

Programm Lebensgrundlage Umwelt
und ihre Sicherung (BWPLUS)

**Neue Pulversprühorgane zur Erweiterung der
Anwendbarkeit der Pulverlackiertechnik**

J. Domnick, K. Pulli
Institut für Industrielle Fertigung und Fabrikbetrieb
Universität Stuttgart

Förderkennzeichen: BW D 20006

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

November 2002

Neue Pulversprühorgane zur Erweiterung der Anwendbarkeit der Pulverlackiertechnik

J. Domnick, K. Pulli
Institut für Industrielle Fertigung und Fabrikbetrieb
Universität Stuttgart

Zusammenfassung

Für den vermehrten und vor allem effizienteren Einsatz von Pulverlacksystemen werden vom Anwender flexiblere Pulversprühsysteme gefordert, d.h. Pulversprühsysteme, bei denen die Ausdehnung des Sprühstrahles stufenlos formbar ist. Das vorliegende Vorhaben zielte darauf ab, solche Pulversprühsysteme unter Anwendung aerodynamischer und elektrostatischer Lösungsansätze zu entwickeln und in Form von Prototypen zu realisieren. Auf elektrostatischem Gebiet wurde vor allem der Einfluss von Lenkelektroden untersucht, die sich besonders in Kombination mit einer reibungselektrischen Aufladung des Pulvers als wirksam erwiesen. Dabei ließ sich die Sprühstrahlausdehnung durch Variation der Lenkelektrodenspannung etwa um den Faktor 3 variieren. Auf der anderen Seite konnte mit Hilfe der numerischen Strömungssimulation eine neuartige Pistole ausgelegt und optimiert werden, bei der die stufenlose Einstellung der Sprühwolke mittels zusätzlicher Steuerlüfte erfolgt. Die Variationsbreite erreicht dabei einen Faktor 5. Die gefundene optimale Konstruktion wurde in einen praxisnahen Prototypen umgesetzt und im IFF-Technikum erprobt. Derzeit wird in Kooperation mit einem industriellen Anwender die Pulverpistole in der Praxis getestet.

Novel Powder Spraying Devices for New Powder Coating Applications

J. Domnick, K. Pulli

Summary

For an increased and more efficient use of powder coating systems users are asking for more flexible powder application systems, i.e. powder systems with a fast adaptation of the powder cloud extension to the work piece geometry. The present project aimed to develop such kind of powder spray guns considering aerodynamical and electrostatical means. With respect to electrostatics mainly the influence of shaping electrodes has been examined. Here, the shaping electrodes very most effective in conjunction with initial tribo charging of the powder, yielding powder cloud extension variations of a factor of 3. On the aerodynamical side, powder guns with additional shaping air outlets have been designed and optimized using CFD-methods, delivering a factor of 5 in powder cloud extension variation. The final version of the gun has been realized as a prototype and successfully tested in the IFF laboratory. In cooperation with an industrial powder coater, the powder gun performance will be verified in practice.

INHALT

1	Einleitung	2
2	Prüfinstrumentarien zur Auswertung der Experimente	4
3	Entwicklung neuer Pulversprühsysteme	7
3.1	Grobkonzipierung - Lösungsfindung	7
3.2	Elektrostatische Lösungsmöglichkeiten	8
3.2.1	Korona-Aufladung	9
3.2.2	Tribo-Aufladung	14
3.3	Strömungsmechanische Lösungsmöglichkeiten	19
3.3.1	Grundsätzliche Überlegungen.....	19
3.3.2	Feinkonzipierung – Detaillierung des Lösungskonzeptes mit Hilfe der numerischen Simulation sowie Konstruktion und Bau des Pulverpistolenprototypen.....	21
3.3.2.1	Dimensionierung der Strömungskanäle und des Anströmkörpers mittels Simulationsrechnungen	21
3.3.2.2	Konstruktion und Bau des Pistolenprototypen	31
3.3.2.3	Vergleich der Beschichtungsergebnisse Simulation – Experiment	37
3.3.3	Weiterführende Untersuchungen mit dem Pistolenprototyp	41
4	Ausblick auf weitere Arbeiten	46
4.1	Genauigkeitsanforderungen	46
4.2	Langzeitversuche bei einem Anwender	48
5	Literatur	49

1 Einleitung

Pulverlacke haben gegenüber den konventionellen Nasslacksystemen den Vorteil, dass sie praktisch keine Lösemittel enthalten und dass das Overspraypulver nahezu vollständig zurückgewonnen werden kann. Trotzdem werden die Pulverlacke erst bei ca. der Hälfte aller potenziellen Anwendungen eingesetzt. Dies liegt zu einem erheblichen Teil an der nicht ausreichenden Produktionssicherheit, insbesondere dann wenn eine hohe Flexibilität der Sprühsysteme in Verbindung mit einer hohen Beschichtungsqualität gefordert wird.

Durch die Entwicklung neuartiger steuerbarer Pulversprühsysteme sollen weitere Bereiche des Nasslackes durch Pulverlack substituiert werden. Ein wichtiger Schritt ist dabei der Einsatz von Sprühsystemen, bei denen sich die Pulverwolke an die Objektgeometrie und an die Pulverlackmaterialien anpassen läßt.

Die Ausbildung der Pulversprühwolke erfolgt bei den meisten Pulverlack-Applikationssystemen durch eine feststehende Düse, z.B. eine Flachstrahl- oder eine Pralltellerdüse. Diese Sprühsysteme haben den Nachteil, dass die Pulversprühwolke während der Applikation nicht an veränderbare Beschichtungsbedingungen (z.B. unterschiedliche Werkstückgeometrien) durch Variation der Pulversprühwolke angepasst werden kann. Die Änderung der Sprühstrahlform kann nur durch Austausch der Düsen durchgeführt werden. Das bedeutet bei diesen Pulversprühsystemen, dass der Beschichtungsvorgang beim Wechseln der Düse unterbrochen werden muss.

Im vorliegenden Vorhaben wurden zunächst elektrostatische und strömungsmechanische Lösungskonzepte zur Auslegung modifizierter bzw. verbesserter Pulverpistolen erarbeitet (Grobkonzipierung) und diese dann unabhängig voneinander näher untersucht.

Bei den Betrachtungen zur Elektrostatik wurden besonders die Erfahrungen der elektrostatischen Sprühstrahlformung aus dem Nasslackbereich berücksichtigt. Dazu werden Pulverpistolenprototypen mit zusätzlichen Steuerelektroden gebaut und im IFF-Technikum erprobt.

Bei den strömungstechnischen Ansätzen wurden zunächst mit Hilfe der numerischen Strömungs- und Elektrostatiksimulation ausgewählte Pulverpistolen-Konzepte bezüglich der Sprühstrahlformung näher untersucht. Dabei wurden mit Hilfe von Simulationsrechnungen die Abmessungen und Formen der einzelnen Strömungskörper ermittelt und zu einem optimierten Pulverpistolenmodell zusammengesetzt. Von dem berechneten Pulverpistolenmodell wurde dann eine konstruktive Detaillösung ausgearbeitet, in einen Pulverpistolen-Prototypen umgesetzt und schließlich im IFF-Technikum erfolgreich getestet.

2 Prüfinstrumentarien zur Auswertung der Experimente

Die Untersuchungen wurden nach einem vom IFF entwickelten Prüfprogramm ausgeführt und ausgewertet. Zur Auswertung der Pulversprühwolke werden im Versuch in Form einer geradlinigen einzelnen Bahn 5 ebene Blechtafeln beschichtet, wobei das erste und letzte Blech aufgrund der Randeffekte nicht berücksichtigt werden (Abb. 2.1). Die Bleche werden mittels eines Förderers zur Erreichung einer maximalen Schichtdicke von 70 bis 80 μm mit angepasster Förderergeschwindigkeit an dem zu untersuchenden mittig und statisch angeordnetem Sprühorgan vorbeigeführt. Ein Blech wird im Ofen eingebrannt und das Schichtprofil auf einem Messtisch mit magnetisch-induktivem Schichtdickenmessgerät ermittelt. Beim zweiten Blech wird durch Gewichtsbestimmung des abgeschiedenen Pulvers nach [01] der Erst-Auftragswirkungsgrad bestimmt. Beim dritten Blech wird das Pulver an bestimmten Positionen streifenweise abgesaugt und die lokale und integrale Korngrößenverteilung auf dem Werkstück bestimmt. Daraus lässt sich die Partikelseparierung innerhalb der Pulversprühwolke und damit die Verschiebung der Partikelgrößenverteilung im Kreislaufpulver bestimmen, woraus schließlich mit Hilfe des KAP-SIM-Verfahrens (**K**reislauf- und **A**pplikations-**S**imulation) das Kreislaufverhalten des Pulvers berechnet werden kann [01], [02].

Die Charakterisierung der Schichtdickenverteilungen der einzelnen Bahnen erfolgt üblicherweise in Form der sogenannten Strahlbreite S_{B50} , wobei es sich um die Ausdehnung des Schichtdickenprofils bei der Hälfte der maximalen Schichtdicke handelt. Dieser Wert steht in der Praxis in engem Zusammenhang mit der für eine homogene Beschichtung erforderlichen Überlappung nebeneinanderliegender Beschichtungsbahnen.

Der Erst-Auftragswirkungsgrad definiert sich als Verhältnis zwischen abgeschiedener Pulvermasse auf dem Werkstück und der, in der für das Werkstück benötigten Beschichtungszeit versprühten Pulvermasse [01].

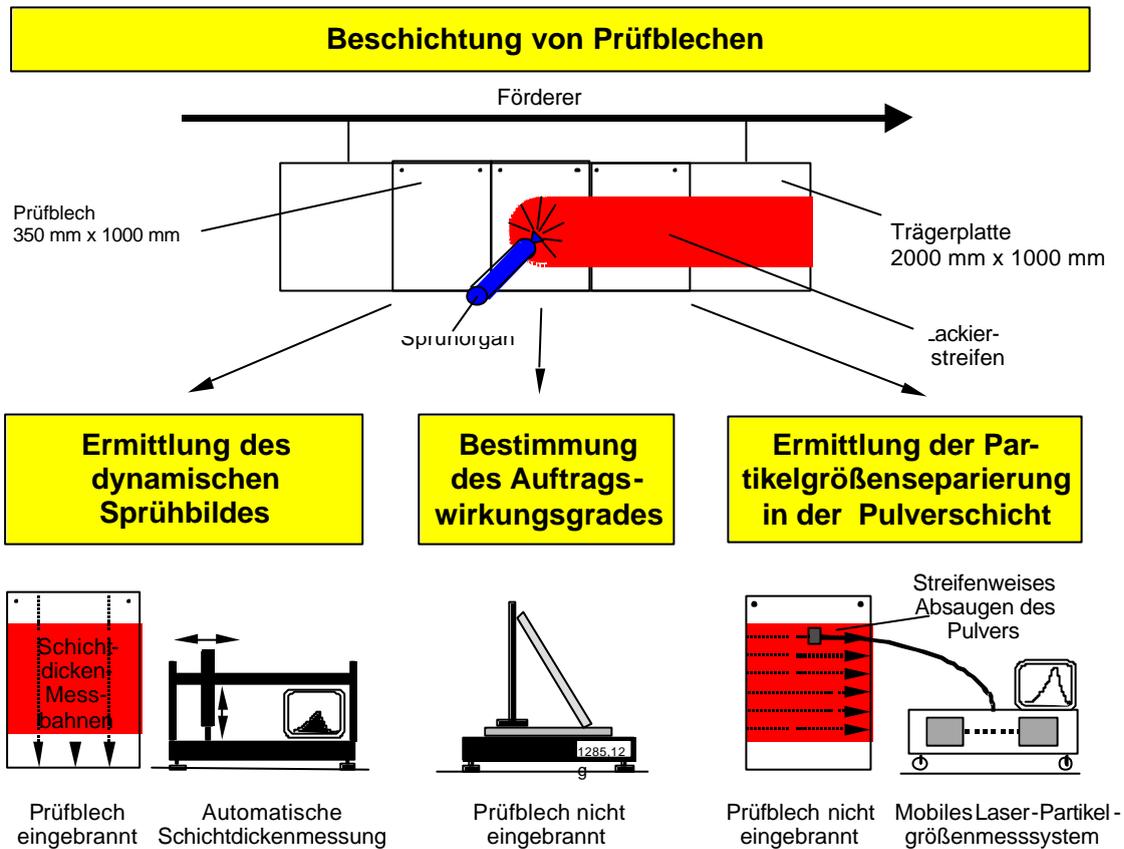


Abb. 2.1: Charakterisierung von Pulversprühsystemen hinsichtlich der Prozesssicherheit beim Pulverlack-Kreislauf mittels der am Fraunhofer IPA entwickelten Prüfmethodik.

Unter Zuhilfenahme der integralen Korngrößenverteilung auf dem Werkstück, der Korngrößenverteilung des versprühten Pulvers und des Erst-Auftragswirkungsgrades lässt es sich mittels des KAP-SIM-Verfahrens vorausberechnen, wie sich während des Betriebes die Korngrößenverteilung des Kreislaufpulvers, der Auftragswirkungsgrad und die mittlere Schichtstärke entwickeln. Bei kontinuierlicher Pulver-Rückgewinnung pendeln sich diese Kennwerte bei gleichbleibenden Beschichtungsbedingungen auf konstante Werte ein [01], [02]. Je geringer diese Korngrößenseparierung ist, desto geringer fallen auch die Auftragswirkungsgradverschlechterung und die mittlere Schichtdickenverringern aus. Für die Auswertung werden die Veränderung der mittleren Partikelgrößenkennwerte $D(v,0.1)$, $D(v,0.5)$ und $D(v,0.9)$ sowie die Veränderung des Auftragswirkungsgrades bei stabilen Pulverkreislaufbedingungen, bezogen auf die Werte im Anfangszustand, herangezogen. Die Kreislaufsimulationen werden unter Berücksichtigung der Filter-Rückgewinnung durchgeführt.

Für genauere Untersuchungen der elektrostatischen Phänomene bei der Pulverbeschichtung, insbesondere im Hinblick auf die angesprochene Sprühstrahlformung durch Lenkelektroden, dient das für die Pulverbeschichtung entwickelte Ladungsspektrometer der Fa. Epping GmbH (q/d-Verfahren). Dabei werden die Pulverpartikel direkt aus der Pulversprühwolke in eine Messzelle gesaugt und scheiden sich dort auf Glasplättchen ab, die mit einer negativen bzw. positiven Elektrode hinterlegt sind (Abb. 2.2). Mit einem Bildverarbeitungssystem werden die Größe und der Niederschlagsort der Partikel erfasst und daraus mittels einer physikalischen Modellrechnung die partikelgrößenbezogenen Ladungswerte abgeleitet [02].

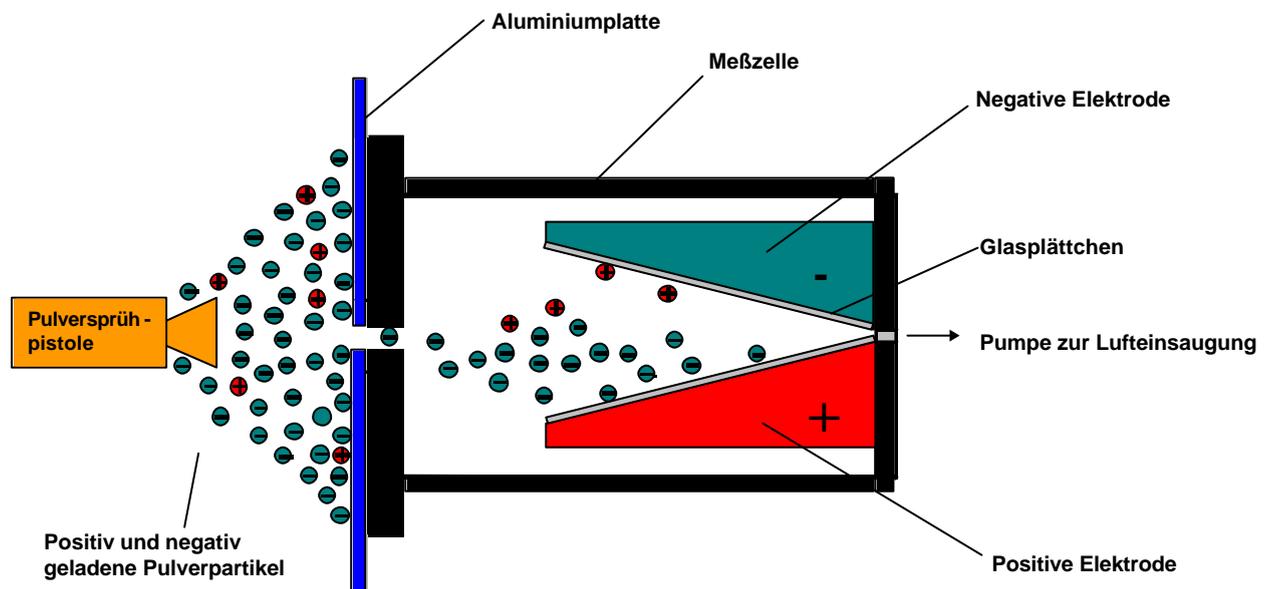


Abb. 2.2: Prinzip des Ladungsspektrometers

3 Entwicklung neuer Pulversprühsysteme

3.1 Grobkonzipierung - Lösungsfindung

Die Zielstellung des Projektes ist die Entwicklung einer Pulversprühvorrichtung, bei der die Pulverwolke vom engen Sprühstrahl (z.B. für Vertiefungen, Hohlräume, kleine Werkstücke, Löcher, Rohrinneisen) bis zur breiten Sprühwolke (z.B. für flache Teile, großflächige Werkstücke) stufenlos einstellbar ist, ohne den Sprühvorgang zu unterbrechen. Um dieses Ziel zu erreichen gilt es grundsätzlich zusätzliche Kräfte zu erzeugen, welche die Bahnen der Pulverpartikel zwischen der Pistole und dem Objekt in der gewünschten Weise beeinflussen. Hierzu bieten sich zwei Möglichkeiten an:

- Modifikation des elektrischen Feldes und/oder der Aufladung der Lackpartikel
- Modifikation des mittleren Geschwindigkeitsfeldes und der Turbulenz der Luft

Bei einer weiteren, detaillierteren Betrachtung möglicher Lösungen, wie sie in Abb. 3.1 angedeutet sind, muss jedoch beachtet werden, dass Pulverpistolenkonstruktionen, bei denen zur Variation der Pulverwolke in der Pistole Teile bewegt werden müssen, aufgrund der Pulververschmutzung ungünstig sind. Daher kommen nur folgende zwei Ansätze weiter in Betracht:

- Anordnung von Lenk- oder Steuerelektroden,
- Einsatz von außen einstellbaren Lenk- oder Steuerlüften.

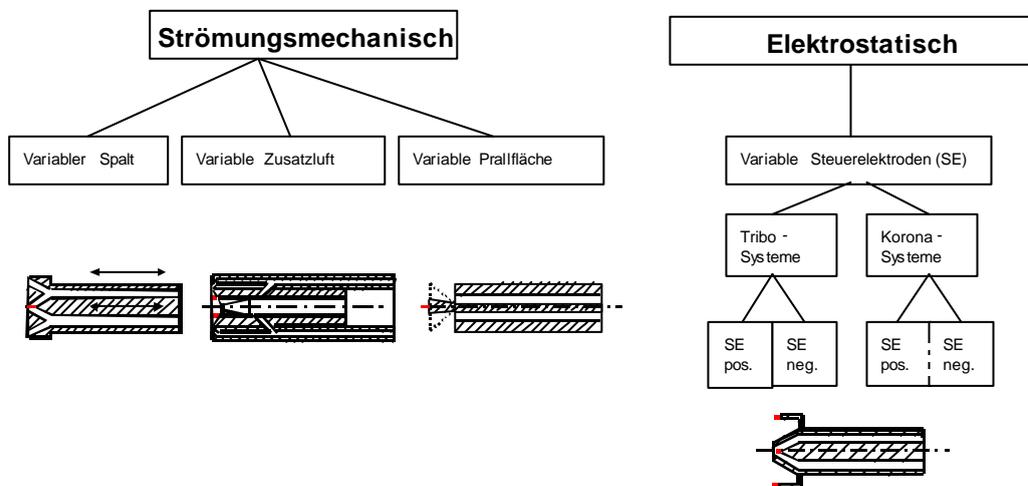


Abb. 3.1: Physikalische Möglichkeiten zur Variation der Pulverwolke

3.2 Elektrostatische Lösungsmöglichkeiten

Bei der Untersuchung des Einflusses zusätzlicher elektrostatischer Felder bzw. Ionenfelder auf die Ausbreitung der Pulverpartikel kann man auf Erfahrungen aus dem Nasslackbereich zurückgreifen. Umfangreiche Untersuchungen ergaben, dass durch den Einsatz von sogenannten Zusatz- bzw. Drücke Elektroden die Sprühwolkenbreite und -form um den Faktor 3 bis 4 variiert werden kann [03]. Die Effizienz solcher Steuer- bzw. Lenkelektroden im Pulverlackbereich wird jedoch durch teilweise andere physikalische Eigenschaften der Pulverlackierung, im Vergleich zur Nasslackapplikation, beeinflusst. Genannt werden können:

- Pulvermaterial: Art, Größe, Form;
- Pulveraufladungsverhalten, Ladungskapazität;
- Strömungsverhältnisse wie z.B. Partikelgeschwindigkeit.

Beim Einsatz von Lenk- bzw. Steuerelektroden muss zusätzlich beachtet werden, dass das Pulver auf zwei verschiedene Arten aufgeladen werden kann:

- Korona-Aufladung (zumeist negativ);
- Tribo-Aufladung (positiv).

Die Steuerbarkeit der Sprühwolke durch Lenkelektroden muss daher getrennt für Korona- und für Tribo-Pistolen untersucht werden. Die Pulverpistolenprototypen werden nach dem in Kapitel 2 beschriebenen Prüfverfahren ausgewertet. Dazu werden erste Pulverpistolenprototypen mit Steuerelektroden gebaut. Beschichtet werden im Versuch ebene Blechtafeln, das Sprühorgan ist dabei statisch angeordnet. Zur Auswertung der Sprühprofile wird das Schichtdickenprofil, der Auftragswirkungsgrad und die Partikelgrößenverteilung sowie das Kreislaufverhalten herangezogen.

Um in dieser Versuchsreihe die Zahl der möglichen Parameter sinnvoll zu begrenzen und gleichzeitig die Praxisnähe der Untersuchungen sicherzustellen, wurden die in Tab. 3.1 aufgeführten Parameter konstant gehalten. Dazu gehörte unter anderem auch das Pulvermaterial, welches in seinen wichtigsten Eigenschaften typisch für viele Industripulver ist. Die Ergebnisse sind daher für viele Pulveranwendungen in der allgemeinen Industrie gültig.

Parameter	Einstellung
Pistolendüse	Prallteller (Durchmesser 32 mm)
Sprühabstand	200 mm
Pulvermassenstrom	Tribo-System: 100 g/min (+/- 3 g/min) Korona-System: 130 g/min (+/- 3 g/min)
max. Schichtstärke	80 µm (+/- 10 µm)
Pulverlackmaterial	Epoxy-Polyester-Mischpulver (D(v,0.5) = 40 µm)
Förderergeschwindigkeit	1,3 bis 2,8 m/min (Anpassung an Schichtdickenmaximum)
Zusatzluft	1,2 m³/h und 3,0 m³/h

Tab. 3.1: Konstante Versuchsparameter

3.2.1 Korona-Aufladung

Bei den Korona-Sprühsystemen erfolgt die Aufladung der Pulverteilchen durch die Anlagerung freier Luftionen, die mittels einer bzw. mehrerer hochspannungsführender Koronaelektrode(n) erzeugt werden. Die (in der Regel negative) Hochspannung (bis ca. 80 kV) wird meist mittels einer, im Sprühorgan integrierten, Hochspannungskaskade erzeugt [04].

Die Koronaelektrode(n) an der Pulverpistole muss dabei einen ausreichend hohen Ionenstrom zur Aufladung der Partikel erzeugen und gleichzeitig die Funktion einer Feldelektrode zur Führung dieser Pulverpartikel an die Werkstückoberfläche übernehmen.

Unmittelbar vor der Elektrode bildet sich eine Ionisierungszone mit Luftionen gleicher Polarität entsprechend der Hochspannung aus. Die Luftionen fliegen mit hoher Geschwindigkeit entlang den Feldlinien. Ein Teil der Luftionen lagern sich dabei an den wesentlich langsameren Pulverpartikeln an und lädt diese dadurch auf („Ionenbombardement“).

Die erreichbare obere Grenzladung beträgt nach Rohmann

$$Q_{oI} = 3 \times p \times e_o \times \frac{e_r}{e_r + 2} \times d^2 \times E_A.$$

Für die auf die Partikelmasse m bezogene Grenzladung $Q_{oI}^* = Q_{oI} / m$ erhält man daraus

$$Q_{oI}^* = 18 \times e_o \times \frac{e_r}{e_r + 2} \times \frac{E_A}{d \times g}.$$

Der zeitliche Verlauf der Aufladung wird nach Moreau – Hanot durch diese Gleichung beschrieben

$$Q_I(t) = Q_{oI} \times \frac{1}{1 + \frac{4 \times e_o \times E_A}{S_A \times t}}.$$

Dabei bedeuten

e_r : relative Dielektrizitätszahl des Teilchenmaterials

g : Dichte des Pulverteilchenmaterials

d : Pulverteilchendurchmesser

E_A, S_A : Feldstärke und Stromdichte am Ort der Aufladung.

Tritt an der Gegenelektrode noch eine Koronaentladung auf (z.B. Rückionisation von der Werkstückelektrode), so ist das Feld bipolar ionisiert. In diesem Fall beträgt die obere Grenzladung nach Pauthenier

$$Q_{\max} = Q_{oI} \times \frac{I-1}{I+1} \quad \text{mit } I = \sqrt{\frac{b_1 \times r_1}{b_2 \times r_2}}.$$

Dabei bedeuten:

b_1, b_2 : Beweglichkeit der Ionen,

ρ_1, ρ_2 : Raumladungsdichte der jeweiligen Ionen,

1: Ionen mit gleicher Polarität wie Hochspannung

2: Ionen mit entgegengesetzter Polarität wie Hochspannung.

Wird das Produkt aus Raumladungsdichte ρ und Beweglichkeit b beider Ionenarten gleich groß, so bleiben die Teilchen ungeladen [05].

In den Untersuchungen zum Einfluss von Lenkelektroden bei Koronaaufladung wurden die Höhe der Hochspannung, die Anzahl und die Position der Lenkelektroden variiert. Dabei zeigten diese Lenkelektroden allerdings keine signifikante Wirkung. Zum Einen hängt dies damit zusammen, dass die Pulverpartikel infolge der normalen Aufladung oft schon gesättigt sind und somit keine weitere Ladung mehr aufnehmen können, bzw. von weiterer Ladung durch Lenkelektroden nicht mehr beeinflusst werden. Andere Faktoren wie z.B. die hohe kinetische Energie und die Trägheit der Pulverpartikel verstärken den Effekt. Zum Anderen führen zusätzliche Lenkelektroden, die natürlich die gleiche Ladungspolarität haben müssen wie die Korona zur Pulveraufladung, zu einer Erhöhung des Luftionenstromes, was sich auf die Reproduzierbarkeit der Beschichtung und auf die Beschichtungsqualität negativ auswirkt. In der Summe ergibt sich, dass der Einfluss der Lenkelektroden durch die vielen Luftionen verringert wird.

Abb. 3.2 zeigt die Ergebnisse der partikelgrößenbezogenen Ladungswerte, gemessen mit dem von der Fa. Epping entwickelten Ladungsspektrometer (q/d-Verfahren). Die Ladungswerte der Pulverpartikel ändern sich durch die zusätzlichen Lenkelektroden nicht. Parallel dazu zeigen die sich bei ähnlichen Pistoleneinstellungen ergebenden Sprühbilder und die sich daraus ergebenden Sprühprofilkennwerte keinen signifikanten Einfluss durch die Lenkelektroden (Abb. 3.3 und 3.4). Ähnliche Auswirkungen sind beim Erst-Auftragswirkungsgrad und bei der Partikelseparierung zu beobachten. Sowohl der Erst-Auftragswirkungsgradwert als auch die Partikelseparierung bleiben unverändert (Abb. 3.5 und 3.6).

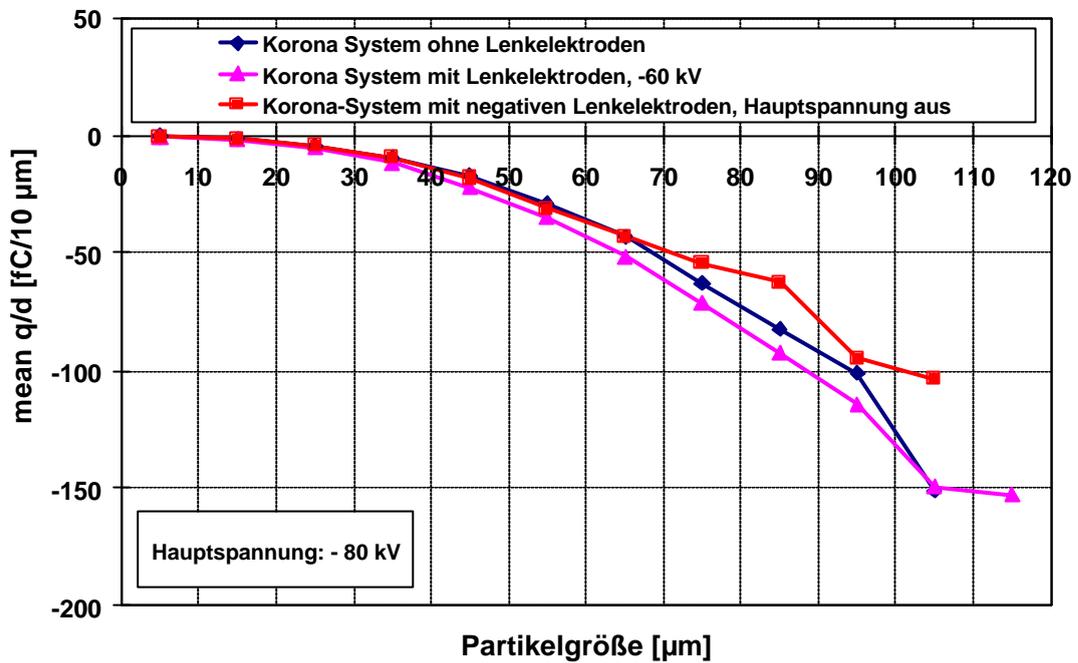


Abb. 3.2: Einfluss der partikelgrößenbezogenen Ladungswerte mit und ohne Lenkelektroden (Korona-Aufladung)

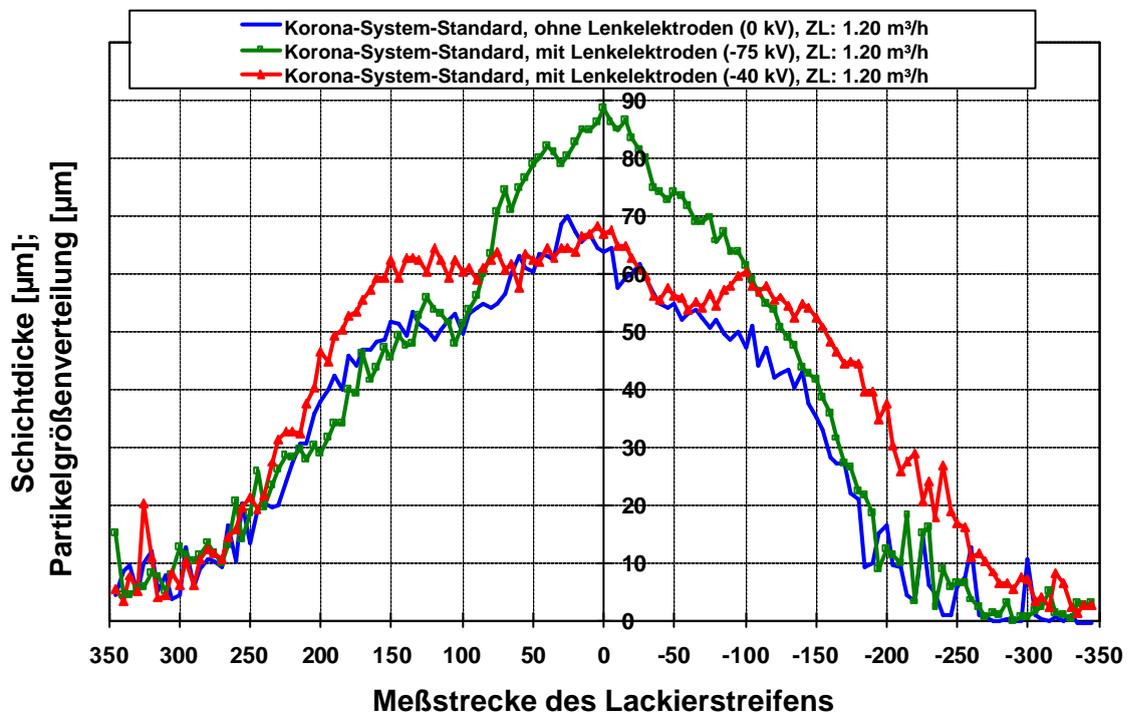


Abb. 3.3: Einfluss der Steuerelektroden auf die Sprühwolkensteuerung bei der Korona-Aufladung (Sprühprofilbilder, Korona-Aufladung)

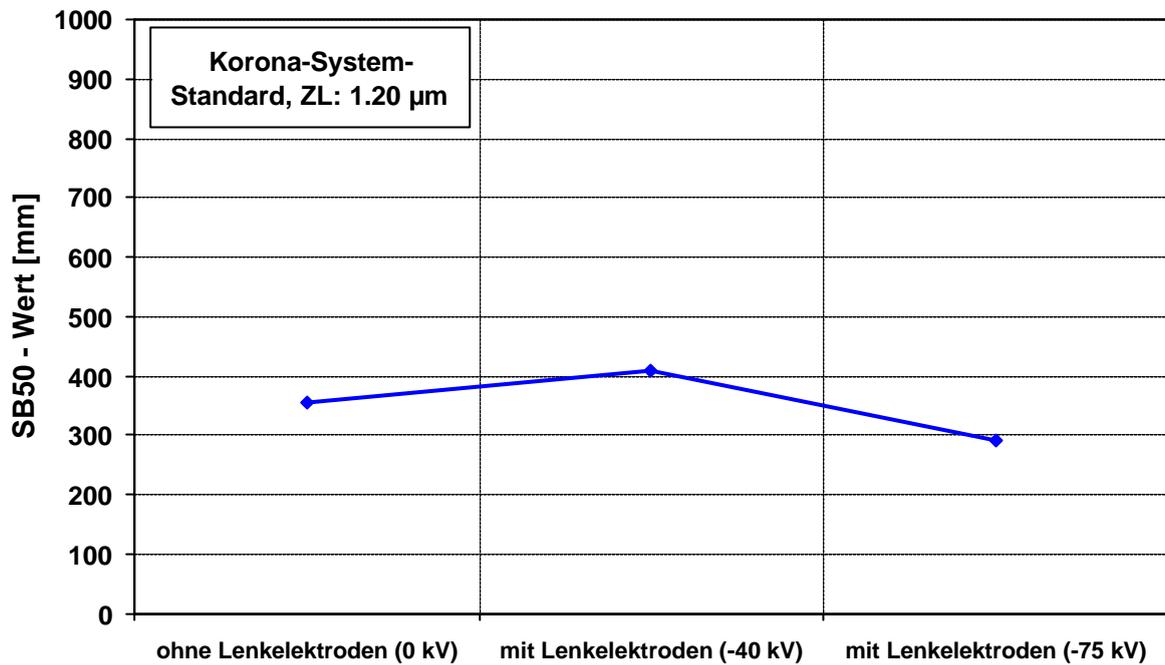


Abb. 3.4: Einfluss der Steuerelektroden auf die Sprühwolkensteuerung bei der Korona-Aufladung (Sprühprofilkennwerte, Korona-Aufladung)

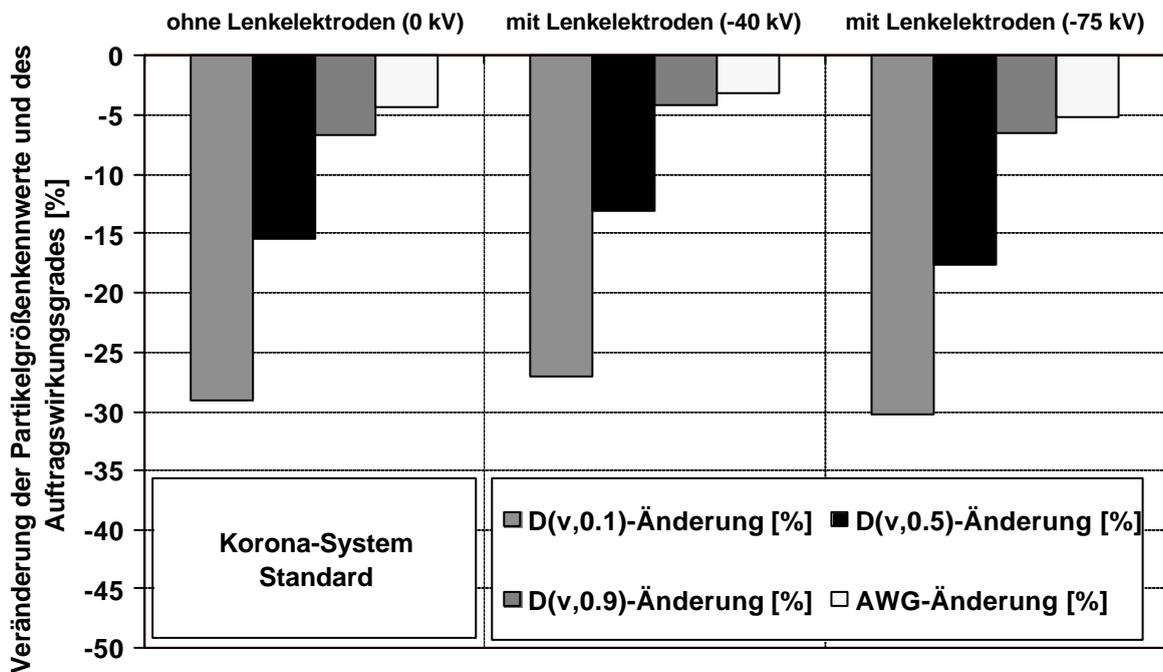


Abb.3.5: Einfluss der Steuerelektroden auf die Partikelseparierung im Pulverkreislauf (Korona-Aufladung)

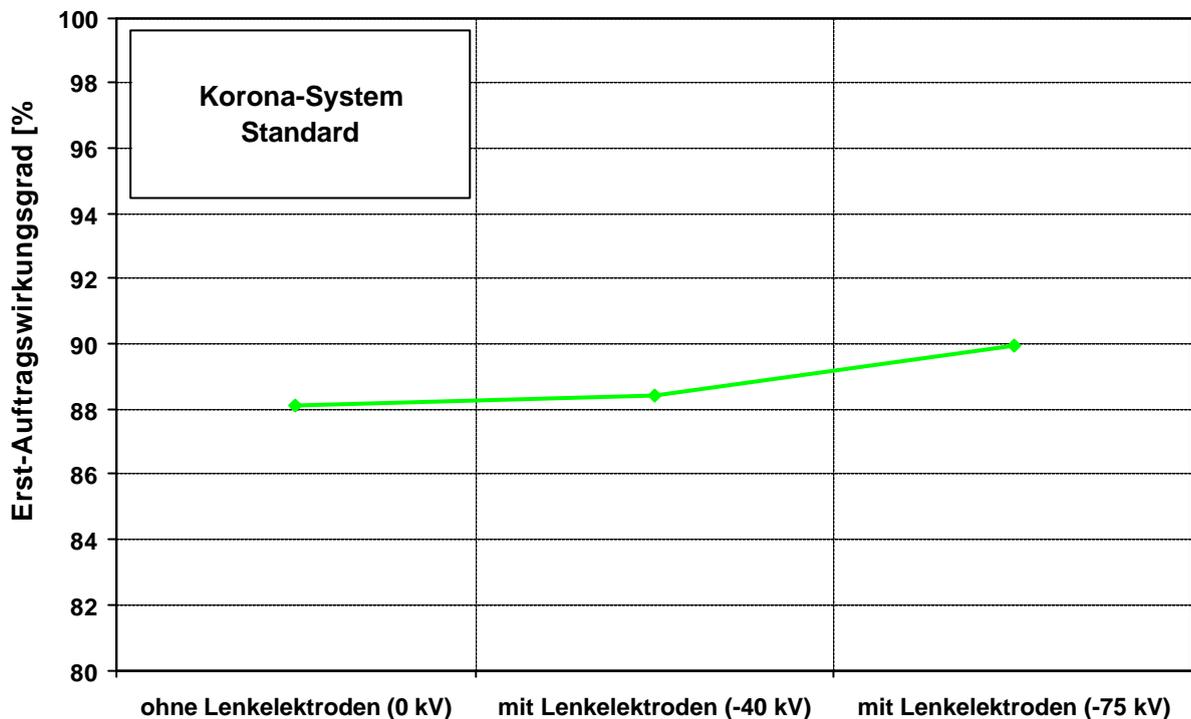


Abb. 3.6: Einfluss der Steuerelektroden auf den Erst-Auftragswirkungsgrad (Korona-Aufladung)

3.2.2 Tribo-Aufladung

Bei den Tribo-Sprühsystemen werden die Pulverteilchen ausschließlich durch reibungselektrische Vorgänge beim turbulenten Durchströmen eines Kunststoffkanals aus PTFE direkt im Sprühorgan aufgeladen, d.h. diese Systeme arbeiten ohne Hochspannungserzeuger. Die üblichen Pulverlacke nehmen bei der reibungselektrischen Aufladung mittels PTFE eine positive Polarität an [04].

Beim Durchströmen der Pulverpartikel im Kanal kommt es zur Berührung von Pulverteilchen und der Kanalwand, wobei an den Kontaktflächen aufgrund der Überlagerung atomarer Kraftfelder Ladungsträger übertreten. Die Kontaktpartner (Pulverteilchen – Reibrohr) bilden gleichgroße Ladungen entgegengesetzter Polarität (Ladungstrennung). Die meist positiv geladenen Pulverteilchen tragen ihre Ladung zum Werkstück, während die entgegengesetzten Ladungsträger in der Pistole über eine Erdung abfließen müssen (Ableitstrom).

Die triboelektrisch erzielbare Grenzladung beträgt dabei

$$Q_{oT} = A \times \epsilon_o \times E_{o \max} = p \times \epsilon_o \times d^2 \times E_{o \max}$$

Man kann davon ausgehen, dass an der Berührungsfläche zunächst eine größere Ladungsdichte herrscht, als nach dem Trennen durch die begrenzte elektrische Festigkeit der Luft im Gleichgewicht gehalten werden kann. Es kommt deshalb wieder zu einem teilweisen Ladungsausgleich über dem Luftzwischenraum. Die durch triboelektrische Effekte erzielbare Grenzladung kann dabei das Hundertfache der Ionisationsladung ($E_{\max} = 1 \dots 10 \text{ kV/cm}$) betragen [05].

Im Vergleich zur Korona-Aufladung verhalten sich Korona-Lenkelektroden in Verbindung mit der Triboaufladung grundsätzlich anders. Bei der Pulverausströmung wird die Pulverwolke durch einen Anströmkörper zu einem großen Strahl geformt. Erhöht man nun die Hochspannung an den Lenkelektroden, dann wird der Pulverstrahl langsam eingeschnürt. Bei einer Hochspannung von ca. 60 kV wird der Pulverstrahl fast vollständig durch die Lenkelektroden begrenzt. Die Polarität der Lenkspannung ist dabei umgekehrt zur Tribo-Aufladung. Bei gleicher Polarität funktioniert die Ablenkung im Prinzip zwar auch, jedoch werden die Pulverpartikel dann zu hoch aufgeladen; es bilden sich schon bei geringer Schichtstärke „Rücksprüher“.

Bei der Tribo-Aufladung bilden sich im Vergleich zur Korona-Aufladung keine freien Luftionen, die zu Überladung und „Rücksprüher“ führen könnten. Die partikelgrößenspezifische Ladungsmessungen zeigen weiterhin, dass die Pulverpartikel durch die Lenkelektroden vollständig umgeladen werden. Die Ladungswerte sind aber kleiner als bei der reinen Korona-Aufladung. Es bilden sich somit weniger freie Luftionen aus und das elektrische Feld der Lenkelektroden hat stärkeren Einfluss auf die Partikelbahnen (Abb. 3.7). Ab einer Hochspannung von ca. 60 kV wird die Pulverwolke im Bereich der Lenkelektroden vollständig eingeschnürt (Abb. 3.8 und 3.9). Es sollten daher möglichst mehrere Lenkelektroden symmetrisch um die Pulverpistole herum angeordnet sein (4 bis 8 Lenkelektroden).

Die Ausdehnung der Pulverwolke lässt sich durch die Steuerelektroden in Verbindung mit der Triboaufladung des Pulvers etwa um den Faktor 3 variieren.

Infolge der Einschnürung und Begrenzung der Pulverwolke durch die Steuerelektroden wird darüber hinaus der Erst-Auftragswirkungsgrad deutlich verbessert. Schließlich wird auch die Partikelseparierung vermindert, da infolge der zusätzlich auf die Pulverpartikel einwirkenden Kräfte diese in geringerem Umfang von der Kabinenluftströmung beeinflusst werden können. Dies gilt auch für die feineren Partikel (Abb. 3.10 und 3.11).

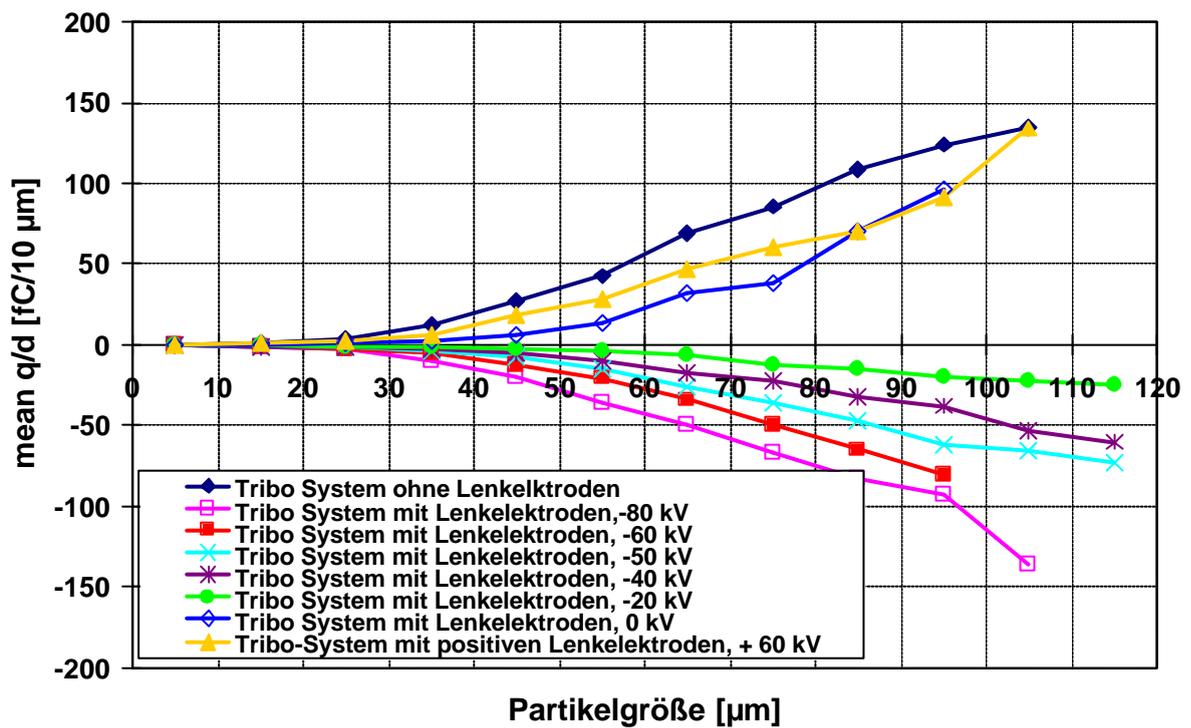


Abb. 3.7: Einfluss der partikelgrößenbezogenen Ladungswerte mit und ohne Lenkelektroden (Tribo-Aufladung)

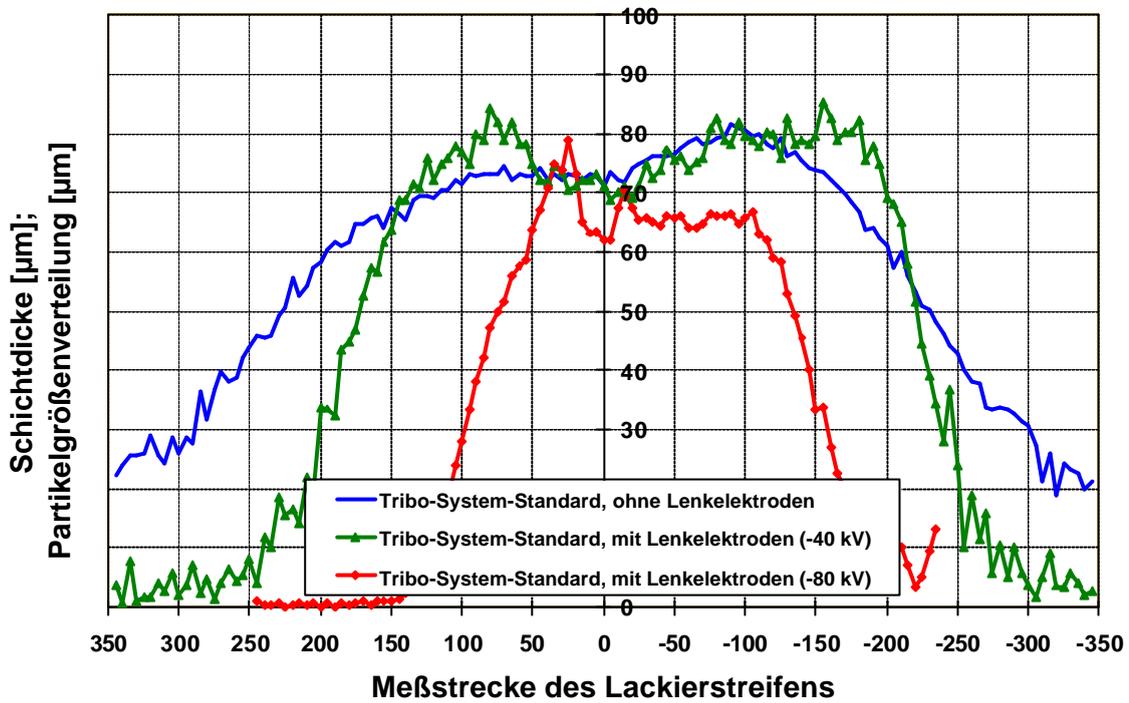


Abb. 3.8: Einfluss der Steuerelektroden auf die Sprühwolkensteuerung bei der Korona-Aufladung (Sprühprofilbilder, Tribo-Aufladung)

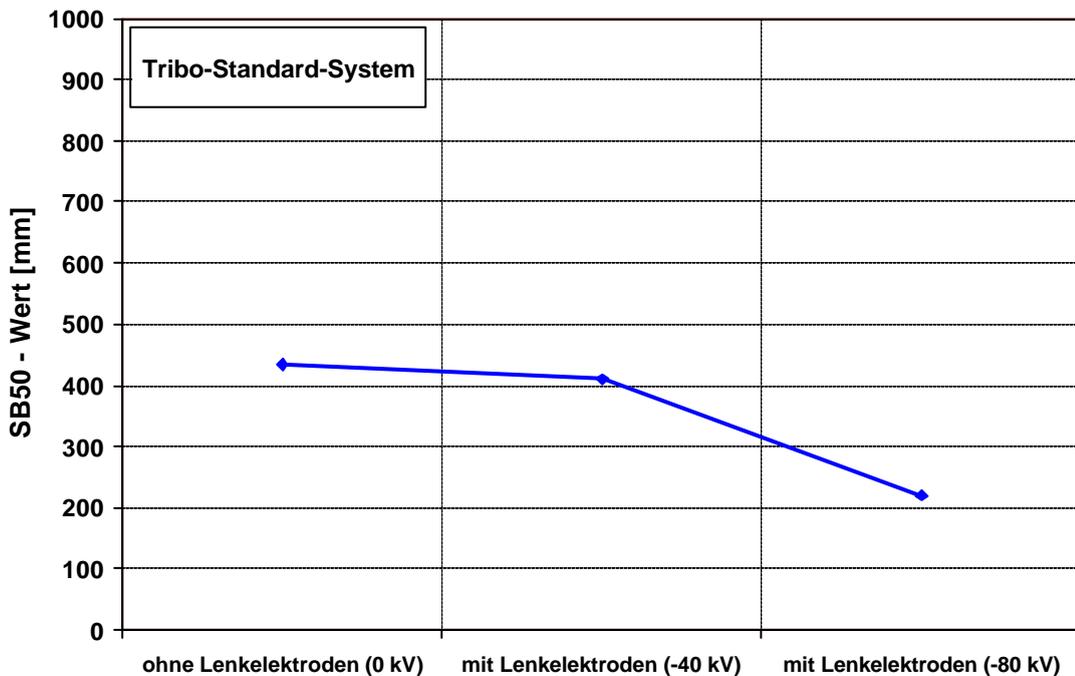


Abb. 3.9: Einfluss der Steuerelektroden auf die Sprühwolkensteuerung bei der Korona-Aufladung (Sprühprofilkennwerte, Tribo-Aufladung)

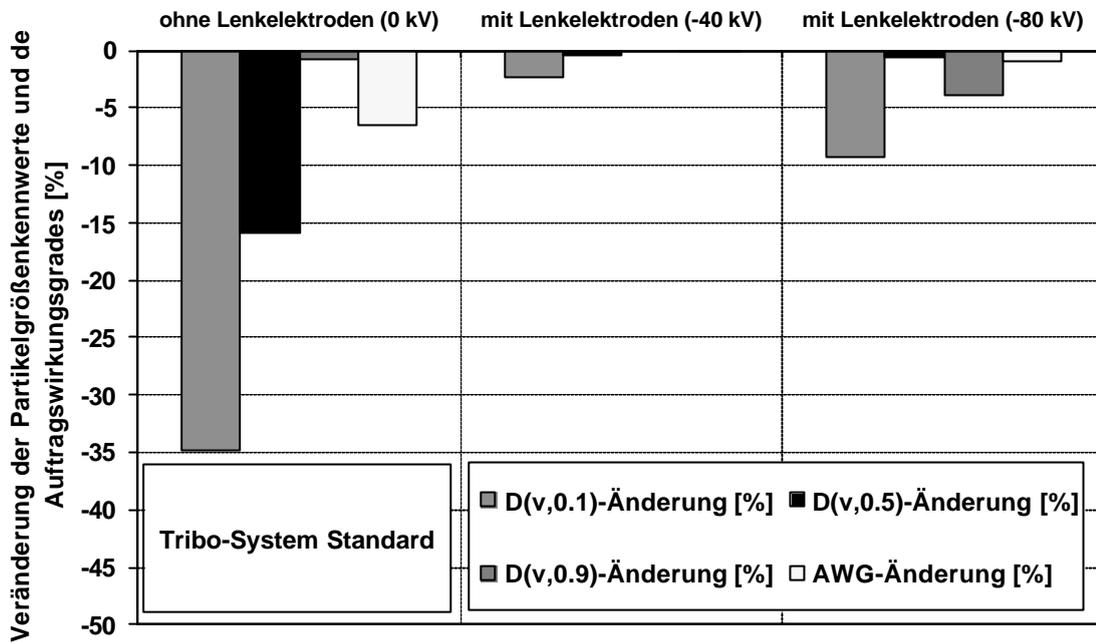


Abb. 3.10: Einfluss der Steuerelektroden auf die Partikelseparierung im Pulverkreislauf (Tribo-Aufladung).

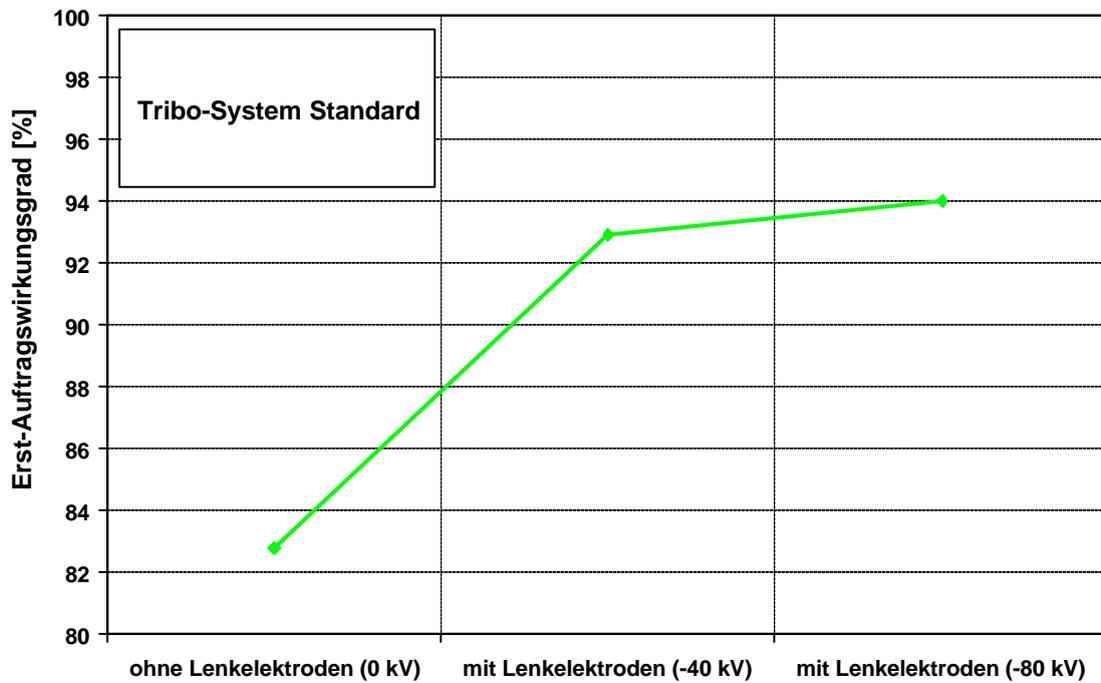


Abb. 3.11: Einfluss der Steuerelektroden auf den Erst-Auftragswirkungsgrad (Tribo-Aufladung)

3.3 Strömungsmechanische Lösungsmöglichkeiten

3.3.1 Grundsätzliche Überlegungen

In der Vergangenheit gab es verschiedentlich Vorschläge, Ausdehnung und Form der Pulversprühwolke durch variable Strömungsquerschnitte und variable Anströmkörper zu variieren. Eine gemeinsame Schwachstelle dieser Ansätze liegt jedoch darin, dass verschiedene Teile in der Pistole bewegt werden müssen. Dadurch muss zur Veränderung der Sprühwolkengeometrie die Pulverpistole ausgeschaltet werden. Motorisch gesteuerte Systeme würden den vom Benutzer vorgegebenen Kostenrahmen mit Sicherheit sprengen. Daher verbleibt neben der zuvor geschilderten elektrostatischen Beeinflussung die Verwendung einer oder mehrerer variabler Zusatzlüfte mit daran angepasster Pistolengeometrie. Strömungskanäle und Anströmkörper bleiben unverändert.

Auf der Grundlage verschiedener Vorüberlegungen wird im Weiteren die Möglichkeit der Sprühstrahlsteuerung durch Veränderung des Strömungsfeldes unmittelbar an der Pistole untersucht. Dabei werden 3 Ringkanäle angeordnet und wie folgt beaufschlagt (Abb. 3.12):

- Innenringkanal: Luft;
- Mittelringkanal: Pulver und Luft;
- Außenringkanal: Luft.

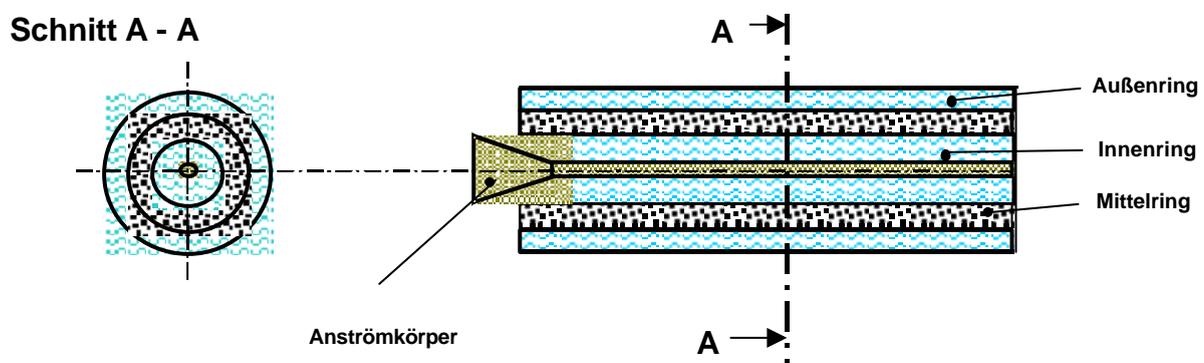


Abb. 3.12: Prinzipskizze einer Pulverpistole mit mehrfachen Ringkanälen

Vor dem Innenring ist ähnlich zu einer normalen Pralltellerpistole ein Ablenkkörper angebracht, der die Luftströmung nach außen umlenkt. Die Außenringluft strömt hingegen nahezu ungestört axial in Richtung des Werkstückes. Das Pulver-Luft-Gemisch strömt durch den Mittelring und kann bei üblichen Luftvolumenströmen, die eine homogene Förderung des Pulvers garantieren, konstant gehalten werden. Mit dieser Anordnung kann durch das Verhältnis zwischen den Volumenströmen von Innen- und Außenringluft die radiale Ausdehnung der Sprühwolke kontrolliert und eingestellt werden. Bei einem großen Verhältnis zwischen Außen- und Innenringluft ergibt sich eine enge Sprühwolke mit hauptsächlich axial nach vorne gerichteter Luftströmung (Fall 1, Abb. 3.13 oben), bei einem niedrigen Verhältnis überwiegt der Effekt der hinter dem Ablenkkörper radial nach außen gerichteten Innenringluft und es stellt sich ein breiter Sprühstrahl ein (Fall 2, Abb. 3.13 unten). Zwischen den beiden Grenzfällen (Außen- bzw. Innenringluft ausgeschaltet) ist die Ausdehnung der Pulversprühwolke stufenlos einstellbar. Außen- und Innenringkanal können dabei aus einer gemeinsamen Quelle mit Luft versorgt oder auch einzeln angesteuert werden. Im ersten Fall vereinfacht sich der schaltungstechnische Aufwand, da über ein einzelnes Stellorgan das Verhältnis der beiden Luftvolumenströme verändert werden kann. Zusätzliche Beeinflussungsmöglichkeiten ergeben sich durch die Gestaltung des Ablenkkörpers.

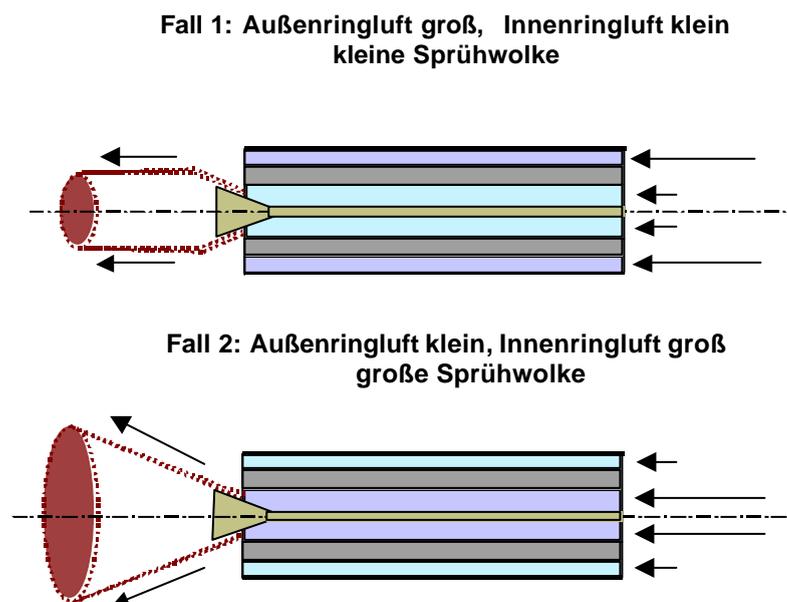


Abb. 3.13: Einstellbereich des Sprühprofils durch Variation der Außen- und Innenringluft

3.3.2 Feinkonzipierung – Detaillierung des Lösungskonzeptes mit Hilfe der numerischen Simulation sowie Konstruktion und Bau des Pulverpistolenprototypen

Ausgehend von der, in Abschnitt 3.3.1 dargestellten, grundsätzlichen Idee muss eine Pistole ausgelegt werden, die den Anforderungen der Praxis in Bezug auf Leistung, Handhabung und Zuverlässigkeit gerecht wird. Hierzu gehört in erster Linie eine optimale Dimensionierung der Strömungskanäle bezüglich Abmessungen, Form und Lage. Bei dieser Optimierung sind 2 hauptsächliche Gesichtspunkte zu berücksichtigen:

- 1 Der zusätzliche Luftverbrauch ist möglichst gering zu halten. Akzeptabel ist ein Gesamtvolumenstrom von 3 bis 5 m³/h für Innen- und Außenringluft.
- 2 Die Empfindlichkeit der Sprühwolkenformung auf Veränderungen der Steuerlüfte darf nicht zu hoch sein und muss sich über den gesamten Bereich möglichst homogen verhalten. Dies reduziert die Anforderungen sowohl an die Genauigkeit der Volumenstromregelung als auch an die einzuhaltenden Fertigungstoleranzen.

Neben den Strömungskanälen gilt es auch, Größe und Form des Anströmkörpers zu ermitteln und zu optimieren. Die gefundene Lösung muss schließlich konstruktionsgerecht (Funktion, Fertigung und Montage) umgesetzt werden.

3.3.2.1 Dimensionierung der Strömungskanäle und des Anströmkörpers mittels Simulationsrechnungen

Am IFF wurde in den vergangenen Jahren ein Programm entwickelt, welches die Berechnung des elektrostatischen Beschichtungsprozesses erlaubt. Hierzu wurde das kommerzielle Finite-Volumen-Programm FLUENT zur Simulation ein- und zweiphasiger Strömungen um die erforderlichen physikalische Modelle, die zur Berücksichtigung aller auftretenden elektrostatischen Einflüsse dienen, ergänzt [06]. Diese Ergänzungen sind im folgenden kurz skizziert:

Zunächst wird das zwischen einer Elektrode und dem geerdeten Werkstück entstehende elektrische Feld mittels Laplace-Gleichung berechnet:

$$\nabla^2 \Phi = 0.$$

Das Potential Φ berechnet sich dabei mit $E = -\nabla\Phi$. Zusätzlich entsteht eine Raumladung durch die geladenen Pulverpartikel, zu dessen Berechnung folgende Poisson-Gleichung herangezogen werden kann:

$$\nabla^2\Phi = -\frac{\rho}{\epsilon}$$

Der Wert ρ ist dabei die Raumladungsdichte und ϵ die Dielektrizitätszahl der Gasphase. Für die Bestimmung der Raumladungsdichte müssen verschiedene Werte, wie z.B. die q/m -Werte und die Partikelkonzentration im Raum bestimmt werden. Die Partikelkonzentration ermittelt man durch die Formel

$$C = \frac{1}{d_v} \sum^* m_i \times (t_{out} - t_{in}).$$

Der Wert d_v ist ein Rechenvolumen, durch das die Partikel der Kornklasse i strömen, m_i der Partikelmassenstrom der Kornklasse i und t_{in} und t_{out} die Eintritts- und Austrittszeit der Partikel der Kornklasse i im Volumen d_v .

Es ist dabei zu beachten, dass nur die Partikel geladen werden, die sich in einer bestimmten Ionisierungszone befinden. Es wird deshalb ein Volumen um die Elektronenspitze herum definiert, innerhalb der die Pulverpartikel geladen werden. Das Volumen entsteht dabei durch Rotation der folgenden Funktion um 360°

$$R_z = 0,0629 \times \log(z_p - 1,0875) + 0,409.$$

Die Höhe der Ionisierung der Partikeloberfläche hängt dabei von der Partikelgeschwindigkeit, der Partikelform und dem elektrischen Feld ab.

Die massenbezogene Ladung Q_m berechnet sich nach folgender Formel

$$Q_m = \frac{\sum q_i}{\sum m_i}.$$

Dabei ist q_i die kornklassenspezifische Ladung und m_i die kornklassenspezifische Masse. Damit berechnet sich die Raumladungsdichte zu

$$? = Q_m \times C.$$

Die elektrostatische Feldkraft auf die Pulverpartikel setzt sich aus der Coulomb-Kraft und der Kraft durch die Spiegelladung in unmittelbarer Nähe des Werkstücks nach folgender Formel zusammen

$$F_E = q_P \times E + \frac{q_P^2}{16 \times \rho \times \epsilon \times a^2}$$

Der Wert q_P ist die Partikelladung und a der Abstand zwischen Partikel und Werkstück.

Die Partikelbahnen werden mit Hilfe des Lagrangeschen Ansatzes berechnet, wobei die Bewegungsgleichung für die einzelnen Partikel gelöst werden müssen. Es gilt:

$$\frac{d u_P}{dt} = F_D + F_G + F_E \quad \text{mit} \quad \frac{d x}{d t} = u_P.$$

Hierin ist F_D die Widerstandskraft (Wechselwirkung zwischen Luft- und Partikelbewegung) und F_G die auf die Partikel wirkende Schwerkraft (Volumenkraft). Der Auftrieb kann hier vernachlässigt werden. Der Einfluss der Elektrostatik wird mit F_E nach obiger Formel berechnet. Die Turbulenz der Luftströmung wird durch Einführung eines stochastischen Anteils in der Geschwindigkeit u berücksichtigt.

Die Pulverpartikel werden über die Querschnittsfläche des Pulvereintritts homogen verteilt und mit der örtlichen Luftgeschwindigkeit gestartet. Ein Zufallsgenerator verteilt dabei unter Berücksichtigung der Kornklassenverteilung eine bestimmte Anzahl von Partikeln über dem Pulvereintrittsquerschnitt.

Da sich Raumladung und Partikelbahnen gegenseitig beeinflussen, entsteht ein zusätzlicher Iterationsprozess, der wie folgt abgearbeitet wird:

1. Berechnung des elektrischen Feldes unter Laplace-Bedingungen ($\rho = 0$). Dies ist eine erste grobe Abschätzung des elektrischen Feldes.
2. Berechnung der Partikelbahnen mit dem Discrete Phase Model (DPM).
3. Berechnung der Ladungsdichteverteilung entsprechend dem geladenen Pulver im Ionisierungsfeld.
4. Berechnung des elektrischen Feldes mit Raumladung.
5. Wiederholung der Schritte 2 – 4 bis die Lösung des Raumladungsfeldes konvergiert [06].

Bei der erforderlichen Vernetzung des Strömungsfeldes und der Geometrien müssen einige Punkte beachtet werden:

- Feinmaschige Vernetzung in Gebieten mit großen Geschwindigkeitsgradienten;
- Generell feine Vernetzung in engen Strömungskanälen;
- Kein schroffer Übergang von einem Gebiet mit feiner und grober Vernetzung;
- Verwendung möglichst einfacher Vernetzungsmodelle (z.B. linear oder Cooper);
- Möglichst geringe Anzahl der Vernetzungsbausteine.

Es wurden daher Netze mit hoher lokaler Gitterverfeinerung verwendet, wobei jedoch auch in diesem Fall bis zu 500 000 Zellen eingeführt werden mussten.

Um den Rechenaufwand in einem annehmbaren Rahmen zu halten, wurden die Simulationsrechnungen in zwei Phasen durchgeführt: In Phase 1 erfolgte die erwähnte Auslegung der Strömungskanäle und des Ablenkkörpers. Diese Rechnungen können einphasig (nur Luftströmung) durchgeführt werden, wodurch sich die Rechenzeit signifikant verkürzt. In Phase 2 werden für die gefundene Geometrie in Abhängigkeit von den eingestellten Luftvolumenströmen Schichtdickenverteilungen, Auftragswirkungsgrad und Partikelseparierung bei der Beschichtung einer ebenen Platte berechnet.

In Phase 1 wurden in systematischer Weise folgende Teilaspekte betrachtet:

- Form und Abmessungen des Verteilungskörpers (z.B. ebene Scheibe, Konus mit verschiedenen Winkeln);
- Abmessungen, Form und Richtung des Innen- und Außenringluftkanals;
- Abmessungen und Form des Mittelringkanals.

Die Berechnungen der Strömung wurden unter Zugrundelegung der in Tab. 3.2 zusammengefassten Randbedingungen durchgeführt. Die Luftgeschwindigkeiten im Innen- und Außenringkanal sind so gewählt, dass die Summe des Gesamtluftvolumenstroms von Innen- und Außenringkanal nicht mehr als 5,0 m³/h beträgt. Im Mittelringkanal wird vorerst eine einphasige Luftströmung angenommen.

Randbedingung	Größe
Schwerkraft	9,81 m/s ²
Luftdruck	101325 Pa
Luftsinkgeschwindigkeit an Kabinendecke	0,25 m/s
Pulvereintrittsgeschwindigkeit	8 m/s
Luftgeschw. im Außenringkanal v_a	0 – 13 m/s
Luftgeschw. im Innenringkanal v_i	0 – 45 m/s
Turbulenzmodell	RNG (renormalization group) ϵ -e Turbulenzmodell für komplexe Strömungen

Tab. 3.2: Randbedingungen für das Strömungsfeld

Natürlich mussten einige grundsätzliche Vorüberlegungen zur Form und Geometrie der Pistole angestellt werden, da die Simulation immer nur eine vorgegebene Situation nachrechnen kann. Daher wurden verschiedene experimentelle Voruntersuchungen durchgeführt, z.B. im Hinblick auf die Gestaltung des Ablenkkörpers.

Abb. 3.14 zeigt die strömungstechnisch optimierte Pulverpistole (nicht maßstabsgerecht), Abb. 3.15 die analogen Schnittdarstellungen der für die Strömungssimulation dreidimensional vernetzten Pulverpistole bei verschiedenen Auflösungen.

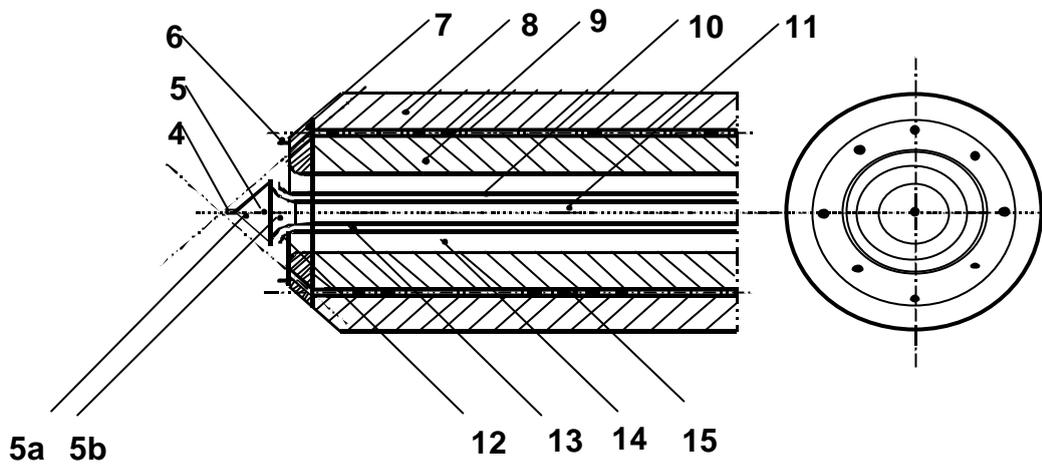


Abb. 3.14 Pulverpistolenansicht: Ansicht von vorne, Querschnitt von rechts

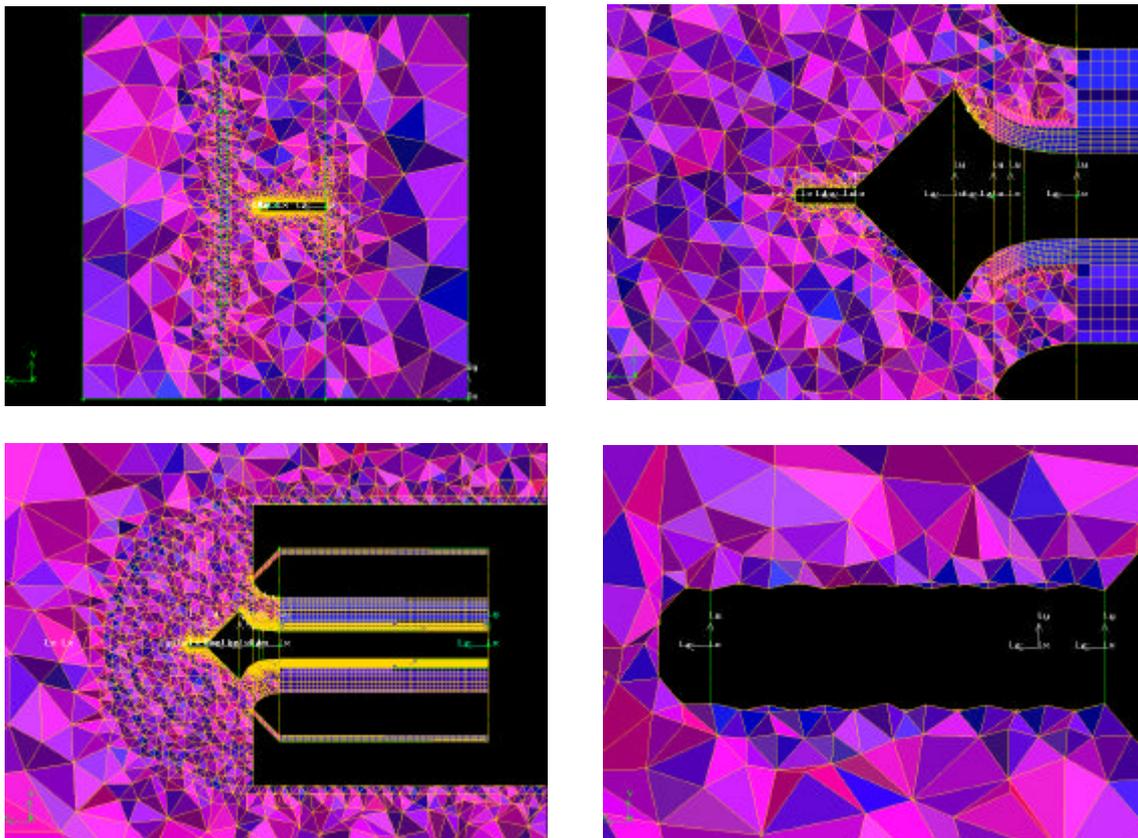


Abb. 3.15: Vernetzter Strömungskörper der optimierten Pulverpistole (verschiedene Auflösungen, zweidimensionale Schnittdarstellung in Pistolenmitte)

In Abb. 3.16 sind die berechneten Strömungsbilder im axialen Querschnitt der Pulverpistole für verschiedene Einstellungen der Außen- und Innenringluft dargestellt.

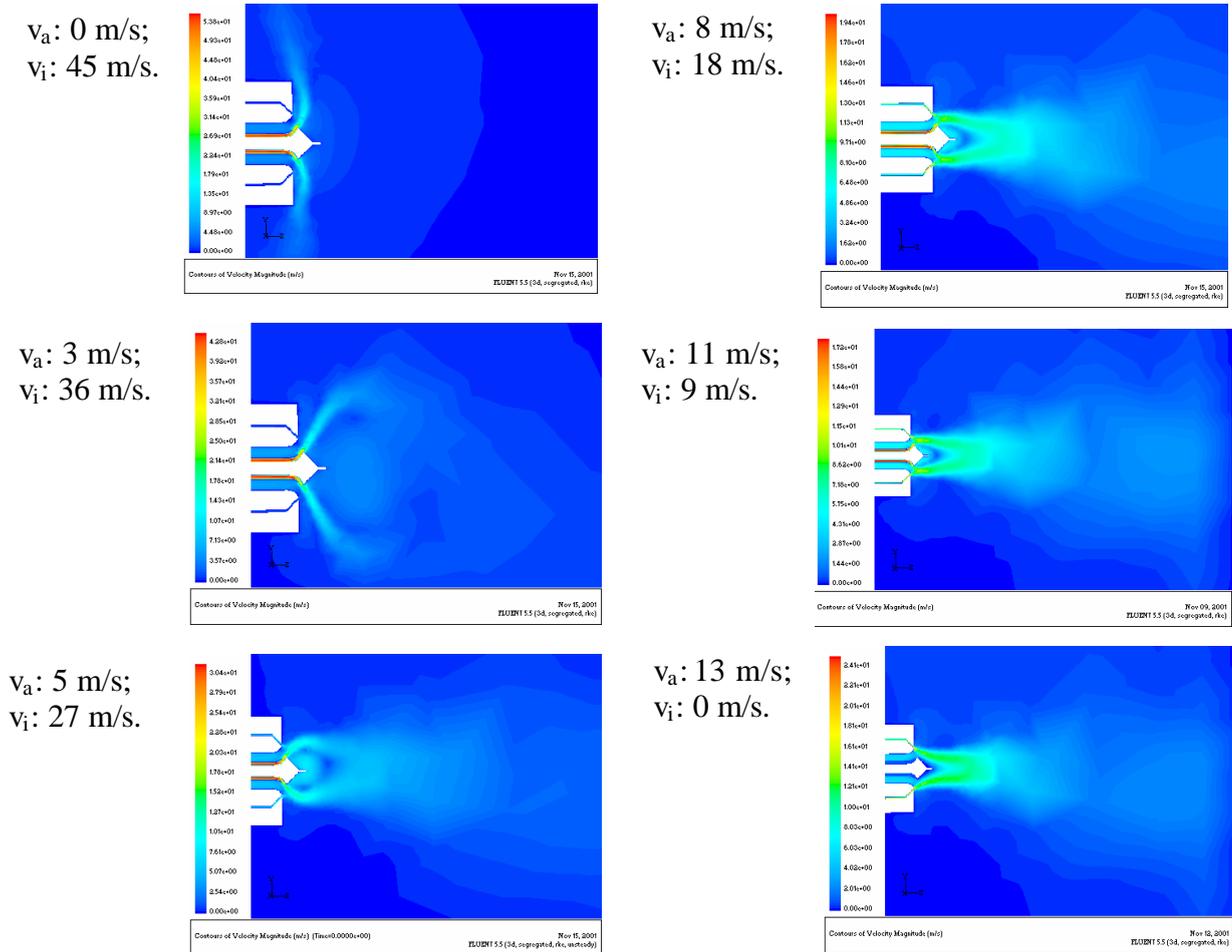


Abb. 3.16: Luftströmungsverlauf bei verschiedenen Innen- und Außenringlüften

Hierbei wird deutlich, dass bereits eine einphasige Simulation der entstehenden Luftströmung einen guten Einblick in die zu erwartende Ausdehnung der Pulverwolke gibt. Bereits ein relativ niedriger Volumenstrom im Außenring genügt, um ein stabiles Strömungsfeld zu erzeugen, ähnlich dem einer normalen Pralltellerdüse (mittleres Bild links). Mit zunehmenden Volumenstromverhältnis zwischen Außen- und Innenringluft wird das Strömungsgebiet enger und stärker zum Objekt hin ausgerichtet, was engere Schichtdickenprofile erwarten lässt. Auch eine gänzliche Abschaltung der Innenringluft ist möglich.

Wie angedeutet, wird im nächsten Schritt das zweiphasige Strömungsfeld mit den Pulverpartikeln einschließlich aller elektrostatischen Effekte berechnet. Daraus lässt sich dann das Sprühbild auf dem Werkstück ermitteln. Den Simulationen liegen folgende Randbedingungen zugrunde:

Randbedingung	Größe
Partikelgrößenverteilung des Epoxy-Polyester-Mischpulvers (Standardpulver), gemessen mit Malvern Mastersizer	$D(v,0.1) = 10 \mu\text{m}$ $D(v,0.5) = 38 \mu\text{m}$ $D(v,0.9) = 80 \mu\text{m}$
Pulverpartikeldichte	1500 kg/m^3
Pulverpartikeleintritt im Pulverkanal	1800 Pulverpartikel pro Intervall, Geschwindigkeit gemäss Luftgeschwindigkeit
Pulvermassenstrom	100 g/min
Hochspannung an Zentralelektrode am Verteilungskörper	80000 V

Tab. 3.3: Randbedingungen für Berechnung der Pulverbeschichtung

Beachtet werden sollte, dass die zweiphasigen Simulationsrechnungen auch mit Partikel-Fluid Wechselwirkung (Rückkopplung) durchgeführt werden können. Dadurch können sich auch die berechneten Strömungsfelder der Luft nochmals verändern.

Für die verschiedenen Verhältnisse zwischen Innen- und Außenringluftvolumenströmen ergeben sich die in Abb. 3.17 dargestellten statischen Sprühbilder. Dabei wurde angenommen, dass die Sprühpistole eine bestimmte Zeit (ca. 20 s) unbewegt auf eine Stelle einer leitfähigen Platte Pulver appliziert. Dies entspricht natürlich nicht der Praxis, ist aber bis zu Schichtdicken zulässig, bei denen im Versuch die ersten Rücksprüheffekte auftreten würden. Unter dieser Bedingung kann man dann mit einer einfachen Integrationsrechnung aus den statischen Sprühbildern unter Annahme einer bestimmten Bewegungsgeschwindigkeit dynamische Schichtdickenprofile ermitteln und gegebenenfalls mit dem Experiment vergleichen.

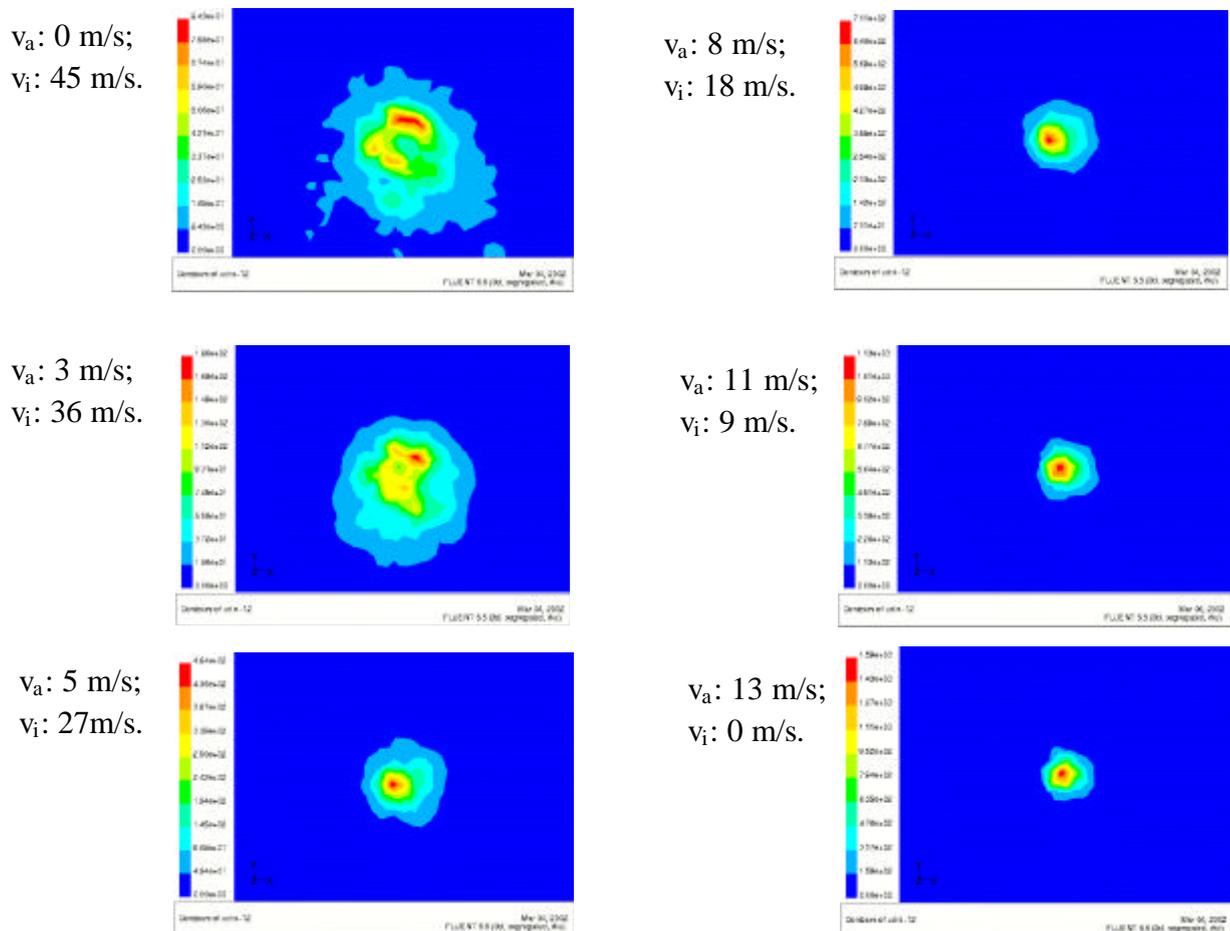
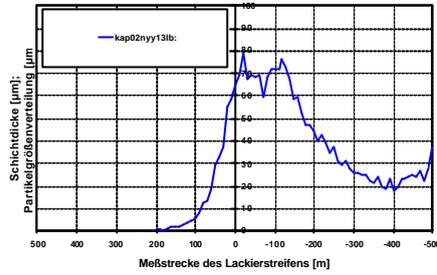


Abb. 3.17: Statische Schichtdickenprofile bei verschiedenen Innen- und Außenringlüften

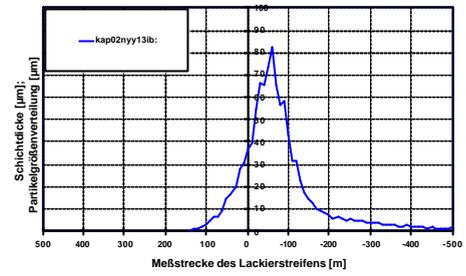
Die Ergebnisse der 6 betrachteten Parametersätze der Pistole sind in Abb. 3.18 einander gegenübergestellt. Dabei wurde die Pistole entlang einer geraden horizontalen Bahn vor einem vertikal stehenden Blech vorbeibewegt (siehe Abb. 2.1). Die wirkende Schwerkraft wurde bereits bei den statischen Sprühbildern berücksichtigt.

Die berechneten Sprühprofilbilder deuten an, dass sich die Ausdehnung der Pulverwolke durch Variation der Außen- und Innenringluft etwa um den Faktor 5 variieren lässt. Damit wäre es möglich, wie angestrebt, sowohl große ebene Flächen wie auch geometrisch begrenzte Teile, wie z.B. Rohre effizient zu beschichten. Natürlich müssen diese Ergebnisse nach Realisierung eines Pistolenprototyps experimentell überprüft werden.

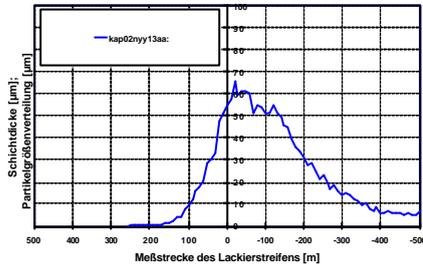
$v_a: 0 \text{ m/s};$
 $v_i: 45 \text{ m/s}.$



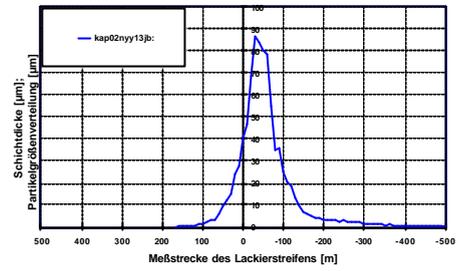
$v_a: 8 \text{ m/s};$
 $v_i: 18 \text{ m/s}.$



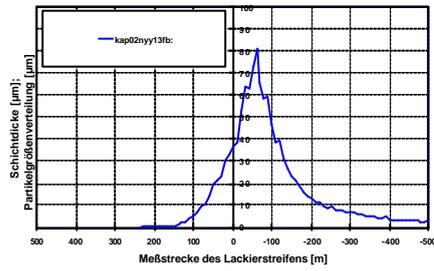
$v_a: 3 \text{ m/s};$
 $v_i: 36 \text{ m/s}.$



$v_a: 11 \text{ m/s};$
 $v_i: 9 \text{ m/s}.$



$v_a: 5 \text{ m/s};$
 $v_i: 27 \text{ m/s}.$



$v_a: 13 \text{ m/s};$
 $v_i: 0 \text{ m/s}.$

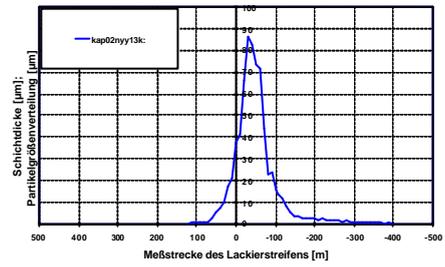


Abb. 3.18: Dynamische Schichtdickenprofile bei verschiedenen Innen- und Außenringlüften

3.3.2.2 Konstruktion und Bau des Pistolenprototypen

Ausgehend von den numerischen Ergebnissen ist die strömungstechnisch optimierte Pistole als Prototyp zu realisieren. Die Umsetzung der Konstruktion erfolgt nach den „Must-Want-Nice Kriterien“.

Die Pulverpistole muss so konstruiert werden, dass die gesamte Einheit

- funktionsgerecht ist

und alle Einzelteile

- fertigungsgerecht gebaut und
- montagegerecht montiert bzw. demontiert werden können („Must-Anforderungen“).

Funktionsgerecht bedeutet dabei, dass die Pulverwolke in Erfüllung der Auslegung von einer engen bis zu einer breiten Sprühwolke stufenlos variiert werden kann, ohne dass dabei irgendwelche Teile der Pistole bewegt oder verändert werden müssen. Fertigungsgerecht bedeutet, dass die Teile nach dem Stand der Technik hergestellt werden können. Montagegerecht bedeutet dass die Einzelteile mit passendem Werkzeug in einer gewissen Reihenfolge montiert und demontiert werden können, ohne Einzelteile zu beschädigen.

Des weiteren gibt es einige weitere allgemeine Anforderungen (sog. „Want-Anforderungen“), die bei der Konstruktion beachtet werden sollten:

- Die Strömungskanäle der Innen- und Außenringluft müssen getrennt angesteuert werden können.
- Position und Abmessungen der drei Strömungskanäle müssen laut den Ergebnissen der Simulationen genau eingehalten werden. Die Toleranzen betragen einheitlich für alle Teile im Strömungsbereich $\pm 0,01$ mm. Form- und Lagetoleranzen sind zu beachten. Für alle anderen Bauteile gelten Allgmeintoleranzen (Freimaßtoleranzen).
- Alle Teile müssen aus einem sehr verschleißbeständigen und spanend leicht zu verarbeitendem Kunststoffmaterial sein (z.B. POM, PEPT oder PA. Farbe weiß bis grau).
- An einigen Teilen sind Dichtungsringe vorzusehen, wobei an den angrenzenden Oberflächen der Teile leichte Anphasungen angebracht werden müssen.

- Der Verteilungskörper muss austauschbar und axial verschiebbar sein, die einzelnen Elektroden am Elektrodenring anschraubbar und der Elektrodenring ebenfalls verschiebbar sein.
- Die Bauteile, die den Pulverkanal ausbilden, müssen austauschbar sein, damit auch tribofähige Materialien für eine reine Reibungsaufladung eingebaut werden können.

Des Weiteren wäre es für die Pistolenkonstruktion ideal, wenn noch folgende zusätzliche Anforderung erfüllt sind („Nice-Anforderungen“).

- Alle Kanäle in der Pistole müssen strömungsgünstig ausgeführt werden (z.B. keine schroffen Übergänge, Kanten, Hohlräume), da sich im Pulverkanal keine Partikel anlagern dürfen.
- Der Verteilungskörper sollte ebenfalls strömungsgünstig konstruiert werden, da sich auch hier kein Pulver anlagern sollte.
- Die äußere Verschmutzung der Pistole durch Niederschlag von Pulver sollte vermieden oder zumindest so gering wie möglich gehalten werden. Pulveransinterungen im Pulverkanal sowie Pulververschleppung in die Innen- und Außenringluftkanäle ist in jedem Fall zu vermeiden.
- Die Montage und Demontage der Pistole sollte eindeutig und so einfach wie möglich sein. Es sollte möglichst kein Werkzeug verwendet werden müssen, auf alle Fälle kein Spezialwerkzeug. Für die Anschlüsse an die Pistole (Elektrostatik, Luft, Pulver, Halterung zum Roboter) sind Normteile zu verwenden.
- Falls die Einzelteile überhaupt gereinigt werden müssen, sollte sich die Reinigungsprozedur so einfach wie nur möglich gestalten (z.B. nur durch Luft abblasen).
- Die Pistole sollte ohne Probleme in automatisierten Anlagen eingesetzt werden können. Sie sollte deshalb nicht allzu groß und allzu schwer sein, jedoch robust genug für die hohen statischen und dynamischen Belastungen während der Beschichtung.
- Das Design der Pistole sollte ansprechend sein.

Für die einfachere Umsetzung der Konstruktion erfolgt die Aufladung nicht wie üblich mittels einer am Verteilungskörper angebrachten und durch eine interne Hochspannungskaskade gespeisten Elektrode, sondern über einen um die Pistole herum angeordneten Hochspannungsring mit externer Kaskade. Die einzelnen Elektroden sind austauschbar und der ganze Ring axial verschiebbar. Dadurch können verschiedene Aufladegerometrien nachgestellt werden. Für die

Versuche bzw. Vergleiche mit der Simulation müssen mit dem Hochspannungsring allerdings ähnliche Ladungswerte erzielt werden wie bei der zentralen Elektrode am Verteilungskörper, da dies eine Eingangsbedingung für die Simulation darstellte. Bei zukünftigen Pulverpistolen-Konstruktionen muss eine am Verteilungskörper angebrachte Hochspannungselektrode mit interner Kaskade berücksichtigt werden.

Im Folgenden wird die Pistolenkonstruktion näher beschrieben. Abb. 3.19 zeigt den Gesamtaufbau der Pistole im Schnitt.

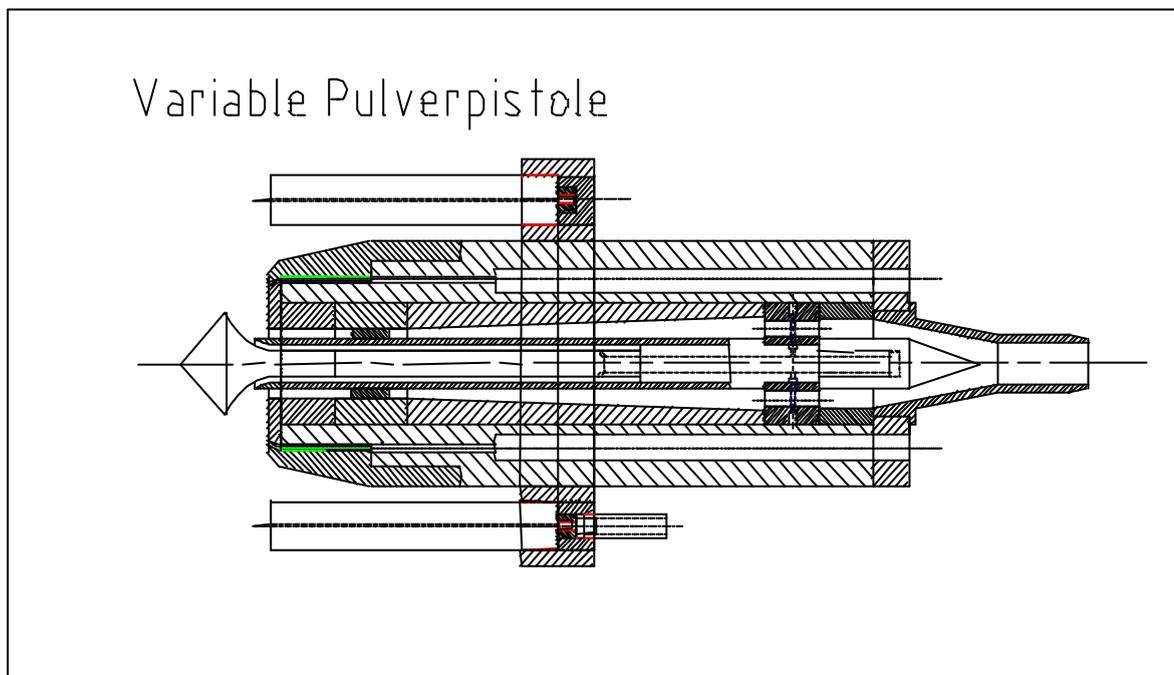


Abb. 3.19: Gesamtaufbau der Pulverpistole im Schnitt

Die Pulverpistole besteht ohne Elektrodenkranz aus 13 Einzelteilen. Das Gewicht beträgt 650 g ohne und 1000g mit Elektrodenkranz. Der Pistolenkörper hat einen Durchmesser von 60 mm und eine Länge von 180 mm (ohne Luftanschlüsse). Die Hochspannungselektroden werden über eine externe Kaskade (max. 100 kV, max. 200 μ A DC) gesteuert, wobei sowohl spannungs- als auch stromkonstant gefahren werden kann. Abb. 3.20 zeigt einen seitlichen Querschnitt mit Ansicht von vorne und hinten mit der Teilenummerierung und ohne Elektrodenring. In Abb. 3.21 und 3.22 sind die wichtigsten Abmessungen der Pulverpistole dargestellt. Abb. 3.23 zeigt die Abmessungen des Elektrodenrings.

Die Pistolenkonstruktion erfüllt alle „Must-“ und „Want-Kriterien“. Inwieweit sich die „Nice-Kriterien“ erfüllen lassen, müssen Erprobungsversuche bei einem Anwender zeigen. Dazu zählen vor allem Kriterien wie die Pistolenhandhabung, die Pulverschmutzung der Pistole sowie das Design der Pistole. Abb. 3.24 zeigt die Pistole mit der Halterung zum Roboter.

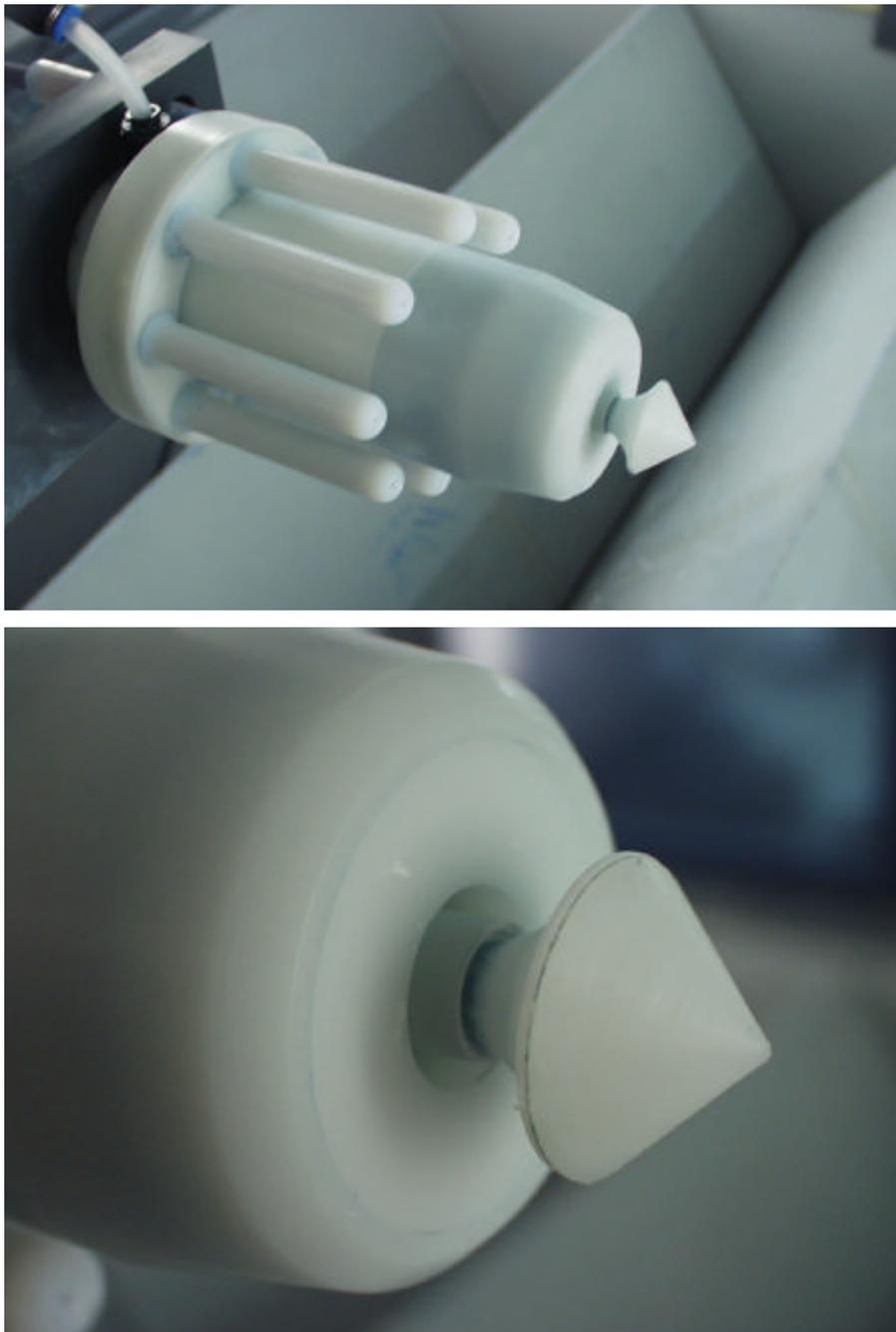


Abb. 3.24: Pulverpistole mit Halterung zum Roboter (Prallteller mit Kegelspitze als Verteilungskörper)

3.3.2.3 Vergleich der Beschichtungsergebnisse Simulation – Experiment

Nach dem erfolgten Bau des Pistolenprototypen werden im nachfolgenden, anhand von 3 Betriebszuständen (Variationen der Außen- und Innenringlüfte), Experiment und Simulation in Bezug auf die dynamischen Sprühprofile und die zugehörigen örtlichen Partikelgrößenverteilungen miteinander verglichen.

Vorab gilt es allerdings experimentell zu klären, wie sich das Aufladungsverhalten der Pulverpartikel bei dem in der Konstruktion realisierten äußeren Elektrodenring und bei direkten Aufladung mittels Zentralelektrode am Verteilungskörper gestaltet. Für die experimentelle Bestimmung der Pulveraufladung am Verteilungskörper wird eine konventionelle Pulverpistole mit einem Prallteller (Durchmesser 25 mm) eingesetzt. Die Pulverwolke wird bei der neu entwickelten Pulverpistole mit der Außen- und Innenringluft so eingestellt, dass die Ausdehnung der Pulversprühwolke ähnlich ist wie bei der konventionellen Pulverpistole. Die Pulverpartikel werden dabei mit maximaler Hochspannung aufgeladen. Die Ergebnisse zeigen, dass sich bei gleichbleibender Pulversprühwolke die Ladungswerte der Pulverpartikel sowohl bei unterschiedlichen Positionen der Hochspannungselektrode, als auch bei unterschiedlicher Anzahl der Hochspannungselektroden nicht wesentlich verändern (Abb. 3.25). Offensichtlich reicht bereits eine einzelne, mit 80 KV betriebene externe Hochspannungselektrode aus, die Pulverpartikel im Bereich der Sättigung aufzuladen. Daher ist es möglich, die mit Zentralelektrode durchgeführten Simulationen direkt mit den experimentellen Ergebnissen zu vergleichen. Eine aufwendige Simulation des elektrischen Feldes mit mehreren außenliegenden Elektroden erübrigte sich daher.

Verändert man jedoch die Größe der Pulversprühwolke, so ergeben sich unterschiedliche Ladungswerte. Dabei werden im Zentrum der Pulverwolke abnehmende Ladungswerte gemessen, je größer die Pulversprühwolke wird (Abb. 3.26).

Die experimentell ermittelten Werte der Schichtdickenverteilung, der Partikelseparierung auf dem Werkstück sowie die experimentell ermittelten Werte des Auftragswirkungsgrades zeigen eine recht gute Übereinstimmung mit den Werten der Simulation (Abb. 3.27 und Abb. 3.28).

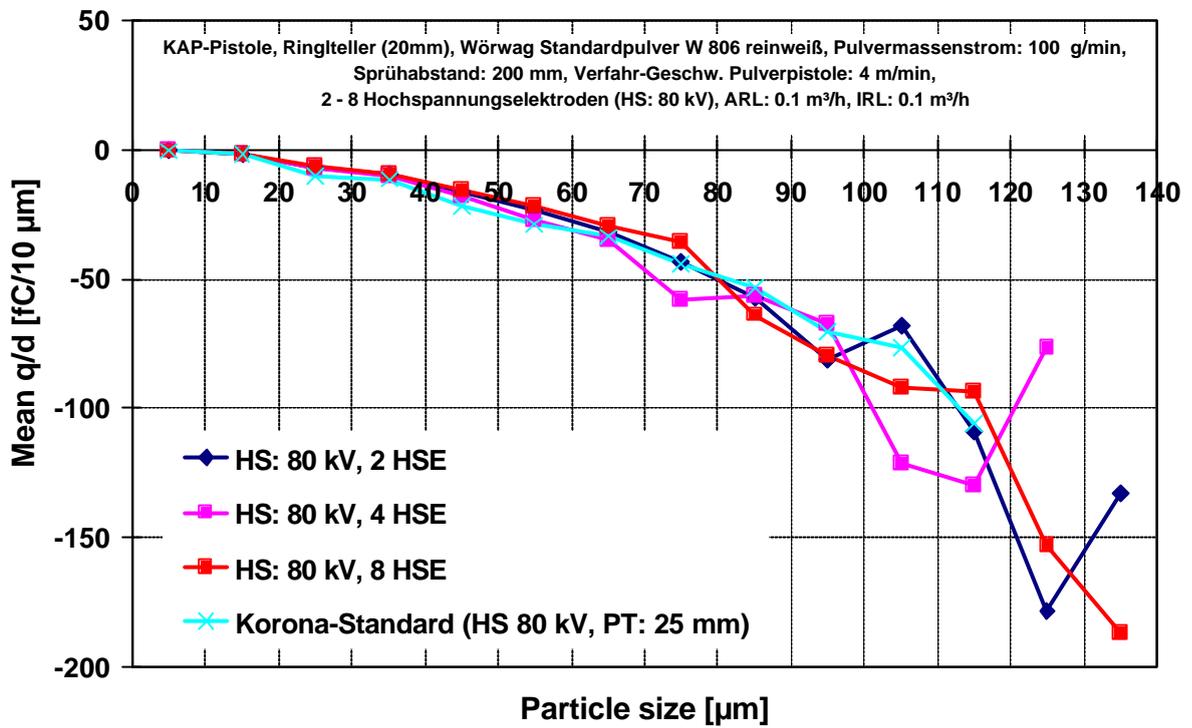


Abb. 3.25: Partikelgrößenbezogene Ladungswerte bei unterschiedlichen Aufladungspositionen bei gleichbleibender Sprühwolke

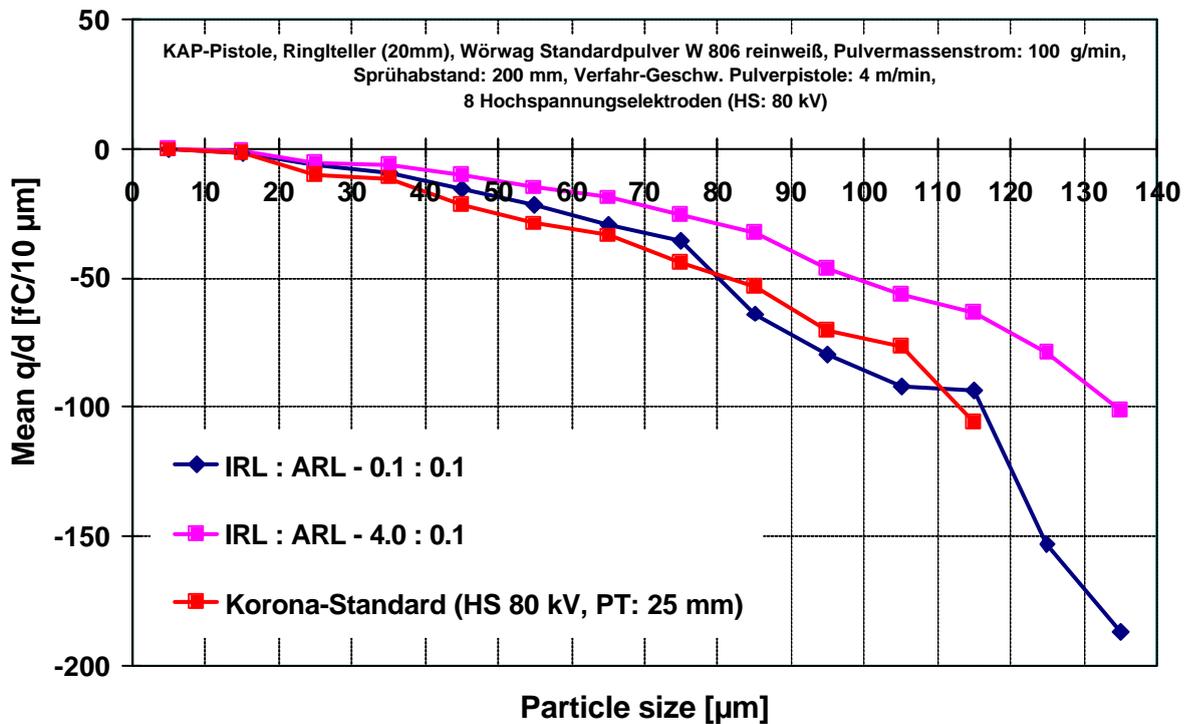
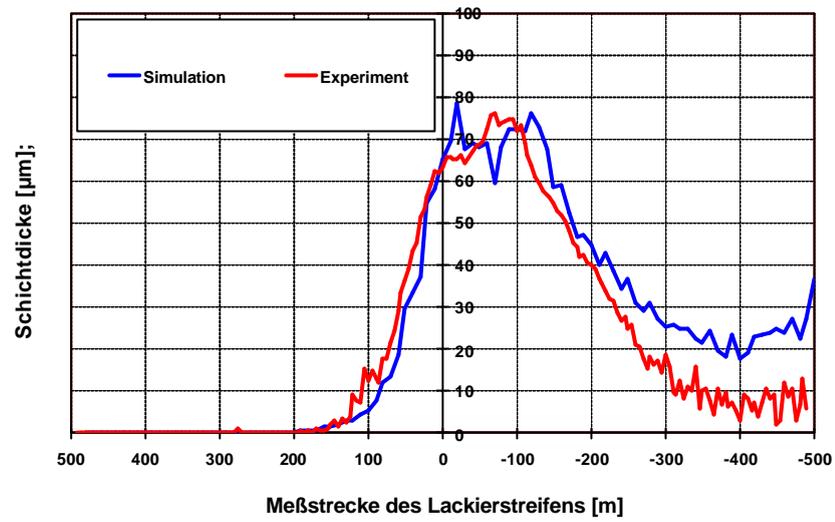
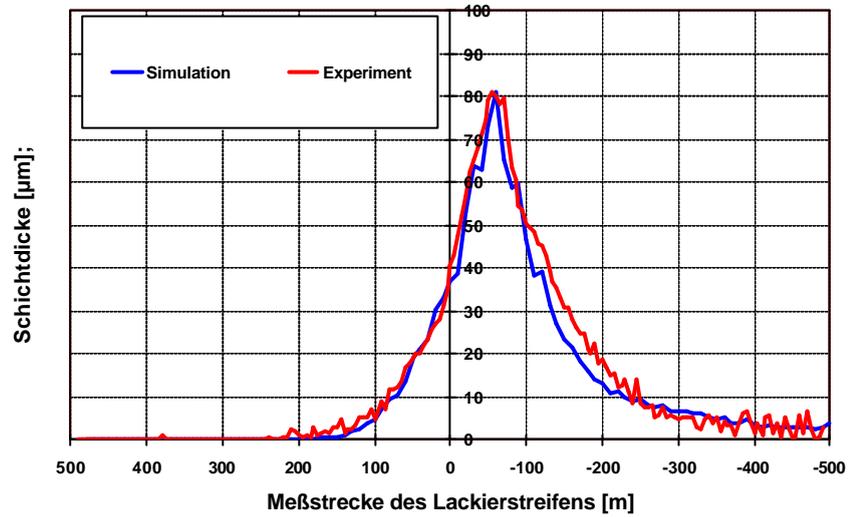


Abb. 3.26: Partikelgrößenbezogene Ladungswerte bei unterschiedlichen Aufladungspositionen bei unterschiedlicher Sprühwolke

v_a : 0 m/s;
 v_i : 45 m/s.



v_a : 5 m/s;
 v_i : 27 m/s.



v_a : 13 m/s;
 v_i : 0 m/s.

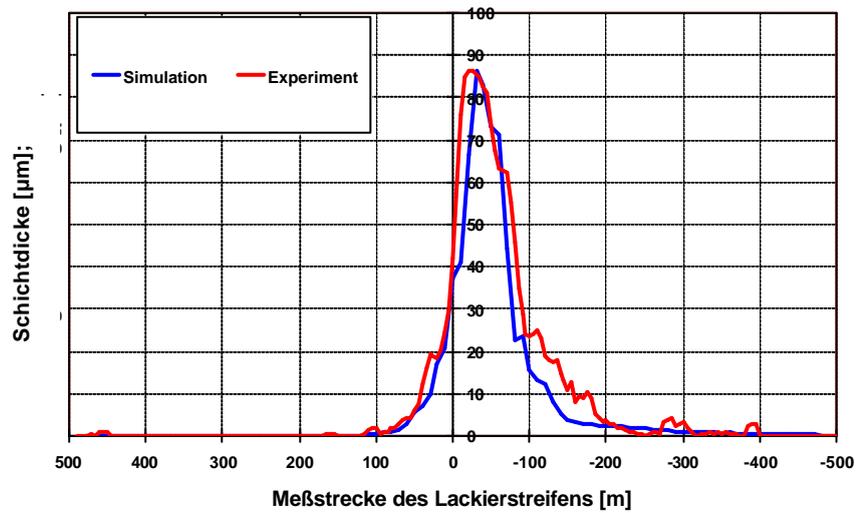
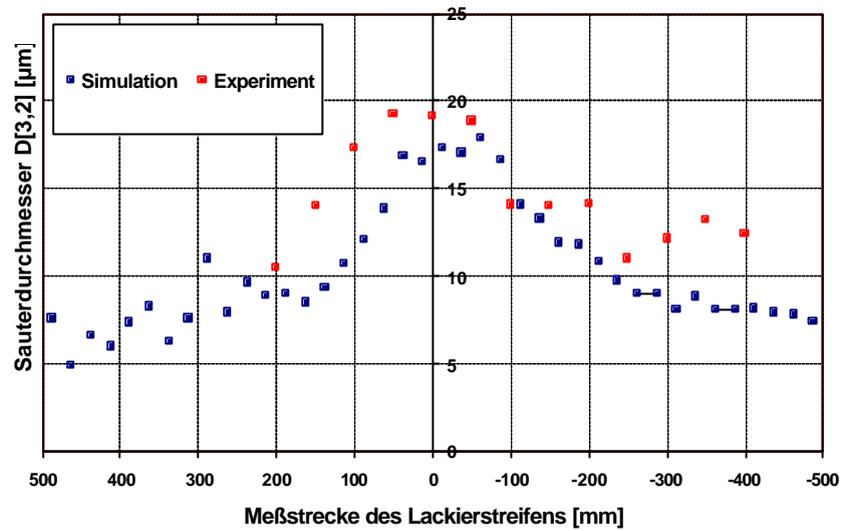
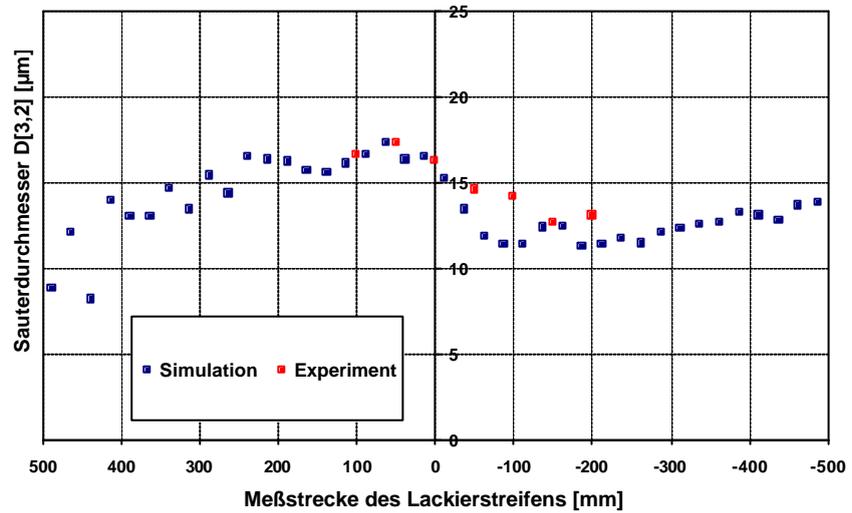


Abb. 3.27: Vergleich der dynamischen Sprühprofile zwischen Simulation und Experiment

v_a : 0 m/s;
 v_i : 45 m/s.



v_a : 5 m/s;
 v_i : 27 m/s.



v_a : 13 m/s;
 v_i : 0 m/s.

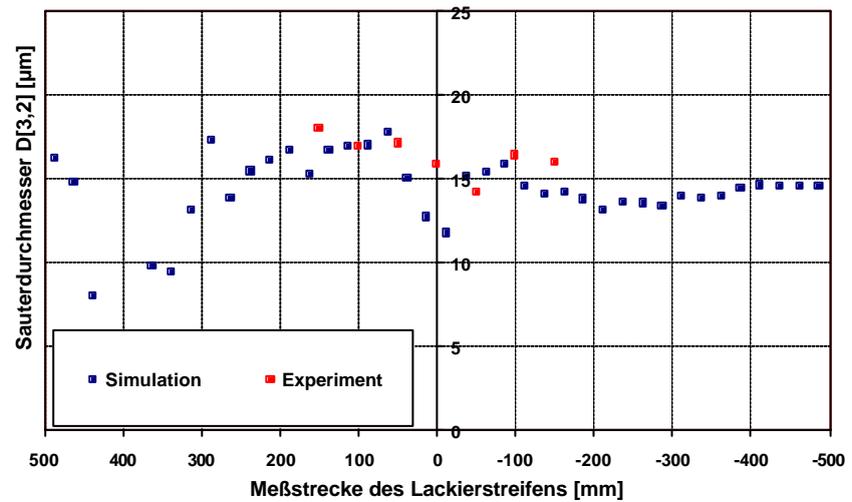


Abb. 3.28: Vergleich gemessener und berechneter örtlicher Partikelgrößenkennwerte innerhalb der dynamischen Schichtdickenverteilung

3.3.3 Weiterführende Untersuchungen mit dem Pistolenprototyp

In abschließenden Versuchen wurde getestet, inwiefern die Ablenkkörpergeometrie auf die Variationsbreite der Sprühwolkenausdehnung Einfluss nimmt. Getestet werden Pralltellerkegel mit 17 mm, 25 mm und 32 mm und ein Ringteller mit 20 mm Durchmesser. Der oben beschriebene Vergleich zwischen Experiment und Simulation wurde mit einem Prallteller mit 17 mm Durchmesser durchgeführt.

Die auf den Sb50-Wert bezogenen Ergebnisse zeigen, dass bei einem Prallteller von 17 mm Durchmesser die Ausdehnung der Pulverwolke etwa um den Faktor 2,5 variiert werden kann. Die Variationsbreite steigt mit zunehmendem Pralltellerdurchmesser an und beträgt bei einem 32 mm Prallteller ca. 4. Die größte Dynamik ergibt sich für einen Ringteller mit 20 mm Durchmesser, wobei die Pulverwolke um den Faktor 5 variiert werden kann. In diesem Fall drückt vor allem die Innenringluft die Pulverwolke auseinander (Abb. 3.29 und 3.30).

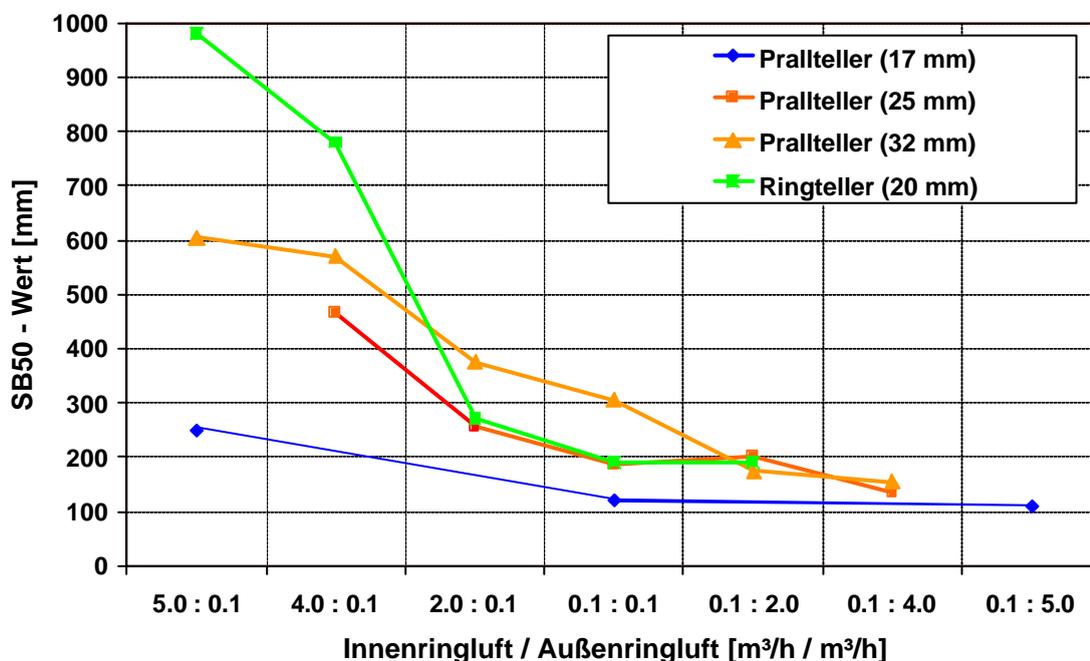


Abb. 3.29: Variation der Pulversprühwolke bei verschiedenen Verteilungskörper

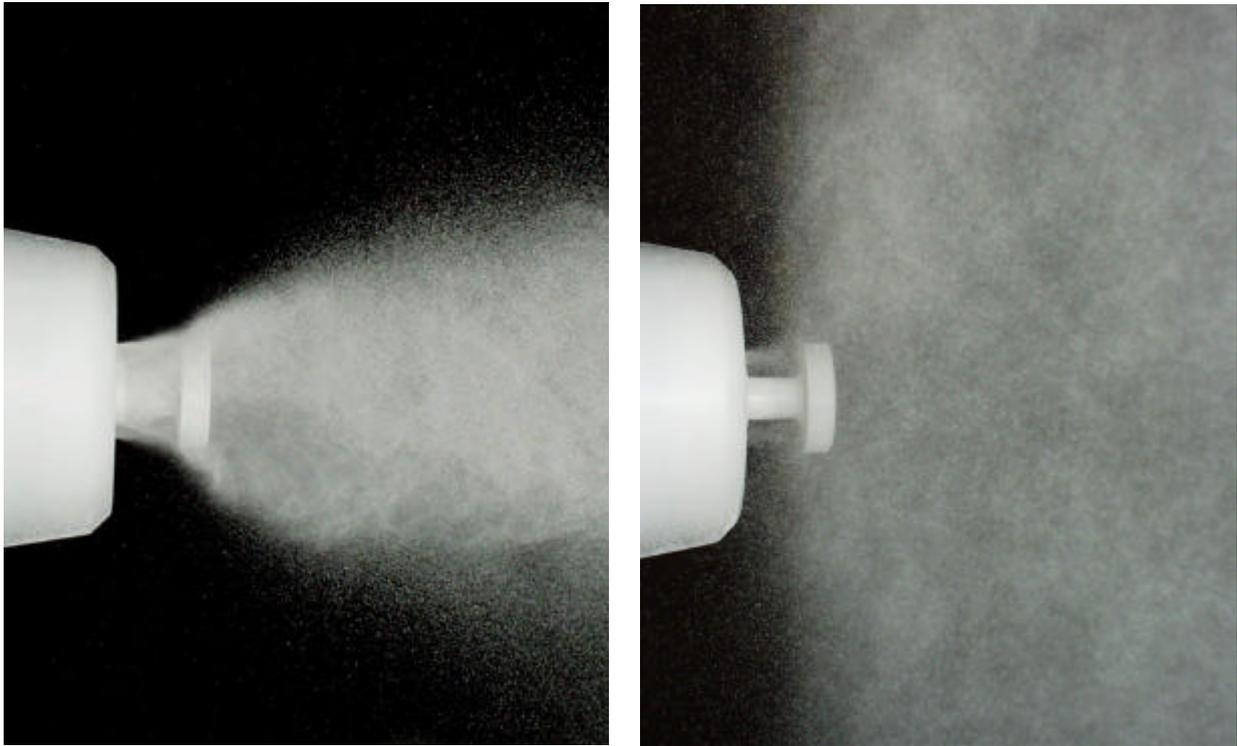


Abb. 3.30: Stufenlose Sprühwolkensteuerung vom engen zum weiten Pulverstrahl (Ringteller)

Es kann dabei von einer kleinen Sprühwolke, wie sie z.B. bei einer konventionellen Pistole mit kleinem Prallteller (Durchmesser 17 mm) entsteht, stufenlos bis zu einer breiten Sprühwolke, wie sie z.B. bei einer Pulverglocke entsteht, variiert werden. Eine noch breitere Pulversprühwolke wäre auch mit größeren Ringtellern kaum möglich (Abb. 3.29 und Abb. 3.30).

Für den Sonderfall der sehr schmalen Profile, wie sie z.B. bei der punktuellen Beschichtung oder bei der Nahtabdichtung nötig sind, kann man kleinere Ringteller (Durchmesser 12 mm und 15 mm) einsetzen.

In der Bilderreihe Abb. 3.31 bis 3.34 ist die Partikelseparierung dokumentiert. Hier fällt auf, dass bei besonders kleinen Pulversprühwolken, d.h. bei kleinen Verteilungskörpern oder bei besonders hohen Außenringlüften bei gleichzeitig kleinen Innenringlüften, die Separierung geringer ist. Bei kleinen, stark in Richtung des Werkstückes ausgerichteten, Sprühwolken werden besonders die feinen Pulverpartikel unempfindlicher auf die Kabinensinkluft und auf die Schwerkraft reagieren und werden dadurch weniger abgelenkt.

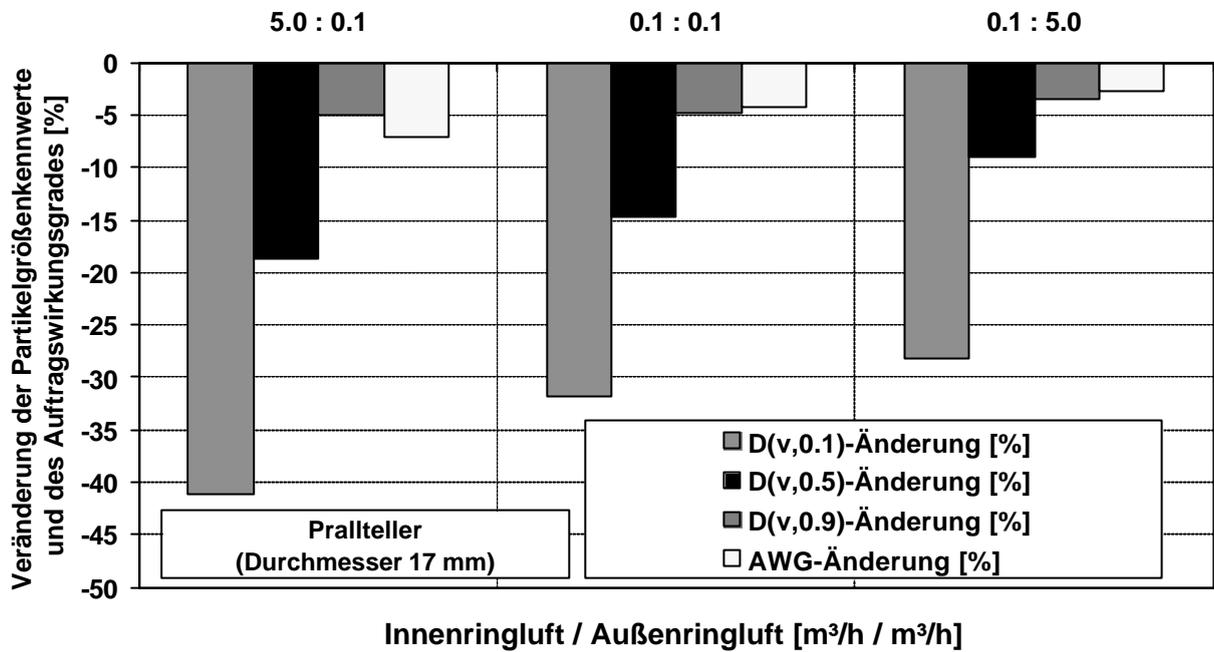


Abb. 3.31: Einfluss der Steuerlüfte auf die Partikelseparierung bei verschiedenen Verteilungskörpern (Prallteller, Durchmesser 17 mm)

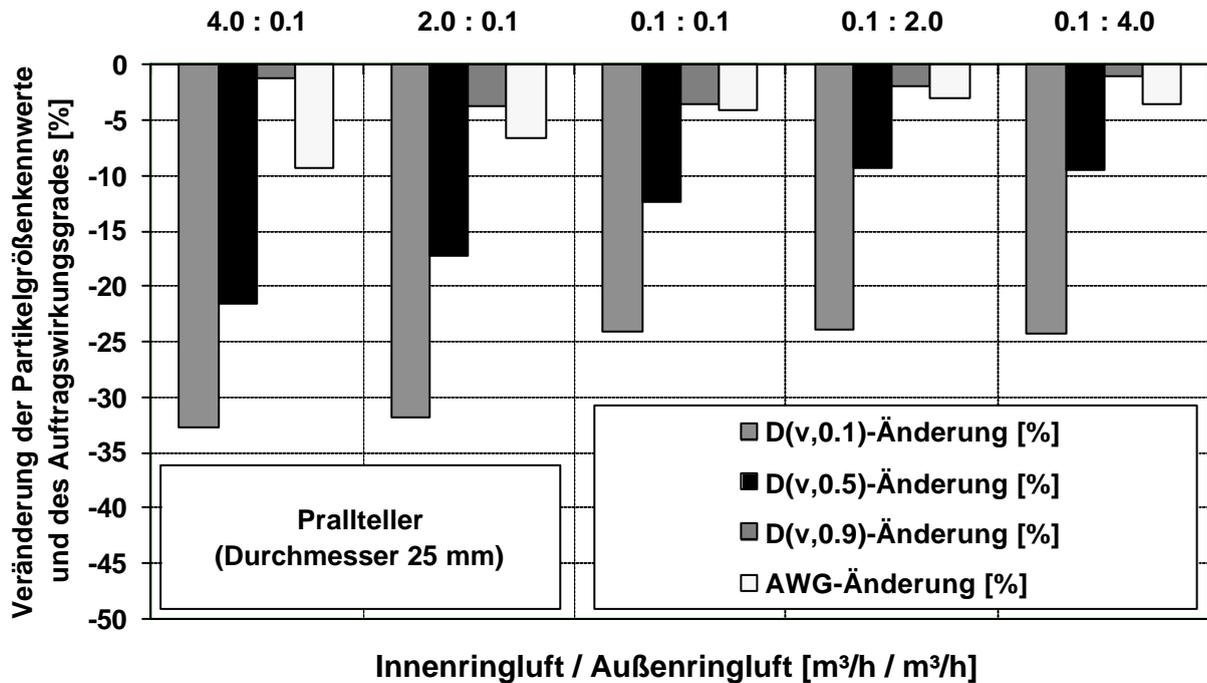


Abb. 3.32: Einfluss der Steuerlüfte auf die Partikelseparierung bei verschiedenen Verteilungskörpern (Prallteller, Durchmesser 25 mm)

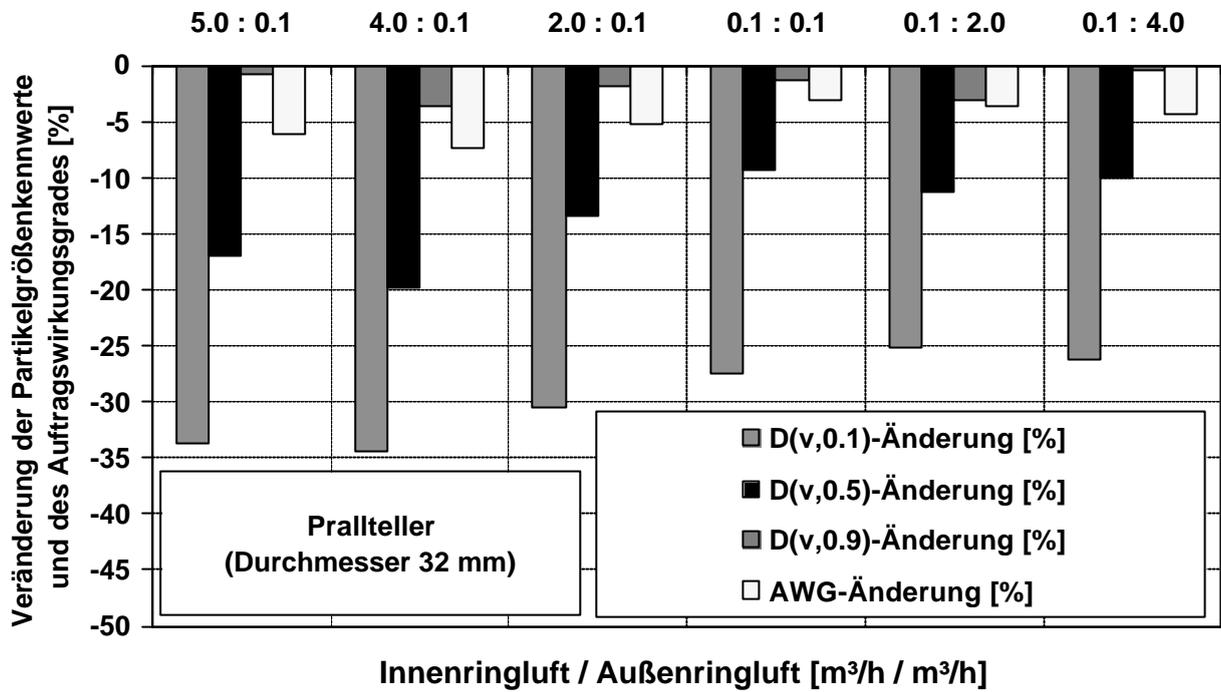


Abb. 3.33: Einfluss der Steuerlüfte auf die Partikelseparierung bei verschiedenen Verteilungskörpern (Prallteller, Durchmesser 32 mm)

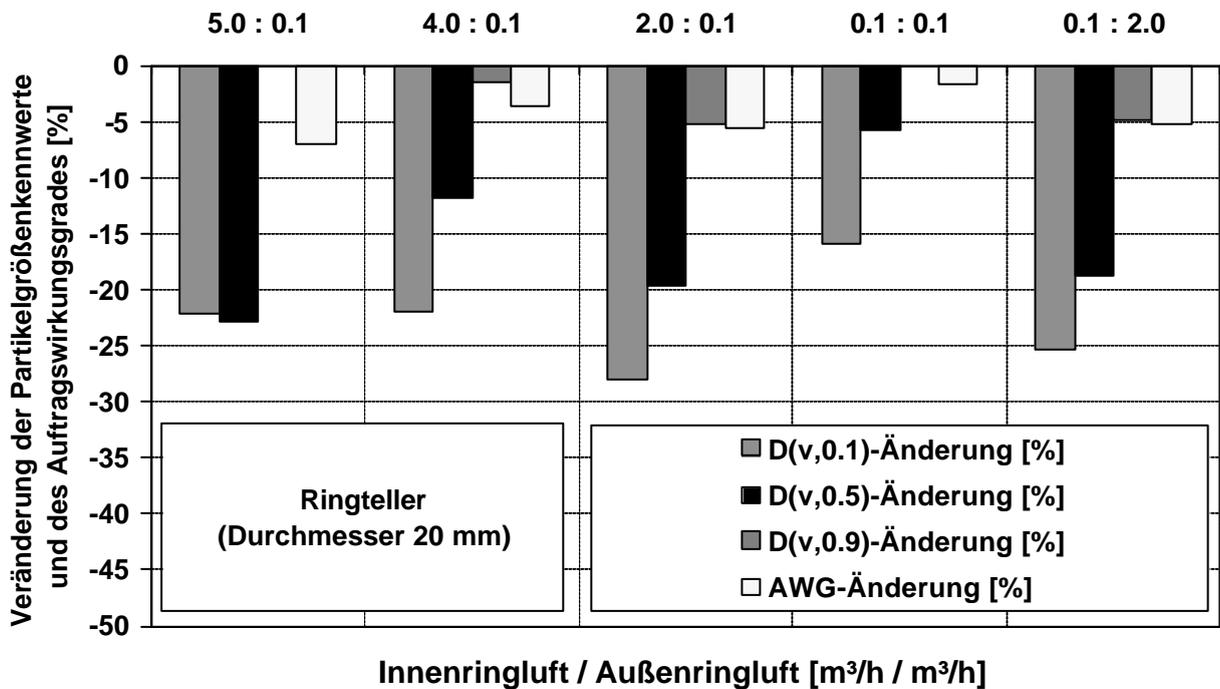


Abb. 3.34: Einfluss der Steuerlüfte auf die Partikelseparierung bei verschiedenen Verteilungskörpern (Ringteller, Durchmesser 20 mm)

Unabhängig von der Pulverwolkengröße, also von den Steuerluftvolumenströmen, ist speziell beim Ringteller die Partikelseparierung bei allen Einstellungen günstig. Offensichtlich werden die Pulverpartikel hier am Ringteller stark durchmischt und verteilen sich homogen in der Pulverwolke. Infolge des Durchmischens der Pulverwolke durch die Innenringluft werden Rückströmungen der Pulverpartikel in Axialrichtung, wie sie z.B. beim konventionellen Prallteller durch Druck- und Geschwindigkeitsdifferenzen entstehen, vermieden.

Beim Erst-Auftragswirkungsgrad sind die Zusammenhänge etwas einfacher. Je kleiner die Pulversprühwolke ist, desto größer ist der Erst-Auftragswirkungsgrad. Eine kleine Sprühwolke wird durch eine hohe Außenringluft bei gleichzeitig kleiner Innenringluft erzeugt. Beim Vergleich von Prallteller und Ringteller zeigt sich, dass die Steigung der Anströmfläche im Gegensatz zum absoluten Durchmesser des Ablenkkörpers eine sehr wichtige Rolle spielt. Je steiler diese ist, desto schlechter der Auftragswirkungsgrad. Besonders bei kleinen Pralltellern ist diese Anströmfläche steil. Der Ringteller stellt mit einem Anströmwinkel von 90° den Grenzfall dar. Deshalb macht es auch keinen Sinn, noch größere Ringteller einzusetzen, um die Ausdehnung der Pulverwolke noch weiter zu erhöhen (Abb. 3.35).

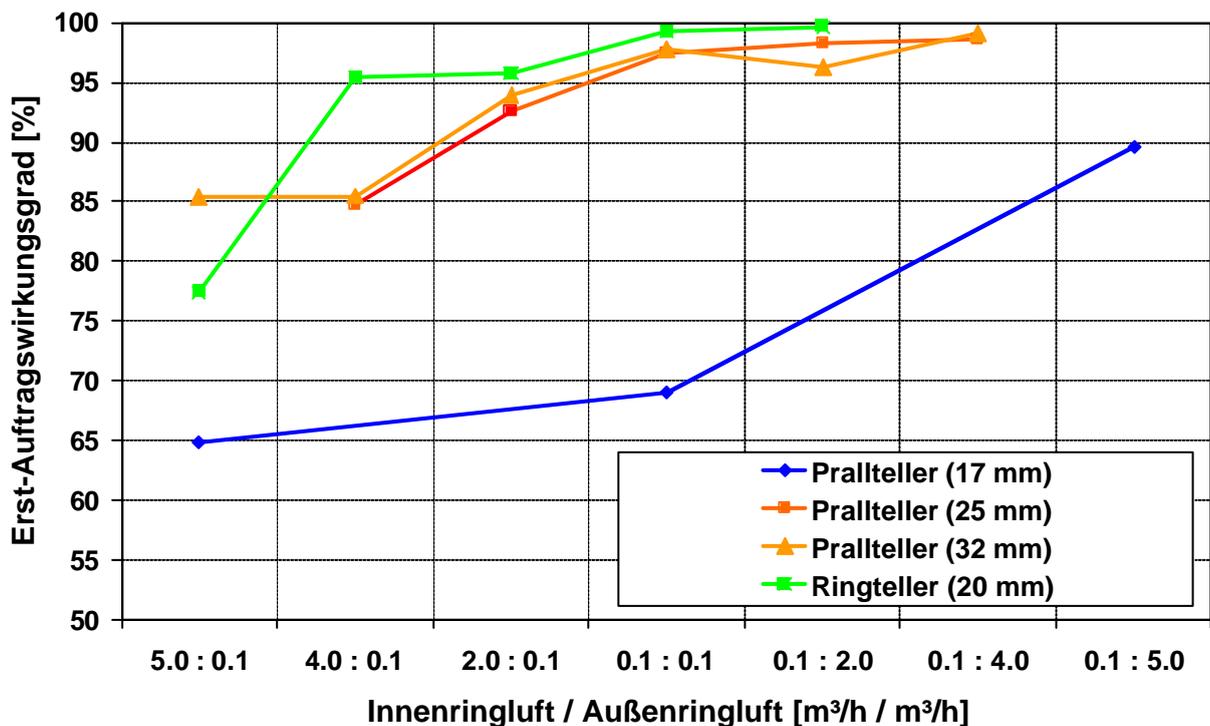


Abb. 3.35: Einfluss der Steuerlüfte und der Verteilungskörper auf den Erst-Auftragswirkungsgrad

4 Ausblick auf weitere Arbeiten

4.1 Genauigkeitsanforderungen

Für eine gleichmäßige und rotationssymmetrische Verteilung der Pulverwolke durch innere und äußere Steuerlüfte müssen Abmessung und Form (Rundheit und Koaxialität) der Strömungskanäle der Steuerlüfte sowie die Oberflächen der Strömungskanäle bestimmte Genauigkeitsanforderungen, ähnlich wie bei den Lackierpistolen im Nasslackbereich, erfüllen. Daher sind für diese Bauteile Toleranzen vorzugeben. Als besonders empfindlich erweist sich dabei der Innenringkanal mit seinen Bauteilen.

Mit Hilfe der Strömungssimulation wurde daher getestet, wie empfindlich die Sprühwolke auf geringe Verschiebungen des Innenringsteges reagiert. Bereits eine Verschiebung des Innenringsteges von 0,1 mm nach oben verursacht eine Asymmetrie der Sprühwolke, die in diesem Fall stärker nach unten abgelenkt wird. Wird der Innenringsteg 0,2 mm nach oben verschoben, weicht die Sprühwolke fast vollständig nach unten aus. Abb. 3.36 zeigt dazu die Ergebnisse der Strömungssimulation.

In erster Näherung können für die Bauteile des Innen- und Ausringkanals folgende Maßtoleranzen festgelegt werden: Durchmesser bzw. Rundheit der Kanäle ca. $\pm 0,01$ mm. Die Koaxialität der Innen- und Außenringkanal muss ebenfalls mit einem Toleranzmaß versehen werden. Vorgeschlagen wird hier für den gesamten Bereich des Innenringsteges bis zur Halterung (ca. 40 mm Länge) ein Wert von $\pm 0,05$ mm. Notfalls muss der Abstand zwischen Halterung und Strömungsaustritt verkleinert werden.

Für die übrigen Bauteile gelten allgemeine Form- und Maßtoleranzen (Freimaßtoleranzen).

Die genauen Toleranzen der Bauteile müssen beim Bau weiterer Pistolen mit einem Gerätehersteller abgeklärt werden.

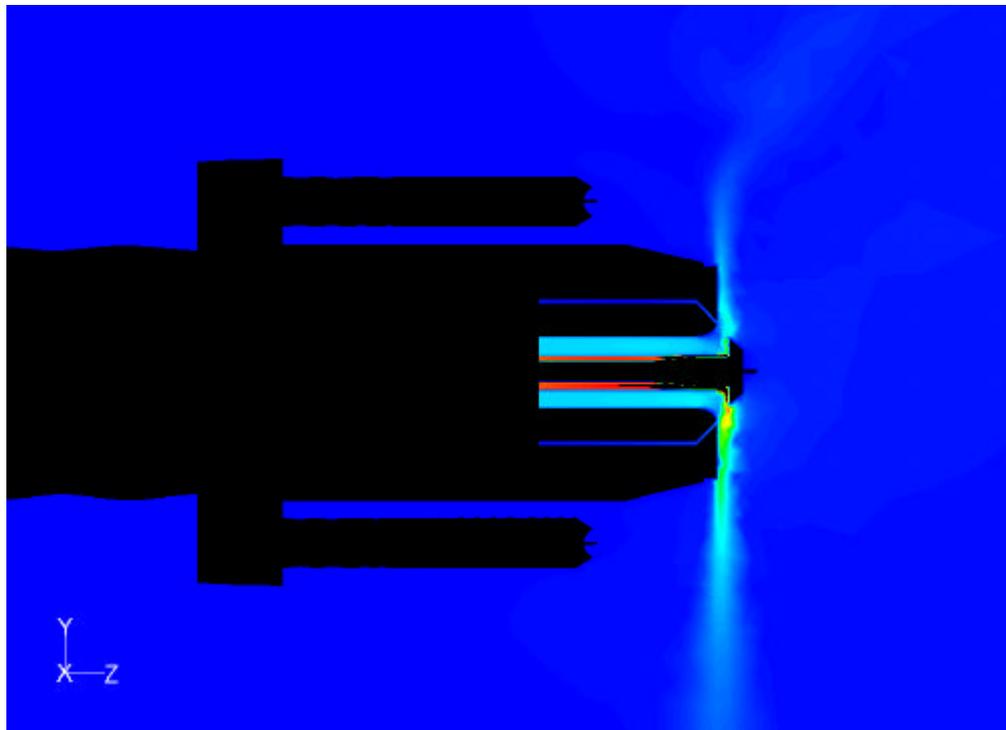
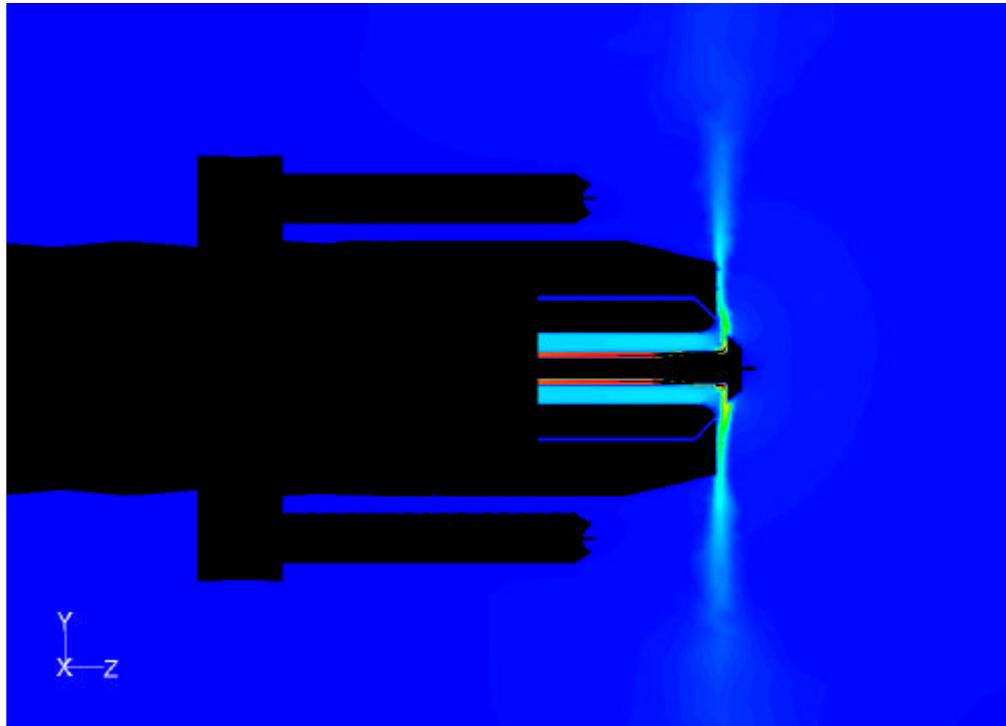


Abb. 3.36: Einfluss der Koaxialität des Innenstegs auf die Sprühwolke – oben genaue Fertigung und unten Innensteg um 0,2 mm nach oben versetzt

4.2 Langzeitversuche bei einem Anwender

Zur Verifikation der Praxistauglichkeit müssen mit der Pistole sogenannte Langzeittests durchgeführt werden, bei denen vor allem die Handhabung der Pistole, der Verschleiß der Pistolenbauteile und die Verschmutzungsneigung der Pulverpistole zu prüfen sind.

In Bezug auf die Handhabung der Pistole sollte darauf geachtet werden, dass die Bauteile nicht allzu leicht beschädigt werden können, d.h. die Pistole bzw. die Bauteile der Pistole sollten eine gewisse Robustheit aufweisen. Die Einzelteile der Pistole sollten sich ohne zusätzliches Werkzeug einfach montieren bzw. demontieren lassen. Die Reinigung der Pistole und ihrer Einzelteile muss möglichst einfach gehalten werden können. Ideal wäre ein einfaches Abblasen der Pistole mit Druckluft.

Bei Beschichtungsvorgängen, insbesondere bei vertikalen Beschichtungen, sollte die Verschmutzungsneigung in und außerhalb der Pistole so gering wie möglich sein. Vor allem Pulverablagerungen an den Elektroden, am Verteilungskörper oder in Strömungsträumen innerhalb der Pistole müssen verhindert werden, da sich dieses Pulver fallweise ablösen kann und auf dem Werkstück zu sogenannten „Pulverspucker“ führen kann.

5 Literatur

- [01] Cudazzo, M.; Hoffmann, U.; Hruschka, R.; Obst, M.; Pulli, K.; Stroheck, U.: „Untersuchung der Einflußgrößen und ihrer Zusammenhänge beim Pulverlackkreislauf“; Abschlußbericht; Projektträger: Deutsches Forschungszentrum für Luft- und Raumfahrt e.V., Bonn; Förderkennzeichen: 01 ZH 9310/8; Koordinator: Deutsche Forschungsgesellschaft für Oberflächenbehandlung e.V. (DFO), Düsseldorf; durchführende Stelle: Fraunhofer IPA, Stuttgart
- [02] Cudazzo, M.; Knofe, R.; Pulli, K.; Stroheck, U.: „Pulver-Rückgewinnung bei aktuellen und neuen Anwendungen“; Abschlußbericht; Projektträger: Deutsches Forschungszentrum für Luft- und Raumfahrt e.V., Bonn; Förderkennzeichen: 01 RV 9616/0; Koordinator: Deutsche Forschungsgesellschaft für Oberflächenbehandlung e.V. (DFO), Düsseldorf; durchführende Stelle: Fraunhofer IPA, Stuttgart
- [03] Ondratschek, D.; Hoffmann, U.; Eichhorn, J.; Hruschka, R.: „Entwicklung von fertigungstechnischen Maßnahmen zur Anwendung elektrostatischer Lackierverfahren für Kunststoffteile“; Abschlußbericht Institut Industrielle Fertigung und Fabrikbetrieb Universität Stuttgart; Stuttgart, September 1998
- [04] Stroheck, U.: „Pulverbeschichten“; Jahrbuch für Lackierbetriebe 2002; Vincentz Verlag, Hannover; Seite 206–226
- [05] Bauch, H.: „Auflademechanismen in Pulversprühgeräten und ihr Einfluss auf die physikalischen Prozesse bei der Schichtbildung“; Schriftenreihe Praxis Forum; EPS-Praxis 1989, Bad Nauheim, Seite 16-33
- [06] Ye, Q.; Steigleder, T.; Scheibe, A.; Domnick, J.: Numerical simulation of the electrostatic powder coating process with a corona spray gun, *Journal of Electrostatics*, 54 (2002), 189-205.