschichtungsversuchsanlage des FhG-IPA [47].

Die Messungen erfolgten am Pulverlackiertechnikum des Fraunhofer IPA in Stuttgart. Die Lackierkabine mit einer Länge von 4 m und einer Breite von 3,3 m befindet sich innerhalb einer 18 m x 8 m großen gekapselten und klimatisierbaren Umkabine. Abbildung 6.1 (entnommen aus Cudazzo [47], wo die gesamte Anlage detailliert beschrieben wird) zeigt die Seitenansicht der Kabine mit Blick in Förderrichtung. Die Kabine, einschließlich der Zu- und Abluftkanäle, ist komplett aus pulverabweisendem Kunststoff gefertigt. Sie wird durch die Zuluftventilatoren über eine Filterdecke mit Luft aus der Umkabine versorgt. Zwei Abluftventilatoren saugen die Luft über Abluftkanäle in die Filterrückgewinnung. Dort wird das Overspraypulver in Sternfiltern abgeschieden und gelangt nach deren Abreinigung über ein Sieb in einen Auffangbehälter. Die von den Pulverpartikeln gereinigte Luft wird in die Umkabine zurückgeführt. In der Lackierkabine bildet sich demnach eine senkrecht von oben nach unten fließende Luftströmung aus. Durch Steuerung der Zu- und Abluftventilatorumdrehzahlen kann die Geschwindigkeit dieser Kabinensinkluft verändert werden. Ein an der Decke befestigter Förderer ermöglicht die Bewegung von Beschichtungsobjekten durch die Lackierkabine. Zur Aufnahme der Sprühorgane stehen ein Hubautomat und ein Roboter zur Verfügung.



Abbildung 6.2: Wagner Airmatic Automatiksprühpistole, Corona, Pralltellerdüse (mit freundlicher Genehmigung der Firma Wagner).

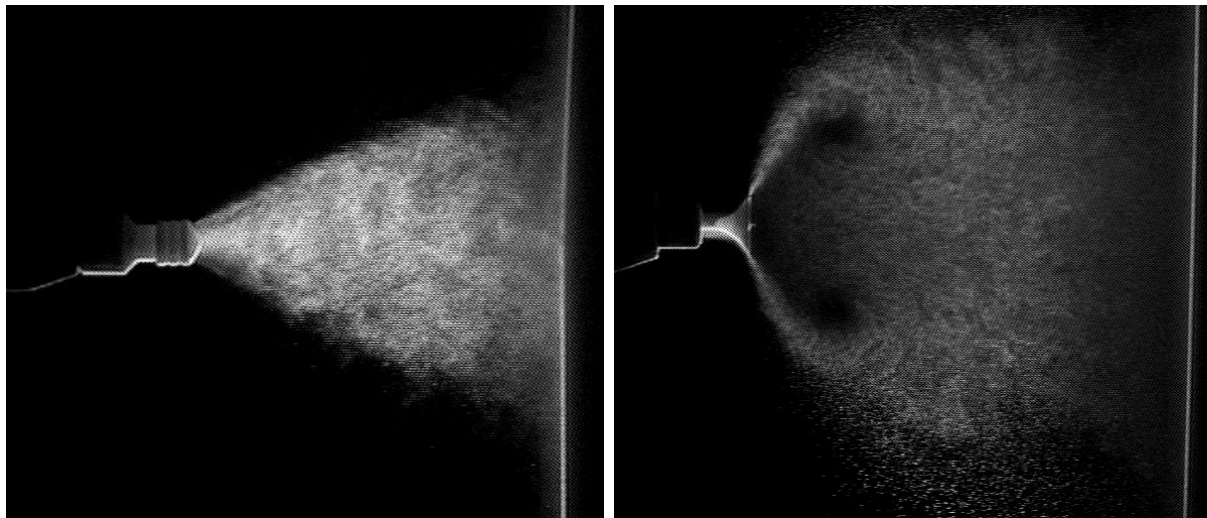


Abbildung 6.3: Laserlichtschnitt der Sprühwolken, Flachstrahldüsenkopf (links) und Pralltellerdüsenkopf (rechts).

Zur Pulverapplikation stehen am Fraunhofer IPA verschiedene Pistolen- und Düsentypen zur Verfügung. Die Auswahl der Sprühorgane und die Festlegung der Betriebsparameter wurde in Absprache mit den Projektpartnern getroffen (Tab. 6.1). Als Basis-Sprühorgan zur Aufladung und Verdüsung kam dabei in allen Fällen eine „Airmatic“ (Abb. 6.2) Pulverlackierpistole der Firma Wagner zum Einsatz. Die Messungen erfolgten an den beiden erhältlichen Versionen der Partikelaufladung: Tribo und Corona. Bei diesen Lackierpistolen lassen sich unterschiedliche Düsentypen durch einfaches Austauschen des Düsenkopfes verwenden. Es wurden eine Flachstrahldüse und eine Pralltellerdüse gewählt. Sie sind zusammen mit dem resultierenden Sprühbild in Abbildung 6.3 dargestellt.

Pulver	Fa. AKZO, $D_{(V0,5)} 39,56\mu\text{m}$
Austragsorgan	Corona- / Tribopistole
Düse	Prallteller, 25 mm / Flachstrahl
Sprührichtung	waagerecht
Luftfeuchte	40 %
Temperatur	20 °C
Pulvermassenstrom	100 g/min
Gesamtluftvolumenstrom (eingestellt)	5 Nm <sup>3</sup> /h
Gesamtluftvolumenstrom (insgesamt)	$\approx 6 \text{ Nm}^3/\text{h}$
Lackierabstand	200 mm
Kabinenluftgeschwindigkeit	0,3 m/s
Hochspannung / Tribostrom	ca. 85 kV / 2 - 3 $\mu\text{A}$

Tabelle 6.1: Festgelegte Parametereinstellungen zu den Versuchen Pulverlackierung. Der einstellbare Volumenstrom bezieht sich auf die sogenannte Förderluft, die sich einstellen lässt, da sie ein Lackierparameter darstellt. Unberücksichtigt bleibt hierbei allerdings die Fluidisierluft aus dem Vorratsbehälter und die Sekundärluft an der Pistole. Der Gesamtluftvolumenstrom kann daher nur geschätzt werden.

Als beispielhaft für viele Lackieranwendungen wurden zwei Beschichtungsobjekte gewählt: eine ebene Platte mit einer Höhe von 1 m und ein Rohr mit einem Durchmesser von 0,1 m. Bei der Pulverlackierung ist ein statisches Beschichten wegen der Ladungsakkumulation auf der Oberfläche nicht möglich. Die Objekte wurden daher durch die Kabine bewegt und haben keine definierte Ausdehnung in der Längsrichtung. Neben einer Laserschnittvisualisierung erfolgten Messungen der Partikelgeschwindigkeiten mit einem Laser-Doppler-Anemometer (LDA) in unterschiedlichen Ebenen zwischen Düsenausgang und Objekt. Eine detaillierte Beschreibung der Funktionsweise des LDA findet man beispielsweise bei Durst [52] oder Ruck [190]. Außerdem erfolgte eine Vermessung der Pistoleninnenströmung, die ebenfalls zur Verifikation dient. Hierfür wurde der gesamte Vorbau der Pistole abgebaut und die Ausströmung aus dem inneren Rohr am Rand mit einer LDA vermessen.

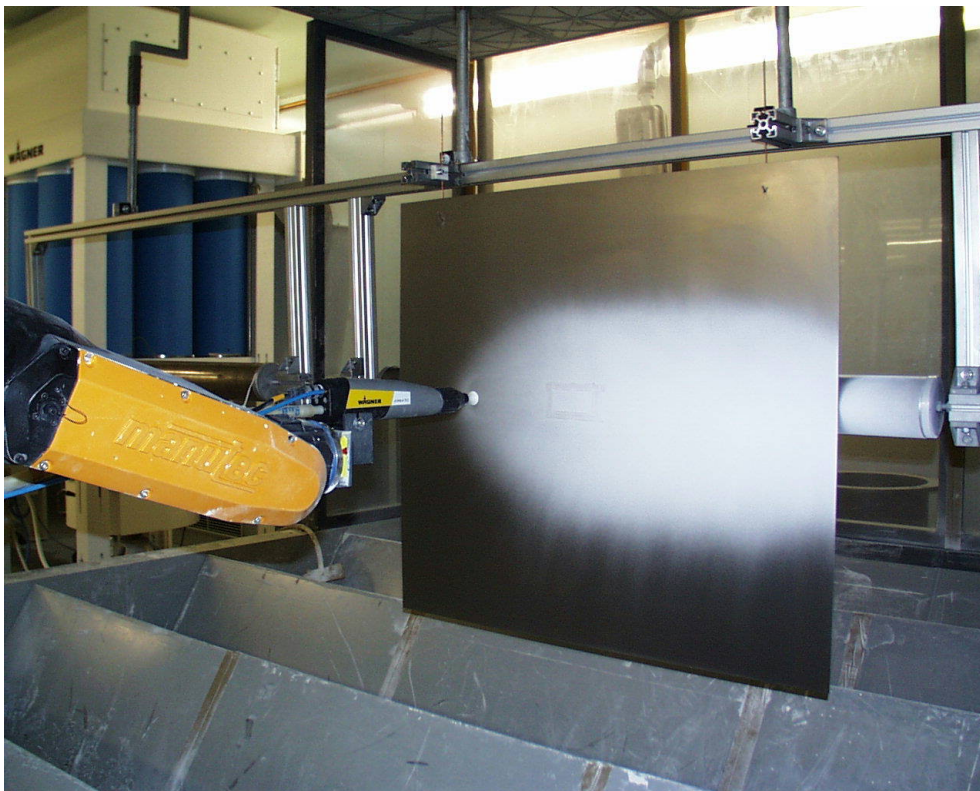


Abbildung 6.4: Lackierversuchsstand am IPA der FhG. Im Bild sind beide Objekte, das Rohr und die ebene Platte, zu erkennen (mit freundlicher Genehmigung von Thomas Steigleder, IPA Stuttgart).

Die Kabinenluftströmung zum Austrag des Oversprays wurde durch eine Absaugung im Kabinenboden erzeugt. Die Anströmung erfolgte durch eine Filterdecke. Die Sinkluftgeschwindigkeiten waren dabei zwischen 0 und 0,4 m/s einstellbar. Die Modellierungen und die meisten Messungen erfolgten bei 0,15 und 0,3 m/s Sinkluftgeschwindigkeit. Der Einfluss dieser Sinkluftbewegung zeigt sich in einer Verschiebung des Staupunktes der Düsenströmung aus der Symmetrieebene hinaus in Richtung der Strömung der Kabinenluft [70, 222]. Eine Vermessung der Gasströmung mit laseroptischen Methoden bei anliegender Feldstärke ist unmöglich, da die notwendigen „Tracer“-Partikel ebenfalls aufgeladen und von der Feldkraft beeinflusst werden. Die Validierung kann daher nur über die Partikelgeschwindigkeiten erfolgen.

## 6.2 Experimentelle Ergebnisse der Lackierkabine

Eine detaillierte Vermessung der Düsencharakteristika dient zum einen zur Validierung der Modelle. Sie gibt zum anderen direkte Hinweise über die Strömungsverhältnisse und für die Berechnung. Die hier vorgestellten Messungen wurden von T. Steigleder angefertigt und sind dem gemeinsamen Abschlussbericht [206] entnommen. Aus dem Vergleich der Gas- und Partikelgeschwindigkeiten (Abb. 6.6) kann man ersehen, dass eine Kopplung mit



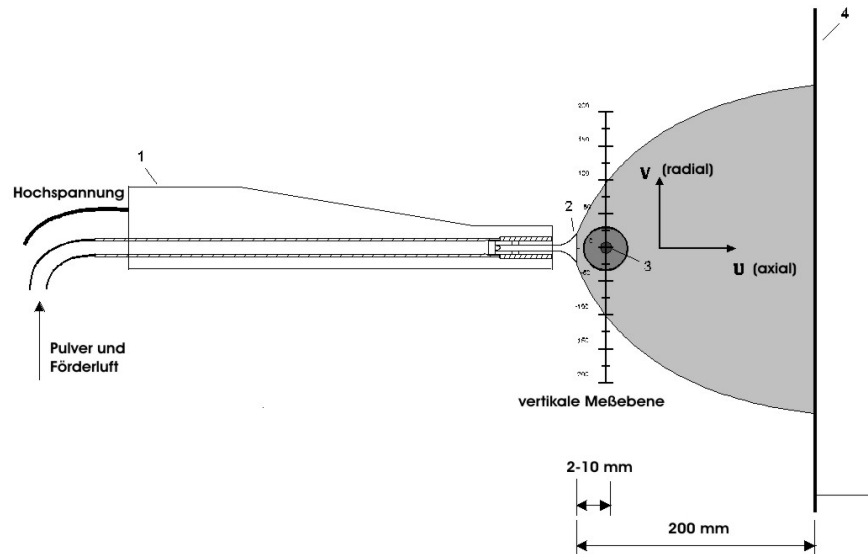


Abbildung 6.5: Skizze der Messanordnung zur Bestimmung der Düsenströmung, gezeigt werden die Messorte in der vertikalen Ebene vor der Düse. Im Bild ist 1: Schnitt durch Pistole, 2: Prallteller, 3: Messvolumen und Messorte, 4: geerdetes Substrat.

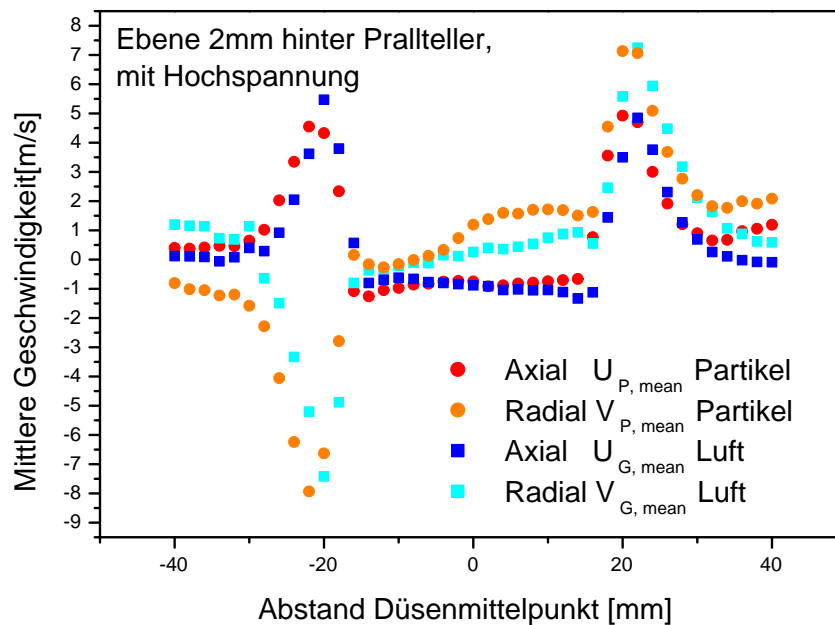


Abbildung 6.6: Vergleich Gas- und Partikelströmung, Prallteller, Corona.

der dispersen Phase nicht notwendig ist, da fast kein Schlupf im Düsenbereich auftritt. Die Massenbeladung beträgt 0,856 im Inneren der Düse. Wegen der Dichteverhältnisse ergibt sich eine Volumenbeladung von 0,0005. Man kann also von einer verdünnten Zweiphasenströmung sprechen. Die numerische Berücksichtigung der Kopplung der beiden Phasen ist bei dieser Anwendung nicht notwendig.



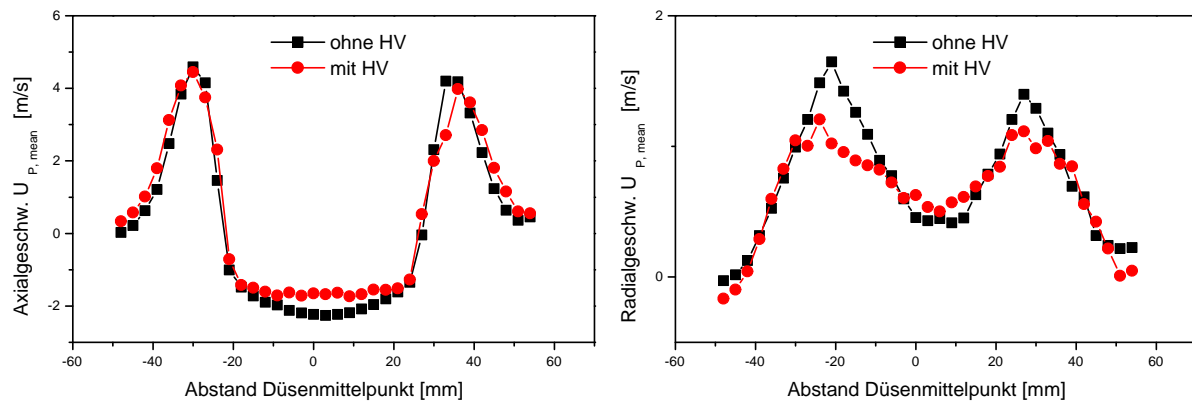


Abbildung 6.7: Einfluss der elektrostatischen Feldstärke auf die Düsenströmung, vertikale Ebene 10 mm stromab des Pralltellers, links: Axial- und rechts: Radialkomponente (zu Koordinaten siehe Abbildung 6.5), Prallteller, Corona.

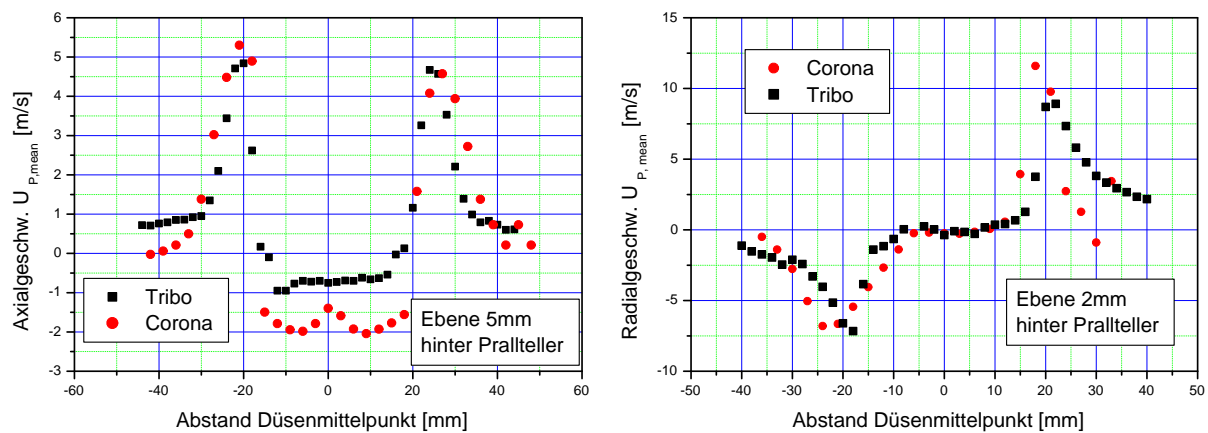


Abbildung 6.8: Vergleich der Partikelgeschwindigkeiten 5mm hinter der Düse, Tribo und Corona, links: Axial- und rechts: Radialkomponente (zu Koordinaten siehe Abbildung 6.5).

Die genaue Vermessung der Düsenströmung bestätigt den geringen Einfluss der Feldstärke selbst in der unmittelbaren Nähe der Corona, wie der Abbildung 6.7 zu entnehmen ist. Einzig die Abstoßung gleichgeladener Partikel von der Hochspannungsnadel bewirkt eine Modifikation gegenüber dem Tribo-Sprühbild in der Abbildung 6.8. Der Einfluss des Ionenstromes auf die entstehende Schicht wird dabei in Abbildung 6.9 deutlich. In dieser stabilisierenden Wirkung auf die erzeugte Schicht ist der Grund für die höheren Massendurchsätze bei der Corona-Beschichtung im Vergleich zur Tribo-Technik zu sehen. Eine

detaillierte Diskussion der Messungen und weiterer Ergebnisse wird im Abschlussbericht [206] zu dem gemeinsamen BMBF-Projekt gegeben.

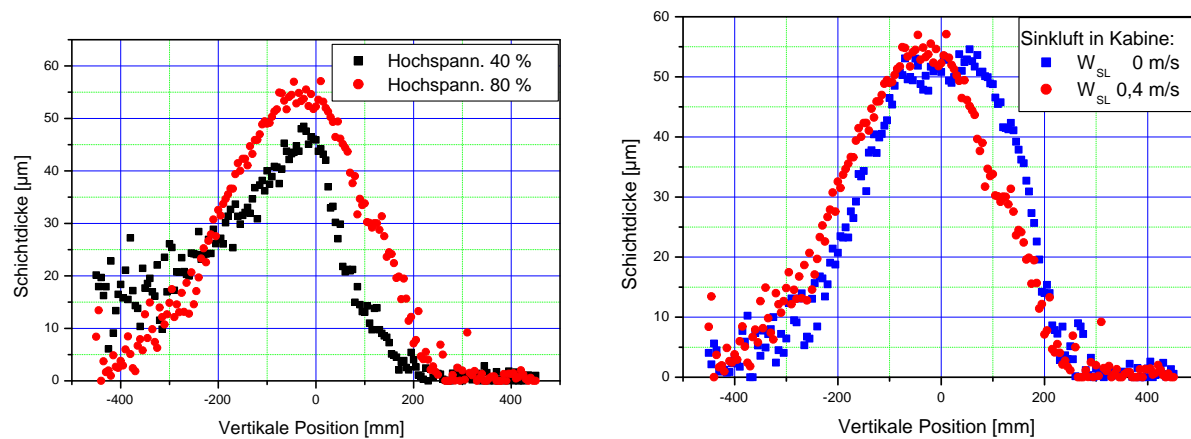


Abbildung 6.9: Einfluss der elektrostatischen Feldstärke und der Sinkluftströmung, dargestellt an der resultierenden Schichtdicke, Prallteller, Corona.

Der Vergleich in Abbildung 6.9 zeigt, dass der Feldeinfluss in weiten Bereichen des Strömungsfeldes sehr moderat ist. Ein entsprechender Vergleich der Ergebnisse der numerischen Modellierung zeigt, dass bei diesem Prozess die Elektrohydrodynamik eine untergeordnete Rolle spielt. Die Bedeutung der Partikelladung für den Beschichtungsvorgang als ganzen ist ebenfalls in Abbildung 6.9 (links) erkennbar. Die Verdickung der Schicht am unteren Rand, in der Abbildung links, entsteht da die Partikel nicht genügend anhaften und der Schwerkraft folgen. Die gesamte Schicht begann bereits vor dem Einbrennen abzurutschen, wie der Form der Schicht zu entnehmen ist.