Optimierung der Pulverlackapplikation durch Anwendung experimenteller und numerischer Untersuchungsverfahren

Von der Fakultät für Maschinenbau der Universität Stuttgart zur Erlangung der Würde eines Doktor-Ingenieurs (Dr.-Ing.) genehmigte Abhandlung

Vorgelegt von

Dipl.-Ing. Karlheinz Pulli

aus Besigheim

Hauptberichter:	Univ.-Prof. Dr.-Ing. Prof. E.h. Dr.-Ing. E.h. Dr. h.c. mult. E. Westkämper
Mitberichter:	Prof. Dr.-Ing. habil. W. Kleber
Tag der mündlichen Prüfung:	07. August 2006

Institut für Industrielle Fertigung und Fabrikbetrieb der Universität Stuttgart

2006

IPA-IAO Forschung und Praxis

Berichte aus dem
Fraunhofer-Institut für Produktionstechnik und
Automatisierung (IPA), Stuttgart,
Fraunhofer-Institut für Arbeitswirtschaft und
Organisation (IAO), Stuttgart,
Institut für Industrielle Fertigung und
Fabrikbetrieb (IFF), Universität Stuttgart
und Institut für Arbeitswissenschaft und
Technologiemanagement (IAT), Universität Stuttgart

Herausgeber:
Univ.-Prof. Dr.-Ing. Prof. E.h. Dr.-Ing. E.h. Dr. h.c. mult. Engelbert Westkämper
und
Univ.-Prof. Dr.-Ing. habil. Prof. E.h. mult. Dr. h.c. mult. Hans-Jörg Bullinger
und
Univ.-Prof. Dr.-Ing. Dieter Spath

Universität Stuttgart
Institut für Industrielle Fertigung und Fabrikbetrieb

Fraunhofer Institut Produktionstechnik und Automatisierung

Karlheinz Pulli

Optimierung der Pulverlackapplikation durch Anwendung experimenteller und numerischer Untersuchungsverfahren

Nr. 443

JOST-JETTER VERLAG
Fachverlag · 71296 Heimsheim

Dr.-Ing. Karlheinz Pulli
Fraunhofer-Institut für Produktionstechnik und Automatisierung (IPA), Stuttgart

Univ.-Prof. Dr.-Ing. Prof. E.h. Dr.-Ing. E.h. Dr. h.c. mult. Engelbert Westkämper
ord. Professor an der Universität Stuttgart
Fraunhofer-Institut für Produktionstechnik und Automatisierung (IPA), Stuttgart

Univ.-Prof. Dr.-Ing. habil. Prof. E.h. mult. Dr. h.c. mult. Hans-Jörg Bullinger
ord. Professor an der Universität Stuttgart
Präsident der Fraunhofer-Gesellschaft, München

Univ.-Prof. Dr.-Ing. Dieter Spath
ord. Professor an der Universität Stuttgart
Fraunhofer-Institut für Arbeitswirtschaft und Organisation (IAO), Stuttgart

D 93

ISBN 3-936947-96-1 Jost Jetter Verlag, Heimsheim

Dieses Werk ist urheberrechtlich geschützt. Die dadurch begründeten Rechte, insbesondere die der Übersetzung, des Nachdrucks, des Vortrags, der Entnahme von Abbildungen und Tabellen, der Funksendung, der Mikroverfilmung oder der Vervielfältigung auf anderen Wegen und der Speicherung in Datenverarbeitungsanlagen, bleiben, auch bei nur auszugsweiser Verwertung, vorbehalten. Eine Vervielfältigung dieses Werkes oder von Teilen dieses Werkes ist auch im Einzelfall nur in den Grenzen der gesetzlichen Bestimmungen des Urheberrechtsgesetzes der Bundesrepublik Deutschland vom 9. September 1965 in der jeweils gültigen Fassung zulässig. Sie ist grundsätzlich vergütungspflichtig. Zuwiderhandlungen unterliegen den Strafbestimmungen des Urheberrechtsgesetzes.
© Jost Jetter Verlag, Heimsheim 2006.
Printed in Germany.

Die Wiedergabe von Gebrauchsnamen, Handelsnamen, Warenbezeichnungen usw. in diesem Werk berechtigt auch ohne besondere Kennzeichnung nicht zu der Annahme, dass solche Namen im Sinne der Warenzeichen- und Markenschutz-Gesetzgebung als frei zu betrachten wären und daher von jedermann benutzt werden dürften.

Sollte in diesem Werk direkt oder indirekt auf Gesetze, Vorschriften oder Richtlinien (z. B. DIN, VDI, VDE) Bezug genommen oder aus ihnen zitiert worden sein, so kann der Verlag keine Gewähr für die Richtigkeit, Vollständigkeit oder Aktualität übernehmen. Es empfiehlt sich, gegebenenfalls für die eigenen Arbeiten die vollständigen Vorschriften oder Richtlinien in der jeweils gültigen Fassung hinzuzuziehen.

Druck: printsystem GmbH, Heimsheim

Geleitwort der Herausgeber

Über den Erfolg und das Bestehen von Unternehmen in einer marktwirtschaftlichen Ordnung entscheidet letztendlich der Absatzmarkt. Das bedeutet, möglichst frühzeitig absatzmarktorientierte Anforderungen sowie deren Veränderungen zu erkennen und darauf zu reagieren.

Neue Technologien und Werkstoffe ermöglichen neue Produkte und eröffnen neue Märkte. Die neuen Produktions- und Informationstechnologien verwandeln signifikant und nachhaltig unsere industrielle Arbeitswelt. Politische und gesellschaftliche Veränderungen signalisieren und begleiten dabei einen Wertewandel, der auch in unseren Industriebetrieben deutlichen Niederschlag findet.

Die Aufgaben des Produktionsmanagements sind vielfältiger und anspruchsvoller geworden. Die Integration des europäischen Marktes, die Globalisierung vieler Industrien, die zunehmende Innovationsgeschwindigkeit, die Entwicklung zur Freizeitgesellschaft und die übergreifenden ökologischen und sozialen Probleme, zu deren Lösung die Wirtschaft ihren Beitrag leisten muss, erfordern von den Führungskräften erweiterte Perspektiven und Antworten, die über den Fokus traditionellen Produktionsmanagements deutlich hinausgehen.

Neue Formen der Arbeitsorganisation im indirekten und direkten Bereich sind heute schon feste Bestandteile innovativer Unternehmen. Die Entkopplung der Arbeitszeit von der Betriebszeit, integrierte Planungsansätze sowie der Aufbau dezentraler Strukturen sind nur einige der Konzepte, welche die aktuellen Entwicklungsrichtungen kennzeichnen. Erfreulich ist der Trend, immer mehr den Menschen in den Mittelpunkt der Arbeitsgestaltung zu stellen - die traditionell eher technokratisch akzentuierten Ansätze weichen einer stärkeren Human- und Organisationsorientierung. Qualifizierungsprogramme, Training und andere Formen der Mitarbeiterentwicklung gewinnen als Differenzierungsmerkmal und als Zukunftsinvestition in *Human Resources* an strategischer Bedeutung.

Von wissenschaftlicher Seite muss dieses Bemühen durch die Entwicklung von Methoden und Vorgehensweisen zur systematischen Analyse und Verbesserung des Systems Produktionsbetrieb einschließlich der erforderlichen Dienstleistungsfunktionen unterstützt werden. Die Ingenieure sind hier gefordert, in enger Zusammenarbeit mit anderen Disziplinen, z. B. der Informatik, der Wirtschaftswissenschaften und der Arbeitswissenschaft, Lösungen zu erarbeiten, die den veränderten Randbedingungen Rechnung tragen.

Die von den Herausgebern langjährig geleiteten Institute, das

- Fraunhofer-Institut für Produktionstechnik und Automatisierung (IPA),
- Fraunhofer-Institut für Arbeitswirtschaft und Organisation (IAO),
- Institut für Industrielle Fertigung und Fabrikbetrieb (IFF), Universität Stuttgart,
- Institut für Arbeitswissenschaft und Technologiemanagement (IAT), Universität Stuttgart

arbeiten in grundlegender und angewandter Forschung intensiv an den oben aufgezeigten Entwicklungen mit. Die Ausstattung der Labors und die Qualifikation der Mitarbeiter haben bereits in der Vergangenheit zu Forschungsergebnissen geführt, die für die Praxis von großem Wert waren. Zur Umsetzung gewonnener Erkenntnisse wird die Schriftenreihe „IPA-IAO - Forschung und Praxis“ herausgegeben. Der vorliegende Band setzt diese Reihe fort. Eine Übersicht über bisher erschienene Titel wird am Schluss dieses Buches gegeben.

Dem Verfasser sei für die geleistete Arbeit gedankt, dem Jost Jetter Verlag für die Aufnahme dieser Schriftenreihe in seine Angebotspalette und der Druckerei für saubere und zügige Ausführung. Möge das Buch von der Fachwelt gut aufgenommen werden.

Engelbert Westkämper Hans-Jörg Bullinger Dieter Spath

Vorwort

Die vorliegende Dissertation entstand während meiner Tätigkeit als wissenschaftlicher Mitarbeiter am Institut für Industrielle Fertigung und Fabrikbetrieb (IFF) der Universität Stuttgart.

Herrn Univ.-Prof. Dr.-Ing. Prof. E.h. Dr.-Ing. E.h. Dr. h.c. mult. E. Westkämper danke ich für seine fachliche Unterstützung sowie für die wertvollen Hinweise und anregenden Diskussionen, die wesentlich zu dieser Arbeit beigetragen haben.

Herrn Prof. Dr.-Ing. habil. W. Kleber danke ich für die kritische Durchsicht des Berichtes und für seine Bereitschaft zum Mitbericht.

Darüber hinaus möchte ich mich bei allen Mitarbeiterinnen und Mitarbeitern des Instituts für Industrielle Fertigung und Fabrikbetrieb (IFF) der Universität Stuttgart und des Fraunhofer Instituts für Produktionstechnik und Automatisierung (IPA) in Stuttgart bedanken, die durch ihre Unterstützung und anregende Kritik zum Gelingen dieser Arbeit beigetragen haben. Mein besonderer Dank gilt den Herren Prof. Dr.-Ing. J. Domnick, Dr.-Ing. A. Scheibe, Dipl.-Ing. U. Strohbeck, Dipl.-Ing. (FH) M. Cudazzo, Dr. rer. nat. M. Schneider und Frau Dr.-Ing. Q. Ye.

Stuttgart, 2006 Karlheinz Pulli

Inhaltsverzeichnis

0	Einleitung	13
1	Stand der Forschung	15
2	Aufbau und Anwendung eines Prüfinstrumentariums	18
2.1	Wirkungsschema des Pulverlack-Kreislaufprozesses	18
2.2	Prüfinstrumentarium	21
2.2.1	Überwachung der Prozesssteuergrößen	21
2.2.2	Entwicklung eines Testverfahrens für Pulversprühorgane	22
2.2.3	Entwicklung einer Simulationsmethode zur Vorhersage des Kreislaufverhaltens einer Pulveranlage auf der Basis verschiedener Applikationsversuche	26
2.2.3.1	Simulationsmethode	26
2.2.3.2	Erweiterung des Simulationsmodells	32
2.2.3.3	Vergleich des KAP-Sim-Verfahrens mit Experiment	35
2.2.4	Messverfahren zur Bestimmung der partikelgrößenbezogenen Ladungsverteilung im Sprühstrahl	38
3	Applikationstechnische Optimierungsmaßnahmen	40
3.1	Pulversprühdüsenoptimierung	41
3.1.1	Entwicklung separierungsarmer Pulversprühdüsen mit nicht veränderbarem Sprühbild – aerodynamischer Lösungsansatz	41
3.1.2	Entwicklung separierungsarmer Pulversprühdüsen mit nicht veränderbarem Sprühbild – elektrodynamischer Lösungsansatz	49
3.1.3	Entwicklung separierungsarmer Pulversprühdüsen mit nicht veränderbarem Sprühbild – aerodynamischer und elektrodynamischer Lösungsansatz	51
3.2	Entwicklung separierungsarmer Pulverlacksysteme	53
3.3	Einsatz optimierter Rückgewinnungsmethoden	55
3.3.1	Ergebnisse zum bisherigen Stand der Technik von Rückgewinnungssystemen	57
3.3.2	Untersuchung des Pulverkreislaufverhaltens bei verschiedenen Rückgewinnungssystemen	57

4	Entwicklung variabler Pulversprühpistolen	59
4.1	Physikalische Wirkungsprinzipien, Grobkonzipierung und Lösungsfindung	60
4.2	Elektrostatische Lösungskonzepte	61
4.2.1	Steuerelektroden bei der Korona-Aufladung	64
4.2.2	Einfluss der Steuerelektroden bei der Tribo-Aufladung	67
4.3	Strömungsmechanische Lösungskonzepte	72
4.3.1	Feinkonzipierung – Detaillierung des Lösungskonzeptes mit Hilfe der numerischen Simulation	74
4.3.2	Konstruktion und Bau des Pulversprühgerätes	80
4.3.3	Vergleich zwischen Simulation und Experiment	84
4.3.4	Abschließende Untersuchungen mit dem Pulversprühgerät und Ausblick auf künftige Arbeiten	88
5	Zusammenfassung	98
6	Summary	101
7	Literatur	104

Formelzeichen, Einheiten und Abkürzungen

Formelzeichen, Einheiten:

Sprühwolkenauswertung, Auftragswirkungsgradbestimmung:

AWG	[%]	Auftragswirkungsgrad, Erst-Auftragswirkungsgrad
$m_{Blech, ist}$	[kg]	tatsächlich abgeschiedene Pulvermasse auf Werkstück
$m_{Blech, max}$	[kg]	theoretisch maximal abscheidbare Pulvermasse auf Werkstück
$\dot{m}_{Pulver}$	[kg/s]	Pulvermassenstrom
l_{Blech}	[m]	Länge der Blechkante in Förderrichtung
l_{Spalt}	[m]	Lücke zwischen zwei Werkstücken in Förderrichtung
SB50-Wert	[m]	Profilbreite bei halber Schichtdicke

Kreislaufsimulation:

p_{kOv}	[%]	Fraktionsabscheidegrad der Kornklasse k des Overspraypulvers Ov
p_{kW}	[%]	Fraktionsabscheidegrad der Kornklasse k des Pulvers auf dem Werkstück W
n_{kO}	[kg]	Teilmasse der Kornklasse k des Originalpulvers O
n_{kOv}	[kg]	Teilmasse der Kornklasse k des Overspraypulvers Ov
n_{kW}	[kg]	Teilmasse der Kornklasse k des Pulvers auf dem Werkstück W
n_k	[kg]	Teilmasse der Kornklasse k des Kreislaufpulvers
t	[-]	Anzahl der Pulverkreisläufe nach Erreichen eines stabilen Pulverkreislaufes

Partikelgrößenmessung:

D(v,0.1)	[m]	Obergrenze des Partikelgrößen-Feinanteils (unterhalb dieses Grenzwertes liegen 10 % des Gesamtvolumens)
D(v,0.5)	[m]	Medianwert der Partikelgrößenverteilung
D(v,0.9)	[m]	Untergrenze des Partikelgrößen-Grobanteils (oberhalb dieses Grenzwertes liegen 10 % des Gesamtvolumens)
D[3,2]	[m]	Sauterdurchmesser

Ladungsmessung:

dm/dt	[kg/s]	Pulverdurchsatz
I	[A]	Ableitstrom
dQ/dt	[As/s]	spezifische Aufladung
dQ/dm	[As/kg]	massenspezifische Aufladung

Applikationstechnische Optimierungsmaßnahmen:

v_{PY}	[m/s]	Partikelgeschwindigkeit in Pistolenachsenrichtung
v_{PX}	[m/s]	radiale Geschwindigkeitskomponente
r_B	[m]	Radius der Lochtellerbohrungen um Düsenachse
d_B	[m]	Durchmesser der Lochtellerbohrung

Variable Pulverpistole, Korona- und Tribo-Aufladung:

SB50-Wert	[m]	Profilbreite bei halber Schichtdicke

Beschichtungs-Simulation:

v_a	[m/s]	Luftströmungsgeschwindigkeit im Außenringkanal der Pulverpistole
v_i	[m/s]	Luftströmungsgeschwindigkeit im Innenringkanal der Pulverpistole

Abkürzungen:

Prüfinstrumentarien:

AWG	Auftragswirkungsgrad
KAP-Sim-Methode	Kreislauf- und Applikations-Simulations-Methode
q/m-Methoden	Integrale Ladungsmessung
IQt-Verfahren	Verfahren zur Bestimmung der elektrokinetischen Aufladbarkeit
q/d-Verfahren	Ladungsspektrometer der Fa. Epping GmbH, Neufahrn

Pulverkreislaufsimulation:

KAP-Sim-Verfahren	Kreislauf- und Applikations-Simulations-Verfahren

Pulverlackmaterial:

EP-Mischpulver:	Epoxid-Polyester-Mischpulver

Neue Pulverpistolen:

SE	Steuerelektroden
PTFE	Poly-Tetra-Fluor-Ethylen
POM	Polyamid
IRL	Innenringluft
ARL	Außenringluft

Beschichtungs-Simulation:

DPM	Berechnungsmodell der Partikelbahnen, Discrete Phase Model
RNG	Berechnungsmodell für turbulente Luftströmung, Renormalization Group

0 Einleitung

Integrierte Umweltschutztechnik, d.h. Schadstoffreduzierung oder Belastungsvermeidung bereits während des Produktionsablaufs, gewinnt immer mehr an Bedeutung. Vorsorgender Umweltschutz löst verstärkt nachsorgende Umweltschutzmaßnahmen mehr und mehr ab. Auch in der Lackiertechnik ist diese Entwicklung zu beobachten. Für den produktionsintegrierten Umweltschutz gibt es dabei drei Ansatzpunkte:

- Veränderung der Einsatzstoffe (z.B. Ersatz lösemittelhaltiger Nasslacke durch Wasser- oder Pulverlack)
- Prozessoptimierung zur besseren Ausnutzung der Einsatz- und Hilfsstoffe
- Wiedereinsatz der Abfälle.

Die Vorteile des produktionsintegrierten Umweltschutzes sind eindeutig. Einzig die Pulverbeschichtung erfüllt dabei alle drei oben genannten Kriterien, da z.B. auch bei der Verwendung von Wasserlacken noch Restmengen an organischen Lösemitteln anfallen, die die Umwelt in Abhängigkeit des Fertigungsverfahrens belasten können. Zudem ist bei Nasslacken nur in Ausnahmefällen ein Recycling möglich. Im Vergleich dazu bietet die Pulverbeschichtung folgende Vorteile:

- keine VOC-Emissionen
- keine gefährlichen Luftverunreinigungen und somit
  keine zusätzlichen Anlagen zur Einhaltung umwelt- und sicherheitstechnischer Auflagen erforderlich (z.B. belüftete Abdunstzone)
- sehr hohe Materialausnutzung (bis zu 99 %) und nur sehr wenige und ungefährliche Abfälle
- minimierte Entsorgungskosten durch Wegfall von Lackschlamm und nasslacktypischen Abfällen bei der Anlagenreinigung (z.B. aus der Gitterrost-Entlackung)
- hoher Automatisierungsgrad
- hohe Investitions-, Betriebs- und Energiekostenvorteile beim Ersetzen einer Zweischicht-Nasslackierung durch eine Einschichtpulverlackierung
- höhere Widerstandsfähigkeit der Pulverlackschicht gegenüber Kratzer und Abrieb, Chemikalienbeständig, Korrosionsschutz.

Trotz dieser ökonomischer und ökologischer Vorraussetzungen werden z.B. in Westeuropa erst ca. 20 % der industriell lackierten Oberflächen mit Pulverlack beschichtet. Dies liegt daran, dass die Pulverlacktechnologie besonders in Branchen mit hohen Anforderungen an die Beschichtungsqualität Nachholbedarf besitzt und die Prozesssicherheit noch nicht den Stand der Nasslacktechnologie erreicht hat.

Das Ziel der vorliegenden Forschungsarbeit ist, die Problematik der Pulverbeschichtung im Produktionsprozess und die Hemmnis zur weiteren Verbreitung der Pulverbeschichtung aufzuführen, und die bisher weitgehend empirisch entwickelte Pulverbeschichtung durch systematische Anwendung experimenteller und numerischer Untersuchungsmethoden zu optimieren. Dabei muss zunächst die Problematik des Pulverbeschichtungsprozesses von der Dosierung bis hin zur Rückgewinnung genau verstanden werden.

Die Achillesferse bei der Pulverlackierung sind dabei die Pulversprühsysteme und das Pulverlackmaterial selbst (unterschiedliche Partikelgrößen). Die Materialausbeute, Beschichtungsqualität und das Recycling des Materials werden durch die Sprühsysteme im Wesentlichen beeinflusst. Dabei ist besonders die Pulverausbringung in Form einer Sprühwolke und die Auflademethode des Pulvers von zentraler Bedeutung.

Schwerpunkt der Forschungsarbeit sind experimentelle und numerische Optimierungsmaßnahmen beim Pulverlackkreislaufprozess, insbesondere die Weiter- und Neuentwicklungen der Pulversprühorgane sowie die Optimierung des Pulvermaterials und die Optimierung der Rückgewinnungsmethode.

1 Stand der Forschung

Pulverlacke kommen trotz ihrer Lösemittelfreiheit, der Vermeidung nasslacktypischer Abfälle (Lackschlamm, verschmutzte Filtermatten und Reinigungsmittel, Gitterrostentlackung) sowie der gegenüber dem Nasslack einfacheren Rückgewinnung und Kreislaufführung des Overspraypulvers bisher erst bei ca. der Hälfte aller potentiellen Anwendungen zum Einsatz.

Dies liegt zu einem erheblichen Teil an der nicht ausreichenden Produktionssicherheit der Pulverbeschichtung, insbesondere dann, wenn hohe Anforderungen an die dekorative Beschichtungsqualität, insbesondere in Verbindung mit zahlreichen Farbwechseln, gestellt werden. Optimierungspotenziale sind dabei vor allem die Pulverlack-Applikatoren, das Pulver-Rückgewinnungsverfahren und das Pulverlackmaterial selbst; bei letzterem vor allem das Partikelgrößenspektrum.

Bei den Pulver-Applikatoren ist die empfindliche Stelle die Düse zur Pulverausbringung. Bei den bisher entwickelten Systemen wurden keine Düsen- bzw. Sprühstrahloptimierungen hinsichtlich der Partikelseparierung gemacht, obwohl die Partikelseparierung im Pulverkreislauf das zentrale Problem darstellt, dessen Ursache im Wesentlichen von den Pulversprühorgandüsen ausgeht. Ein weiterer Nachteil der bisher auf dem Markt verfügbaren Pulversprühpistolen ist die nicht ausreichende Flexibilität bezüglich unterschiedlicher Werkstückgeometrien durch eine stufenlose Sprühstrahlformung. Im Vordergrund der bisherigen Entwicklungen stehen eher ein einfacher Aufbau bzw. eine einfache Reinigung der Sprühorgane sowie die Verhinderung von Pulveransinterungen im Pulverkanal und im Düsenbereich. Dies hat dazu geführt, dass bei den heutigen Sprühsystemen sehr einfach gestaltete Düsen verwendet werden, ohne die Möglichkeit die Sprühwolke u.a. auch zu Formen und zu Steuern [01], [02].

Andere wissenschaftliche Arbeiten in Verbindung mit elektrostatischen Pulversprühsystemen beschränken sich bisher auf grundsätzliche Betrachtungen, u.a. auf die Berechnung der Schichtdickenverteilung bei der Überlagerung von mehreren Sprühorganen bzw. einzelner Sprühstreifen bei gleichzeitiger Förderbahnbewegung und Hubbewegung des Sprühorgans [03], [04]. Auch die bisherigen in der Literatur beschriebenen Ansätze zur numerischen Simulation der elektrostatischen Pulverbeschichtungsprozesse stellen prinzipielle Betrachtungen unter vereinfachten Ansätzen (z.B. monodisperse Partikelverteilung) dar [05], [06], [07]. Ansätze zu konkreten konstruktiven Weiterentwicklungen von Pulversprühpistolen hinsichtlich eines separierungsarmen und flexiblen Sprühstrahls lassen sich aus diesen Arbeiten kaum ableiten.

Arbeiten über die numerische Simulation von Zweiphasenströmungen in anderen Bereichen wurden bereits in großer Anzahl veröffentlicht, u.a. über den pneumatischen Staubtransport in Rohren, z.B. [08] und über den partikelbezogenen Freistrahl, z.B. [09] und [10]. Auch diese Ergebnisse können nicht direkt auf die Strömungsproblematik bei der Pulverlack-Applikation übertragen werden, da bei diesen Simulationen nicht die elektrostatische Aufladung der Pulverpartikel berücksichtigt werden.

Experimentelle strömungstechnische Untersuchungen an Pulversprühorganen, die vom Fraunhofer Institut für Produktionstechnik und Automatisierung (IPA) in Zusammenarbeit mit den Universitäten Erlangen-Nürnberg und Halle-Wittenberg durchgeführt wurden, zeigen die Empfindlichkeit der Strömungsverhältnisse und der Verteilung des Pulvers in der Sprühwolke gegenüber den Zuströmbedingungen des Pulver-Luft-Gemisches im Sprühorgan. Bei der in dieser Forschungsarbeit eingesetzten numerischen Simulation müssen diese Bedingungen berücksichtigt werden [11], [12].

Vorschläge zur veränderbaren Sprühwolkenformung in der Pulversprühdüse sind vor allem in der Patentliteratur zu finden, z.B. [13], [14], [15]. Als bisher einziges kommerziell verfügbares System wurde von der Fa. Gema in den achtziger Jahren ein Sprühsystem auf den Markt gebracht, bei dem die Rundstrahldüse mittels des „Coanda-Effekts“ variabel aufgeweitet werden konnte [16]. Aufgrund von erheblichen Schwachstellen (geringe Reproduzierbarkeit der Sprühwolkenform, hoher Luftverbrauch) konnte sich das System nicht durchsetzten.

Zusatzelektroden am Pulversprühorgan zur Sprühstrahlformung sind bisher in der Praxis nicht anzutreffen. Da am Fraunhofer IPA solche Systeme im Flüssiglackbereich bereits erfolgreich eingesetzt wurden, sollen sie auch in der vorliegenden Forschungsarbeit bei der Pulverbeschichtung berücksichtigt werden [17]. Beim elektrostatischen Flüssiglacksprühen kann der Sprühstrahl mit solchen Zusatzelektroden allein durch Variation der angelegten Hochspannung in einem weiten Bereich verändert werden.

Bei der Pulverlack-Rückgewinnung haben sich überwiegend der Filter- und der Zyklonabscheider bewährt. Beide Systeme sind seit Jahrzehnten ausgiebig untersucht und optimiert worden. Bei den Filterabscheidern gibt es dazu ausführliche Untersuchungen von F. Löffler [18], W. Siegel [19], W. Steffens [20] und E. Smilge [21]. Die Zyklonabscheider wurden vor allem von W. Barth, W. Krambrock, E. Muschelknautz, J. Keuschnigg und G. Staudinger berechnet [22]-[28]. Bei der Pulverlack-Rückgewinnung wirken sich diese beiden Abscheidmethoden jedoch unterschiedlich stark auf das Kreislaufverhalten aus. Es ist bekannt dass bei Filtersystemen im gesättigten Zustand das Pulver nahezu vollständig zurückgewonnen wird, während beim Zyklon vor allem der Feinanteil über ein Tauchrohr abgeschieden wird, wobei das Overspraypulver eine Sichtung feiner Partikel erfährt, allerdings verbunden mit Pulververlust [29]-[30]. Als denkbare Alternative zum Zyklonabscheider könnte sich der Zyklonsichter erweisen, der zwar ähnlich arbeitet wie der Zyklon, die Partikel jedoch schärfer heraustrennt [31]-[34]. Andere Rückgewinnungsmethoden wie z.B. der Elektrofilter oder die Pulverzentrifuge haben sich aufgrund ihrer Komplexität bis heute in der Pulverlackiertechnik nicht durchgesetzt [35]-[37].

Bei der Pulverbeschichtung führt das komplexe Wechselspiel der elektrischen, aerodynamischen und massenbezogenen Kräfte dazu, dass für die meisten Beschichtungsfälle der Feinanteil, d.h. die Partikel unterhalb von 10 µm Größe kaum noch auf den Teilen abgeschieden werden, sondern überwiegend als Overspray zurückgewonnen werden. Es gibt dazu bereits eine Reihe von Untersuchungen [38]-[43]. In der Literatur wird deshalb auch vorgeschlagen, die Pulverlacke vor der Applikation zu sichten, d.h. zumindest einmal den Feinanteil zu reduzieren oder gleichzeitig auch den Grobanteil zu reduzieren, um bezüglich der Partikelgrößenverteilung maßgeschneiderte Pulverlacke herzustellen [31]-[34], [44]-[46]. Für den Pulverlackhersteller bedeutet dies jedoch Pulververlust, der minimal gehalten werden sollte. Welche Partikelgrößenverteilungen für das Pulver ideal sind und wie sich diese auf den Pulverkreislauf auswirken, ist weitgehend unbekannt; u.a. muss hier auch der Einfluss der chemischen Zusammensetzung der Pulverlacke beachtet werden und Pulverlacke wie Acrylate oder Primer oder gar Effektpulverlacke getrennt betrachtet werden.

2 Aufbau und Anwendung eines Prüfinstrumentariums

2.1 Wirkungsschema des Pulverlack-Kreislaufprozesses

Für eine zukünftig verstärkte Pulverlackierung im Bereich der hochproduktiven und qualitativ hochwertigen Lackierungen müssen die damit verbundenen hohen Anforderungen an die Prozesssicherheit erfüllt werden. Dies erfordert eine detaillierte Untersuchung aller Prozessschritte und Anlagenkomponenten bzw. die Verknüpfung derer komplexer Zusammenhänge. Abb. 2.1 zeigt anhand eines vereinfachten Wirkungsschemas die Vielzahl der dabei zu berücksichtigenden Verknüpfungen.

Schwerpunkte der im ersten Teil der Forschungsarbeit durchzuführenden Arbeiten zur Optimierung des Pulverlackierprozesses beziehen sich dabei auf:

- die Charakterisierung des Applikationsverhaltens von Pulversprühorganen, u.a. Anwendung eines neuen Testverfahrens zur Analyse des Sprühprofils
- die Beschreibung des Aufladeverhaltens von Pulversprühsystemen
- die Untersuchung des Kreislaufverhaltens unter Zuhilfenahme eines neu entwickelten Simulationsprogramms (KAP-Sim-Verfahren)
- die Umsetzung der entwickelten Methoden und Verfahren in die Praxis.

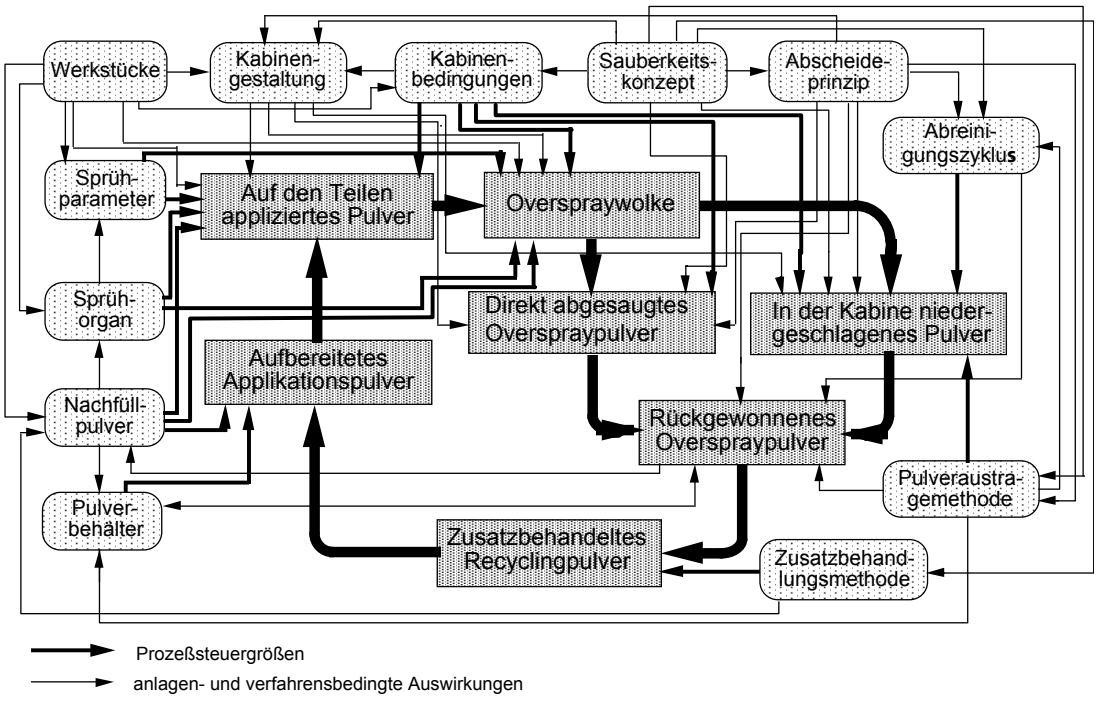


Abb. 2.1: Vereinfachtes Wirkungsschema der Prozesssteuergrößen und Randbedingungen beim Pulverlack-Kreislaufprozess [01]

Das Hauptmerkmal und zugleich ein wichtiger Vorteil der Pulverbeschichtung ist die fast vollständige Rückgewinnung des Lackoverspraypulvers, in der Regel durch eine Filter- oder Zyklon-Rückgewinnungsanlage. Trotz dieses Vorteils ergeben sich, u.a. durch das Pulverlackmaterial bedingt, einige Probleme beim Pulverlackierprozess. Während sich beim Nasslack die Lackiertröpfchen erst unmittelbar nach Verlassen des Sprühorgans bei der Entstehung der Sprühwolke ausbilden, und bezüglich Form und Abmessung weitgehend homogen sind, liegen beim Pulverlackierprozess die Partikelteilchen hinsichtlich Form und Abmessung herstellungsbedingt bereits vor. Die Korngrößenverteilung des Pulvers liegt dabei in einer glockenkurvenähnlichen Verteilung vor und beträgt bei

- einem Standard-Industrie-Pulver in der Regel zwischen 1 und 100 µm
  und
- bei einem Acrylat-Klarlackpulver oder Primer-Pulver in der Regel zwischen 1 und 40 µm.

Durch den Pulverlackierprozess bedingt verändert sich jedoch die Korngrößenverteilung des Pulvermaterials. Entmischungen des Pulvermaterials entstehen dabei hauptsächlich bei der Ausbildung der Sprühwolke aus der Pistole, beim Transport zum Werkstück und bei der Rückführung des Overspraypulvers. Die Ursachen dieser Partikelseparierung sind strömungsmechanische und elektrostatische Phänomene.

Ziel der Forschungsarbeit ist es, die komplexen Zusammenhänge der Pulver-Kreislaufführung produktionsnah zu untersuchen und Maßnahmen zur prozesssicheren Pulver-Kreislaufführung zu erarbeiten.

Abb. 2.2 zeigt die typischen Veränderungen des Korngrößenspektrums bei der Pulver-Kreislaufführung.

In der Regel ist bei der Pulver-Kreislaufführung eine Verfeinerung des Overspray- bzw. Rückgewinnungspulvers zu erwarten, da kleinere Partikel nicht so hoch aufgeladen werden und empfindlicher auf die Kabinenluftströmung reagieren, d.h. feinere Partikel gelangen mit dem Overspray tendenziell stärker in die Rückgewinnung als gröbere Partikel. Gröbere Partikel wiederum scheiden sich tendenziell stärker auf dem Werkstück ab als feinere Partikel. Eine Verfeinerung des Rückgewinnungspulvers führt somit auch zu einer Verfeinerung des Kreislaufpulvers. Es sei an diese Stelle jedoch vermerkt, dass in bestimmten Beschichtungsfällen auch umgekehrt eine Vergröberung des Rückgewinnungspulvers auftreten kann, insbesondere dann, wenn die Gravitationskräfte bei der Beschichtung stärker ins Gewicht fallen als die elektrostatischen und strömungsmechanischen Kräfte, z.B. bei einer „Überkopfbeschichtung“ einer Coil-Beschichtungsanlage.

Die Veränderung des Korngrößenspektrums im Kreislaufpulver führt zu einer Verschlechterung des Auftragswirkungsgrades und damit zu einer Verringerung der Schichtdicke. Diese Tendenzen können derart zunehmen, dass der Beschichtungsprozess nicht mehr beherrscht werden kann.

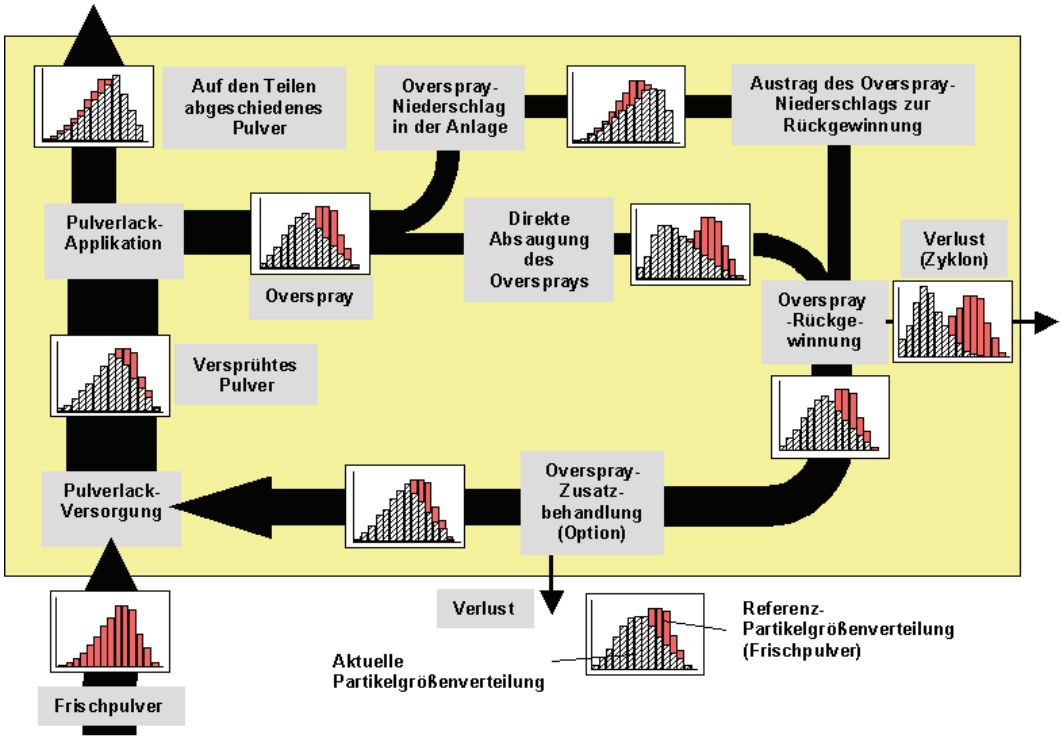


Abb. 2.2: Schematische Darstellung des Pulvermassenstromverlaufes und Veränderung der Partikelgrößenverteilung im Pulverkreislaufprozess [02]

Für die Lösung derartiger Kreislaufprobleme gibt es je nach Problemfall unterschiedliche Ansätze um den Prozess in den Griff zu bekommen, u.a. können die Beschichtungsparameter wie z.B.

- Pulverlackpistoleneinstellungen, wie z.B. Pulvermassenstrom, Düsengeometrie und Hochspannung
- Pulverlackmaterial, z.B. Einsatz von gesichtetem Pulver
- Rückgewinnungsmethode
- Sprühposition und Abstand zum Objekt
- Warenträgerbelegung

dem Beschichtungsfall entsprechend angepasst werden. In der Praxis ist es jedoch nicht möglich die Beschichtungsparameter entsprechend der Kreislaufführung schnell und sicher anzupassen, da nach Veränderung eines Parameters der Pulverkreislauf praktisch über einen längeren Zeitraum beobachtet werden muss.

Für eine künftig prozesssichere Pulver-Kreislaufführung bedarf es neuer Prüfverfahren, welche den Pulverkreislauf komplett bewerten und optimieren. Dazu müssen sämtliche Prozesssteuergrößen erfasst und gegebenenfalls korrigiert, die Sprühsysteme komplett geprüft, ausgewertet und das Kreislaufverhalten vorausberechnet und optimiert werden. Die komplette Prüfmethode muss möglichst einfach und schnell in einem Prüflabor durchgeführt werden können, um vor allem neue Industrieanlagen zu dimensionieren bzw. bestehende Anlagen zu optimieren, ohne den Produktionsprozess zu unterbrechen.

2.2 Prüfinstrumentarium

2.2.1 Überwachung der Prozesssteuergrößen

Für den sicheren Pulverbeschichtungsprozess ist es zunächst wichtig, die Beschichtungsparameter am Sprühorgan zu erfassen und evtl. zu korrigieren. Dazu zählen der Pulvermassenstrom, das Pulverlackmaterial (Korngrößenspektrum), die Pulveraufladung (Elektrostatik), die Klima- und Umgebungsbedingungen wie Abluftströmungen und Einbrennbedingungen.

Ein wichtiger Einfluss auf die Pulver-Kreislaufführung und auf das Beschichtungsergebnis stellen dabei der Betrag und die Gleichmäßigkeit des Pulvermassenstromes dar. Der Pulvermassenstrom kann dabei auf verschiedene Arten gemessen und geregelt werden, u.a.:

- Indirekt, z.B. über ein geregeltes Luftversorgungssystem in Verbindung mit SPS-Steuerung [47].
- Direkt mittels eines Online-Überwachungsgerätes. Bei diesem System kann der Pulvermassenstrom hochauflösend (bis 8 Messungen pro Sekunde) abgelesen werden. Mit diesem System können Zusammenhänge zwischen auftretenden Schichtdicken- und Massenstromschwankungen (auch Kurzzeitschwankungen, wie Pulvereinschaltstoß oder Pulverspucker) ermittelt werden [01].
- Integral über die Bestimmung der Gewichtsabnahme des Fluidbehälters über die Beschichtungszeit [01], [48].

Die Korngrößenverteilung sollte zumindest bekannt sein. Für einen Lackmaterialhersteller ist ein Partikelmessgerät unerlässlich. Für einen genau überwachten Pulverkreislaufprozess ist es optimal, das Korngrößenspektrum im Kreislauf zu kontrollieren (z.B. Online-Messung im Pulverbehälter).

Auch die Funktion der Elektrostatik der Pulversprühsysteme muss überwacht werden. Bei der Korona-Aufladung muss die Hochspannung und der Strom an der Elektrode und bei der Tribo-Aufladung der Ableitstrom bekannt sein.

Die Klima- und Umgebungsbedingungen wie z.B. Luftfeuchte, Temperatur, Luftströmung in der Kabine und Einbrennbedingungen müssen bekannt sein. Dazu gibt es entsprechende Messgeräte. Besonders empfindlich wirken sich dabei der Betrag und die Gleichmäßigkeit der Kabinensinkluft auf den Pulverkreislaufprozess aus.

Für einen zunehmenden Fortschritt in der Pulverlackiertechnik reicht das Kontrollieren obiger Messgrößen nicht aus. Für die nicht ausreichende Produktionssicherheit müssen die Ursachen gefunden und gelöst werden. Dafür ist eine, speziell für die Pulverbeschichtung ausgelegte Messtechnik zu entwickeln.

2.2.2 Entwicklung eines Testverfahrens für Pulversprühorgane

Die Prozesssicherheit bei der Pulverbeschichtung hängt entscheidend vom Einsatz der richtigen Auswahl und von der richtigen Betriebsweise der Pulversprühorgane ab. Da bislang Auswahl und Anpassung der Sprühsysteme rein empirisch erfolgen und die Ergebnisse nicht eindeutig sind, wird eine objektive, neue Prüfmethode zur Beurteilung der Pulversprühorgane eingesetzt. Dazu wird ein Testverfahren entwickelt, mit dem Pulversprühorgane anhand ein und desselben Versuchs schnell und aussagefähig bezüglich der drei wichtigsten Applikationskriterien bewertet werden können:

- Erst-Auftragswirkungsgrad
- Form und Gleichmäßigkeit der Sprühwolke (Sprühprofil) sowie
- Partikelgrößenseparierung in der abgeschiedenen Pulverschicht.

Alle drei Kriterien müssen dabei gleichwertig, unter Berücksichtigung anwendungsspezifischer Anforderungen, betrachtet werden. So nützt z.B. ein hoher Erst-Auftragswirkungsgrad wenig, wenn sich gleichzeitig die Sprühbilder nicht zur Überlagerung mehrerer Lackierstreifen für ein gleichmäßiges Sprühprofil eignen oder zu einer zu starken Feinkornanreicherung im Kreislaufpulver führen. Abb. 2.3 zeigt den Ablauf des Testverfahrens für Pulversprühorgane. In der Regel wird der Pulverlack bei diesem Testverfahren mit einem einzelnen Sprühorgan appliziert. Als Beschichtungsgegenstand werden meist 5 senkrecht hängende oder waagerecht liegende ebene Bleche verwendet, wobei die mittleren 3 Bleche ausgewertet werden. Bei der Versuchsdurchführung werden entweder die Bleche mittels eines Förderers am Sprühorgan vorbeibewegt oder umgekehrt das Sprühorgan mittels eines Roboters an den Blechen vorbeibewegt. Für die Schichtdickenauswertung wird ein Prüfblech eingebrannt, die beiden anderen Bleche werden zur Auftragswirkungsgradbestimmung und zur Partikelgrößenmessung verwendet.

Zur Bestimmung des Erst-Auftragswirkungsgrades wird die Pulvermasse des auf den Prüfblechen abgeschiedenen Pulvers (wiegen der Bleche vor und nach der Beschichtung) sowie die versprühte Pulvermenge bestimmt, z.B. durch eine Online-Wägung des Pulverbehälters. Der AWG berechnet sich dann nach folgender Formel

$$AWG = \frac{m_{Blech,\,ist}}{m_{Blech,\,\max}} = \frac{m_{Blech,\,ist}}{\dot{m}_{Pulver} \times \dfrac{l_{Blech} + 2\,\dfrac{l_{Spalt}}{2}}{v_{Förd}}}.$$

Zur Sprühbildbewertung wird das Schichtdickenprofil des Lackierstreifens senkrecht zur Beschichtungsrichtung millimetergenau auf einem Schichtdickenmesstisch abgerastert. Je symmetrischer die Profile sind, desto gleichmäßiger lassen sie sich überlagern, d.h. desto gleichmäßiger wird die Pulverschicht. Als Maß für den Sprühabstand zweier Sprühsysteme dient der SB50-Wert.

Der für den Pulverkreislaufprozess wichtigste Parameter ist die Korngrößenverteilung in der abgeschiedenen Pulverschicht auf dem Werkstück. Das Problem bisheriger Partikelmessverfahren war das zeitraubende und aufwändige Messverfahren mittels Nassdispergierung der Pulver-

proben. Das Pulver musste dazu in einer komplizierten Prozedur vom Werkstück entfernt werden und in einer Flüssigkeit (Flüssigkeiten für die das Pulver nicht löslich ist, z.B. VE-Wasser oder diverse Alkohole) unter Zuhilfenahme von Ultraschall dispergiert werden, bevor die Probe überhaupt mit einem optischen Verfahren mittels Laserlichtbeugung [49]-[57] vermessen werden konnte.

Für eine rationelle Partikelgrößenmessung wird ein neu entwickeltes Testverfahren eingesetzt, mit dem kleine Pulvermengen (bis ca. 0,05 g) in sekundenschnelle trocken dispergiert und vermessen werden können. Dabei wird das Pulver in Förderrichtung mittels einer Unterdruckdüse streifenweise abgesaugt und die Partikelgröße ermittelt. Die Partikelmessung erfolgt im Abstand von 5 cm quer zur Förderrichtung.

Als Gesamtergebnis erhält man eine zweidimensionale Darstellung des Sprühprofils und der Partikelseparierung auf dem Prüfblech entlang einer Messtrecke senkrecht zur Beschichtungsrichtung (Abb. 2.4).

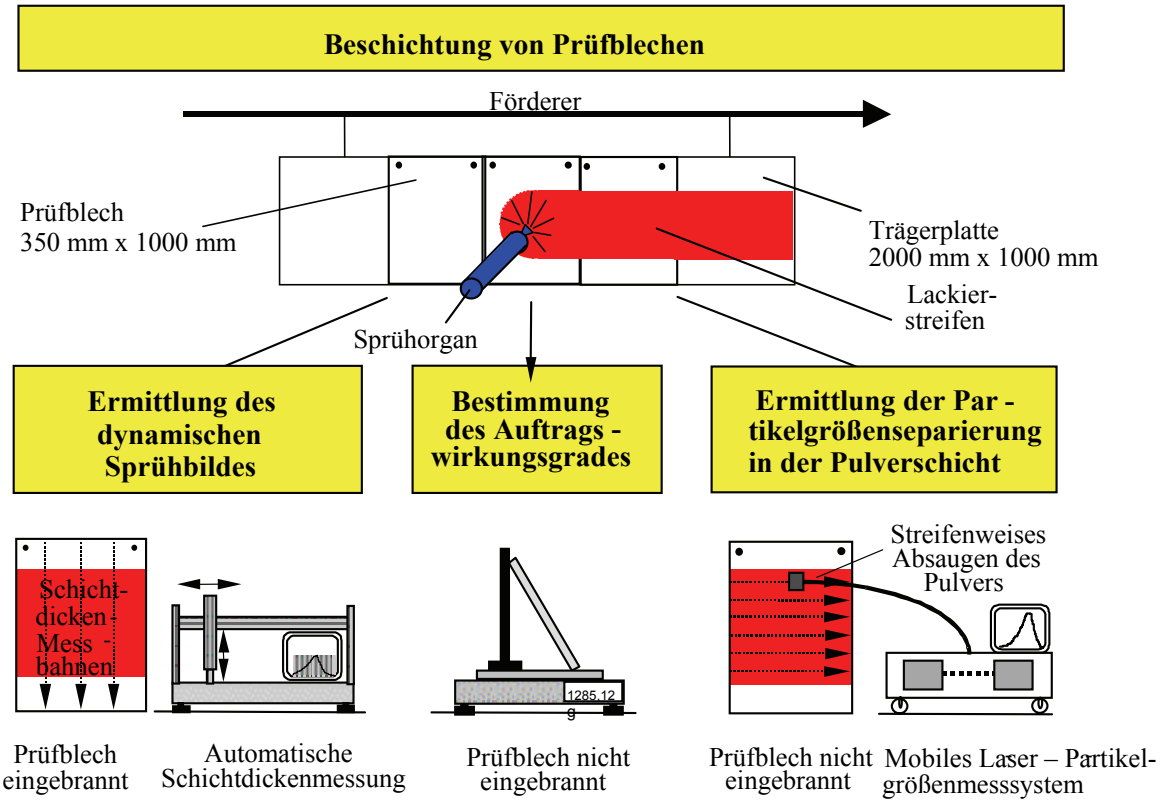


Abb. 2.3: Ablauf des Testverfahrens für Pulversprühorgane

Das neu entwickelte Partikelmessverfahren eignet sich auch für eine Online Überwachung des Kreislaufpulvers in verschiedenen Bereichen des Pulverkreislaufes. Über die Unterdruckdüse wird eine kleine Pulvermenge direkt aus dem Fluidbehälter abgesaugt und vermessen.

Das Messprinzip bietet folgende Vorteile:

- Online-Partikelgrößenmessung während des Beschichtungsvorganges. Pulverproben können dabei aus verschiedenen Bereichen des Pulverkreislaufes, wie z.B.
  - aus dem Pulverbehälter
  - aus dem Rückgewinnungsbehälter
  - von den Werkstücken sowie
  - von diversen anderen Bereichen der Pulverkabinenanlage abgesaugt werden.
- Hohe Reaktionsgeschwindigkeit bei Veränderung der Partikelgrößenverteilung.
- Pulvermengen können auch über größere Distanzen (bis 10 m) angesaugt und reproduzierbar gemessen werden.

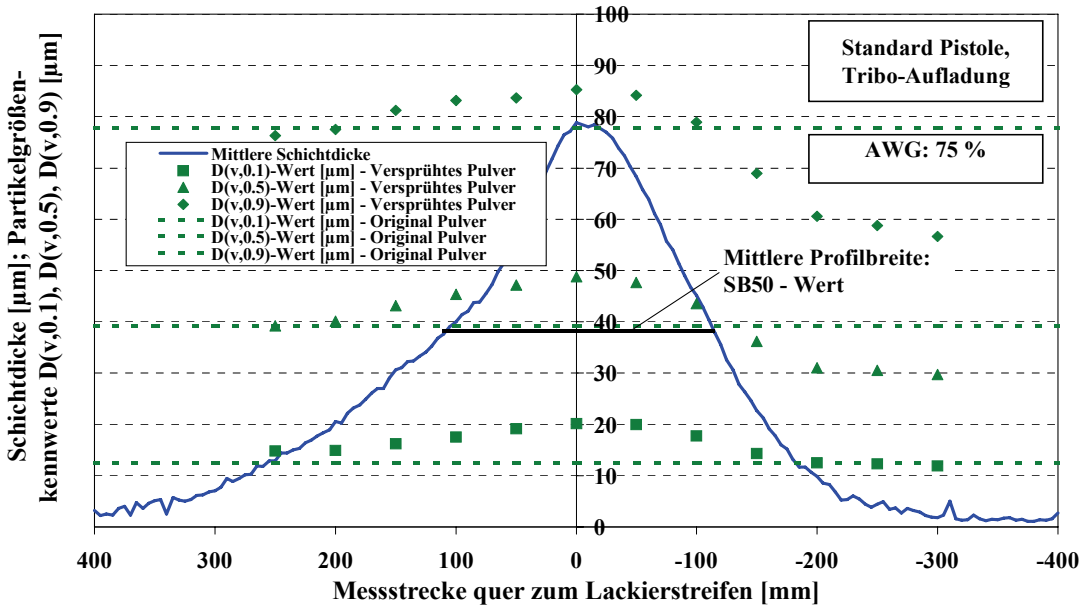


Abb.2.4: Beispiel einer Sprühwolkenauswertung

Das Partikelmessverfahren zeigt dabei eine gute Übereinstimmung der gemessenen Partikelgrößenkennwerte (D(v,0.1), D(v,0.5), D(v,0.9) und D[3,2]) zur konventionellen Trockendispergierung über eine Schüttelrinne mit mehreren Gramm Pulver. Die Übereinstimmung beider Messverfahren liegen bei einer Korngröße von 40 µm bei ±1,5 µm und entsprechen damit den üblichen Toleranzen dieser Meßmethode.

Alternativ kann dieses Messverfahren darüber hinaus auch indirekt zur Online-Bestimmung der abgeschiedenen Pulvermasse bzw. des Auftragswirkungsgrades sowie der Schichtdicke eingesetzt werden. Als Maß dient hierbei die mittlere Verdunkelung des Laserstrahls („Obscuration“) während einer definierten Partikelgrößen-Messzeit und bei einer definierten abzusaugenden Fläche. Die durchschnittliche „Obscuration“ während der Messzeit ist direkt proportional zur abgesaugten Pulvermasse (Abb. 2.5).

Eine Weiterentwicklung der Messmethode bietet sich insbesondere bei den Endlosband- bzw. Coil-Beschichtungsanlagen zur gleichzeitigen Online-Erstauftragswirkungsgradmessung und –Partikelmessung an.

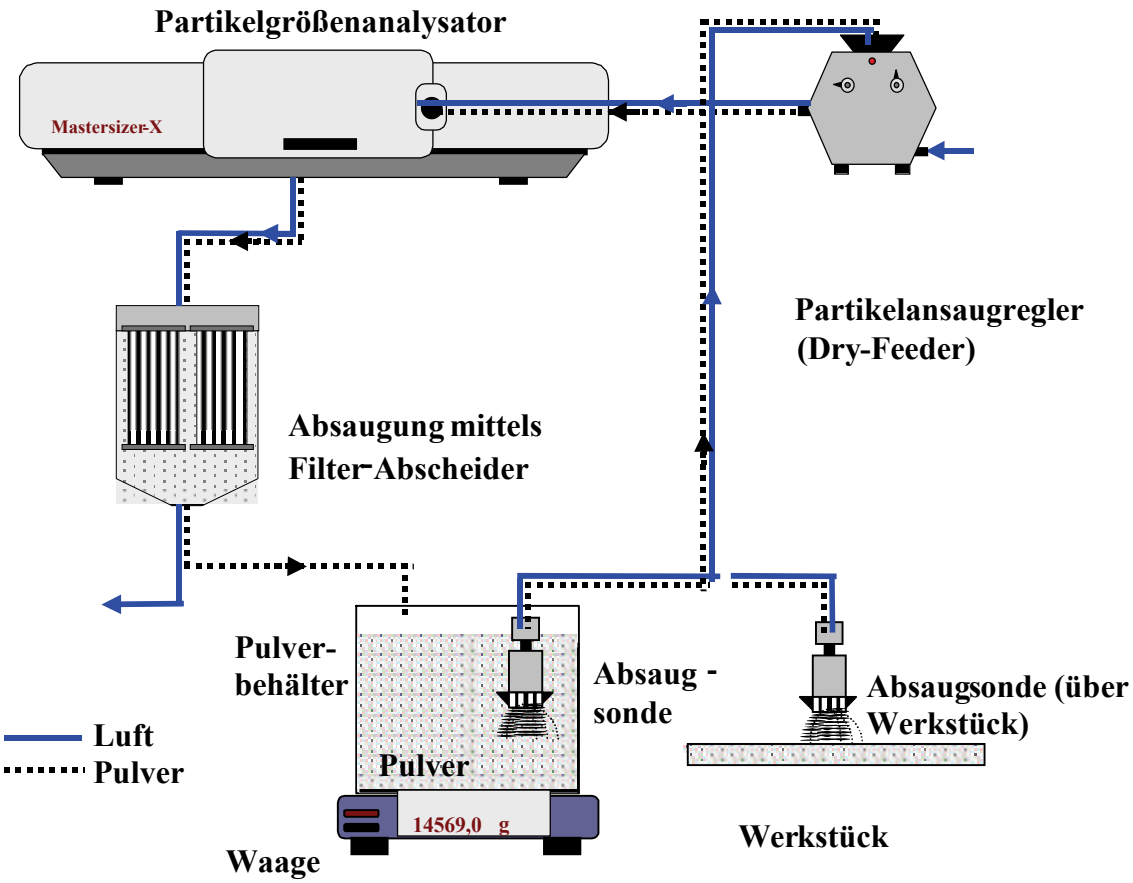


Abb. 2.5: Online-Partikelgrößenüberwachung des Pulvers aus dem Fluidbehälter bzw. vom Werkstück

2.2.3 Entwicklung einer Simulationsmethode zur Vorhersage des Kreislaufverhaltens einer Pulveranlage auf der Basis verschiedener Applikationsversuche

2.2.3.1 Simulationsmethode

Bei der Pulverlackapplikation zeigen die verschieden großen Partikel ein unterschiedliches Abscheidverhalten. Während bei den meisten Beschichtungsfällen die feinen Partikel durch die Kabinenluftströmung eher in die Rückgewinnung gelangen, scheiden sich die mittleren bis gröberen Partikel mehr am Werkstück ab. Sehr grobe Partikel gelangen durch die Schwerkraft bedingt wiederum stärker in die Rückgewinnung. Beim Pulverbeschichtungsprozess findet somit eine Separierung des Overspray- und damit des Kreislaufpulvers statt. Durch die Veränderung des Korngrößenspektrums des Pulvers verändern sich auch die Beschichtungsergebnisse; Auftragswirkungsgrad und Schichtstärke nehmen ab. Über die sich daraus ergebenden anlagen- und verfahrenstechnischen sowie pulvermaterialspezifischen Konsequenzen wird zunehmend in der Industrie berichtet.

Bisher besteht jedoch nicht die Möglichkeit, ohne großen experimentellen Aufwand den Pulverkreislaufprozess zu analysieren und Ansätze für die Verbesserung der Kreislaufführung zu finden. Häufig driftet der Beschichtungsprozess ohne die Ursachen zu kennen ab. Der Beschichtungsvorgang wird angehalten, um die ganze Prozedur „von Neuem“ an mit frischem Pulver zu beginnen. Das alte Kreislaufpulver wird verworfen.

Aus dieser Problematik heraus muss die Möglichkeit geschaffen werden, die Auswirkungen der Partikelseparierung bei der Pulverbeschichtung zu erfassen und Lösungen zu finden, um den Pulverkreislaufprozess im Voraus zu optimieren, ohne dabei den gesamten Beschichtungsprozess abzuwarten, bis dann nicht mehr eingegriffen werden kann.

Davon ausgehend wird eine halbempirische Simulationsmethode entwickelt, die das Kreislaufverhalten bei entsprechenden Beschichtungsfällen vorausberechnen kann (**K**reislauf- und **Ap**plikations-**Sim**ulations-Methode, kurz KAP-Sim-Methode). Mit dieser Simulationsmethode wird die Möglichkeit geschaffen, den experimentellen Aufwand zur produkt- und produktionsspezifischen Optimierung der Applikationsbedingungen hinsichtlich einer produktionssicheren Kreislaufführung erheblich zu reduzieren.

Die KAP-Sim-Methode basiert auf den experimentell ermittelten Werten der Masse und des Partikelgrößenspektrums des versprühten sowie auf den Werkstücken und in der Anlage abgeschiedenen Pulvers. Daraus lassen sich partikelgrößenbezogene Faktoren für die Abscheidung auf dem Werkstück bzw. für das Overspraypulver ableiten.

Anhand eines fiktiven Modellpulvers wird die KAP-Sim-Methode erläutert. Das Modellpulver hat 5 Kornklassen mit einer hypothetischen Häufigkeitsverteilung (Abb. 2.6). Das Modellpulver zeigt ein für die Pulverbeschichtung typisches Separierungsverhalten (hoher Feinanteil im Overspray und mittlere bis gröbere Partikel auf dem Werkstück).

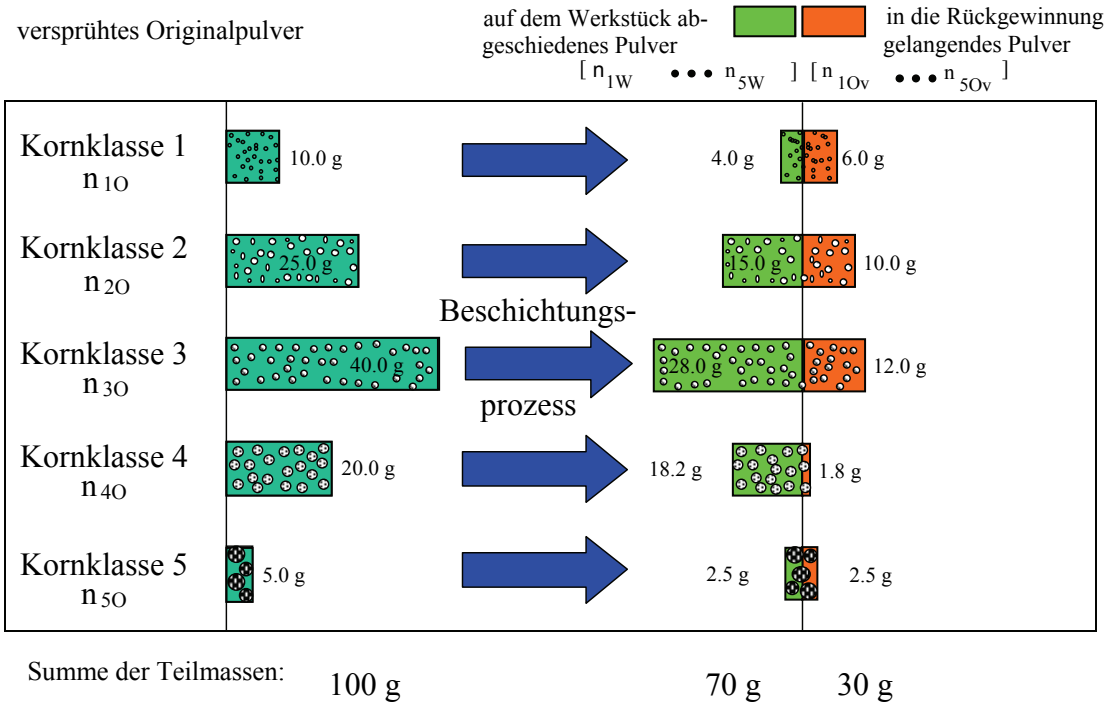


Abb. 2.6: Partikelgrößenspezifisches Separierungsverhalten eines Modellpulvers mit 5 Kornklassen

Die Teilmassen der einzelnen Kornklassen auf dem Werkstück bzw. im Overspray werden auf die jeweiligen Kornklassen des versprühten Originalpulvers bezogen; diese Verhältnisse werden als Fraktionsabscheidegrade definiert, mit denen sich die Partikel der entsprechenden Kornklasse am Werkstück abscheiden oder ins Overspray gelangen:

$$p_{kOv} = \frac{n_{kOv}}{n_{kO}} \quad \text{bzw.} \quad p_{kW} = \frac{n_{kW}}{n_{kO}}.$$

Dabei bedeuten:

p_{kOv}	[%]	Fraktionsabscheidegrad der Kornklasse k im Overspray Ov zu landen
p_{kW}	[%]	Fraktionsabscheidegrad der Kornklasse k auf dem Werkstück W zu landen
n_{kO}	[kg]	Teilmasse der Kornklasse k, des Originalpulvers O
n_{kOv}	[kg]	Teilmasse der Kornklasse k des Overspraypulvers Ov
n_{kW}	[kg]	Teilmasse der Kornklasse k des Pulvers auf dem Werkstück W.

Mit den zwei möglichen Formen der Pulverprobenvorbereitung bei der Partikelmessung ergibt sich für die Kornklasse k folgender Klassenbereich:

k = 1...49 bei „Trockendispergierung“ und k = 1...64 bei „Nassdispergierung“.

Für das Modellpulver ergeben sich daraus die in Tabelle 2.1 dargestellten Fraktionsabscheidefaktoren:

	Massenbezogener Anteil der Kornklasse beim Originalpulver (Modellpulver)	Fraktionsabscheidefaktoren für die Abscheidung	
		in der Anlage p_{kOv}	auf dem Werkstück p_{kW}
Kornklasse 1 (sehr fein)	10,0 %	0,60	0,40
Kornklasse 2 (fein)	25,0 %	0,40	0,60
Kornklasse 3 (mittel)	40,0 %	0,30	0,70
Kornklasse 4 (grob)	20,0 %	0,09	0,91
Kornklasse 5 (sehr grob)	5,0 %	0,50	0,50
Summe	100 %	-	-

Tab. 2.1: Aus dem Separierungsverhalten des Modellpulvers abgeleitete Fraktionsabscheidegrade für das korngrößenspezifische Abscheidverhalten

Überträgt man diese Modellrechnung auf die Praxis, dann kann man durch die Bestimmung der Partikelgröße des Originalpulvers, des Pulvers auf dem Werkstück und der Ermittlung des AWG´s bei der Erstbeschichtung folgende Werte vorausberechnen:

- Auftragswirkungsgrad und Oversprayanteil in Abhängigkeit von der Anzahl der Umläufe mit und ohne Frischpulverzugabe
- Korngrößenspektrum des Overspraypulvers und des auf dem Werkstück abgeschiedenen Pulvers in Abhängigkeit von der Anzahl der Umläufe mit und ohne Frischpulverzugabe (Kreislaufsimulation).

Anhand des Modellpulvers soll das Separierungsverhalten des Oversprays mit Frischpulverzugabe in Abhängigkeit von der Anzahl der Umläufe erläutert werden (Tab. 2.2).

Originalprobe 0 neu:		**Wahrscheinlichkeitsfaktor**		**Overspray 1:**		**Kreislaufpulver neu:**	
	Masse [g]	**(x 100 = %)**		**Masse [g]**			
Kornklasse 1	10,00	0,6		6,00		12,77	
Kornklasse 2	25,00	0,4		10,00		26,93	
Kornklasse 3	40,00	0,3		12,00		39,08	
Kornklasse 4	20,00	0,09		1,80		15,34	
Kornklasse 5	5,00	0,5		2,50		5,89	
Summe:	**100,00**			**32,30**		**100,00**	
Originalprobe 1 neu:		**Wahrscheinlichkeitsfaktor**		**Overspray 2:**		**Kreislaufpulver neu:**	
	Masse [g]	**(x 100 = %)**		**Masse [g]**			
Kornklasse 1	12,77	0,6		7,66		14,21	
Kornklasse 2	26,93	0,4		10,77		27,15	
Kornklasse 3	39,08	0,3		11,72		37,93	
Kornklasse 4	15,34	0,09		1,38		14,48	
Kornklasse 5	5,89	0,5		2,94		6,22	
Summe:	**100,00**			**34,48**		**100,00**	
...	**...**	**...**	**...**	**...**	**...**	**...**	
Originalprobe 29 neu:		**Wahrscheinlichkeitsfaktor**		**Overspray 29:**		**Kreislaufpulver neu:**	
	Masse [g]	**(x 100 = %)**		**Masse [g]**			
Kornklasse 1	16,05	0,6		9,63		16,05	
Kornklasse 2	26,75	0,4		10,70		26,75	
Kornklasse 3	36,68	0,3		11,00		36,68	
Kornklasse 4	14,11	0,09		1,27		14,11	
Kornklasse 5	6,42	0,5		3,21		6,42	
Summe:	**100,00**			**35,81**		**100,00**	
Originalprobe 30 neu:		**Wahrscheinlichkeitsfaktor**		**Overspray 30:**		**Kreislaufpulver neu:**	
	Masse [g]	**(x 100 = %)**		**Masse [g]**			
Kornklasse 1	16,05	0,6		9,63		16,05	
Kornklasse 2	26,75	0,4		10,70		26,75	
Kornklasse 3	36,68	0,3		11,00		36,68	
Kornklasse 4	14,11	0,09		1,27		14,11	
Kornklasse 5	6,42	0,5		3,21		6,42	
Summe:	**100,00**			**35,81**		**100,00**	

Tab. 2.2: Separierungsverhalten des Modell-Overspraypulvers mit Frischpulverzugabe (bis 30 Kreisläufe)

Ausgehend von 100 g versprühtem Pulver fallen nach dem ersten Beschichtungsumlauf 32,30 g Overspraypulver an. Das Kreislaufpulver setzt sich nun aus 32,3 % Overspraypulver und 67,7 % Frischpulver zusammen. Von 100 g erneut versprühtem Kreislaufpulver bleiben nach einem weiteren Beschichtungsumlauf 34,48 g Overspray übrig, vermischt mit 65,52 g Frischpulver ergibt sich das neue Kreislaufpulver. Mithilfe der Fraktionsabscheidefaktoren jeder Kornklasse lässt sich nun der Oversprayanteil bzw. der Auftragswirkungsgrad nach beliebig vielen Umläufen berechnen. Nach 30-maligen Umlauf bleiben von 100 g versprühtem Pulver knapp 36 g als Overspray übrig, wobei die Kornklasse 1 am stärksten zugenommen hat (Feinanteil). Beim Ausgangspulver betrug der Massenanteil der Kornklasse 1 lediglich 10 g, nach den 30 Umläufen 16,05 g. Beim n-maligen Durchlauf nähert sich also der Auftragswirkungsgrad dem Wert 64,2 % an (Anfangswert: 67,7%). Es ist dann der Zustand des stationären Pulverkreislaufes eingetreten.

Die Abb. 2.7 und 2.8 zeigen die Veränderung der Massenanteile der einzelnen Kornklassen bzw. die Veränderung des Auftragswirkungsgrades und des Oversprayanteils des Modellpulvers in Abhängigkeit von der Anzahl der Umläufe (mit Frischpulverzugabe).

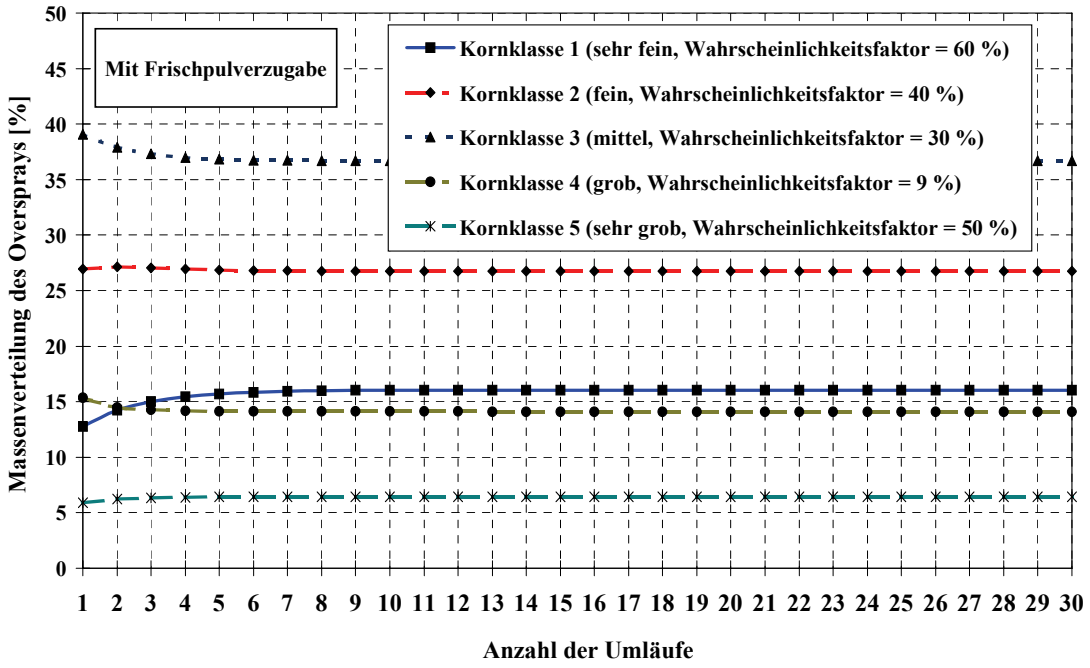


Abb. 2.7: Veränderung der Kornklassenverteilung des Oversprays eines Modellpulvers in Abhängigkeit von der Anzahl der Umläufe (mit Frischpulverzugabe)

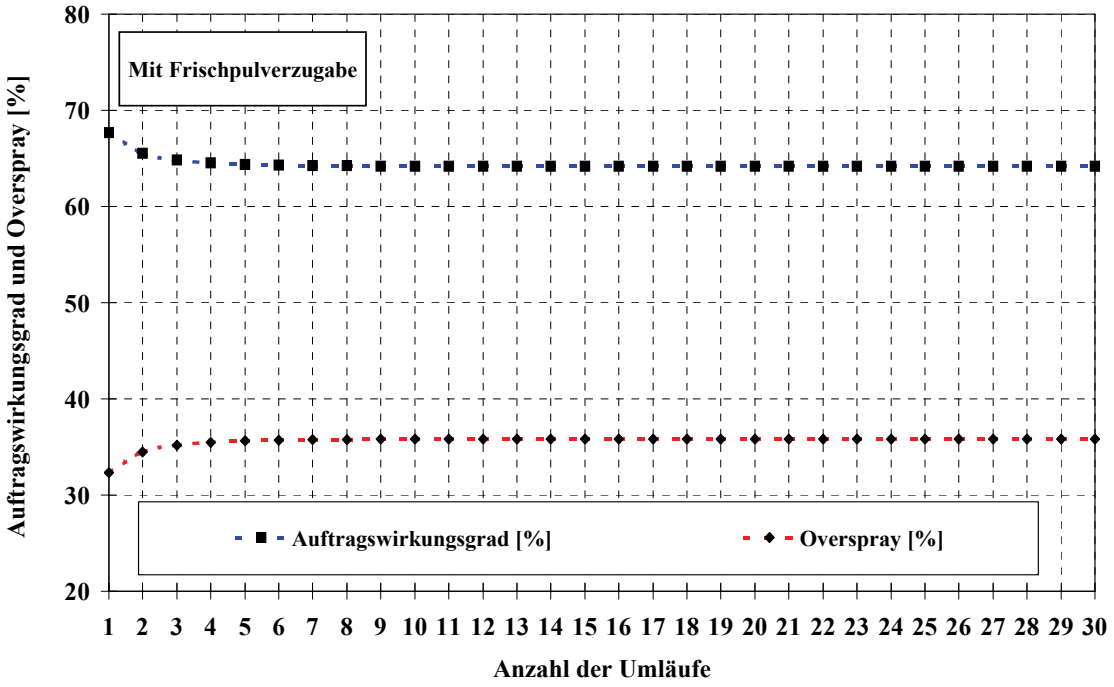


Abb. 2.8: Veränderung des Auftragswirkungsgrades und des Oversprayanteils in Abhängigkeit von der Anzahl der Umläufe (mit Frischpulverzugabe)

Mathematisch ausgedrückt berechnet sich die Kornverteilung des Pulvers im stabilen Endzustand für die Kornklassen des Kreislaufpulvers n_k (k = 1...49, „Trockendispergierung“) mit der maximalen Kreislaufanzahl t (Schreibweise: n_{kt}) mit der KAP-Sim-Formel:

$$\left[p_{kOv} \times n_{k1} + \left(\sum_{k=1}^{k=49} n_{k1} \times (1 - p_{kOv}) \right) \times n_{k1} \right] = n_{k2} \,, \left[p_{kOv} \times n_{k(t-1)} + \left(\sum_{k=1}^{k=49} n_{k(t-1)} \times (1 - p_{kOv}) \right) \times n_{k1} \right] = n_{kt}$$

$$\text{mit} \quad \sum_{k=1}^{k=49} \frac{n_{k1}}{(1 - p_{kov})} = \frac{1}{\sum_{k=1}^{k=49} n_{kt} \times (1 - p_{kov})} \qquad \text{folgt} \quad n_{kt} = \frac{\frac{n_{k1}}{1 - p_{kov}}}{\sum_{k=1}^{k=49} \frac{n_{k1}}{1 - p_{kov}}} .$$

Mit Hilfe der KAP-Sim-Methode kann unter definierten Versuchsbedingungen das Separierungsverhalten bei der Pulverapplikation und in der Anlage (Overspraypulver) sowie der Auftragswirkungsgrad eines Pulvers mit beliebigem Ausgangskorngrößenspektrum vorausberechnet werden. Bei den Kreislaufsimulationen für die Pulverbeschichtung wird analog dem Modellbeispiel nicht immer nur das reine Overspray wiederverwendet, sondern dem Oversprayanteil wird die Menge an Frischpulver zugemischt, die prozentual dem Auftragswirkungsgrad entspricht. Anstatt 5 Kornklassen, wie bei dem Modellpulver sind es, je nach Art der Partikelgrößenmessung 49 (Trockendispergierung) oder 64 (Nassdispergierung) Kornklassen. Die Rechnung wird dadurch erheblich genauer. Die Berechnungsprozedur bleibt ansonsten die gleiche.

Die Ergebnisse zeigen eine gute Übereinstimmung zwischen der gemessenen und der mit dieser Methode vorausberechneten Partikelgrößenverteilung eines Pulvers auf dem Werkstück (Abb. 2.9).

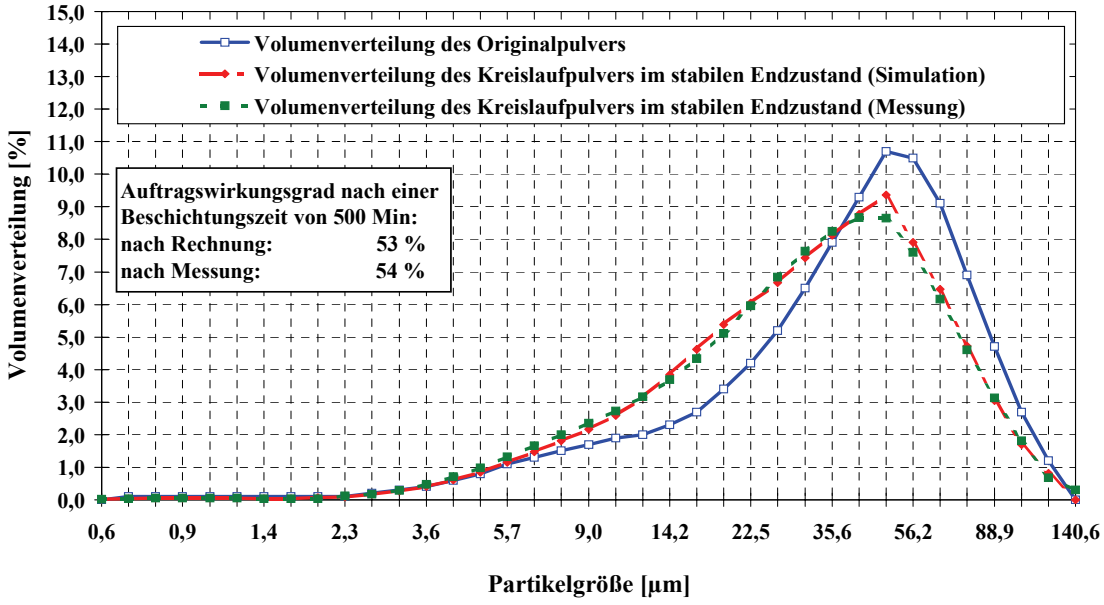


Abb. 2.9: Anwendungsbeispiel für die Vorausberechnung des Partikelspektrums des Kreislaufpulvers nach Erreichen stationärer Kreislaufbedingungen (Vergleich Simulation und Messung)

2.2.3.2 Erweiterung des Simulationsmodells

Ausgehend von den Fraktionsabscheidegrad-Werten der einzelnen Korngrößenklassen vom Werkstück und von der Pulverrückgewinnung (Overspray) kann dieses Berechnungsverfahren über beliebig viele Pulverlack-Kreisläufe angewendet werden und die Veränderung des Auftragswirkungsgrades (AWG) simuliert werden, z.B. bezüglich der zunehmenden Feinkornanreicherung des Overspraypulvers bei Zyklon- oder Filter-Rückgewinnung.

In der industriellen Pulverbeschichtung wird jedoch nicht, wie in obiger Simulation durchgeführt, ein fester Zyklus nach dem anderen gefahren und das Overspraypulver erst am Ende eines Zyklus wieder mit Frischpulver dem Pulverkreislauf zugeführt, sondern unmittelbar oder nach einer gewissen Zeit, d.h. es kommt ein Zeitfaktor hinzu. Dabei können zwei Fälle von Pulverrückführung auftreten:

- kontinuierliche Pulver-Kreislaufführung und
- diskontinuierliche Pulver-Kreislaufführung.

Bei der kontinuierlichen Pulver-Kreislaufführung wird das Overspraypulver in infinitesimal kleinen Zeitschritten in den Pulverbehälter zurück transportiert und gleichzeitig die, entsprechend in dem gleichen Zeitabschnitt auf dem Werkstück deponierte Pulvermenge, Menge an Frischpulver dem Pulverbehälter zugeführt. Das Overspraypulver wird also sofort in den Pulverbehälter zurücktransportiert und die, durch die auf den Werkstücken bedingte Pulverabscheidung, fehlende Restmenge mit Frischpulver ersetzt. Der Inhalt des Pulverbehälters bleibt also ständig auf konstantem Niveau.

Bei der diskontinuierlichen Pulver-Kreislaufführung kommt in infinitesimal kleinen Zeitabschnitten zunächst nur das Overspraypulver zurück, während Frischpulver erst nach Unterschreiten einer bestimmten Füllhöhe wieder zugeführt wird.

Neben der Kontinuität der Pulver-Rückführung spielt auf die Kreislaufsimulation auch die Art der Pulver-Rückgewinnung eine wichtige Rolle. Bei der Pulver-Rückgewinnung unterscheidet man hauptsächlich zwischen der

- Filter-Rückgewinnung
  und der
- Zyklon-Rückgewinnung.

Bei der Filter-Rückgewinnung geht man von einem stationären Zustand aus (Filterfliese gesättigt), d.h. das gesamte Overspraypulver kommt ohne Verlust in den Pulverbehälter zurück.

Bei der Zyklon-Rückgewinnung entsteht ein zusätzlicher Verlust des Overspraypulvers. In diesem Fall muss für eine Kreislaufsimulation zusätzlich noch der Zyklonabscheidegrad und die Partikeltrenngradkurve des Zyklons berücksichtigt werden.

Aufgrund dieser Erkenntnisse wird das KAP-Sim-Verfahren entsprechend erweitert. Folgende Randbedingungen können bei der KAP-Sim-Rechnung variiert werden:

- die Länge der Zeitschritte bei der Kreislaufberechnung
- den Zeitpunkt des stationären Kreislaufzustandes
- die Ausgangsfüllhöhe des Pulverbehälters
- die zeitlich versprühte Pulvermenge
- die Grenzfüllmenge des Pulverbehälters, unterhalb der Frischpulver nachdosiert wird
- die Fraktionsabscheidegrad-Werte bei der Pulverabscheidung auf dem Werkstück
- die Fraktionsabscheidegrad-Werte des Rückgewinnungssystems
- das Partikelgrößenspektrum des Frischpulvers.

Anhand eines Beispiels aus der Praxis soll die Erweiterung des KAP-Sim-Verfahrens zur Auslegung der Pulverbehältergröße erläutert werden. In der industriellen Pulverbeschichtung wird das zurückgewonnene Overspraypulver nicht unmittelbar mit Frischpulver vermischt, sondern zunächst ohne Frischpulver zurückgeführt. Erst wenn der Pulverbehälter ein bestimmtes Niveau unterschritten hat, wird Frischpulver nachdosiert. Dies führt dazu, dass sich das Pulver zwischen den Nachfüllzyklen stärker verfeinert, als wenn kontinuierlich Frischpulver nachdosiert wird. Auf die Praxis bezogen führt dies zu Schichtdickenschwankungen zwischen den Nachfüllzyklen (Abb. 2.10).

In der Praxis ist vor allem der Zeitpunkt des stationären Kreislaufzustandes und die Höhe der zulässigen maximalen Schichtdickenschwankung wichtig.

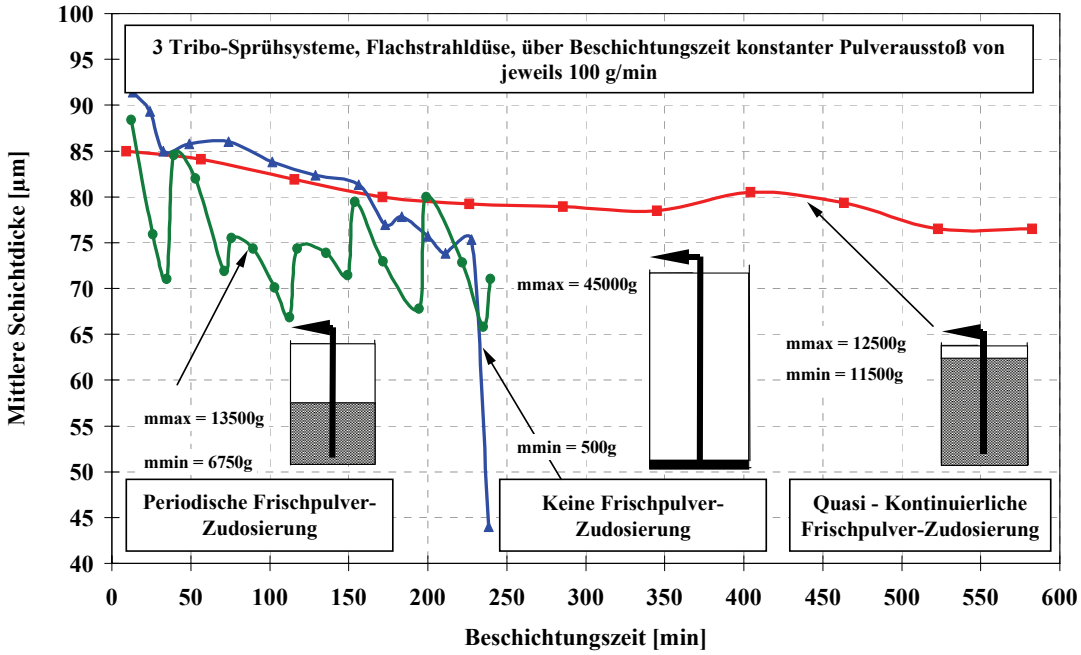


Abb. 2.10: Beispiel für den Einfluss des Frischpulver-Nachfüllzyklus und des Fluidbehältervolumens auf die zeitabhängige Schichtdickenänderung beim kontinuierlichen und diskontinuierlichen Pulverkreislauf

Mit diesen konstanten Bedingungen kann man daraus u.a. die Pulverbehälternachfüllzyklen bestimmen.

Abb. 2.11 zeigt beispielhaft dieses Vorgehen für ein Standardpulver und für ein gesichtetes Pulver. Der Pulvernachfüllzyklus ist beim gesichteten Pulver deutlich größer als beim Standardpulver, bedingt durch zwei Ursachen.

Da sich bei einem gesichteten Pulver der stationäre Kreislaufzustand bei einer bestimmten Behältergröße schneller einstellt als bei einem Standardpulver, kann der Pulverbehälter beim gesichteten Pulver größer gewählt werden, wenn der Zeitpunkt des stationären Endzustandes gleich bleibt.

Beim gesichteten Pulver ist die Separierung geringer als beim Standardpulver. Damit sind auch die Schichtdickenschwankungen, bei gleichbleibenden Nachfüllzyklen, beim gesichteten Pulver geringer als beim Standardpulver. Bei konstanten Schichtdickenschwankungen ist der Nachfüllzyklus beim gesichteten Pulver somit größer.

Die Handhabung der Pulvernachdosierung ist beim gesichteten Pulver wesentlich einfacher als bei einem Standardpulver.

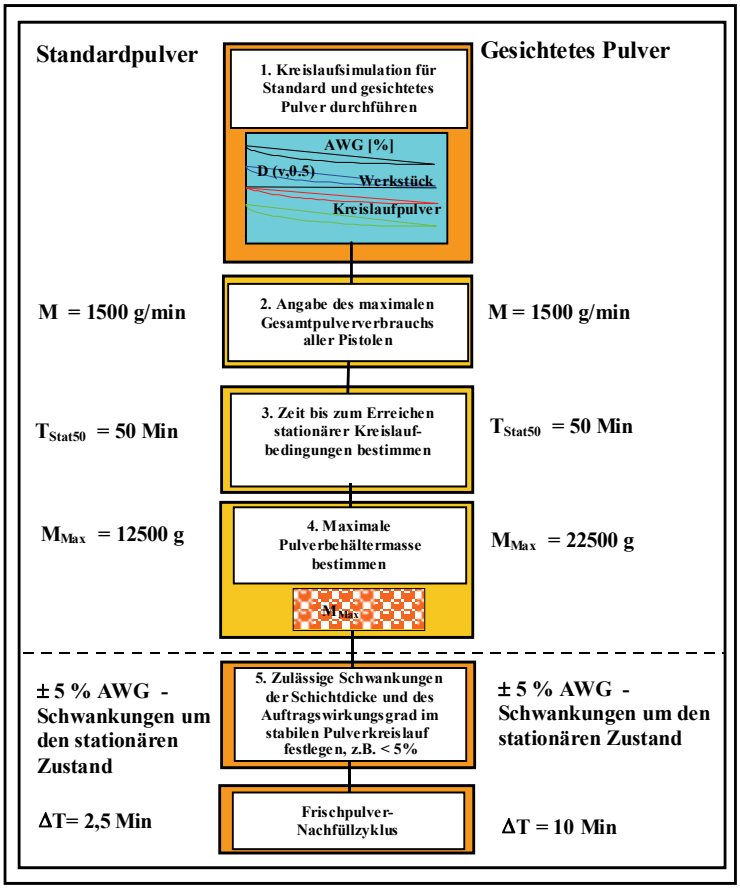


Abb. 2.11: Beispielhafte Vorgehensweise zur Ermittlung der Frischpulver-Nachdosierzeit bei vorgegebenem Zeitpunkt, stationären Kreislaufbedingungen und bei tolerierten Schwankungen des Beschichtungsergebnisses

2.2.3.3 Vergleich des KAP-Sim-Verfahrens mit Experiment

Für die Durchführung von kontinuierlichen Pulverkreislaufversuchen ist für den Technikumsmaßstab der Einsatz einer automatischen Beschichtungsanlage notwendig, mittels derer längere Beschichtungszeiträume nachgestellt werden können. Als Beschichtungsobjekt werden streifenförmige Transferbänder unterschiedlicher Breite eingesetzt. Diese bestehen aus einem leitfähigen Kohlefasermaterial. Mit der Verstellung der Breite der Bänder können unterschiedliche Beschichtungsfälle nachgestellt werden. Bei den vorliegenden kontinuierlichen Kreislaufversuchen wird mit 15 m/min Bandgeschwindigkeit gearbeitet, wobei drei Pistolen nebeneinander angeordnet sind. Das Beschichtungsband fährt im Schnitt 6 Minuten am Stück durch die Kabine, wird beschichtet und wird außerhalb der Kabine wieder abgereinigt. Anschließend wird das Band wieder zurückgespult (ca. 50 m/min). Dem über das Zyklon zurückgewonnene Overspraypulver wird dem Auftragswirkungsgrad entsprechend Frischpulver zudosiert und dem Fluidisierungsbehälter zurückgeführt. Diese Prozedur wird etwa 100 mal (ca. 10 h) wiederholt, um einen praxisnahen Pulverkreislauf nachzustellen. In bestimmten Zeitabständen wird der Auftragswirkungsgrad sowie die Partikelgrößenverteilung am Band, im Rückgewinnungsbehälter und im Fluidisierungsbehälter mit der in Kapitel 2.2.2 erläuterten Online-Partikelmesstechnik gemessen. Zur Auftragswirkungsgradmessung wird ein metallisches Normblech am Transferband befestigt. Ein zweiter Blechstreifen wird zur Bestimmung der Schichtdicke eingebrannt. In Tab. 2.3 sind die konstanten Beschichtungsparameter aufgeführt.

Versuchsparameter	**Werte**
Sprühsystem	3 feststehende Automatik-Tribo-Sprühpistolen, nebeneinander angeordnet
Sprühabstand	200 mm
Volumenstrom einer Pulverpistole (Gesamtluftvolumenstrom von drei Pistolen)	8 m³/h (3 × 8 = 24 m³/h)
Luftsinkgeschwindigkeit in der Pulverkabine	0,25 m/s
Bandgeschwindigkeit beim Beschichten	15 m/min
Umgebungsklima	20 °C / 40 % r.F.
Werkstück	Einzelnes „Endlosband“, 70 mm breit, Werkstoff: leitfähiges Kunststoffband TRANSILON E 4/1 UH/UH-HC
Rückgewinnung	Multizyklon-Rückgewinnung (9 Rohre)
Pulverausstoß einer Pistole (Pulverausstoß von drei Pistolen)	100 g/min (3 × 100 = 300 g/min)
Pulverlack	Epoxid-Polyester-Mischpulver (D(v,0.5) = 40 µm)
Abluftvolumenstrom	Zyklonbetrieb: 12000 m³/h

Tab. 2.3: Konstante Versuchsparameter bei der kontinuierlichen Pulver-Kreislaufführung

In Abb. 2.12 und 2.13 sind die Ergebnisse der produktionsnahen Langzeit-Kreislaufversuche mit Tribo-Sprühsystemen bei der Verwendung herkömmlicher Flachstrahldüsen und mit modifizierten Pralltellerdüsen gegenübergestellt (siehe auch Kapitel 3). Nach jedem Banddurchlauf (ca. 6 Minuten) wird das über den Zyklon rückgewonnene Overspraypulver unmittelbar in den Fluidisierbehälter zurückgeführt sowie die mit dem Band ausgetragene Pulvermenge durch eine gleich große Frischpulvermenge ersetzt, so dass eine quasi-kontinuierliche Frischpulver-Nachdosierung gegeben ist.

Beim Sprühen mit konventionellen Flachstrahldüsen tritt eine charakteristisch starke Partikelgrößenseparierung bei der Applikation auf, bedingt durch die hohen axialen Luftströmungsgeschwindigkeiten in der Düse [11]. Zwar findet über den Zyklon ein Feinkornaustrag statt, dieser kann die Verfeinerung des Kreislauf- bzw. Overspraypulvers und den damit verbundenen Qualitätsverlust jedoch lediglich abmildern. Mit der Verfeinerung des Kreislaufpulvers ist ein Absinken des Erst-Auftragswirkungsgrades bzw. der Schichtdicke bis zum stationären Endzustand um ca. 10 % verbunden (Abb. 2.12).

Dieser Wert kann (bei gegebenen Randbedingungen) auf weniger als 5 % reduziert werden, wenn die neu entwickelten separierungsarmen Sprühsysteme (siehe auch Kapitel 3) eingesetzt werden. Der Abscheidgrad der feinen Pulverpartikel auf dem Werkstück liegt hier gegenüber Flachstrahldüsen wesentlich höher. In Verbindung mit dem Feinkornaustrag durch den Zyklon ergibt sich dadurch ein sehr stabiler Kreislauf mit deutlich geringerem „Abdriften“ des Beschichtungsergebnisses (Abb. 2.13).

Bei der kontinuierlichen Kreislaufführung kann zudem gezeigt werden, dass sich der Pulverkreislauf bei konstanten Versuchsbedingungen nach einer bestimmten Zeit stabilisiert. Bei der Standardpralltellerdüse tritt dieser Zustand bei den vorliegenden Versuchen nach ca. 500 Minuten ein, bei der modifizierten Pralltellerdüse nach ca. 300 Minuten ein. Diese Werte liegen in guter Übereinstimmung mit der KAP-Sim-Methode. Bei der Kreislaufführung ohne Pulververlust scheidet sich im stabilen Kreislaufzustand auf dem Werkstück Pulver ab, dessen Kornspektrum dem des Ausgangspulvers entspricht. Die Abweichungen der Werte der Simulationsrechnung von den gemessenen Werten am Anfang des Pulverkreislaufes (instationärer Zustand) sind vor allem auf das „vorübergehende Verschwinden“ insbesondere feiner Partikel in der Pulverkabine (z.B. an Wänden, Decken, Boden etc.) oder in der Rückgewinnungsanlage zurückzuführen. Unregelmäßig kommt dieses Pulver früher oder später wieder aus der Anlage heraus, so dass die Massenbilanz im Kreislauf (und somit auch die gemessenen Partikelgrößenwerte) nicht hundertprozentig kontinuierlich ist. Langfristig jedoch stabilisiert sich der Kreislauf entsprechend den simulierten Werten auf einem konstanten Niveau.

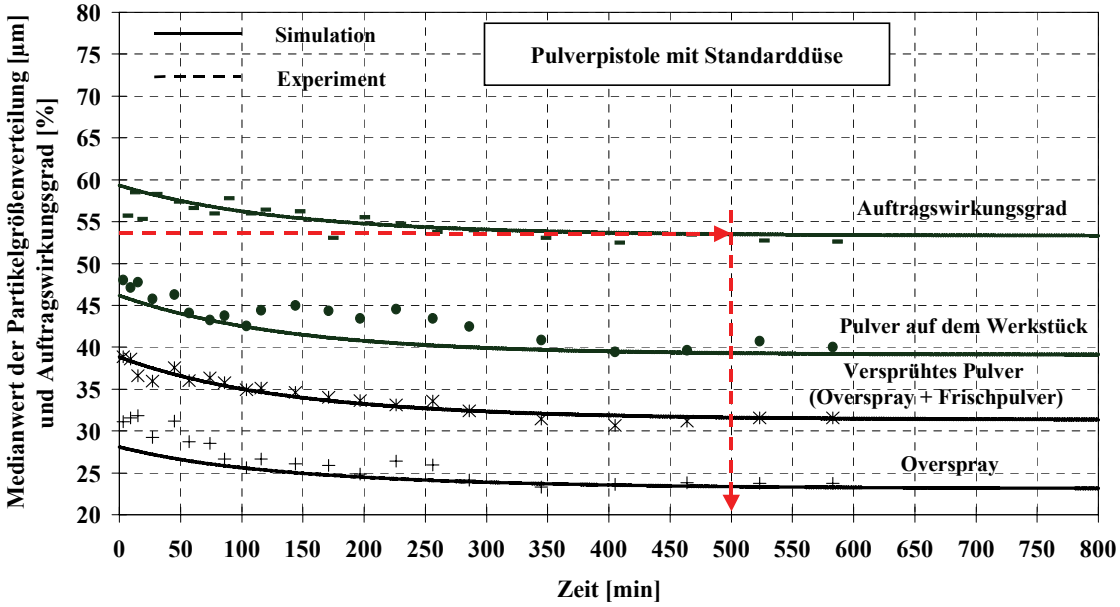


Abb. 2.12: Verlauf des Auftragswirkungsgrades und der Partikelgrößenkennwerte bei kontinuierlicher Pulver-Kreislaufführung mit einer Standard-Pistolendüse (Flachstrahldüse)

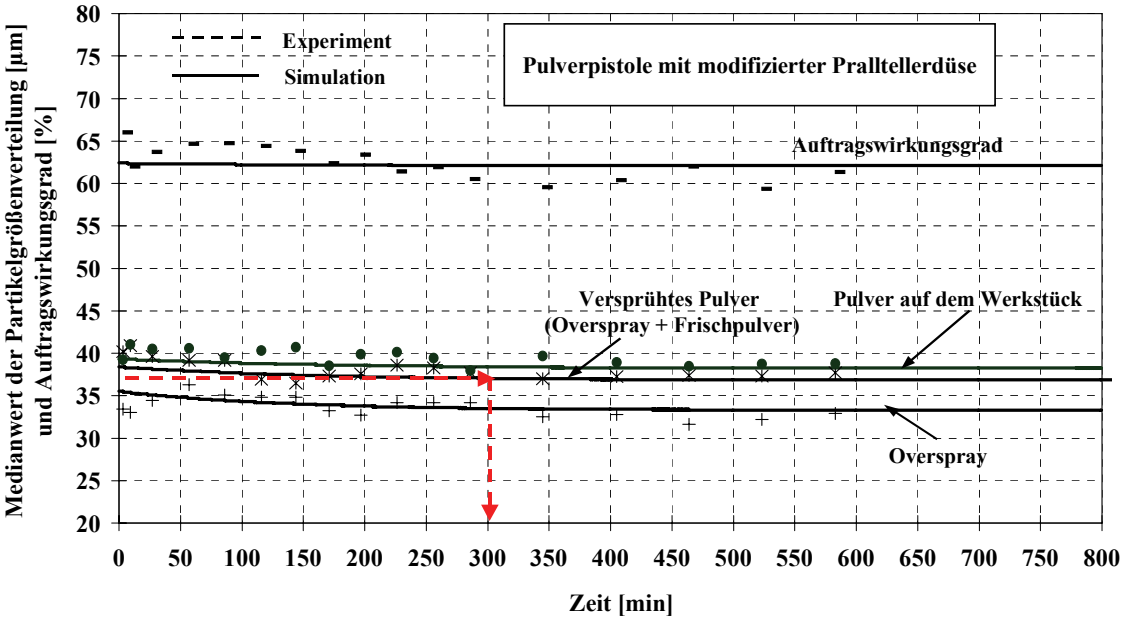


Abb. 2.13: Verlauf des Auftragswirkungsgrades und der Partikelgrößenkennwerte bei kontinuierlicher Pulver-Kreislaufführung mit einer modifizierten Pistolendüse

2.2.4 Messverfahren zur Bestimmung der partikelgrößenbezogenen Ladungsverteilung im Sprühstrahl

Die Aufladung der Pulverpartikel wurde bisher integral gemessen, d.h. es wurde die Ladung pro Gramm oder Volumeneinheit des Pulvers angegeben (sogenannte q/m-Methoden). Eine exakte Ladungsmessung bezogen auf die einzelnen Korngrößen war damit nicht möglich. Dies war bisher ausreichend, um schnelle Rückschlüsse auf den technischen Ablauf zu gewinnen. Dabei sind folgende drei Verfahren zum Einsatz gekommen [58]-[60]:

- Ermittlung der Tribofähigkeit mit dem IQt-Meßgerät
- Ermittlung der Ladung durch Nutzung der Fliehkraft (Rotationsmethode)
- Ermittlung der Ladung mit dem Abblasverfahren.

Für genauere Untersuchungen der elektrostatischen Effekte bei der Pulverbeschichtung, insbesondere bei der Untersuchung von Pulversprühsystemen, dient das für die Pulverbeschichtung entwickelte Ladungsspektrometer der Fa. Epping GmbH (q/d-Verfahren). Bisher konnte dieses Messverfahren lediglich bei der Ladungsmessung von „Carrier-Pulver“ (Toner-Pulver für Kopierer) erfolgreich eingesetzt werden [61]-[62].

Mit dem in Abb. 2.14 dargestelltem Versuchsprinzip wird erstmals die partikelgrößenspezifische Ladungsverteilung von verschiedenen Pulversprühsystemen ermittelt. 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. Mit einem Bildverarbeitungssystem werden die Größe und der Niederschlagsort der Partikel erfasst und daraus mittels einer physikalischen Modellrechnung die partikelgrößenbezogenen Ladungswerte abgeleitet [02], [63]-[64].

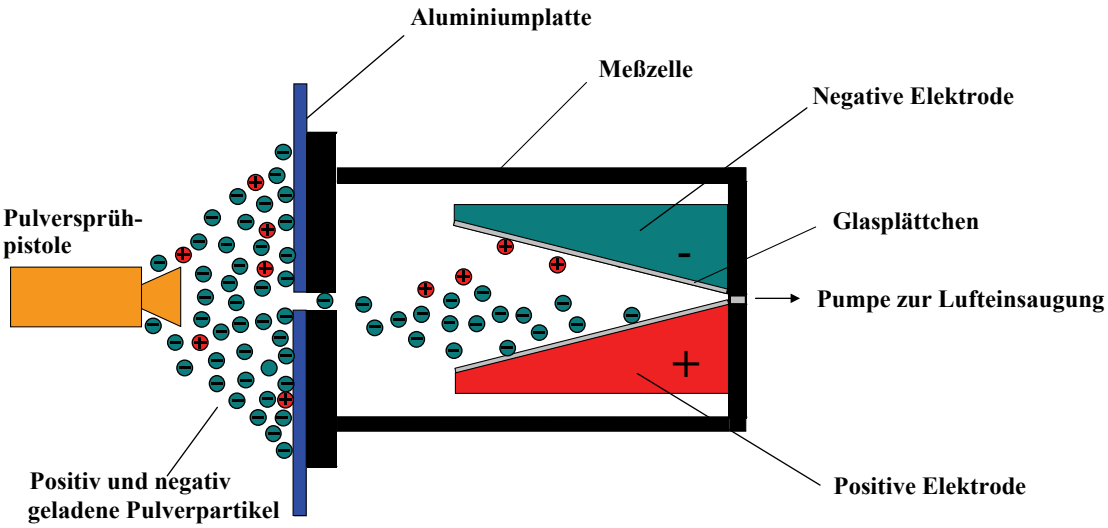


Abb. 2.14: Prinzip des Ladungsspektrometers (q/d-Verfahren) [02]

Bei der Entwicklung dieses Ladungsspektrometers für Pulverlacke wurde geklärt, wie sich die Messbedingungen und Prozessparameter auf das elektrische Aufladungsverhalten von Pulverlacken auswirken. Folgende Randbedingungen wurden dabei untersucht:

- Reproduzierbarkeit des Messgerätes
- Einfluss konstruktiver Parameter am Messsystem
- Einfluss der Probennahme aus dem Sprühstrahl
- Einfluss des Aufladungsprinzips und der Düsengeometrie der Sprühsysteme und
- Einfluss des Pulverlackmaterials.

Die Untersuchungen haben gezeigt, dass dieses Ladungsspektrometer erfolgreich für die Bestimmung der partikelgrößenbezogene Ladungswerte von Standard-Industrie-Pulverlacken gegenüber den konventionellen Ladungsmessverfahren eingesetzt werden kann.

Zum anderen dient dieses Messverfahren auch zur Überprüfung der partikelspezifischen Aufladung des Pulvers bei der Entwicklung neuer Pulverpistolen (siehe Kapitel 4).

3 Applikationstechnische Optimierungsmaßnahmen

Mit Hilfe des entwickelten Prüfinstrumentariums werden nun mehrere experimentelle Lösungen von unterschiedlicher Art zur Optimierung der Pulverlackapplikation bzw. der Pulver-Kreislaufführung ausgearbeitet. Dabei werden besonders die auf die Pulver-Kreislaufführung empfindlichen Bereiche, insbesondere

- das Applikationssystem (Auflademethode, Düsengeometrie)
- das Pulverlacksystem (Korngrößenspektrum, wie z.B. gesichtetes Pulver, Pulver mit einem engen Korngrößenspektrum) und
- das Pulver-Rückgewinnungssystem (Filter- oder Zyklon-Rückgewinnung oder andere denkbare Alternativen)

bezüglich Optimierungsmöglichkeiten untersucht und modifiziert. Wichtig dabei ist die weitgehende Unabhängigkeit der einzelnen Lösungsmöglichkeiten, da einem Anwender Alternativen zur Auswahl stehen sollen. Die zu untersuchenden Lösungen müssen einfach und schnell ausgeführt werden können.

Bei den zu optimierenden Pulver-Applikatoren handelt es sich dabei zunächst um Ergänzungs- bzw. Erweiterungskonstruktionen bestehender Systeme. Die Pulversprühsysteme werden im Düsenbereich bezüglich Partikelseparierung, Sprühwolkenform (Sprühprofil auf dem Werkstück) und Auftragswirkungsgrad hin optimiert. Die Lösungen dazu sind ausschließlich für Automatikgeräte, nicht jedoch für Handgeräte bestimmt (Arbeitssicherheit, siehe dazu Kapitel 4.2).

Bei den Pulverlacksystemen kann das Partikelseparierungsverhalten durch Sichtung feiner Partikel beim Pulverlackhersteller oder beim Anwender verbessert werden. Dabei ist es auch möglich gleichzeitig den Grobanteil zu reduzieren (Pulver mit engem Kornspektrum).

Bei den Pulver-Rückgewinnungssystemen (Filter- oder Zyklonrückgewinnung) muss geklärt werden, wie sich diese auf das Rückgewinnungsverhalten auswirken, ob noch Verbesserungspotential darin stecken und ob denkbare Alternativen existieren.

Diese Optimierungsmaßnahmen werden aufgrund der praktischen Erfahrung und der Einfachheit weitgehend empirisch und experimentell nach den in Kapitel 2 beschriebenen Methoden durchgeführt.

3.1 Pulversprühdüsenoptimierung

3.1.1 Entwicklung separierungsarmer Pulversprühdüsen mit nicht veränderbarem Sprühbild - aerodynamischer Lösungsansatz

Die Korngrößenseparierung bei der Pulverbeschichtung ist u.a. stark von der Strömungsführung im Pulverapplikator bzw. von der Pulversprühwolkenausbildung und somit von der Düsengeometrie abhängig. Da dieses Bauteil der Pistole relativ preiswert ist, lohnt es sich hier zu optimieren.

Auf dem Pulverbeschichtungsbereich haben sich bisher vor allem folgende zwei Sprühdüsen etabliert:

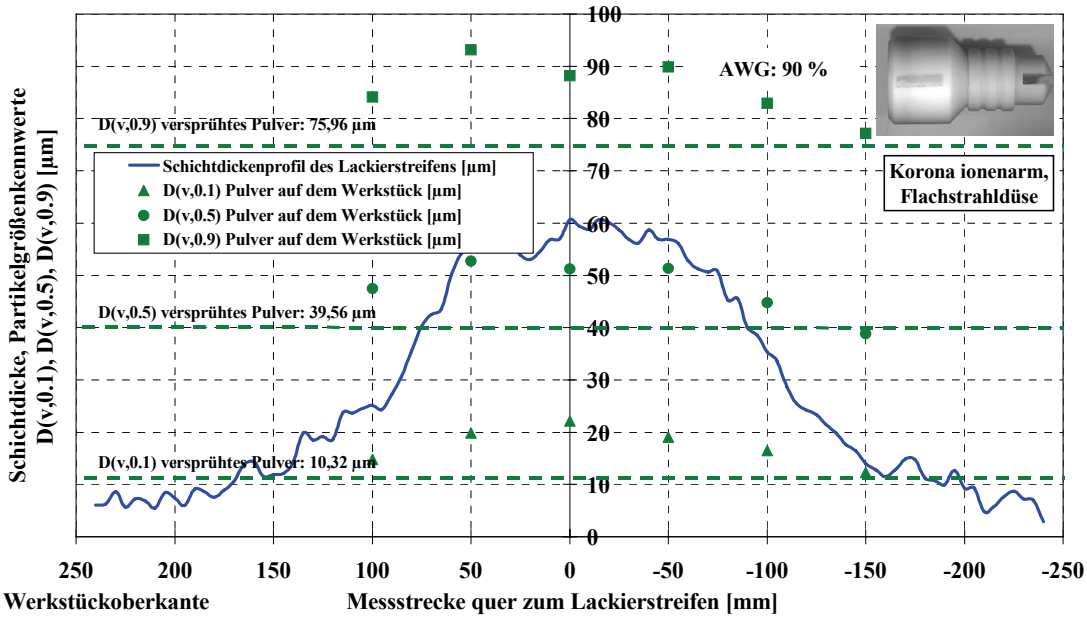
- Flachstrahldüse (oder Schlitzdüse - Flachstrahl)
- Pralltellerdüse (Prallkegeldüse - Rundstrahl).

Mit dem eingangs beschriebenen Testverfahren für Pulversprühsysteme werden zunächst diese zwei Sprühstrahldüsen bezüglich Sprühstrahlform, Partikelseparierung und Auftragswirkungsgrad hin untersucht, um mögliche Optimierungspotenziale dieser Düsen auszuarbeiten. Die Versuche werden mit den in Tab. 3.1 dargestellten Beschichtungsparametern durchgeführt.

Versuchsparameter	**Werte**
Pulverlackmaterial	Epoxid-Polyester-Mischpulver (D(v,0.5) = 40 µm)
Sprühsystem	Korona-Automatik Sprühsysteme
Sprühabstand [mm]	200
Pulvermassenstrom [g/min]	130
Fördergeschwindigkeit [m/min]	3–5 (an Schichtdicke angepasst)
Hochspannung [kV]	80
Luftsinkgeschwindigkeit [m/min]	0,25
Klima [°C / % r.F.]	20 / 40

Tab. 3.1: Konstante Versuchsparameter für die Düsenoptimierung

Im Folgenden werden die Beschichtungsergebnisse zur Charakterisierung des Sprühprofils auf dem Werkstück dargestellt. Zur Bewertung der Pulversprühwolke wird zum einen die Symmetrie des Sprühprofils am eingebrannten Prüfblech, zum andern die örtliche Partikelgrößenverteilung am nicht eingebrannten Prüfblech herangezogen sowie der Betrag des Auftragswirkungsgrades ermittelt. Abb. 3.1 zeigt die Beschichtungsergebnisse zur Charakterisierung der Sprühwolke des Standard-Flachstrahls (oben) und des Standard-Pralltellers (unten). Zur qualitativen Beurteilung wird ergänzend das Laserlichtschnittverfahren eingesetzt (Abb. 3.2).



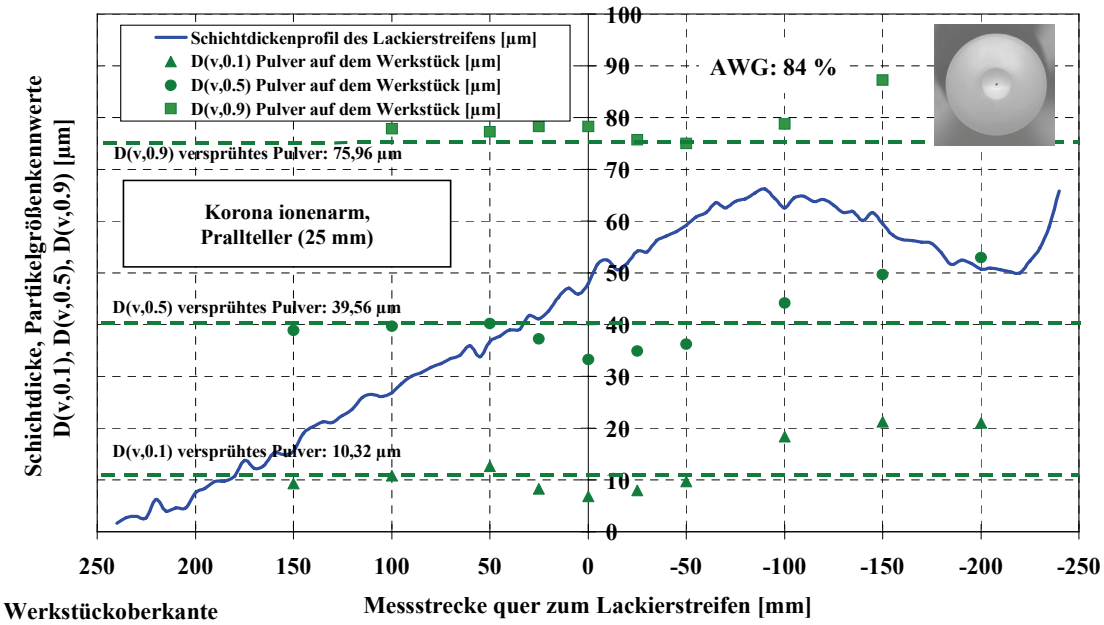


Abb. 3.1: Schichtdickenprofil und Partikelgrößenseparierung innerhalb der Sprühwolke bzw. im Lackierstreifen bei einer Standard-Flachstrahldüse (oben) und bei einer Standard-Pralltellerdüse (unten)

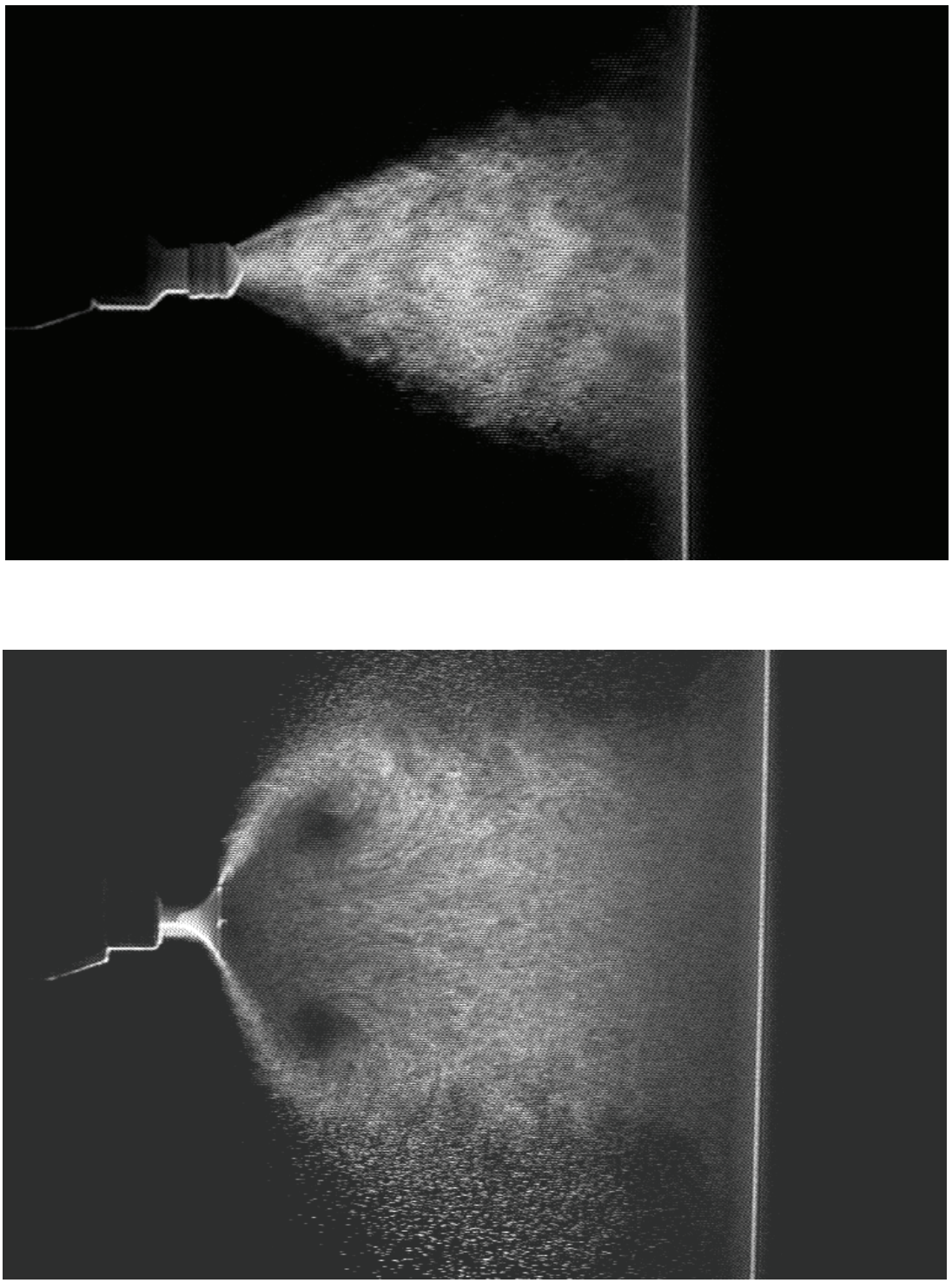


Abb. 3.2: Laserlichtschnittaufnahme einer Flachstrahldüse (oben) und einer Pralltellerdüse (unten)

Bei der Flachstrahldüse lässt sich die Pulverwolke durch äußere Kräfte kaum beeinflussen. Die Sprühwolke ist weitgehend symmetrisch zur Pistolenachse. Die Geschwindigkeit der Pulverpartikel beim Austritt aus der Düse ist so groß, dass deren Axialimpuls genügt, um die meisten Partikel relativ geradlinig bis zum Objekt zu transportieren. Während vor allem die großen Partikel aufgrund ihrer Trägheit geradlinig zum Objekt befördert werden, gelangen feine Partikel in die Randbereiche des Pulverstrahls. Deshalb scheiden sich bei der Flachstrahldüse besonders die groben Partikel im Zentrum des Profils ab, während die kleinen Partikel sich eher am Randbereich des Profils niederschlagen (Abb. 3.1, oben).

Bei der Pralltellerdüse ist im Zentrum der Sprühwolke die Ausbildung von Wirbeln zu erkennen. Diese entstehen bei der Umströmung des Pralltellers, wodurch sich ein Unterdruckgebiet im Innern der Wolke ausbildet. Dies führt dazu, dass der Pulverfeinanteil, der in der Lage ist, der Luftströmung zu folgen, in das Zentrum der Pulverwolke befördert wird. Gröbere Partikel behalten aufgrund ihres größeren Eigenimpulses länger die durch den Pralltellerrand vorgegebene Strömungsrichtung bei und gelangen somit eher in den Randbereich der Sprühwolke. Die gemessene Partikelseparierung auf dem Profil bestätigt die Ergebnisse (Abb. 3.1, unten). Aufgrund der größeren Austrittsöffnung der Pralltellerdüse ist die axiale Austrittsgeschwindigkeit der Pulverpartikel nicht so hoch wie beim engen Flachstrahl. Die Pulverpartikel reagieren deshalb auf die Kabinensinkluft empfindlicher und werden nach unten abgelenkt. Das Sprühprofil wird deshalb stark unsymmetrisch (Abb. 3.1, unten).

Die inhomogene Ausbringung der Pulverpartikel bzw. inhomogene Verteilung der Partikel im Sprühstrahl trägt maßgeblich zur Partikelseparierung auf dem Werkstück und somit auch im Pulverkreislauf bei. Eine naheliegende Lösung zur Verbesserung der Kreislaufführung ist die Konstruktion „separierungsarmer Düsen“ bei denen sich das Sprühprofil bezüglich der Partikelverteilung, Partikelgeschwindigkeit und Partikeldichte homogen ausbildet. Der Einsatz solcher Pulverdüsen führt dazu, dass sich das Pulver auf dem Werkstück gleichmäßiger abscheidet und sich im Pulverkreislauf weniger entmischt.

Die Entwicklung „separierungsarmer Düsen“ ist eine der wichtigsten Primärmaßnahme für einen prozesssicheren Pulverkreislauf.

Aufgrund der bei der Flachstrahl- und Pralltellerdüse gewonnenen Erkenntnisse liegt es nahe, einen konstruktiven Ansatz einer neuen „separierungsarmen Pulverdüse“ in der Kombination einer konventionellen Pralltellerdüse und einer konventionellen Flachstrahldüse zu finden.

Die Entstehung von Kernwirbeln beim Prallteller kann verringert werden, wenn ein Teil der Pulver-Luftströmung nicht über den Pralltellerrand hinaus befördert wird, sondern direkt axial ins Innere der Wirbel geführt wird. Dies kann z.B. dadurch erzielt werden, indem man in den Pralltellerring Bohrungen oder beliebig andere Aussparungen anbringt (Abb. 3.3). Bei der Anordnung der Bohrungen müssen jedoch einige Punkte beachtet werden:

- Die mittlere axiale Anströmgeschwindigkeit der Pulverpartikel v_{PY} sollte im Bereich der Bohrungseingänge größer sein, als die radiale Komponente v_{PX}. Da diese Geschwindigkeiten wesentlich von der Profilsteigung der Pralltellerfläche abhängen, ist die Position der Bohrungen relativ zur Pralltellerachse eingeschränkt (Abb. 3.3). Bei den Lochtellerdüsen mit einem Randdurchmesser von 17, 25 und 32 mm beträgt dieser Abstand:
  - Tribo-System: r_B = 5 bis 7 mm
  - Korona-System: r_B = 3 bis 5 mm.

- Die Anzahl und die Größe der Bohrungen richtet sich nach der Aufteilung des Massenstromes in den inneren Wirbelbereich durch die Aussparungen und in den äußeren Bereich des Pralltellerrandes. Bei den untersuchten Düsen sollte das Massenstromverhältnis ca. 1:1 betragen. Aus

$$\frac{1}{2} \times A_{Ring} \approx A_{Bohrung}$$

  ergeben sich für eine Lochtellerdüse mit 8 Bohrungen und einem Randdurchmesser von 17, 25 und 32 mm näherungsweise folgende Bohrungsdurchmesser:

  - Tribo-System: d_B = 3,0 bis 3,5 mm
  - Korona-System: d_B = 2,5 bis 3,0 mm.

- Neben den Bohrungen sind natürlich beliebig andere Kombinationen von Aussparungen mit zwei oder mehr Reihen von Öffnungen um die Pralltellerachse sowie Sondervarianten, wie z.B. schräge Bohrungen möglich. Scharfe Kanten sollten jedoch vermieden werden, ebenso rechteckige Aussparungen.
- Bei der Konstruktion der Düsen muss beachtet werden, dass kein Pulver in den Bohrungen ansintert (Mindestdurchmesser nicht unterschreiten).

Anhand dieser konstruktiver Überlegungen werden in der ersten Phase der Entwicklung „separierungsarmer Düsen“ verschiedene Düsentypen nach obiger Prüfmethode experimentell untersucht. Erprobt werden verschiedene Varianten „einreihiger“ und „zweireihiger“ Ausführungen sowie Sondervarianten des im Durchmesser von 17, 25 oder 32 mm breiten Lochtellers.

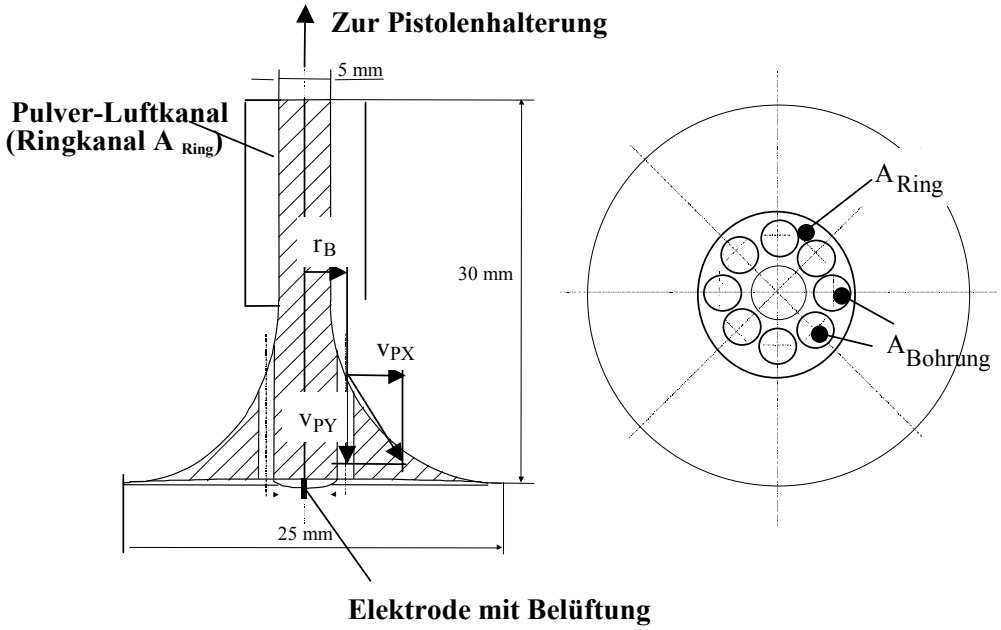


Abb. 3.3: Strömungsmechanisch optimierte Pralltellerdüse der 1. Generation (Prallteller mit Bohrungen, Zeichnung nicht maßstäblich)

Abb. 3.4 zeigt das Sprühprofil mit der örtlichen Partikelseparierung eines einreihigen Lochtellers mit 25 mm Tellerdurchmesser, durchgeführt nach eingangs beschriebener Meßmethode. Der Rückstau feiner Partikel im Kernbereich des Sprühstrahls wird durch das teilweise Durchströmen der Partikel durch die Bohrungen gegenüber der konventionellen Pralltellerdüse verringert. Dadurch wird im Kernbereich der Sprühwolke die Partikelseparierung vermindert. Als Ergebnis erhält man in der Schichtdickenverteilung und in der Partikelgrößenseparierung eine Kombination aus konventioneller Flach- und konventioneller Pralltellerdüse. Das Sprühprofil entspricht in etwa dem eines Flachstrahls. Das Schichtprofil ist wesentlich unempfindlicher auf die Luftströmung und auf die Schwerkraft und wird gleichmäßiger als das reine Pralltellerprofil. Die Partikelseparierung ist geringer als bei den Flachstrahl- und bei den Pralltellerdüsen. Hier heben sich quasi die unterschiedlichen Separationsneigungen des Flachstrahls (Randbereich: feine Partikel; Kernbereich: grobe Partikel) und des Pralltellers (Randbereich: grobe Partikel; Kernbereich: feine Partikel) auf. Dies wirkt sich auch auf die Partikelseparierung im Pulverkreislauf deutlich besser aus.

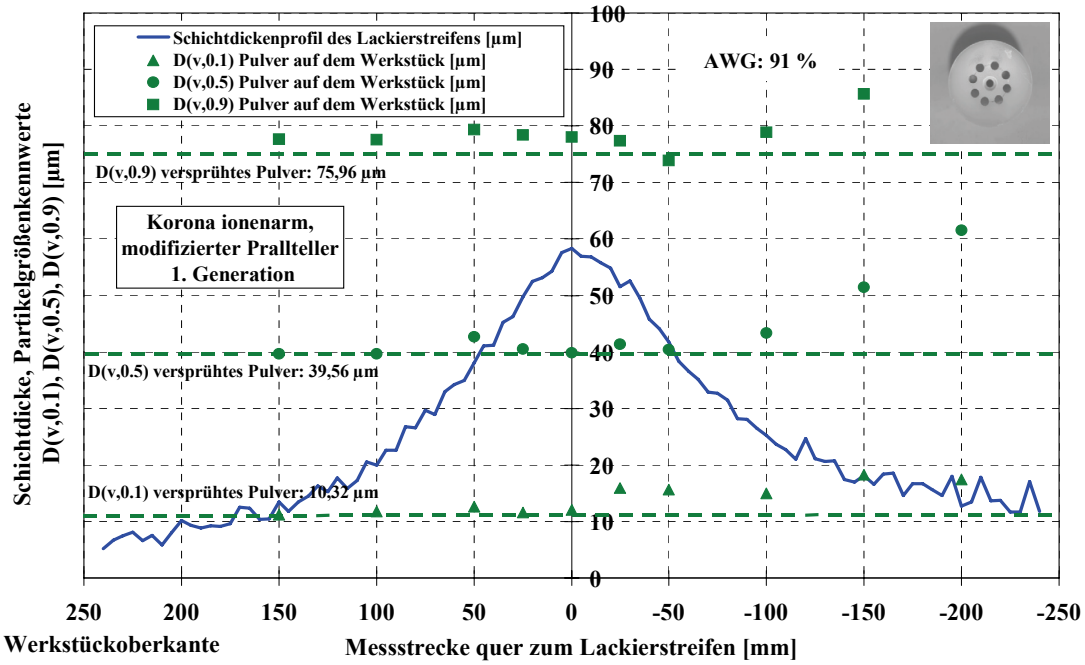


Abb. 3.4: Schichtdickenprofil und Partikelgrößenseparierung innerhalb der Sprühwolke bzw. im Lackierstreifen beim modifizierten Prallteller der 1. Generation

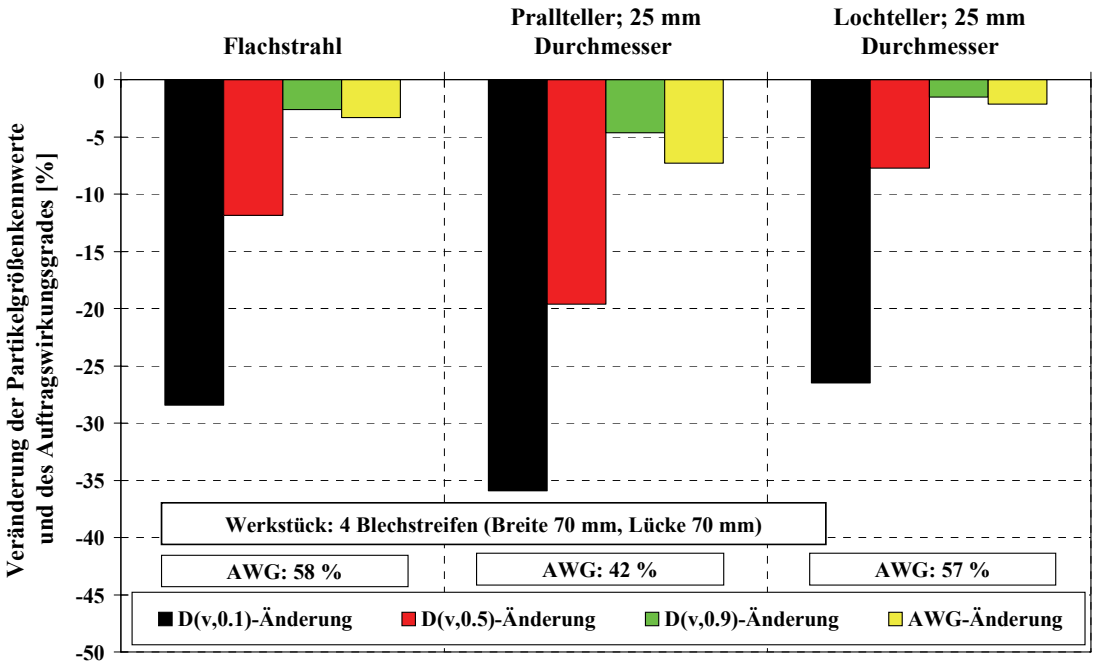
Die Düsenmodifikationen wirken sich auch aufgrund ihrer geringen Partikelseparierung im Sprühstrahl und bei der Applikation günstiger bezüglich der Stabilität des Pulverlack-Kreislaufes aus. Abb. 3.5 zeigen die Kreislaufergebnisse des KAP-Sim-Verfahrens bei der Beschichtung horizontaler Blechstreifen bei unterschiedlicher Breite und Anordnung.

Die Ergebnisse zeigen auch, dass neben der Düsengeometrie auch die Geometrie der Werkstücke und die Art der Werkstückanordnung (Warenträgerbelegung) einen Einfluss auf die Partikelseparierung bei der Applikation hat. Allgemein kann man sagen, dass bei filigran angeordneten Teilen auf dem Warenträger, die Partikelseparierung geringer ist, als bei großflächigen und für den Sprühstrahl undurchdringbaren Werkstücken. Bei filigran angeordneten Teilen wird der Pulverstrahl am Werkstück gleichmäßig aufgeteilt; ein Teil der Partikel gelangt so auch an den Umgriff (Werkstückrückseite). Dies ist z.B. bei der Beschichtung von Rohren oder Drähten vorteilhaft. Bei großflächigen Teilen dagegen prallt ein Teil der Partikel seitlich ab (Effekt wie bei der Anströmung einer unendlich großen ebenen Platte), es kommt dabei zu Turbulenzen und Entmischungen in der Pulversprühwolke. Die Pulverlack-Kreislaufsimulation bestätigt diese Erkenntnis. Bei der Beschichtung horizontaler Blechstreifen sind dünnere und dichter angeordnete Streifen bezüglich des Kreislaufverhaltens am günstigsten.

Bei den Kreislaufsimulationen mittels des KAP-Sim-Verfahrens sieht man, dass der Pulverlack-Kreislauf bei den „modifizierten Prallteller der 1. Generation“ stabiler verläuft, als bei den konventionellen Düsentypen. Dies ist vor allem auf den gleichmäßigeren Austrag der Pulverpartikel aus der Pistole bzw. auf die homogene Verteilung der Partikel in der Pulverwolke durch die Pulverdüse zurückzuführen.

Die strömungstechnische Düsenoptimierung ist somit ein erster wichtiger Schritt zur Verringerung der Partikelseparierung im Pulverkreislaufprozess.

Neben den strömungstechnischen Einflüssen spielen aber auch die elektrostatischen und –dynamischen Größen eine weitere wichtige Rolle für die Separierung im Sprühstrahl und bei der Applikation. Deshalb wird, zunächst unabhängig von der strömungstechnischen Lösung, im nächsten Schritt die Partikelseparierung durch elektrostatische Maßnahmen an der Düse verbessert.



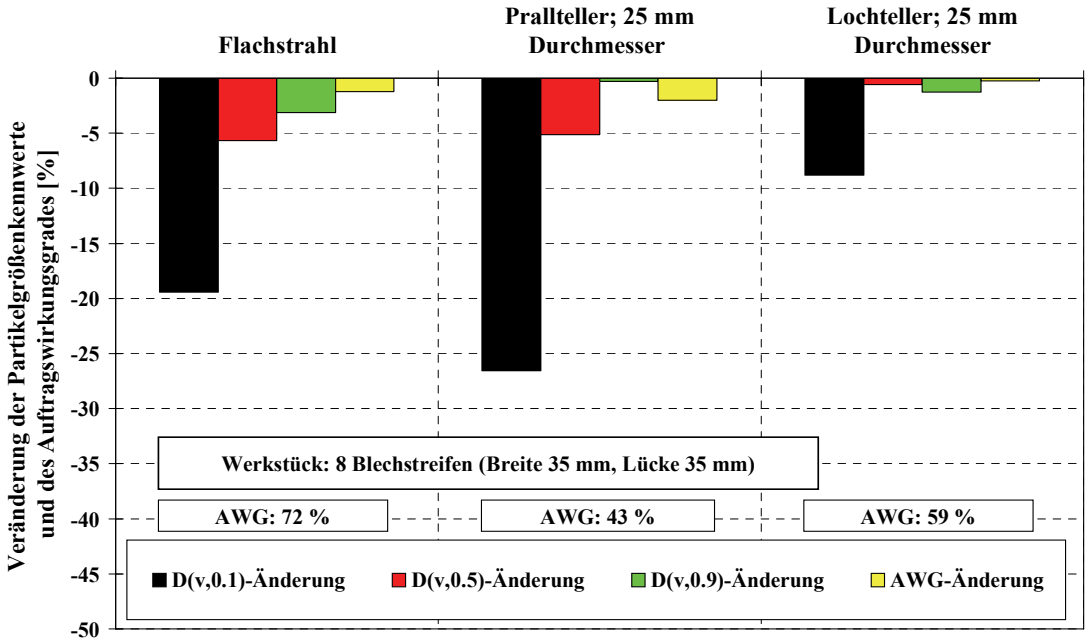


Abb. 3.5: Veränderung der Verschiebung des Partikelgrößenspektrums beim Pulverlack-Kreislauf durch den Einsatz modifizierter Pulversprühdüsen (Korona-Sprühsystem, ionenarm, Pulvermassenstrom: 130 g/min, Sprühabstand: 200 mm, max. Schichtdicke 70 µm (Werkstück oben: 4 Blechstreifen, Breite: 70 mm, Lücke: 70 mm; Werkstück unten: 8 Blechstreifen, Breite 35 mm, Lücke 35 mm))

3.1.2 Entwicklung separierungsarmer Pulversprühdüsen mit nicht veränderbarem Sprühbild - elektrodynamischer Lösungsansatz

Bei den Pralltellerdüsen strömen die Pulverpartikel über eine konkav gekrümmte Fläche nach außen und lösen sich am Pralltellerrand tangential ab. Die Korona-Elektrode zur Aufladung der Pulverpartikel ist jedoch an der Pralltellerachse angebracht. Um diese Elektrode herum bildet sich ein Potentialfeld aus, das jedoch von der Elektrode weg stark abnimmt. Die abströmenden Partikel durchqueren das Potentialfeld nicht in seinem Zentrum mit der höchsten Raumladungsdichte, sondern etwas außerhalb davon. Ziel ist es daher, eine Pralltellerdüse zu modifizieren, bei der die Partikel, ähnlich wie bei der Flachstrahldüse, das Zentrum des Raumladungsfeldes durchströmen. Durch die Pralltellermodifikation der 1. Generation wird dies teilweise realisiert. Etwa die Hälfte der Partikel strömen dabei durch Bohrungen unmittelbar an der Elektrodenachse vorbei (Abb. 3.3 und 3.4). Im nächsten Schritt der Düsenoptimierung wird untersucht, wie sich das Applikationsverhalten verändert, wenn am Pralltellerrand, wo sich der Partikelstrom ablöst, die Raumladungsdichte erhöht wird. Dies kann durch folgende konstruktive Änderungsmaßnahmen realisiert werden:

- Umverteilung der elektrischen Aufladung
  - durch das Anbringen von Aluminium-Folie an der Stirnfläche des Prallkegels wird von der Pralltellerspitze ein elektrischer Kontakt bis zum Pralltellerrand geschaffen („elektrischer Ring“)
  - durch feine Bohrungen von der Prallkegelachse zum Pralltellerrand hin wird mittels feiner Nadelspitzen ein punktueller elektrischer Kontakt bis zum Pralltellerrand geschaffen („elektrischer Punkt“).

- Innenaufladung
  - Elektroden im Strömungskanal laden die Partikel beim Durchströmen des Rohres auf. Bei der Innenaufladung wird das äußere elektrische Feld jedoch zu schwach. Sollte daher mit Außenaufladung kombiniert werden.

- Zusätzliche Aufladung mittels Außen-Elektroden
  - Mittels eines zusätzlichen Hochspannungserzeugers werden durch hochspannungsführende Zusatzelektroden die Partikel aufgeladen. Sind diese auch noch steuerbar, dann kann auch die Sprühwolkenform durch Variation der Hochspannung der einzelnen Elektroden gesteuert werden. Möglicherweise jedoch großer experimenteller Aufwand notwendig.

Abb. 3.6 zeigt schematisch mögliche Anordnungen der Elektroden.

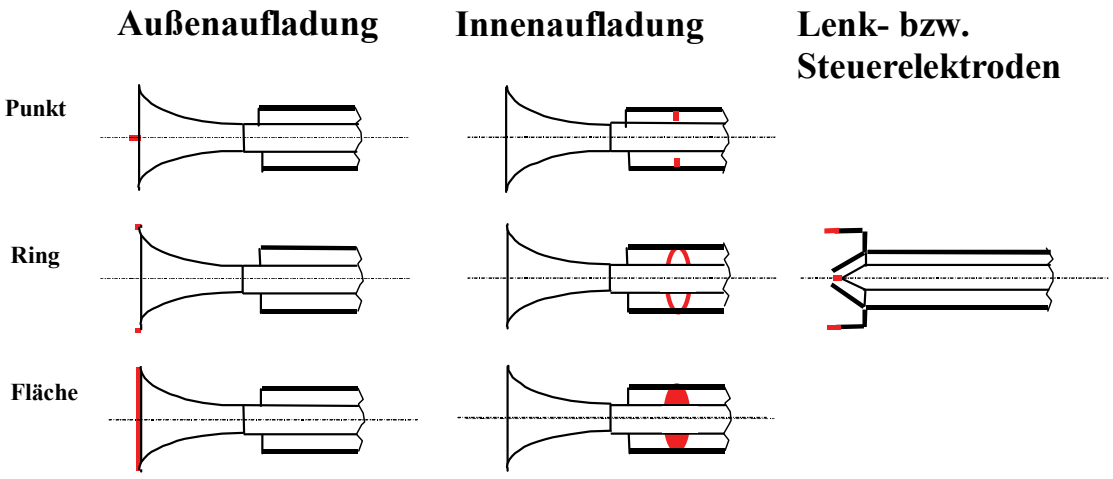


Abb. 3.6: Beispiele für die unterschiedliche Aufladungsmethoden der Pulverteilchen bei einer Pralltellerdüse

Untersucht wird eine einfache, aber neue Methode der Aufladung. Die Pulverteilchen werden beim Abströmen am Prallkegel durch 3 bzw. 5 zusätzlich angeordnete Nadeln (im Winkel von 120 ° bzw. 72 ° zueinander) an der Pralltellerkante aufgeladen („elektrischer Punkt“).

Die Auswirkungen auf die Applikation durch die Umverteilung der Elektroden von der Pralltellerspitze zum Pralltellerrand hin führen zu folgenden Ergebnissen. Es macht praktisch kein Unterschied, ob 3 oder 5 Elektroden an den Pralltellerrand führen, sie sollten lediglich symmetrisch zueinander angeordnet sein. In Abb. 3.7 sind die Applikationsergebnisse mit 5 Elektroden dargestellt.

Die Ergebnisse zeigen, dass durch die Umverteilung der Hochspannung zum Pralltellerrand hin das Sprühprofil etwas symmetrischer und die Partikelseparierung deutlich verringert wird als bei den Standard-Pralltellerdüsen.

Es macht dabei keinen Unterschied, ob die Partikel durch einzelne Punkte am Pralltellerrand aufgeladen werden oder durch die ganze Ringfläche des Pralltellers. Wichtig ist nur, dass die Kanten und Spitzen scharf genug sind, um eine Korona-Entladung mit Luftionen zu erzeugen.

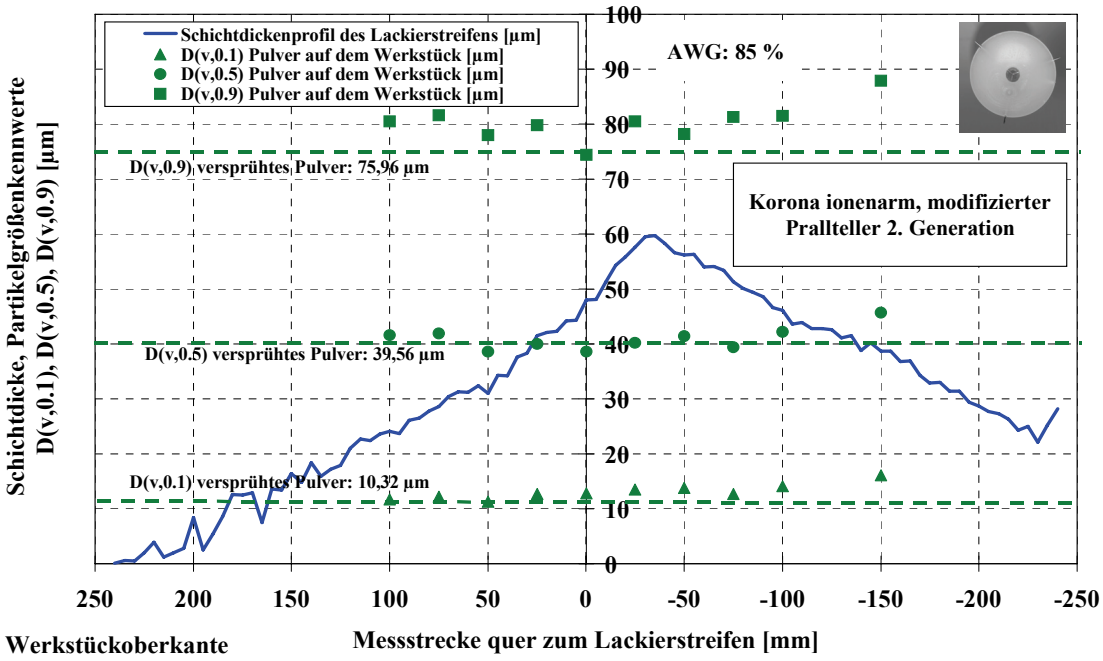


Abb. 3.7: Schichtdickenprofil und Partikelgrößenseparierung innerhalb der Sprühwolke bzw. im Lackierstreifen beim modifizierten Prallteller der 2. Generation

3.1.3 Entwicklung separierungsarmer Pulversprühdüsen mit nicht veränderbarem Sprühbild - aerodynamischer und elektrodynamischer Lösungsansatz

Da sich offensichtlich die elektrostatischen Kräfte eher auf die Partikelseparierung und die strömungsmechanischen Kräfte eher auf die Sprühwolkenform auswirken, wird im letzten Schritt der Düsenmodifikationen eine Kombination der Pralltellerdüsen der 1. und 2. Generation entwickelt.

Auf die Auswirkungen der Partikelseparierung beim Pulverkreislauf bei Innenaufladung bzw. mit Außenelektroden, wird später eingegangen (Kapitel 4.2).

Bei der Optimierung des Pulverkreislaufprozesses durch Minimierung der Partikelseparierung während der Applikation schneidet die Kombination von strömungstechnisch und elektrostatisch modifizierter Düse am besten ab. Das Sprühprofil ist weitgehend symmetrisch und die Partikelseparierung am geringsten (Abb. 3.8). Für die Praxis bedeutet dies:

- Beim Einsatz dieser Düsen ist aufgrund der geringen Partikelseparierung ein schneller und stabiler Pulverkreislauf möglich. Der Auftragswirkungsgrad und die Schichtdicke verringern sich während des Pulverkreislaufes gegenüber den konventionellen Düsen deutlich weniger.
- Das Sprühprofil wird gleichmäßiger und symmetrischer und lässt sich bei der Komplettbeschichtung einfacher überlagern als die konventionellen Düsen.

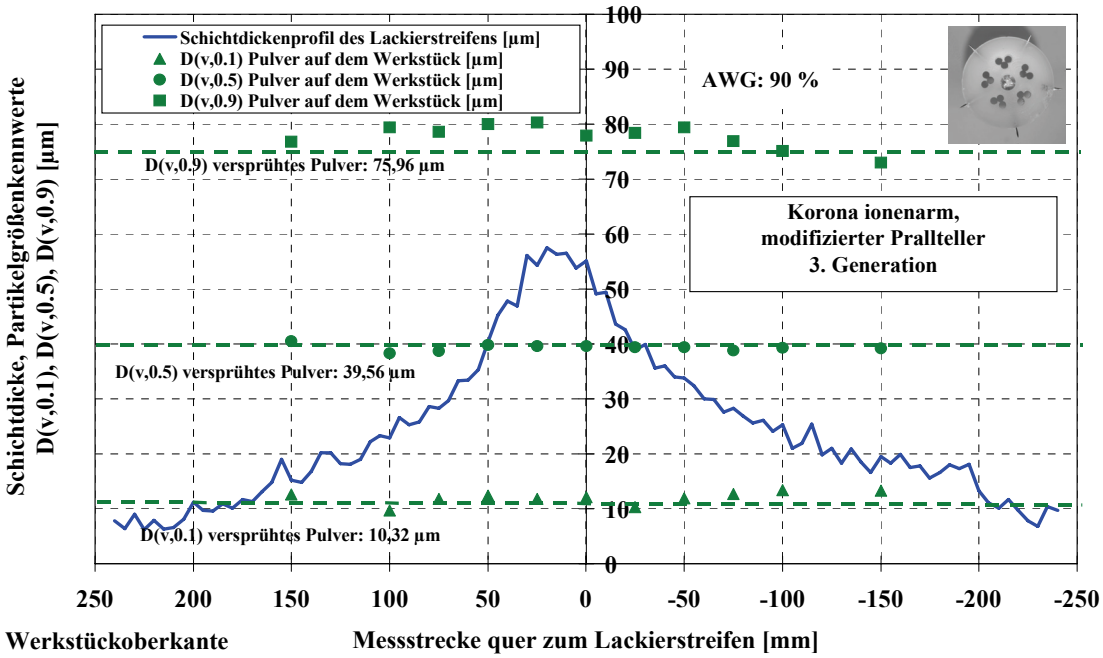


Abb. 3.8: Schichtdickenprofil und Partikelgrößenseparierung innerhalb der Sprühwolke bzw. im Lackierstreifen beim modifizierten Prallteller der 3. Generation

Die Entwicklung und Erprobung von neuen prozess- und anlagentechnischen Maßnahmen zur kontrollierten Pulverlack-Kreislaufführung wird durch die Optimierung der Pulversprühdüsen maßgeblich beeinflusst. Die Düsenoptimierung stellt somit eine wichtige experimentelle Primärmaßnahme zur prozesssicheren Pulver-Kreislaufführung dar.

Ein bisher jedoch zu wenig beachtetes Kriterium hinsichtlich der Einsatzbreite von Sprühsystemen ist die mangelnde Flexibilität der Systeme bei der Beschichtung unterschiedlicher Werkstückgeometrien, da die Pulverwolke während des Beschichtungsvorgangs nicht verändert werden kann. Ideal wären Pulversprühsysteme, bei denen der Sprühstrahl von einer sehr schmalen bis zu einer sehr großen Sprühwolke stufenlos gesteuert werden könnte, ohne den Beschichtungsvorgang zu unterbrechen.

Dazu muss auf die Erfahrungen aus dem Nasslackbereich (z.B. elektrostatische Sprühwolkenformung) zurückgegriffen werden oder es müssen neue Lösungen (z.B. strömungsmechanische Sprühwolkenformung) erarbeitet werden. Da es sich insbesondere bei der strömungsmechanischen Sprühwolkenformung um Neukonstruktionen von Pulverpistolen handelt, muss hier die Simulation der Strömungsmechanik und der Elektrostatik für die Pulverbeschichtung entsprechend eingesetzt werden, um die Entwicklungszeit zu verkürzen. Darüber wird im Kapitel 4 der Arbeit berichtet.

3.2 Entwicklung separierungsarmer Pulverlacksysteme

Aufgrund des Einflusses der Korngrößenverteilung auf das Kreislaufverhalten liegt es nahe, auch mit dem Korngrößenspektrum zu experimentieren. Wie bereits erläutert, besteht der Standard-Industrie-Pulverlack aus Partikeln im Größenbereich von ca. 1 bis 100 µm, Acrylat- und Primer-Pulver aus Partikeln im Größenbereich von ca. 1 bis 40 µm. Infolge des komplexen Wechselspiels der auf die Partikel einwirkenden elektrischen, aerodynamischen und massebezogenen Kräfte verhalten sich die verschieden großen Partikel bei der Applikation unterschiedlich. Bei den meisten Beschichtungsversuchen werden eher die gröberen Partikel am Werkstück abgeschieden, während die feineren Partikel mit der Kabinenabluft eher in die Pulver-Rückgewinnung gelangen. Dies führt dann zu einer Feinkornanreicherung im Kreislaufpulver. Neben verschiedenen prozesstechnischen und anlagentechnischen Maßnahmen stellt die Verarbeitung von gesichtetem Pulver, d.h. Pulver mit reduziertem Feinkornanteil, eine weitere wichtige Optimierungsmaßnahme zur Verbesserung des Pulverkreislaufes dar. Die Sichtung des Pulverlacks kann einerseits bei der Verarbeitung des Pulvers im Rückgewinnungsprozess durch den Einsatz von Zyklonabscheidern, andererseits beim Pulverlackhersteller z.B. mittels eines Zyklonsichters erfolgen. Wird die Sichtung beim Beschichtungsvorgang vorgenommen, so entstehen allerdings Pulverlackverluste beim Anwender (Feinpulver im Endfilter nach der Zyklon-Rückgewinnung) und die Kontamination der Pulverbeschichtungsanlage mit den Feinpulveranteilen des eingesetzten noch ungesichteten Frischpulvers bleibt bestehen, da nur die Oversprayanteile des Pulvers bei der Pulver-Rückgewinnung gesichtet werden. Wird das Pulver bereits beim Pulverlackhersteller behandelt, z.B. mittels eines Zyklonsichters, so kann eine Kontamination der Anlage mit kritischen Feinpulveranteilen von vornherein vermieden werden. Dabei kann dann auch gleichzeitig der in geringen Mengen vorhandene Grobanteil herausgesichtet werden.

Aufgrund dieser entscheidender Bedeutung des Partikelgrößenspektrums für das Kreislaufverhalten wird mit verschiedenen Klassierungen eines EP-Mischpulvers die Verbesserungspotenziale bezüglich einer möglichst geringen Verschiebung des Partikelgrößenspektrums beim Kreislauf ermittelt.

Beschichtet werden weiterhin streifenförmige Werkstücke, als Referenz werden Standard-Blechtafeln herangezogen. Für die Versuche gelten ansonsten die in Tab. 3.2 dargestellten Versuchsparameter.

Versuchsparameter	**Werte**
Pulverlackmaterial	Epoxid-Polyester-Mischpulver (D(v,0.5) = 40 µm)
Sprühsystem	Korona-Automatik Sprühsysteme
Sprühabstand [mm]	200
Pulvermassenstrom [g/min]	130
Fördergeschwindigkeit [m/min]	3–5 (an Schichtdicke angepasst)
Hochspannung [kV]	80
Luftsinkgeschwindigkeit [m/min]	0,25
Klima [°C / % r.F.]	20 / 40

Tab. 3.2: Konstante Versuchsparameter für die Optimierung der Pulverlacksysteme

Die Versuchsergebnisse zeigen, dass durch den Einsatz des gesichteten Pulvers eine drastische Verringerung der Feinkornanreicherung und der Auftragswirkungsgradabsenkung (und damit der Schichtdickenabsenkung) beim Kreislauf erreicht werden kann (Abb. 3.9).

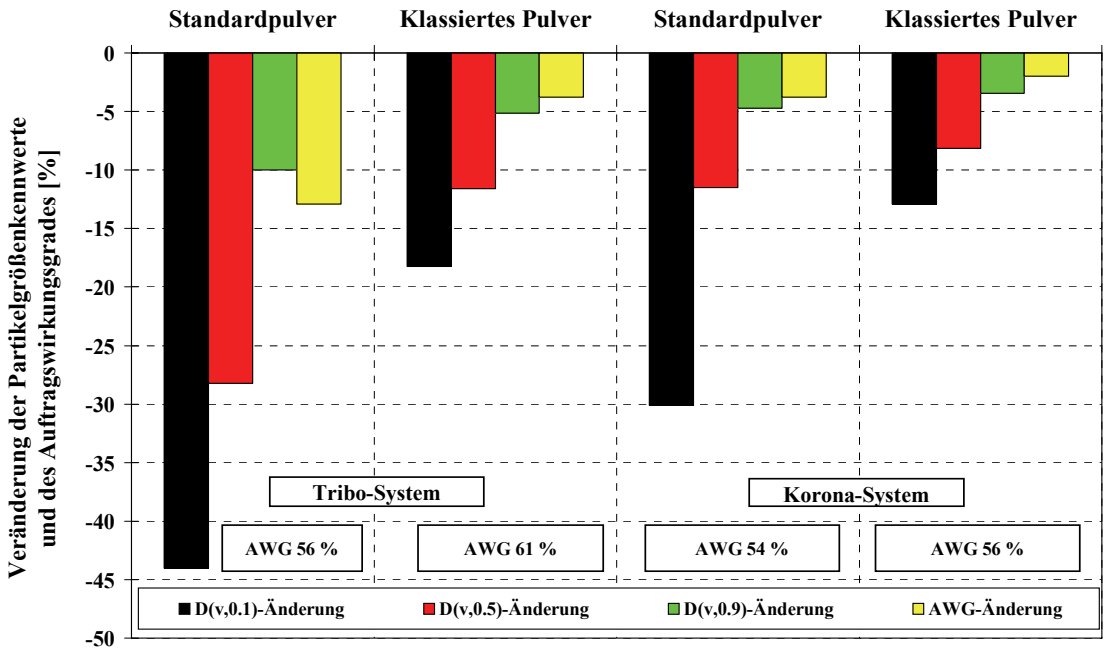


Abb. 3.9: Reduzierung der Feinkornanreicherung beim Pulverlack-Kreislauf durch Anpassung des Partikelgrößenspektrums des eingesetzten Pulverlacks

Die Analyse der partikelgrößenspezifischen Ladungsspektren des versprühten Pulvers mittels der für die elektrostatische Pulverbeschichtung entwickelten „q/d – Methode“ ergibt zwischen dem Standardpulver und dem gesichteten Pulver signifikante Unterschiede. Bei letzterem zeigen die (in wesentlich geringerer Anzahl vorhandenen) kleinen Partikel sowohl bei der Tribo- als auch bei der Korona-Aufladung signifikant höhere Ladungswerte und damit höhere Abscheidgrade auf dem Werkstück.

Zusätzlich kann man noch folgende Vorteile von gesichtetem Pulver gegenüber dem ungesichteten Pulver nennen:

- geringe Staubentwicklung beim Pulverhandling und bei der Fluidisierung [34]
- homogenere Sprühwolke
- z.T. bessere optische Verlaufsqualität der eingebrannten Lackschicht.

Mit der Sichtung kann zudem auch noch der, in geringer Masse vorhandene Grobanteil reduziert werden, um Pulverlacke mit besonders engem Korngrößenspektrum zu erhalten.

3.3 Einsatz optimierter Rückgewinnungsmethoden

Die Staubabscheidung zur Reinhaltung der Luft hat in den vergangenen Jahren aufgrund verschärfter Umweltauflagen in der Industrie zunehmend an Bedeutung gewonnen. Vor allem in Bereichen der eisen-, stahl- und holzverarbeitenden, chemischen und pharmazeutischen Industrie haben sich modernste Abscheidtechnologien bewährt. Hierbei haben sich neben Elektrofiltersystemen auch, aufgrund der Einfachheit und der weitreichenden Erfahrung, die traditionellen Filter- und Zyklonabscheider hervorragend durchgesetzt.

Auch bei der Pulverlackbeschichtung spielt die Abscheidtechnologie eine wichtige Rolle, da bei der Beschichtung Overspraypulver anfällt, das als Feststoff bei der Rückführung von der Luft getrennt werden muss. Bei der Auswahl der geeigneten Rückgewinnungsmethode ist auf die Arbeitssicherheit (Luftreinhaltung, Verschmutzung des Pulvers, etc.), aber auch auf ökonomische Aspekte (z.B. Lackmaterialkosten, Anlagenkosten, Energiekosten, Farbwechselzeiten) zu achten. Bisher haben sich bei der Pulver-Rückgewinnung zwei Abscheidtypen bewährt:

- Filter-Rückgewinnung
- Zyklon-Rückgewinnung.

Bei der Filter-Rückgewinnung wird das Overspraypulver nahezu vollständig zurückgewonnen, Farbwechsel ist jedoch so gut wie ausgeschlossen. Zyklon-Rückgewinnungssysteme sind einfach zu reinigen, ein Teil des Oversprays geht jedoch verloren. Beim Zyklon sind Nachfilter nötig. Der Anwender muss selbst abwägen, welche Rückgewinnungsmethode für ihn günstiger ist.

Anhand einer nachfolgenden Übersicht über den derzeitigen Stand der Technik vorhandener Systeme zur Aerosolbehandlung in der Abluft soll geklärt werden, ob neben den traditionellen Filter- und Zyklonabscheidsystemen und deren Varianten auch noch andere denkbare Abscheidkonzepte, wie z.B. Elektrofiltersysteme oder Zyklonsichter zur Pulver-Rückgewinnung oder evtl. auch bei der Pulverlackherstellung bzw. Pulverlackzusatzbehandlung eingesetzt werden können und welche Optimierungspotenziale noch dahinter stecken.

Die Tab. 3.3 zeigt zunächst eine Übersicht aller möglicher Rückgewinnungsmethoden, samt Vor- und Nachteile. Im Folgenden wird über diese Rückgewinnungsmethoden für die Pulverlack-Rückführung diskutiert, um die optimalen Betriebsparameter der Filter- und Zyklonabscheider oder gar neue und bessere Rückgewinnungsmethoden herauszufinden.

Rückgewinnungsmethode	Funktionsprinzip	Vorteile	Nachteile	Anwendungs-beispiele
Filter	Siebung, Trägheitsabscheidung, elektrostatische Abscheidung.	- Kein Pulververlust, - nahezu jedes Kornspektrum abscheidbar.	- Reinigung aufwändig, daher ungeeignet bei häufigem Materialwechsel.	- Endabscheider in der industriellen Luftreinhaltung, - Endabschheider in der Rein-Raumtechnik.
Filterband	Kombination von Filter-Rückgewinnung und Zyklonabscheider (Staub wird von Filterband abgesaugt und im Zyklon rückgewonnen).	- Einfacher Aufbau, daher leichter zu reinigen.	- Pulververlust durch Austrag des Feinstaubes.	- Abscheidsystem in der Pulverlackbeschichtungsbranche.
Monozyklon	Fliehkraftabscheidung in rotationssymmetrischem Kanal.	- Einfacher Aufbau, daher leichter zu reinigen, - bei kritischen Umgebungsbedingungen einsetzbar.	- Pulververlust durch Austrag des Feinststaubes, - daher als Endabscheider Filtersysteme notwendig.	- Vorabscheider in der industriellen Luftreinhaltung.
Multizyklon	Prinzip wie Monozyklon, Verteilung des Partikel-Luftstromes auf mehrere kleinere Zyklone.	- Kompaktere Bauweise im Vergleich zum Monozyklon.	- Reinigung aufwändiger als Monozyklon.	- Vorabscheider in der industriellen Luftreinhaltung.
Zyklonsichter	Prinzip wie Monozyklon, Abscheidverhalten durch zusätzliche Sekundärluft und durch ein Sichterrad variierbar.	- Variabler Trenngrad, - zur Klassierung von Schüttgütern geeignet.	- Hohe Investitionskosten, - Reinigung aufwändiger als beim Monozyklon.	- Vor- bzw. Nach-Klassierung spezieller pulverförmiger Stoffe.
Elektrofilter	Abtrennen der Partikel durch elektrostatische Kräfte.	-Geringer Druckverlust, - geringer Energiever - brauch, - nahezu jedes Kornspektrum abscheidbar.	- Hohe Investitionskosten, - ungünstig bei kritischen Umgebungsbedingungen, - Reinigung aufwändig, - großer Platzbedarf.	- Entstaubung der Luft und Entfernung von Reaktionsstoffen.
Pulverzentrifuge	Fliehkraftabscheidung in einer rotierenden Zentrifuge.	- Hoher Trenngrad, - geringer Energiebedarf, - geringer Platzbedarf.	- Reinigung aufwändiger als beim Monozyklon, - zusätzlicher Endfilter notwendig.	- Vorabscheider in der industriellen Luftreinhaltung.

Tab. 3.3: Denkbare Rückgewinnungsmethoden für die Pulverlackierung [02]

3.3.1 Ergebnisse zum bisherigen Stand der Technik von Rückgewinnungssystemen

Die Recherchen bezüglich der Pulverabscheidungs- und Zusatzbehandlungstechnologien haben zusammenfassend folgendes ergeben:

- Die Filterabscheider sind nach wie vor die wichtigsten und sichersten Abscheidmedien im Pulverbeschichtungsbereich, Optimierungsmöglichkeiten sind kaum mehr gegeben.
- Die Zyklonabscheider stellen derzeit die zweite wichtige Pulverabscheidmethode dar und müssen aufgrund ihres hohen Optimierungspotenzials weiter verfolgt werden.
- Zyklonsichter werden derzeit als Rückgewinnungssystem in der branchenüblichen Baugröße (16000 m³/h) nicht eingesetzt. Eingesetzt werden sie bisher überwiegend in der Pulverlackherstellung (gesichtetes Pulver).
- Elektrofilter und die Pulverzentrifuge werden aufgrund der hohen Investitions- und Betriebskosten in der Pulverbeschichtung nicht eingeplant.

Bei der Auswahl des Abscheidsystems werden vor allem wirtschaftliche Gründe herangezogen. Zyklonabscheider sind z.B. einfach zu reinigen, d.h. bei Mehr- oder Vielfarbenbetrieb gut geeignet. Je nach Korngröße des Overspraypulvers tritt ein Pulververlust auf.

Die Filterabscheider arbeiten nahezu verlustfrei, sind aber sehr schwer zu reinigen. Für Mehr- oder Vielfarbenbetrieb sind sie daher nicht geeignet.

Dennoch unterscheiden sich die beiden Rückgewinnungssysteme beim Pulver-Kreislaufverhalten.

3.3.2 Untersuchung des Pulverkreislaufverhaltens bei verschiedenen Rückgewinnungssystemen

Bei den Experimenten zum Kreislaufverhalten wird der Filter- und Zyklonabscheider und als derzeit einzig mögliche Alternative der Zyklonsichter untersucht. Während bei den Filtern nach einer gewissen „Einlaufphase“ der Pulverlack vollständig zurückgewonnen wird, entsteht bei der Zyklon-Rückgewinnung ein Pulververlust des Overspraypulvers, der stark von der Partikelgröße abhängt.

Bei der Filter-Rückgewinnung ist nicht die Höhe der Beladung wichtig, sondern der Zeitpunkt, bei dem das Filter gesättigt ist. Ab diesem Zustand arbeiten Filter in der Pulverrückführung nahezu verlustfrei.

Zyklonabscheider scheiden Partikel im Bereich < 5 µm nur noch mit sehr geringem Wirkungsgrad ab. Dadurch wirken sie einer Feinkornanreicherung im Kreislaufpulver entgegen, allerdings auf Kosten eines Pulververlustes. Bei optimiert konstruierten Zyklonabscheidern und bei prozesssicherer Betriebsweise kann dieser Pulververlust gering gehalten werden. Bezüglich der Pulver-Kreislaufführung schneiden die Zyklonabscheider durch den Feinkornaustrag ähnlich gut ab wie das feinkornreduzierte Pulver (Kapitel 3.2).

Aufgrund dieses Feinkornaustrages ist die Partikelseparierung und die Verringerung des Auftragswirkungsgrades beim Zyklonabscheider geringer als beim Filterabscheider. Noch besser schneidet der Zyklonsichter ab, der den Feinanteil schärfer heraustrennt als der Zyklonabscheider. Dies wirkt sich vor allem auf die wesentlich geringere Verringerung des Feinkornanteils und der damit verbundenen geringeren Partikelseparierung aus (Abb. 3.10).

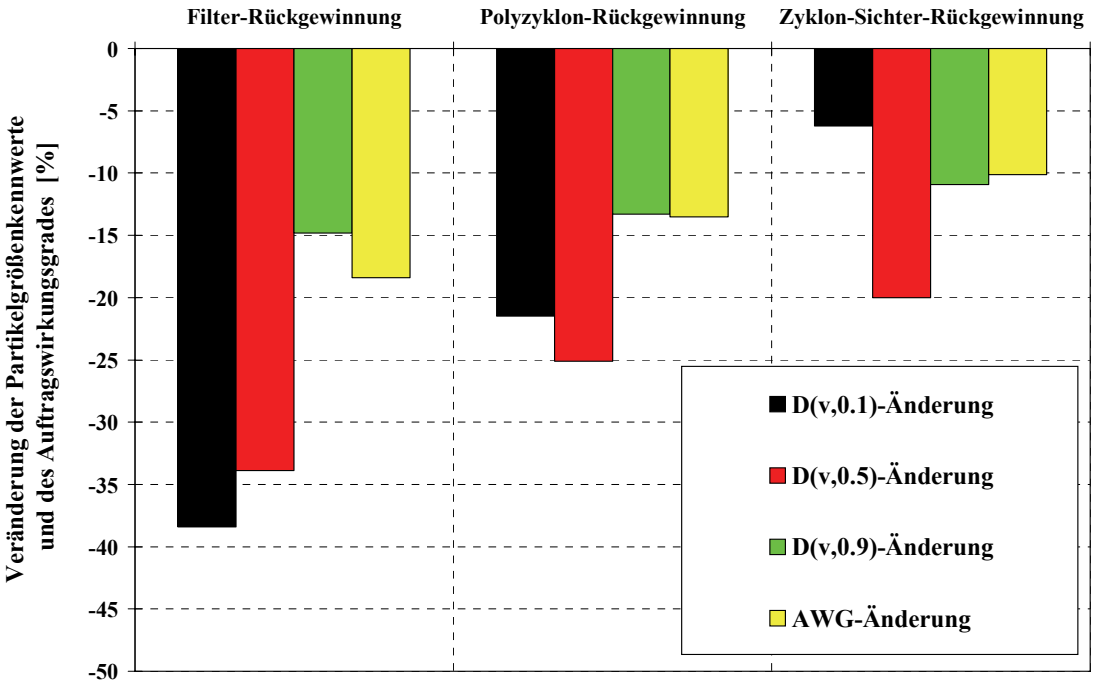


Abb. 3.10: Verbesserung des Pulverkreislaufverhaltens beim Einsatz eines Polyzyklons und eines Zyklonsichters

Neben dem Zyklonabscheider werden künftig nach anderen denkbaren Systeme zur Pulver-Rückgewinnung gesucht. Denkbar wären Zyklonsichter, bei denen der Rückgewinnungsgrad durch Variation der Sichterdrehzahl und der Sekundärluft variiert werden kann. Für die Herstellung oder Nachbearbeitung von Pulverlacken werden die Zyklonsichtermühlen bereits eingesetzt.

4 Entwicklung variabler Pulversprühpistolen

Die Ausbildung der Pulversprühwolke erfolgt bei den meisten Pulver-Applikatoren durch eine feststehende Düse, wie z.B. eine Flachstrahl- oder Pralltellerdüse. Diese Systeme haben jedoch den Nachteil, dass die Pulversprühwolke während der Applikation nicht an unterschiedliche Beschichtungsbedingungen, wie z.B. unterschiedliche Werkstückgeometrien, angepasst werden kann. Die Änderung der Pulversprühwolke kann nur durch den Austausch der Düse vorgenommen werden, d.h. der Beschichtungsvorgang muss unterbrochen werden.

Durch die Entwicklung neuerer flexiblerer Pulverlacksysteme könnten weitere Bereiche des Nasslackes durch Pulverlack substituiert werden. Ein wichtiger Schritt ist dabei die Entwicklung von Pulversprühpistolen bei denen sich die Pulverwolke an die Objektgeometrie anpassen könnte, ohne den Beschichtungsvorgang zu unterbrechen. Die Forderung lautet daher, eine Pulverpistole zu entwickeln, bei der die Pulverwolke, ähnlich wie im Nasslack, von einem sehr schmalen Strahl bis zu einem sehr breiten Strahl stufenlos geformt werden kann, ohne dabei irgendwelche Teile in der Pistole zu verändern, sondern durch Veränderung von Steuergrößen außerhalb der Pistole.

Eine rein experimentelle und empirische Vorgehensweise führt dabei aber nur unter hohem Aufwand zu einer praxistauglichen Pulverpistole. Deutlich schneller wird die Realisierung eines Pulverpistolentyps mit der Einführung und Weiterentwicklung der numerischen Simulation in der Lackiertechnik. Die Entwicklung neuer flexiblerer Pulverpistolen wird dabei nach folgendem Schema durchgeführt:

- Auflistung möglicher physikalischer Wirkungsprinzipien zur Sprühstrahlformung
- Eingrenzung der Lösungen bezüglich der Realisierbarkeit
- Detaillierung möglicher Lösungen mittels Experiment und Simulation
- Konstruktionsgerechte Umsetzungen von ausgewählten Lösungen
- Fertigung von Pulversprühgeräten
- Erprobung der Sprühgeräte im Technikum
- Vergleich von Simulation und Experiment.

4.1 Physikalische Wirkungsprinzipien, Grobkonzipierung und Lösungsfindung

Im ersten Entwicklungsschritt werden nach möglichen physikalischen Wirkungsprinzipien zur stufenlosen Pulversprühstrahlformung gesucht. Für eine praktische Lösung kommen jedoch nur die zwei folgenden physikalische Wirkungsprinzipien in Frage:

- elektrostatisch und
- strömungsmechanisch.

Abb. 4.1 zeigt dazu eine Auflistung möglicher Lösungsansätze. Bei der weiterführenden Konzipierung muss jedoch beachtet werden, dass Pulverpistolenkonstruktionen, bei denen zur Variation der Pulversprühwolke in der Pistole Teile bewegt werden müssen, aufgrund der Verschmutzungsgefahr ausscheiden. Deshalb kommt z.B. ein veränderbarer variabler Spalt oder ein in der Form veränderbarer Anströmkörper oder gar ein sich drehender Anströmkörper (z.B. Pulverglocke) nicht in Frage. Diese Lösungsansätze würden außerdem die Konstruktion bzw. Realisierung der Pistole deutlich verkomplizieren. Als Erfolg versprechend könnte im strömungsmechanischen Bereich die Variation der Pulverwolke durch steuerbare Zusatzlüfte sein. Im Nasslackbereich hat man außerdem schon mit der elektrostatischen Sprühwolkenformung erfolgreich Erfahrung gesammelt.

Für die Sprühstrahlformung kommen deshalb folgende Ansätze in Betracht:

- elektrostatische Lösung durch Einsatz von Lenk- oder Steuerelektroden
- strömungsmechanische Lösung durch den Einsatz von Lenk- oder Steuerlüften.

Aufgrund der unterschiedlichen technischen Ausführungen der Lösungen und der unterschiedlichen Vorgehensweise zur technischen Umsetzung der Lösungen werden die beiden Lösungen getrennt realisiert.

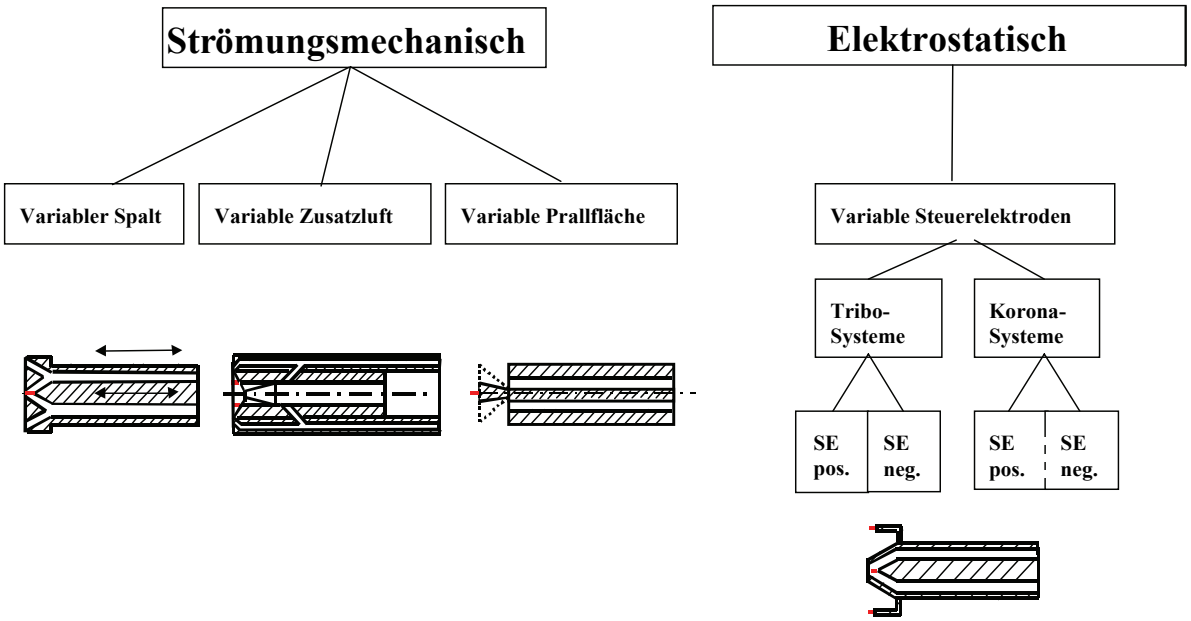


Abb. 4.1: Physikalische Wirkungsschemas zur Variation der Pulversprühwolke [65]

4.2 Elektrostatische Lösungskonzepte

Bei den Untersuchungen des Einflusses zusätzlicher elektrostatischer Felder bzw. Ionenfelder auf die Ausbreitung der Pulverpartikel kann man zunächst auf die Erfahrungen aus dem Nasslackbereich zurückgreifen. Umfangreiche Untersuchungen haben gezeigt, dass die Sprühwolke durch den Einsatz von sog. Steuer- oder Drückelektroden im Nasslackbereich um den Faktor 3 bis 5 variiert werden kann [17]. Die Möglichkeiten zur Sprühstrahlformung bei der Pulverbeschichtung werden jedoch vor allem durch andere physikalische Grundlagen gegenüber der Nasslackapplikation beeinflusst. Dazu zählen:

- Pulverlackmaterial: Chemismus, Größe und Form der Partikel
- Pulveraufladungsverhalten: Pulverpartikel isolierend – Nasslackpartikel leitfähig
- Strömungsverhältnisse: Partikelgeschwindigkeit.

Bei der Pulverbeschichtung muss noch beachtet werden, dass das Pulver auf zwei verschiedene Arten aufgeladen werden kann:

- durch Anlagerung freier Luftionen, die mittels einer oder mehrerer hochspannungsführender Elektroden erzeugt werden (Korona-Aufladung)
- durch reibungselektrische Vorgänge beim turbulenten Durchströmen eines tribofähigen Kunststoffkanals (Tribo-Aufladung).

Die nachstehenden Untersuchungen zur Steuerbarkeit der Pulversprühwolke müssen daher getrennt für die Korona- und Tribo-Pistolen durchgeführt werden. Aufgrund der großen Erfahrung mit Steuerelektroden aus dem Nasslackbereich erfolgen die Untersuchungen weitgehend experimentell. Die Auswertungen erfolgen nach dem in Kapitel 2 beschriebenen Prüfinstrumentarium. Zunächst werden Pulverpistolen mit Steuerelektroden gebaut. An der Strömungsführung in und an der Pistole wird zunächst nichts verändert. Bei der Konstruktion der Pulverpistolen mit Steuerelektroden muss aufgrund der praktischen Erfahrung folgendes beachtet werden:

- die Steuerelektroden sollten gleichmäßig um die Pistolenachse herum angeordnet sein (mindestens 3 Elektroden a' 120 °)
- die Abstände der Steuerelektroden sollten nicht allzu groß sein (Elektrodenkranz für Pulverlack kleiner als im Nasslack)
- bei Korona-Aufladung keine entgegengesetzte Polarität der Steuerelektroden wählen (Überlagerung eines positiven und negativen Raumladungsfeldes führt dazu, dass sich die positiven und negativen Luftionen teilweise oder ganz entladen, die Pulverpartikel werden nur teilweise oder gar nicht aufgeladen)
- die Steuerelektroden sollten getrennt von der Hauptspannung angesteuert werden
- die Hochspannung aller Steuerelektroden sollte gleich sein.

Vor der Umsetzung der Lösungen müssen jedoch auch die sicherheitstechnischen Fragen geklärt werden. Hohe Spannungen an den Pulversprühgeräten bergen zum einen Gefahrenmomente für den Bedienenden und zum anderen ist das Beschichtungspulver brand- und explosionsgefährlich.

Bezüglich der Arbeitssicherheit müssen Maßnahmen zum Schutz durch Personen und Maßnahmen zur Gewährleistung des Explosions- und Brandschutzes eingehalten werden. Bei der Auslegung der Pulversprühgeräte mit Steuerelektroden müssen dazu die folgenden Punkte beachtet werden:

Personenschutz:

- alle spannungsführende Anlagenteile in weitgehend geschlossenen Beschichtungskabinen anordnen, die beim Öffnen der Anlage automatisch abgeschaltet werden
- die elektrostatischen Lösungskonzepte sind aufgrund des entstehenden Gesamtstromes nur bei Automatikgeräten und nicht bei Handgeräten vorgesehen.

Brand- und Explosionsschutz:

- Konzentrationsminderung unter 50 % der unteren Explosionsgrenze in der Beschichtungsanlage durch ausreichende Lüftung sicherstellen
- Unterbinden der Funkenentladungen im Sprühbereich durch Einhaltung eines Mindestabstandes zwischen Werkstück und Sprühorgan (1cm je 4 kV)
- Sicherstellung der Erdung aller leitfähigen Teile in der Kabine einschließlich des Bedienpersonals (der Ableitwiderstand zwischen Bedienpersonal und leitfähigem Boden darf dabei höchstens 1 MΩ betragen).

Der Konzentrationsminderung unter 50 % der unteren Explosionsgrenze ist im Sprühbereich nicht erfüllbar. Daher müssen die entwickelten Pulversprühgeräte den Nachweis der Zündsicherheit erfüllen. Die Pulversprühgeräte müssen für eine Freigabe zur Serienfertigung von einer staatlichen Prüfstelle (z.B. PTB Braunschweig) abschließend untersucht werden.

Bei der Ausführung der Pulverpistolen werden konventionelle Korona- und Tribo-Pistolen mit einem speziell dafür vorgesehenen Elektrodenkranz eingesetzt. Abb. 4.2 zeigt den schematischen Aufbau der Pulverpistole.

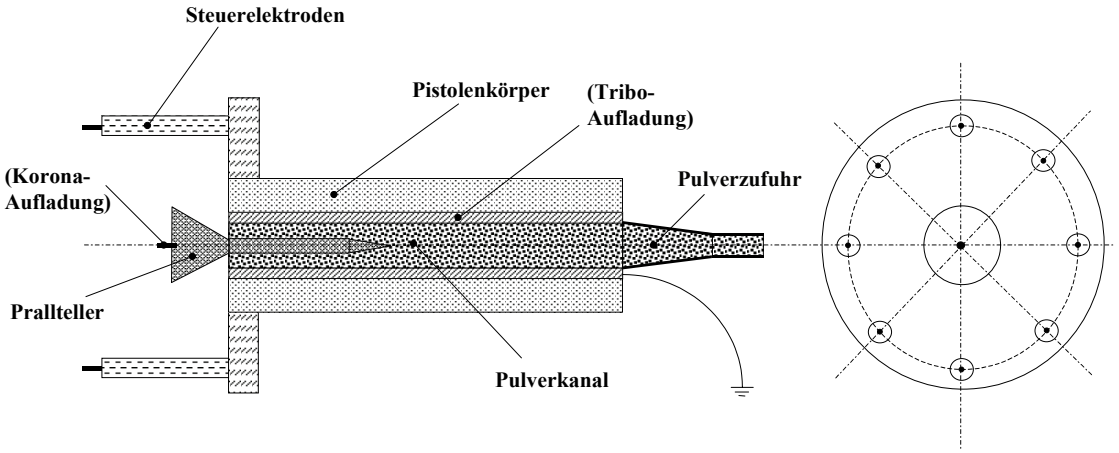


Abb. 4.2: Pulverpistolenaufbau mit Steuerelektroden (alternativ entweder Korona- oder Tribo-Aufladung)

Die Beschichtungsparameter werden entsprechend der Korona- und Tribo-Aufladung gängigen Werte eingestellt. Tab. 4.1 zeigt die konstanten Versuchsparameter. Dazu gehört u.a. auch das Pulvermaterial, welches in seinen Eigenschaften, insbesondere die Korngröße, typisch für ein Industriepulver ist.

Beschichtungsparameter	**Einstellung**
Pistolendüse	Prallteller (Durchmesser 32 mm)
Sprühabstand	200 mm
Pulvermassenstrom	Korona-Aufladung: 130 g/min (± 3 g/min) Tribo-Aufladung: 100 g/min (± 3 g/min)
Schichtdicke (max.)	80 µm (± 10 µm)
Pulverlackmaterial	Epoxid-Polyester-Mischpulver (D(v,0.5) = 40 µm)
Fördergeschwindigkeit	1,3 bis 2,8 m/min (Anpassung an Schicht-dickenmaximum ca. 70 bis 90 µm)
Zusatzluft	1,2 m³/h und 3,0 m³/h

Tab. 4.1: Beschichtungsparameter zur elektrostatischen Pulversprühwolkenformung

4.2.1 Steuerelektroden bei der 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.

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 der Feldlinien. Ein Teil der Luftionen lagern sich dabei an den wesentlich langsameren Pulverpartikeln an und laden diese dadurch auf („Ionenbombardement“). Die physikalischen Grundlagen dazu werden ausführlich in der Literatur beschrieben [29], [30], [39], [66]-[80].

Bei den Untersuchungen zur Steuerbarkeit der Pulversprühwolke bei Korona-Aufladung wird vor allem die Höhe der Hochspannung, die Anzahl und Position der Steuerelektroden variiert. Diese Lenkelektroden zeigen allerdings keine signifikante Wirkung. Dies hängt zum einem damit zusammen, dass die Pulverteilchen durch die Korona-Aufladung oft schon gesättigt sind und somit keine weitere Ladung mehr aufnehmen können oder von weiterer Ladung durch Steuerelektroden nicht mehr beeinflusst werden. Weitere Faktoren wie z.B. die hohe kinetische Energie und die Trägheit der Pulverpartikel verstärken diesen Effekt. Zudem erfahren die Pulverpartikel durch das elektrische Feld zwischen Zentralelektrode und Werkstück bereits eine gewisse Ausrichtung. Andererseits führen zusätzliche Steuerelektroden, die natürlich die gleiche Polarität wie die Koronahochspannung zur Aufladung der Pulverpartikel haben müssen, zu einem Überschuss an Luftionen, der oft schon durch eine einzige Elektrode bei normaler Pulveraufladung entsteht, was die Reproduzierbarkeit der Beschichtungsergebnisse und die Beschichtungsqualität negativ beeinflusst. Zusammengefasst kann gesagt werden, dass der Einfluss der Lenkelektroden durch zu viele Luftionen verringert wird.

In Abb. 4.3 sind die Ergebnisse der partikelgrößenbezogenen Ladungswerte mit dem von der Fa. Epping entwickelten Ladungsspektrometers (q/d-Verfahren) dargestellt. Die Ladungswerte der Pulverpartikel ändern sich durch die zusätzlichen Steuerelektroden nicht, da die Pulverpartikel durch die Grundaufladung schon weitgehend gesättigt sind. Parallel dazu zeigen die gemessenen Sprühprofile auf dem Werkstück keine signifikanten Veränderungen beim Einsatz und bei der Variation der Lenkspannung (Abb. 4.4 und 4.5). Analog verhält es sich beim Erst-Auftragswirkungsgrad und bei der Partikelseparierung, diese bleiben praktisch unverändert (Abb. 4.6 und 4.7).

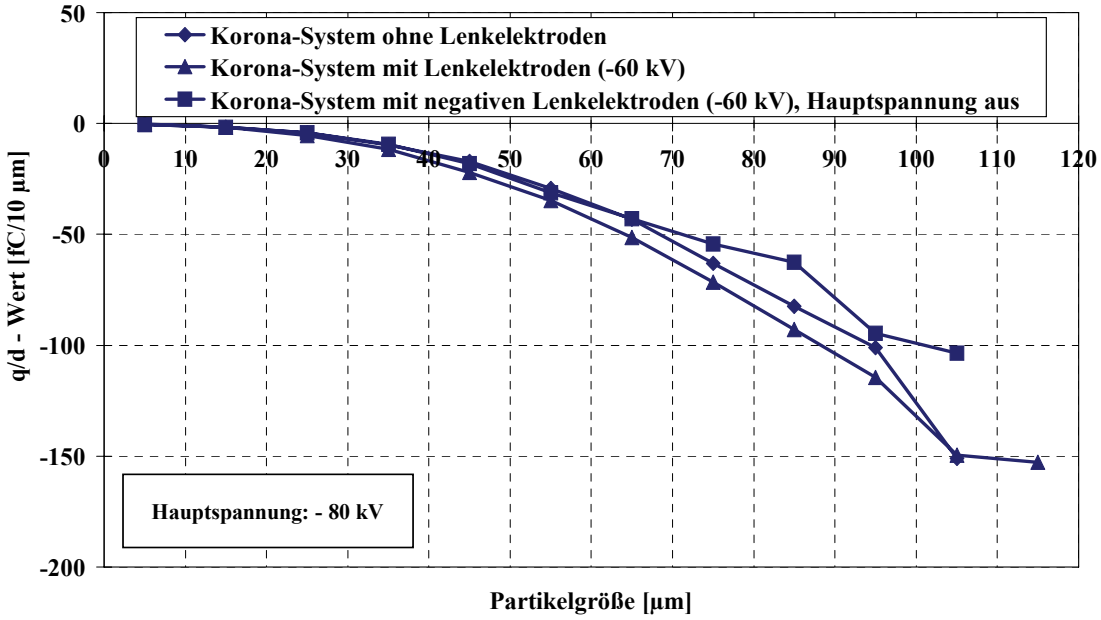


Abb. 4.3: Einfluss der partikelgrößenbezogenen Ladungskennwerte mit und ohne Steuerelektroden (Korona-Aufladung)

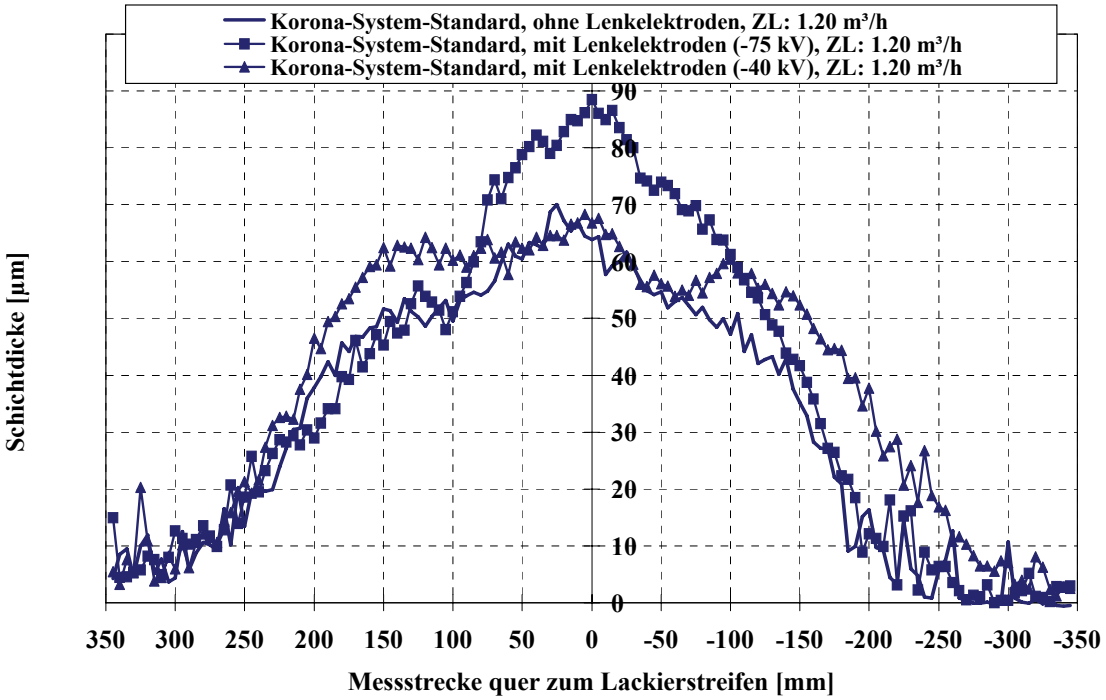


Abb. 4.4: Einfluss der Steuerelektroden auf die Sprühwolkenformung bei der Korona-Aufladung

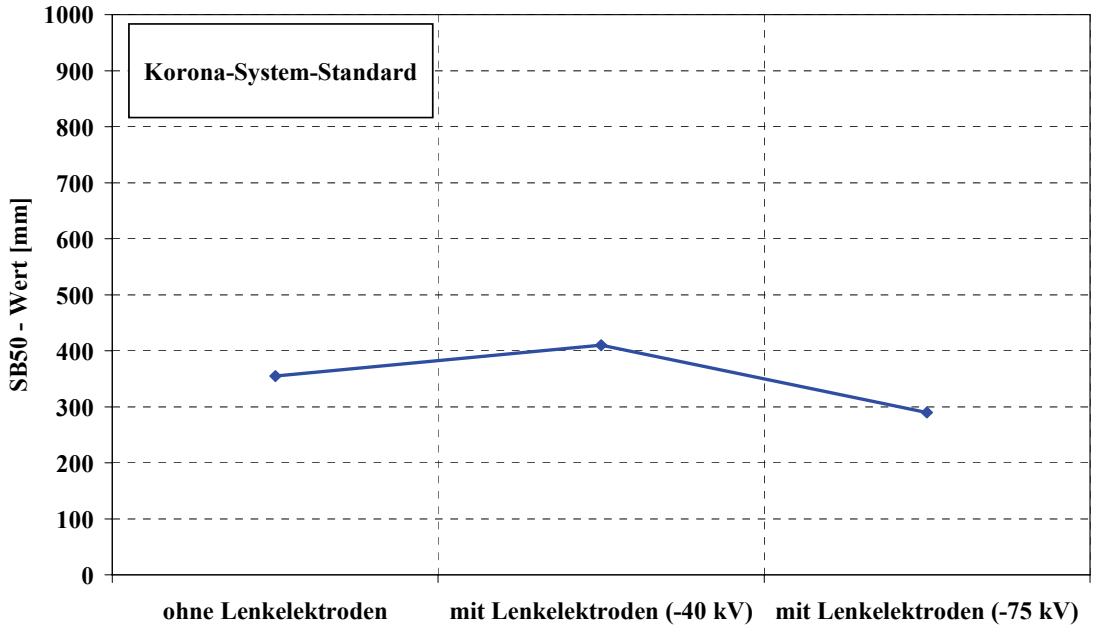


Abb. 4.5: Einfluss der Steuerelektroden auf die Sprühwolkenformung bei der Korona-Aufladung

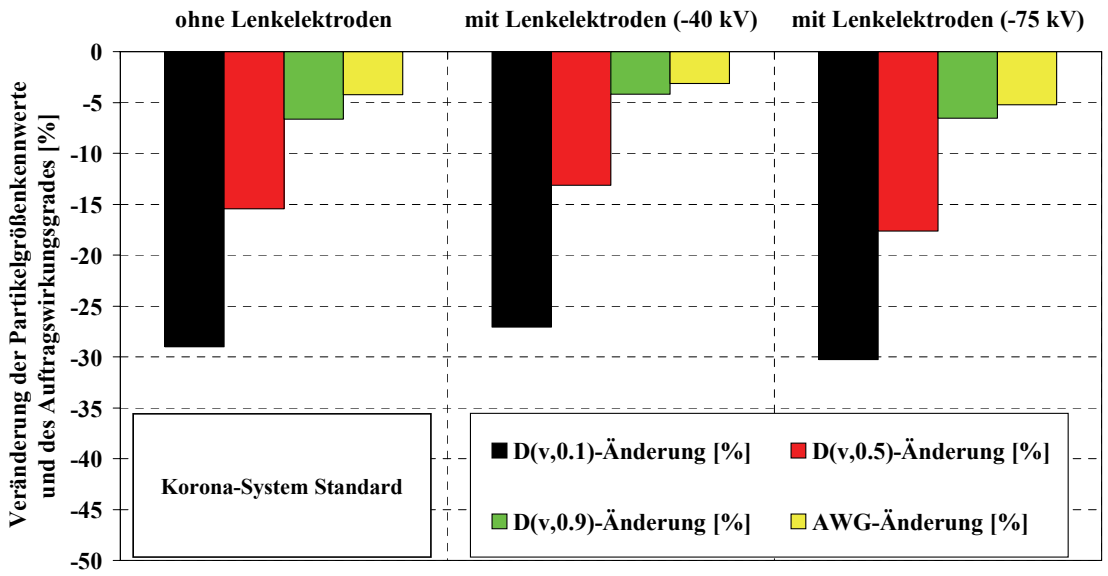


Abb. 4.6: Einfluss der Steuerelektroden auf die Partikelseparierung im Pulverkreislauf (Korona-Aufladung)

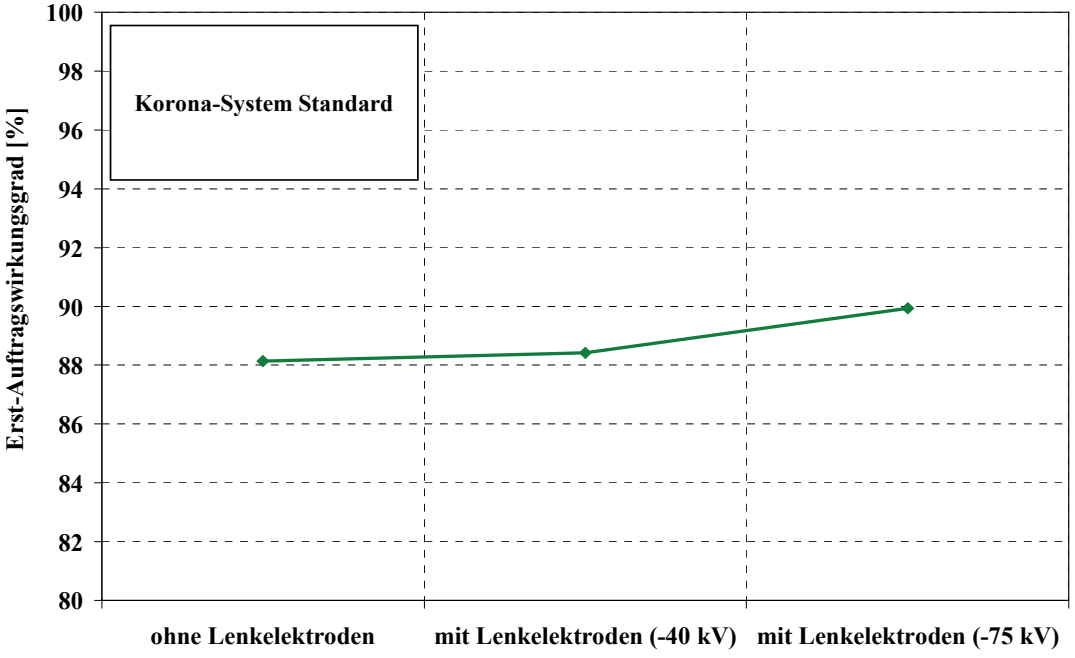


Abb. 4.7: Einfluss der Steuerelektroden auf den Erst-Auftragswirkungsgrad (Korona-Aufladung)

4.2.2 Einfluss der Steuerelektroden bei der Tribo-Aufladung

Bei den Tribo-Sprühsystemen werden die Pulverteilchen ausschließlich durch reibungselektrische Vorgänge beim turbulenten Durchströmen eines Kunststoffkanals direkt im Sprühorgan aufgeladen, d.h. diese Systeme arbeiten ohne Hochspannungserzeuger. In der Regel besteht dieser Kunststoffkanal aus PTFE (Poly-Tetra-Fluor-Ethylen). PTFE ist als Werkstoff gut geeignet, da es am Ende der Elektrisierungsreihe steht und bei den meisten Pulverlacken zu einer hohen positiven Ladung führt. Außerdem hat dieses Material sehr gute Antihafteigenschaften, die eine Verkrustung des Pulvers an der Kanalwand unterdrücken [29], [30], [39], [66]-[77], [81]-[87]. Denkbar sind auch Tribo-Pistolen mit negativer Aufladung, z.B. mittels POM (Polyamid) oder Nylon [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 abfliesen müssen (Ableitstrom).

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} = 5...10 kV/cm) betragen [39].

Ausführliche physikalische Grundlagen zur Tribo-Aufladung werden u.a. von Bauch beschrieben [39].

Im Vergleich zur Korona-Aufladung verhalten sich Korona-Lenkelektroden in Verbindung mit der Tribo-Aufladung 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 reinen Korona-Aufladung keine freien Luftionen, die Gefahr der Überladung und „Rücksprüherneigung“ ist dadurch wesentlich geringer. Die partikelgrößenspezifischen 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. 4.8). Ab einer Hochspannung von ca. 60 kV wird die Pulverwolke im Bereich der Lenkelektroden vollständig eingeschnürt (Abb. 4.9 und 4.10). Bei der konstruktiven Umsetzung der Pistole sollte darauf geachtet werden, dass möglichst mehrere Lenkelektroden symmetrisch um die Pulverpistole herum angeordnet sind (4 bis 8 Lenkelektroden).

Betrachtet man die Sprühwolke als Rundstrahl, so lässt sich die Ausdehnung der Pulverwolke durch die Steuerelektroden in Verbindung mit der Tribo-Aufladung des Pulvers im mittleren Durchmesser etwa um den Faktor 3 stufenlos 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 äußeren Kräfte diese in geringerem Umfang von der Kabinenluftströmung beeinflusst werden können. Dies gilt auch für die feineren Partikel (Abb. 4.11 und 4.12).

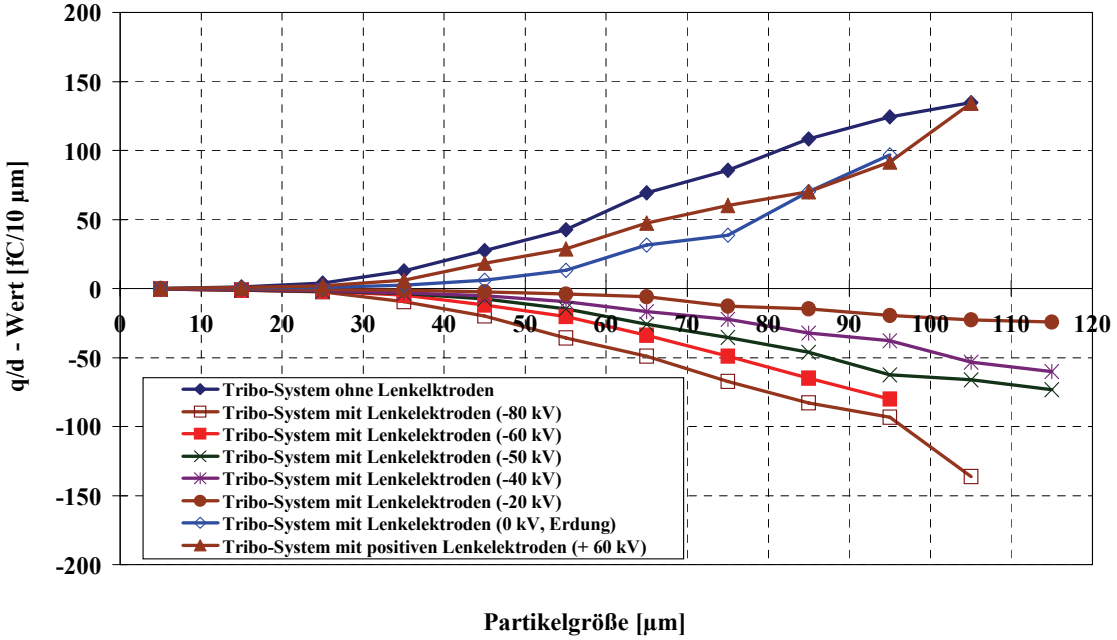


Abb. 4.8: Einfluss der partikelgrößenbezogenen Ladungskennwerte mit und ohne Steuerelektroden (Tribo-Aufladung)

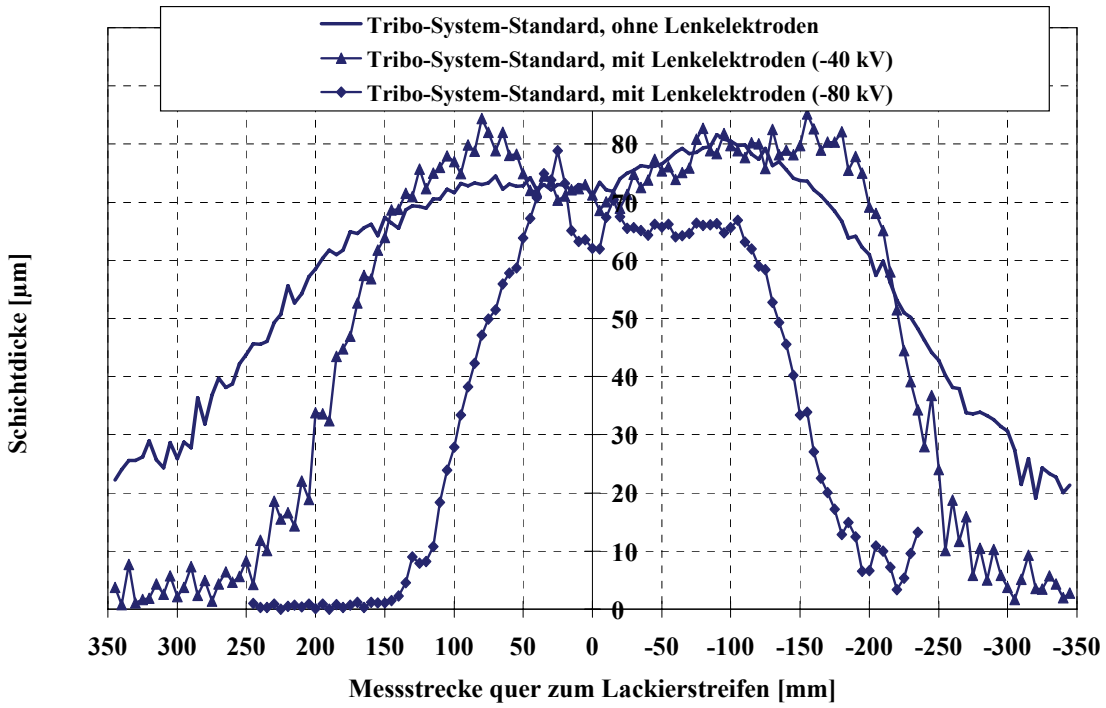


Abb. 4.9: Einfluss der Steuerelektroden auf die Sprühwolkenformung bei der Tribo-Aufladung

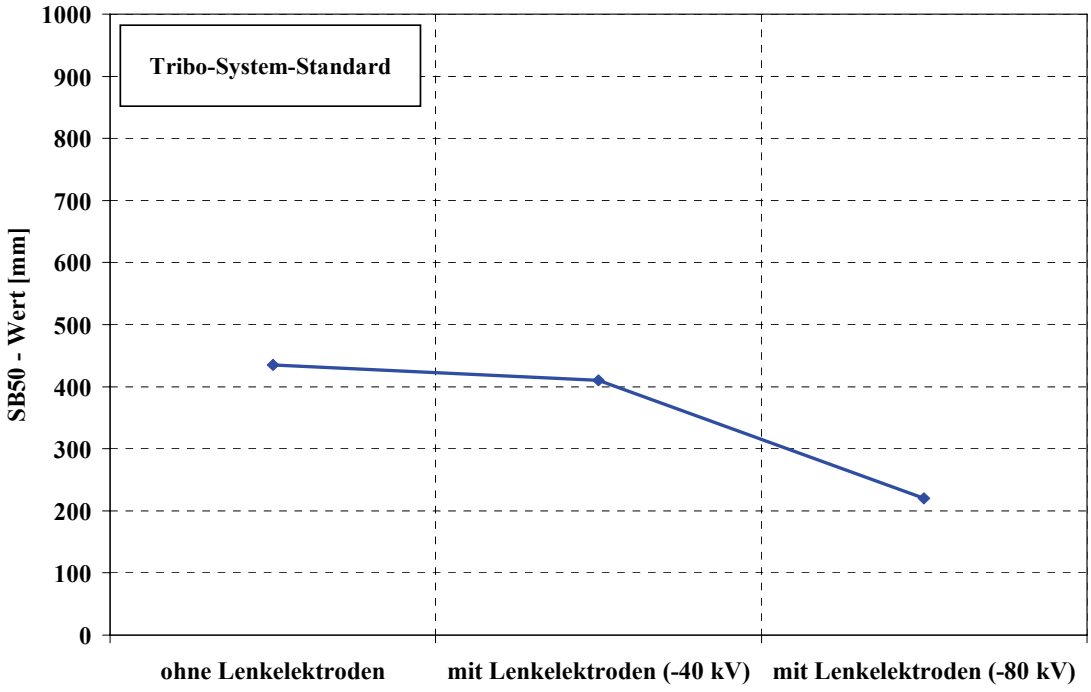


Abb. 4.10: Einfluss der Steuerelektroden auf die Sprühwolkenformung bei der Tribo-Aufladung

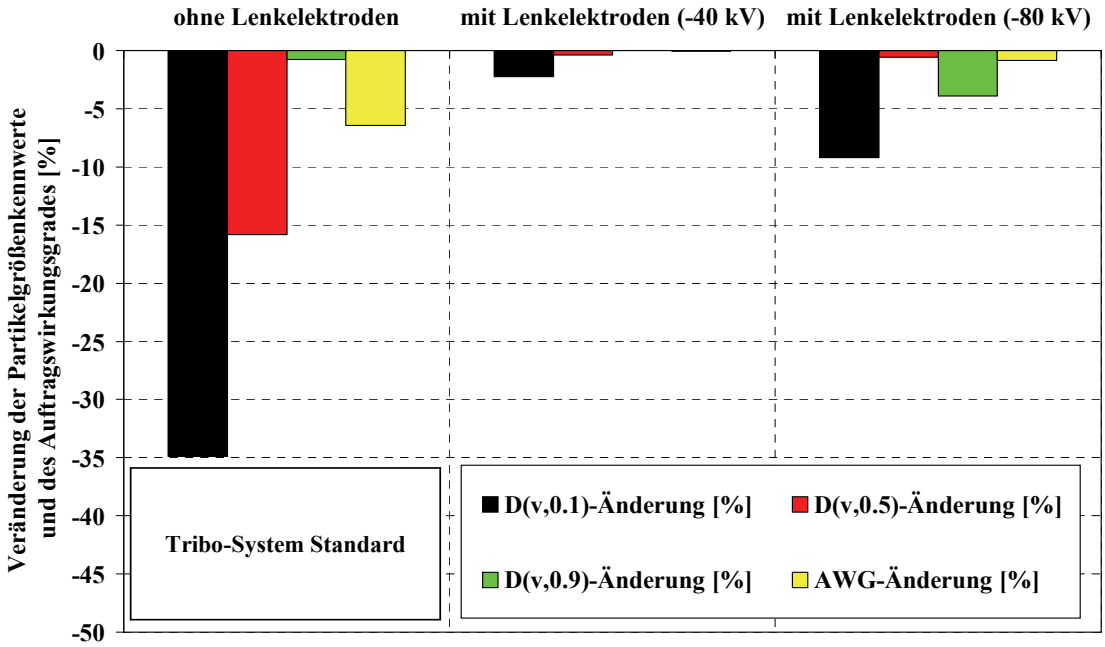


Abb. 4.11: Einfluss der Steuerelektroden auf die Partikelseparierung im Pulverkreislauf (Tribo-Aufladung)

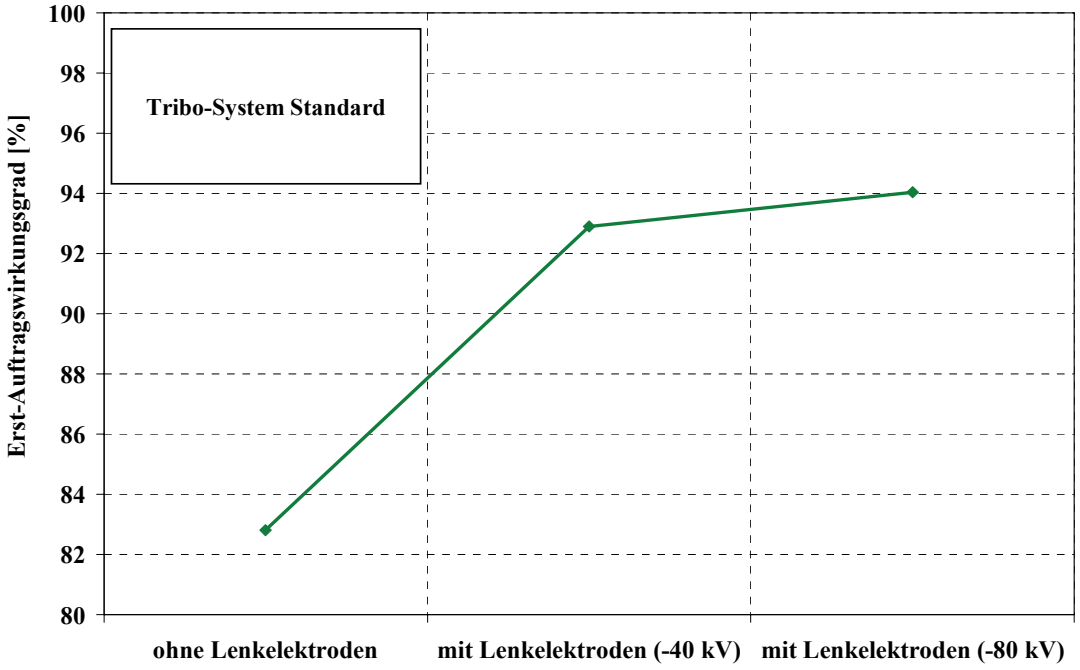


Abb. 4.12: Einfluss der Steuerelektroden auf den Erst-Auftragswirkungsgrad (Tribo-Aufladung)

4.3 Strömungsmechanische Lösungskonzepte

Im Bereich der Pulverbeschichtung gibt es schon verschiedene Ansätze zur stufenlosen Sprühwolkenformung, u.a. durch variable Strömungsquerschnitte und durch veränderbare Anströmkörper. Ein Nachteil bei diesen Systemen ist, dass bei Veränderung der Pulversprühwolke Teile in der Pistole bewegt oder ihre Position verändert werden müssen. Dabei muss zur Variation der Pulverwolke die Pistole in der Regel ausgeschaltet und der Beschichtungsvorgang unterbrochen werden. Motorisch gesteuerte Systeme würden den vom Benutzer vorgeschlagenen Kostenrahmen mit Sicherheit sprengen. Deshalb verbleibt neben der bereits beschriebenen elektrostatischen Sprühwolkenformung die strömungsmechanische Sprühwolkenformung mittels einer oder mehrerer veränderbarer Steuerlüfte mit angepasster Pistolengeometrie. Die Strömungskanäle des Pulvers und die Anströmkörper bleiben unverändert.

Aufgrund verschiedener Vorüberlegungen wird nach einer Lösung gesucht, bei der das Strömungsfeld unmittelbar am Pulveraustritt aus der Pistole stark variiert werden kann. Bei der Lösung werden drei Ringkanäle angeordnet und mit Folgendem beaufschlagt:

- Innenringkanal: Gas (Einphasenströmung)
- Mittelringkanal: Feststoff (Pulver) + Gas (Zweiphasenströmung)
- Außenringkanal: Gas (Einphasenströmung).

Abb. 4.13 zeigt einen schematischen Aufbau der variablen Pulverpistole.

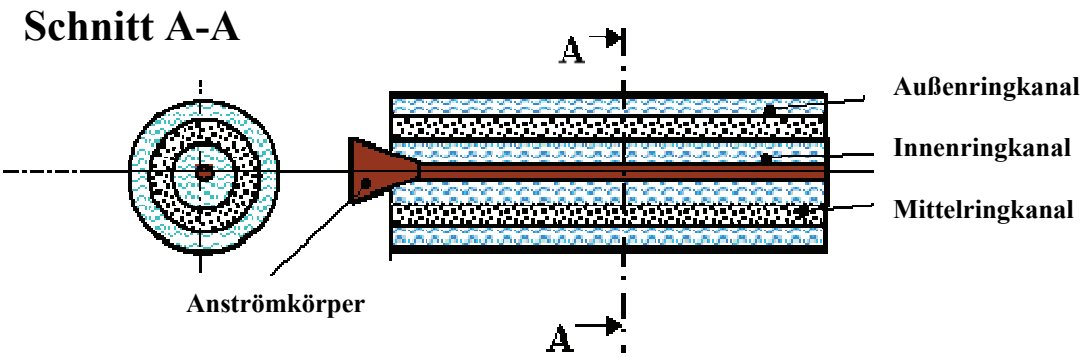


Abb. 4.13: Schematischer Aufbau der Pulverpistole mit variablen Steuerlüften [65]

Direkt an der Pistolenmündung befindet sich ein Ablenkkörper, ähnlich wie bei einer normalen Pralltellerdüse, der die Luftströmung aus dem Innenringkanal nach außen ablenkt. Die Außenringluft strömt dagegen über dem Ablenkkörper hinweg nahezu unabgelenkt nach vorne. Das Pulver-Gas-Gemisch strömt aus dem Mittelringkanal, der so dimensionieret sein muss, dass das Pulver homogen und konstant mit üblichem Luftverbrauch gefördert werden kann. Mit dieser Ringanordnung kann durch das Verhältnis von Außenringluft zu Innenringluft die Sprühwolke variiert werden. Bei einem großen Verhältnis von Außenringluft zu Innenringluft wird die

Sprühwolke durch die sie umgebende Außenluft eingeschnürt und verengt. (Fall 1, Abb. 4.14 oben). Bei einem niedrigen Verhältnis von Außen- zu Innenringluft wird die Pulverwolke von der ihr eingeschlossenen Innenringluft aufgeweitet (Fall 2, Abb. 4.14 unten). Zwischen diesen Grenzfällen ist die Ausdehnung der Pulversprühwolke stufenlos einstellbar. Die Außen- und Innenringluft können dabei aus einer gemeinsamen Luftquelle oder einzeln angesteuert werden. Im ersten Fall wird der steuerungstechnische Aufwand reduziert, da über ein einziges Stellorgan das Verhältnis der beiden Luftströme verändert werden kann.

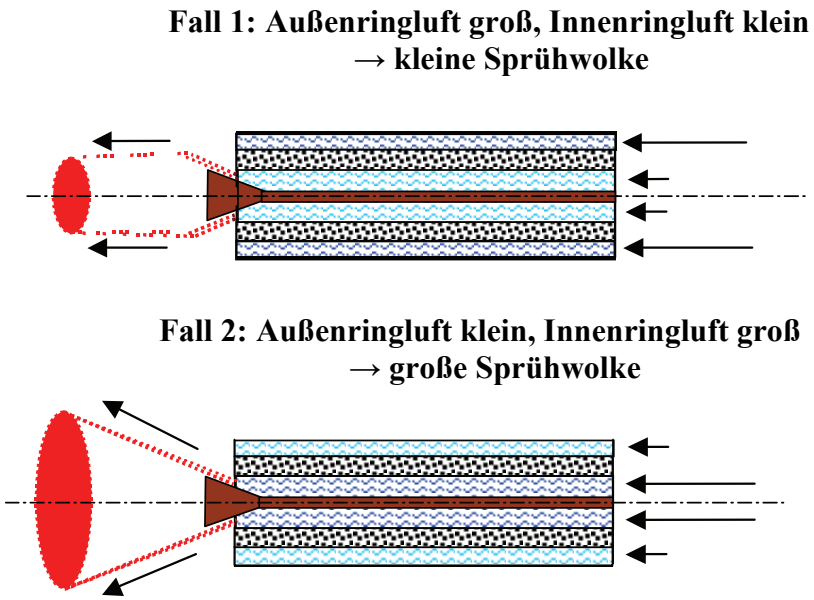


Abb. 4.14: Maximale Einstellbereiche der Pulverwolke durch Variation der Außen- und Innenringluft [65]

Von dieser grundsätzlichen Idee ausgehend muss eine Pistole ausgelegt werden, die den Anforderungen der Praxis bezüglich Leistung, Handhabung und Zuverlässigkeit gerecht wird. Hierzu gehören zunächst einmal eine optimale Dimensionierung der Strömungskanäle bezüglich Abmessungen, Form und Lage. Bei dieser Optimierung sind zwei wichtige Aspekte zu berücksichtigen:

- Der durch die Steuerlüfte zusätzliche Luftverbrauch sollte bei möglichst großer Wirkung so gering wie möglich gehalten werden. Akzeptabel sind Gesamtluftmengen von 3 bis 5 m^3/h für Innen- und Außenringluft zusammen.
- Die Empfindlichkeit der Sprühwolkenformung bei Veränderung der Steuerlüfte sollte nicht zu hoch sein und sollte sich möglichst über dem Steuerungsbereich konstant verhalten. Dies reduziert die Anforderungen an die Genauigkeit der Volumenstromregelung und die einzuhaltenden Fertigungstoleranzen.

Neben den Strömungskanälen muss auch die Größe und Form des Anströmkörpers ermittelt werden, da durch diesen die Innenringluft abgelenkt wird.

Im letzten Entwicklungsschritt muss die Lösung konstruktionsgerecht umgesetzt werden. Das Pulversprühgerät muss zuletzt folgenden Anforderungen gerecht werden:

- Funktionsgerecht
- Fertigungsgerecht und
- Montagegerecht.

4.3.1 Feinkonzipierung – Detaillierung des Lösungskonzeptes mit Hilfe der numerischen Simulation

Am IFF wird seit den letzten Jahren ein Programm entwickelt, welches die Berechnung des elektrostatischen Beschichtungsprozesses erlaubt. Dazu wird das kommerzielle Finite-Volumen-Programm FLUENT zur Simulation ein- und zweiphasiger Strömungen unter Berücksichtigung der physikalischen Modelle die zur Berücksichtigung der elektrostatischen Einflüsse dienen, ergänzt [88]-[89].

Im ersten Schritt wird der Strömungskörper erzeugt. Dazu werden alle Strömungsgebiete in und außerhalb der Pistole ausgelegt und vernetzt.

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

Um den Rechenaufwand in einem annehmbaren Rahmen zu halten, werden die Simulationsrechnungen in zwei Phasen durchgeführt: In Phase 1 erfolgt 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 optimierte Geometrie in Abhängigkeit von den eingestellten Luftvolumenströmen die Schichtdickenverteilungen, der Auftragswirkungsgrad und die Partikelseparierung bei der Beschichtung einer ebenen Platte unter Berücksichtigung der Elektrostatik berechnet.

In Phase 1 werden 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 werden unter Zugrundelegung der in Tab. 4.2 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/s²
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) κ-ε Turbulenzmodell für komplexe Strömungen [90]

Tab. 4.2: Randbedingungen für das Strömungsfeld

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

Abb. 4.15 zeigt die strömungstechnisch optimierte Pulverpistole (nicht maßstabsgerecht), Abb. 4.16 die analoge Schnittdarstellung der für die Strömungssimulation dreidimensional vernetzten Pulverpistole bei zwei verschiedenen Auflösungen.

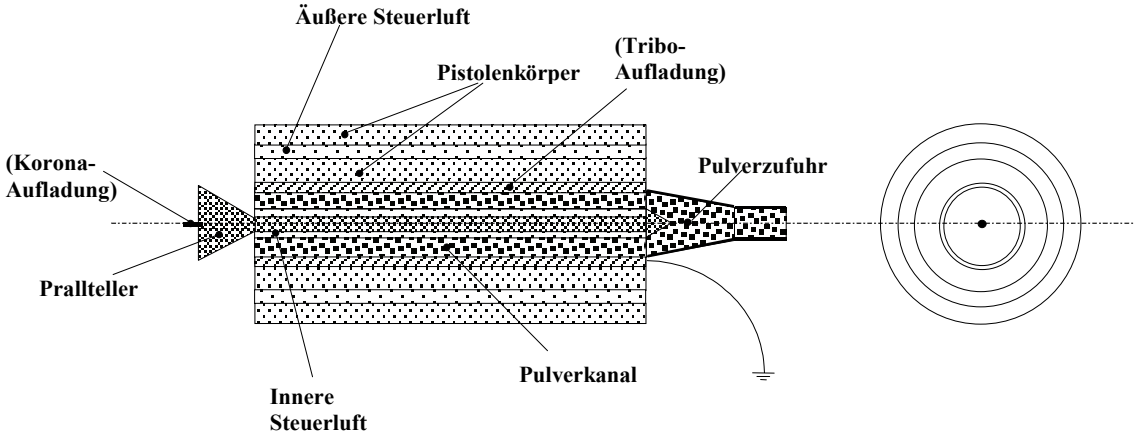


Abb. 4.15: Erweiterung der Pulverpistolenkonstruktion

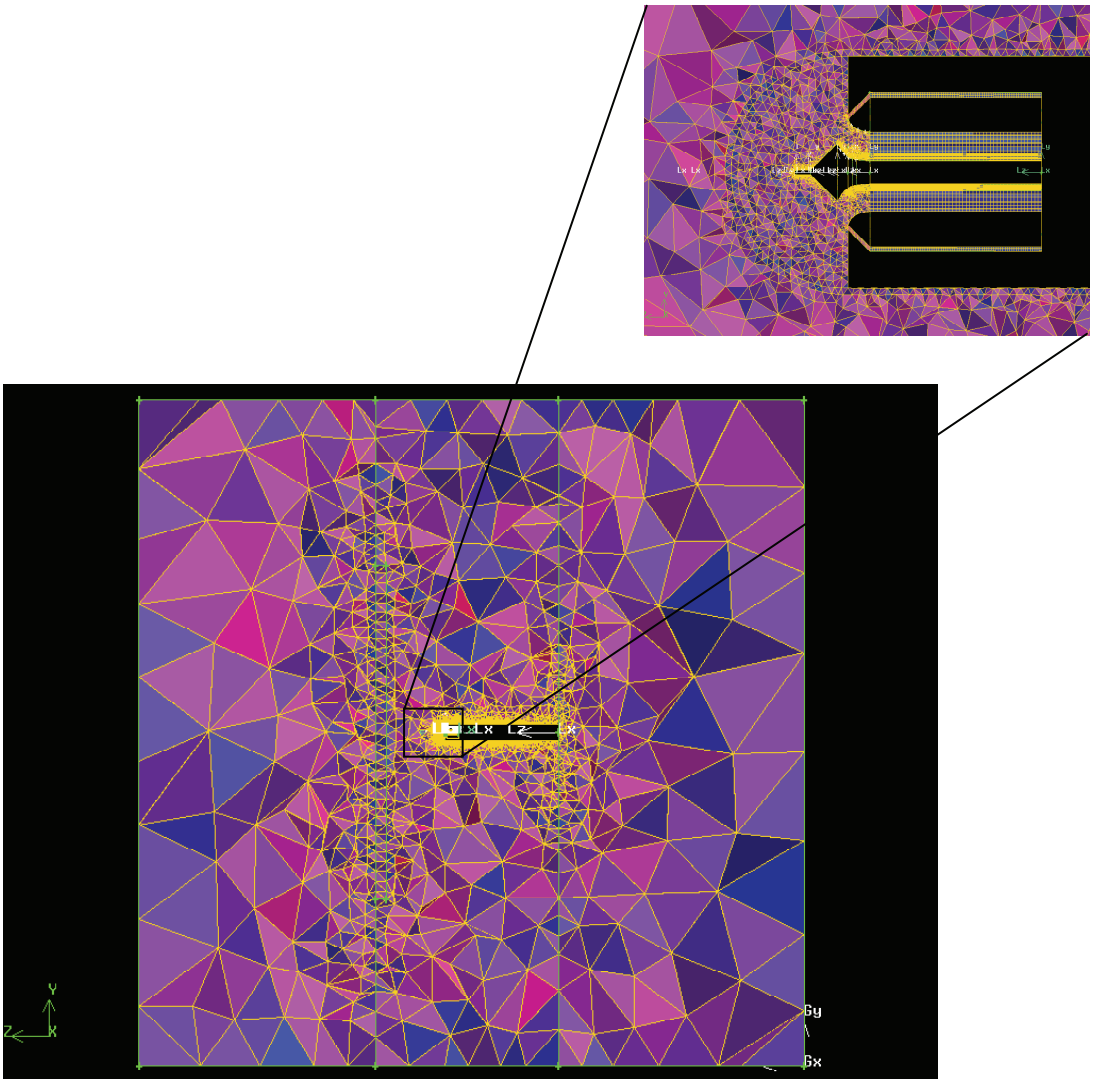


Abb. 4.16: Vernetzter Strömungskörper der optimierten Pulverpistole (verschiedene Auflösungen, zweidimensionale Schnittdarstellung, Pistolenmitte)

In Abb. 4.17 sind die Ergebnisse der berechneten Strömungsfelder im axialen Querschnitt der Pulverpistole für unterschiedliche Einstellungen der Innen- und Außenluft dargestellt.

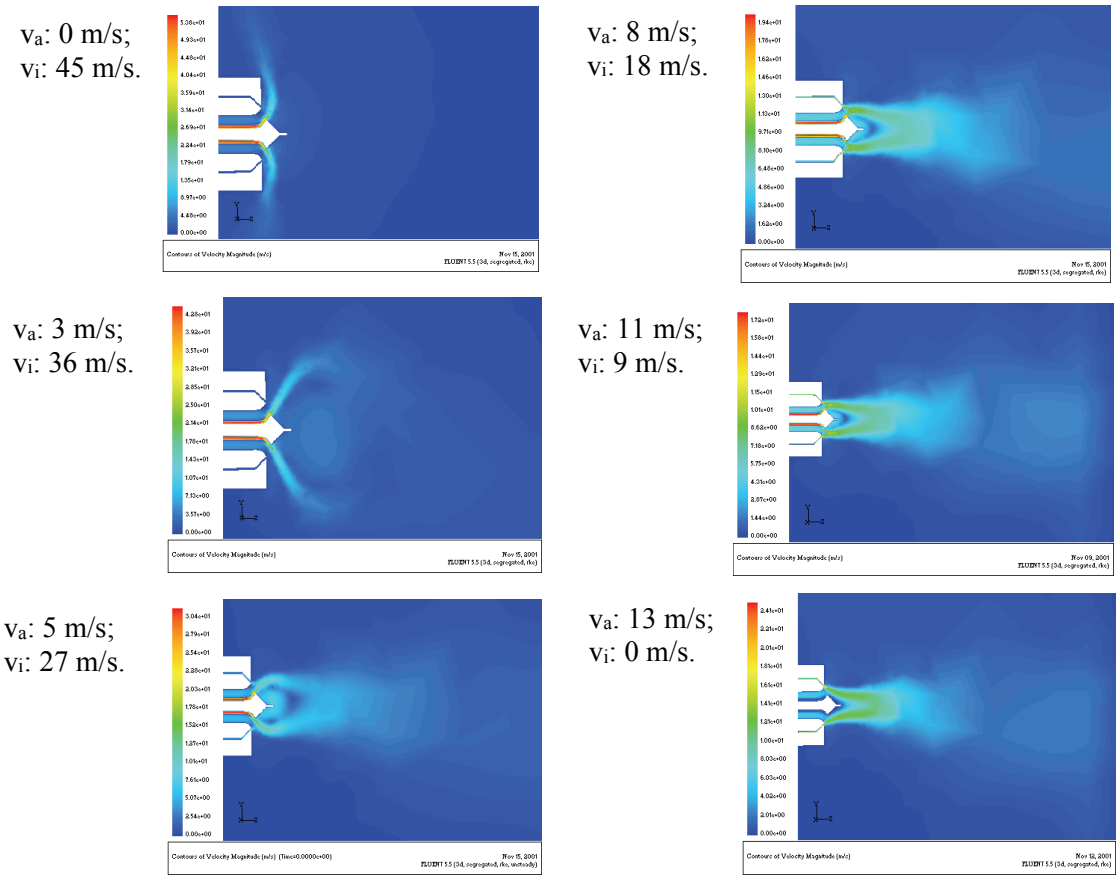


Abb. 4.17: Luftströmungsverlauf bei verschiedenen Innen- und Außenringlüften

Die Ergebnisse zeigen bereits deutlich, dass die einphasige Simulation der entstehenden Luftströmung ein relativ gutes Ergebnis der zu erwartenden Pulverwolke gibt. Bereits ein relativ geringer Volumenstrom der Außenluft führt zu einem relativ stabilen Strömungsfeld. Mit zunehmendem Verhältnis von Außen- zu Innenringluft wird das Strömungsgebiet immer enger und stärker zum Objekt hin ausgerichtet, wodurch besonders schmale Sprühprofile entstehen können. Auch eine komplette Abschaltung der Innenringluft ist möglich.

In Phase 2 wird das zweiphasige Strömungsfeld mit den Pulverpartikeln einschließlich aller elektrostatischer Effekte berechnet. Dadurch lässt sich auch das statische Sprühprofil auf den Werkstücken berechnen. Den Simulationen werden die in Tab 4.3 dargestellten Randbedingungen zugrunde gelegt.

Randbedingung	**Größe**
Partikelgrößenverteilung des Epoxid-Polyester-Mischpulvers (Standardpulver)	D(v,0.1) = 10 µm D(v,0.5) = 38 µm D(v,0.9) = 80 µm
Pulverpartikeldichte	1500 kg/m³
Pulverpartikeleintritt im Pulverkanal	1800 Pulverpartikel pro Intervall, Geschwindigkeit gemäss Luftgeschwindigkeit
Pulvermassenstrom	100 g/min
Sprühabstand	200 mm
Hochspannung an Zentralelektrode am Verteilungskörper	80000 V

Tab. 4.3: Randbedingungen für die Berechnung der Pulverbeschichtung

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

Für die verschiedenen Verhältnisse zwischen Innen- und Außenringluftvolumenströmen ergeben sich die in Abb. 4.18 dargestellten statischen Sprühbilder. Dabei wird angenommen, dass die Sprühpistole eine bestimmte Zeit (ca. 2 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 (ca. 80–100 µm). Unter dieser Bedingung kann man dann mit einer einfachen Integrationsrechnung aus den statischen Sprühbildern unter Annahme einer bestimmten Bewegungsgeschwindigkeit dynamische Schichtdickenprofile ermitteln und mit dem Experiment vergleichen.

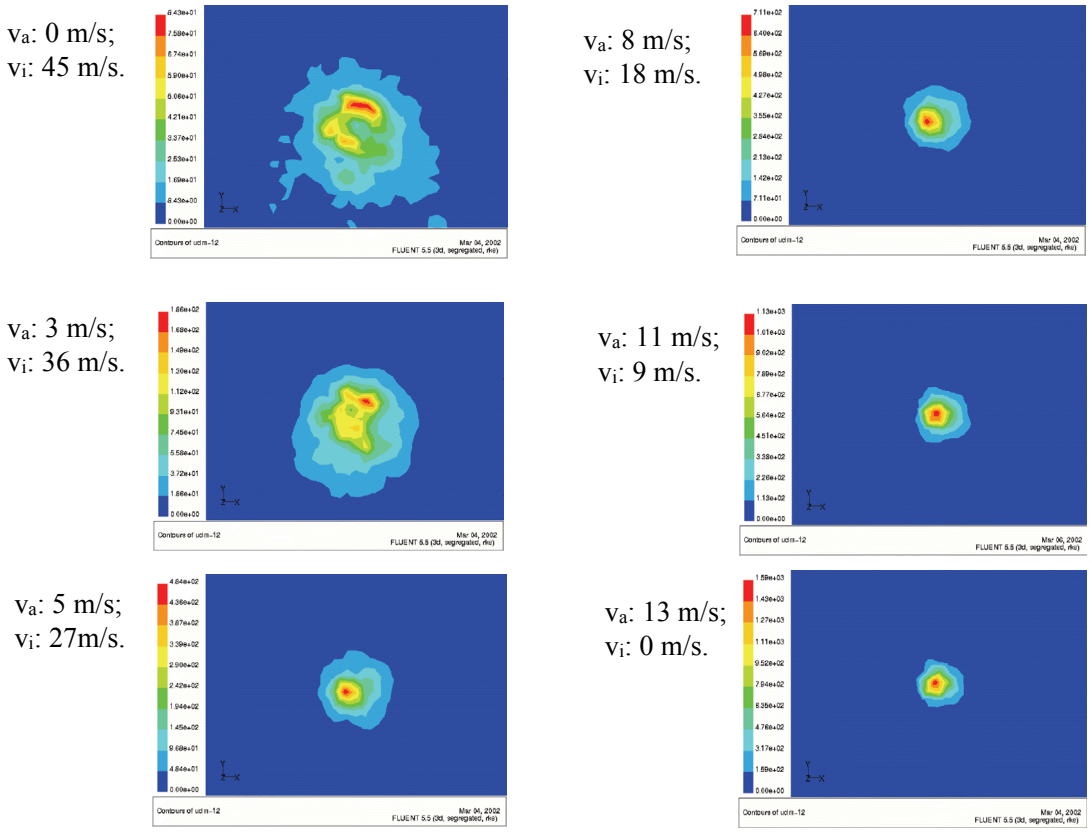


Abb. 4.18: Statische Pulversprühprofile in Abhängigkeit der Steuerlüfte

In Abb. 4.19 sind die anhand der statischen Sprühbilder berechneten Sprühprofile dargestellt. Die Sprühpistole wurde dabei entlang einer geraden horizontalen Bahn vor einem vertikal stehenden Blech vorbeibewegt. Die einwirkende Schwerkraft wurde bereits bei den statischen Sprühbildern berücksichtigt.

Die berechneten Sprühprofilbilder deuten an, dass die Pulverwolke sich um den Faktor 3 variieren lässt. Damit wäre es möglich, die Pistole von einer großen Sprühwolke bis hin zu einer kleinen Sprühwolke für verschiedene Teile zu betreiben (wie z.B. Flachteile, Coils oder geometrisch begrenzte Teile wie z.B. Rohre, Drähte).

Im nächsten Schritt müssen die simulierten Ergebnisse verifiziert werden. Dazu muss ein Pulversprühgerät gebaut werden.

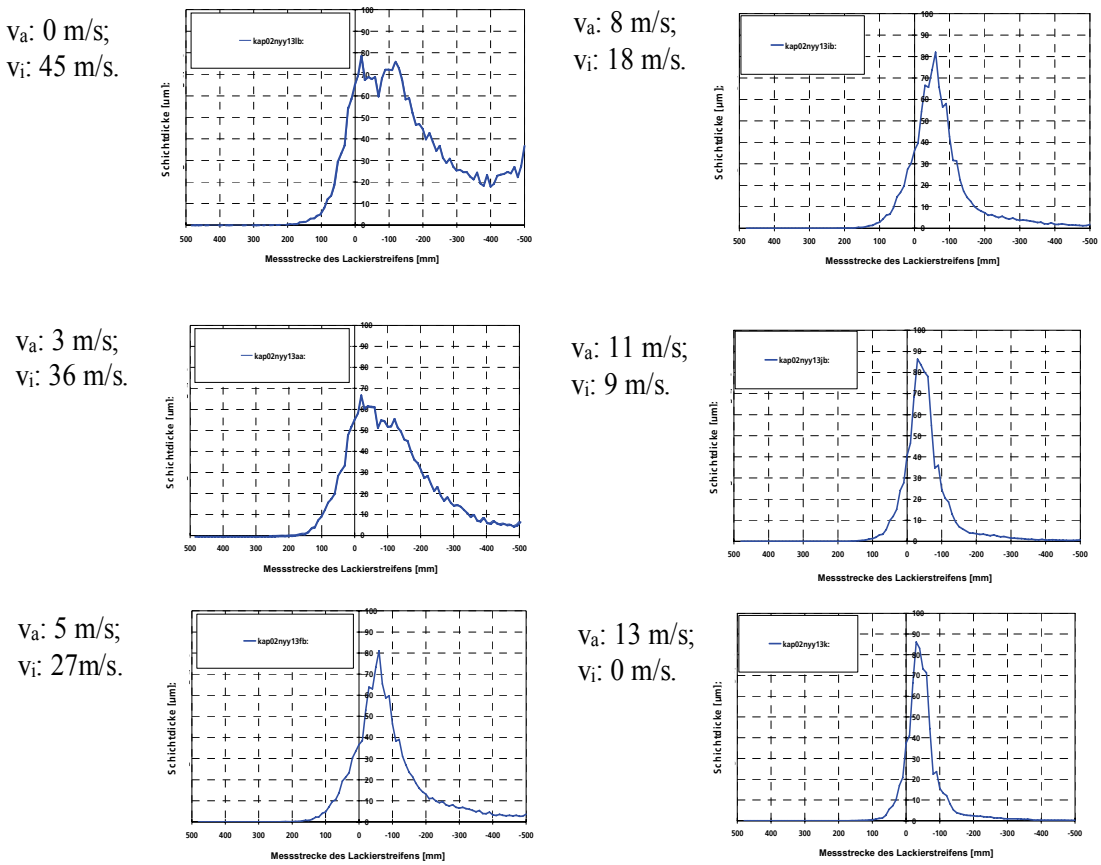


Abb. 4.19: Berechnete Schichtdickenprofile bei verschiedenen Innen- und Außenringlüften

4.3.2 Konstruktion und Bau des Pulversprühgerätes

Anhand der numerischen Ergebnisse aus 4.3.1 wird im nächsten Schritt mittels der berechneten Dimensionen der Strömungskanäle und der Pralltellerform ein Pulversprühgerät gebaut. Dazu muss eine Konstruktion aufgesetzt werden, die die sogenannten „Must-Want-Nice“-Kriterien erfüllt (Fest- und Mindestforderungen sowie Wünsche [91]).

„Must“ bedeutet dabei, dass die Pulverpistole so konstruiert sein muss, damit die komplette Konstruktion

- funktionsgerecht ist

und alle Einzelteile der Pistole

- fertigungsgerecht gebaut und
- montagegerecht montiert bzw. demontiert werden können.

Funktionsgerecht bedeutet in diesem Falle, dass die Pulverwolke nach den Ergebnissen der Simulation von einer schmalen bis zu einer breiten Sprühwolke stufenlos variiert werden kann, ohne irgendwelche Teile in der Pistole verändern zu müssen. Fertigungsgerecht bedeutet, dass alle Einzelteile der Pistole nach dem Stand der Technik hergestellt werden können. Montagegerecht bedeutet, dass alle Einzelteile in einer gewissen Reihenfolge montiert und demontiert werden können, ohne dass dabei irgendwelche Einzelteile beschädigt oder gar zerstört werden müssen.

Die „Must-Anforderungen“ sind sehr allgemein gehalten. Werden diese nicht erfüllt ist die Konstruktion wertlos.

Zusätzlich müssen noch einige weitere, detailliertere, für Pulverpistolen typische Anforderungen erfüllt werden. Dazu zählen:

- Die Strömungskanäle der Pistole müssen getrennt angesteuert werden können.
- Die Dimensionierungen der drei Strömungskanäle müssen nach den Ergebnissen der Simulation genau eingehalten werden. Dazu müssen die Fertigungstoleranzen der Einzelteile beachtet werden. Die Toleranzen betragen für alle Einzelteile der Strömungskanäle ±0,01 mm. Dabei sind auch Form- und Lagetoleranzen einzuhalten. Für alle anderen Bauteile gelten aber mindestens Allgemeintoleranzen (Freimaßtoleranzen).
- Alle Bauteile müssen aus einem sehr verschleißbeständigem, nichtleitfähigem und spanend leicht zu verarbeitbarem Kunststoffmaterial sein (z.B. POM, PEPT oder PA, Farbe weiß bis grau).
- An einigen Teile sind Dichtungsringe vorzusehen, wobei an den entsprechenden Teile leichte Einsparungen vorzusehen sind.
- Der Verteilungskörper an der Pistolenmündung muss axial verschiebbar sein. Der Verteilungskörper muss wie die einzelnen Elektroden am Elektrodenring austauschbar sein.
- Ebenso müssen alle Bauteile die den Pulverkanal ausbilden austauschbar sein, damit z.B. auch tribofähige Materialien eingesetzt werden können.

Diese sogenannten „Want-Anforderungen“ sollten eingehalten werden, damit das Pulversprühgerät zumindest denn zusätzlichen Anforderungen gängiger Pulverpistolen und damit mindestens mit der Konkurrenz mithalten kann.

Um die Pulverpistole noch von Konkurrenzprodukten abheben zu lassen, wäre es ideal, wenn noch die sogenannten „Nice-Anforderungen“ erfüllt wären. Dazu zählen:

- Alle Kanäle in der Pulverpistole müssen strömungsgünstig ausgeführt werden (z.B. keine schroffen Übergänge, Kanten oder Hohlräume), damit sich im Pulverkanal kein Pulver anlagern kann.
- Der Verteilungskörper sollte ebenfalls strömungsgünstig ausgeführt werden, da sich auch hier kein Pulver ablagern darf („Pulverspucker“).
- Die Verschmutzung außerhalb der Pistole sollte ebenfalls weitgehend vermieden werden.
- Wenn Einzelteile zu reinigen sind, sollte sich die Reinigungsprozedur einfach und schnell durchführen lassen (z.B. nur durch Luft abblasen).
- Die Montage und Demontage der Pistole sollte eindeutig und so einfach wie möglich sein. Es sollte dazu, wenn möglich, kein Werkzeug verwendet werden müssen. Man sollte auf

gar keinen Fall mehrere Werkzeuge oder gar Spezialwerkzeuge verwenden müssen. Für Anschlüsse an die Pistole (Elektrostatik, Luft, Pulver, Halterung zum Roboter oder Beschichtungsautomat) sind Normteile zu verwenden.

- Die Pistole sollte ohne weiteres in automatisierbaren Anlagen eingesetzt werden können. Die Pistole sollte deshalb nicht allzu groß und schwer sein, jedoch robust genug sein, um den hohen kinetischen Belastungen durch Roboter oder Automaten gerecht zu werden.
- Auch das Design und die Ergonomie (insbesondere bei Handgeräten) der Pistole sollte beachtet werden.

Damit das Pulversprühgerät möglichst einfach und schnell verwirklicht wird, erfolgt die Pulverladung nicht mit einer im Pistolenkörper integrierten Hochspannungskaskade und einer am Verteilungskörper angebrachten Hochspannungselektrode, sondern durch einen mit Elektroden versehenen Hochspannungsring, gespeist durch eine externe Kaskade. Die einzelnen Elektroden sind austauschbar und der Hochspannungsring als Ganzes axial verschiebbar. Dadurch können u.a. auch verschiedenartige Aufladungsfälle nachgestellt werden.

Für die nachfolgenden Versuche werden mit einer externen Kaskade mit Elektrodenring die Aufladungsfälle nachgestellt, die identisch sind mit der Aufladung mittels interner Kaskade mit Zentralelektrode. Dabei werden auch entsprechende Aufladungsmessungen mit dem in Kapitel 2 beschriebenen q/d-Verfahren durchgeführt, um diese zu bestätigen (siehe auch Kapitel 4.2.1).

Bei künftigen Pistolenkonstruktionen muss eine interne Kaskade mit Zentralelektrode vorgesehen werden.

Im folgendem Abschnitt wird die umgesetzte Pistolenkonstruktion näher beschrieben. Abb. 4.20 zeigt zunächst den Gesamtaufbau der Pistole im Schnitt.

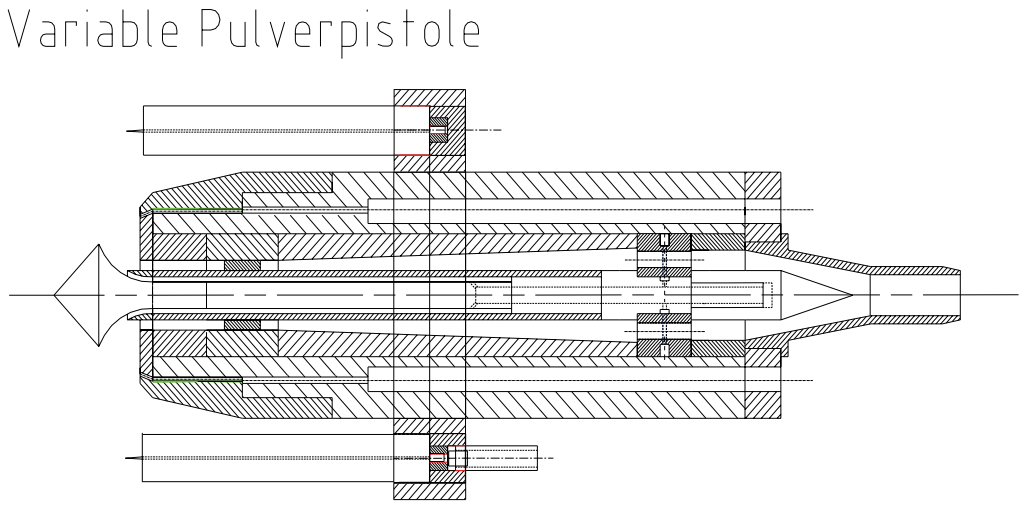


Abb. 4.20: Gesamtaufbau der Pulverpistole im Schnitt

Die Pulverpistole besteht ohne Elektrodenring aus 13 Einzelteilen. Das Pistolengewicht beträgt ohne Elektrodenring etwa 650 g und mit Elektrodenring etwa 1000 g. Der Pistolenkörper hat einen Durchmesser von ca. 60 mm und eine Länge von 180 mm (ohne Luftanschlüsse). Die Hochspannungselektroden werden über eine externe Hochspannungskaskade gespeist (max. 100 kV bei max. 200 µA DC), wobei spannungs- und stromkonstant gefahren werden kann.

Die Pulverpistole wird anschließend von einem Pistolenhersteller nach obiger Konstruktionsanweisung gebaut. Abb. 4.21 zeigt die Pistole mit der Halterung zum Roboter und eine Großansicht eines Verteilungskörpers.

Erste Untersuchungen haben gezeigt, dass die Pistolenkonstruktion alle „Must-“ und „Want-Anforderungen“ erfüllt. Inwieweit sich die „Nice-Anforderungen“ erfüllen, müssen Langzeitversuche im Versuchstechnikum oder bei einem Anwender zeigen. Dazu sind vor allem das Pistolenhandling, die Pulverschmutzung der Pistole, Pistolen- bzw. Teileverschleiß sowie Handhabung der Pistole in der Automation (z.B. Roboter oder Beschichtungsautomat) zu nennen (Kapitel 4.3.4).

In den folgenden Versuchen müssen die Beschichtungsfälle entsprechend der Parametrierung der Simulation nachgestellt werden, um zu zeigen wie genau die Simulation ist. Zum Abschluss werden zusätzliche weitere Beschichtungsfälle, insbesondere mit anderen Verteilungskörpern, untersucht.

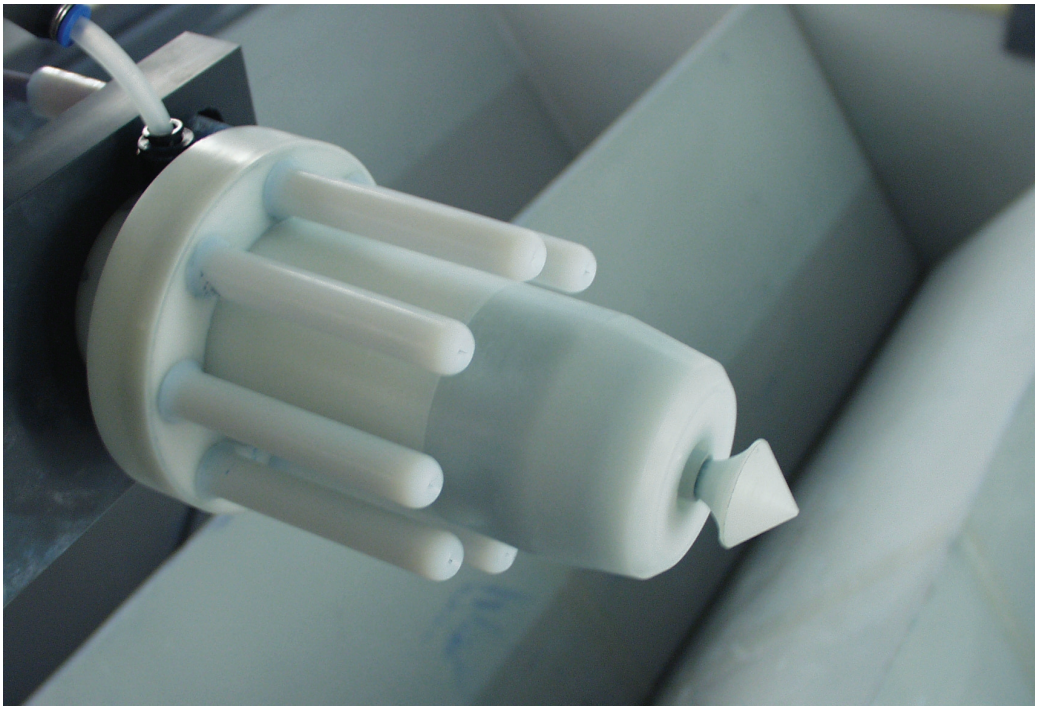


Abb. 4.21: Pulverpistole mit Halterung zum Roboter (Prallteller mit Kegelspitze als Verteilungskörper)

4.3.3 Vergleich zwischen Simulation und Experiment

Nach der Fertigstellung der variablen Pulverpistole erfolgt anschließend die Überprüfung der Simulationsergebnisse durch das Experiment. Dabei werden drei verschiedene Betriebszustände (Variation der Außen- und Innenringluft) im Experiment der Simulation nachgestellt. Die Experimente werden mit den gleichen Randbedingungen durchgeführt wie bei der Simulation (Tab. 4.3). Verglichen werden dabei die dynamischen Sprühprofile und die örtliche Partikelseparierung auf dem Prüfblech.

Zunächst muss jedoch geklärt werden, wie sich das Aufladungsverhalten der Pulverteilchen mittels eines äußeren Elektrodenrings und mittels einer einzelnen Zentralelektrode am Verteilungskörper gestaltet. Dazu werden partikelgrößenspezifische Ladungsmessungen nach dem q/d-Verfahren mit einer konventionellen Pulverpistole mit Zentralelektrode und mit der variablen Pulverpistole durchgeführt und miteinander verglichen. Die Beschichtungsparameter beider Pistolen sind gleich, d.h. auch Form des Verteilungskörpers und die Sprühwolkenform sowie die Sprühwolkengröße. Die Pulverpartikel werden dabei, wie in der Simulation, bei maximaler Hochspannung von 80 kV durch eine Korona-Entladung aufgeladen. Die Ergebnisse der Pulveraufladungen zeigen dabei, dass sich, bei gleichbleibender Sprühwolkenform und –größe, die Ladungswerte der Pulverpartikel bei verschiedener Anzahl und bei unterschiedlichen Positionen der Aufladungsquelle (z.B. durch Elektroden) nicht beeinflussen (Abb. 4.22). Dies zeigt, dass die Partikel bereits mit einer einzelnen Elektrode mit 80 kV bereits im Sättigungsbereich liegen und somit nicht stärker geladen werden können. Dies erklärt sich dadurch, dass die Pulverpartikel im Wesentlichen durch einen Überschuss an Luftionen, entstanden durch Korona-Entladung an der Spitze der Elektrode, geladen werden und nicht durch das richtungs- und ortsabhängige elektrische Feld. Über dieses Phänomen wurde bereits bei der nicht steuerbaren Sprühwolke mittels Lenkelektroden bei gleichzeitiger Pulveraufladung mittels Korona-Elektroden berichtet (Kapitel 4.2.1).

Daher ist es möglich, die mittels Zentralelektrode durchgeführten Simulationsrechnungen mit den experimentellen Ergebnisse zu vergleichen. Eine aufwändigere Simulation mittels Außenelektroden erübrigte sich daher.

Ändert man jedoch die Größe der Pulverwolke, dann verändert sich auch das Aufladungsverhalten. Es wurde festgestellt, dass mit zunehmender Pulversprühwolke im axialen Zentrum der Pulversprühwolke leicht abnehmende Ladungswerte gemessen werden, die das Applikationsergebnis jedoch nicht beeinflussen (Abb. 4.23).

Die Ergebnisse zeigen, dass die experimentell ermittelten Werte der Sprühprofile auf den Werkstücken und die örtliche Partikelseparierung auf den Werkstücken praktisch die gleichen Resultate aufweisen.

Die berechneten Sprühprofile stimmen sowohl in Form, als auch in der Höhe (max. Schichtdicke), als auch in der Fläche (Auftragswirkungsgrad) und auch in der Position (z.B. leichte Verschiebung besonders großer Sprühwolken infolge der Schwerkraft) sehr gut überein. Dies gilt auch für die Partikelseparierung (Sauterdurchmesser).

Das zweite, aber wichtigere Resultat ist, dass die numerische Simulation zur Auslegung einer Pistole erfolgreich eingesetzt wurde. Abb. 4.24 und 4.25 zeigt die Ergebnisse.

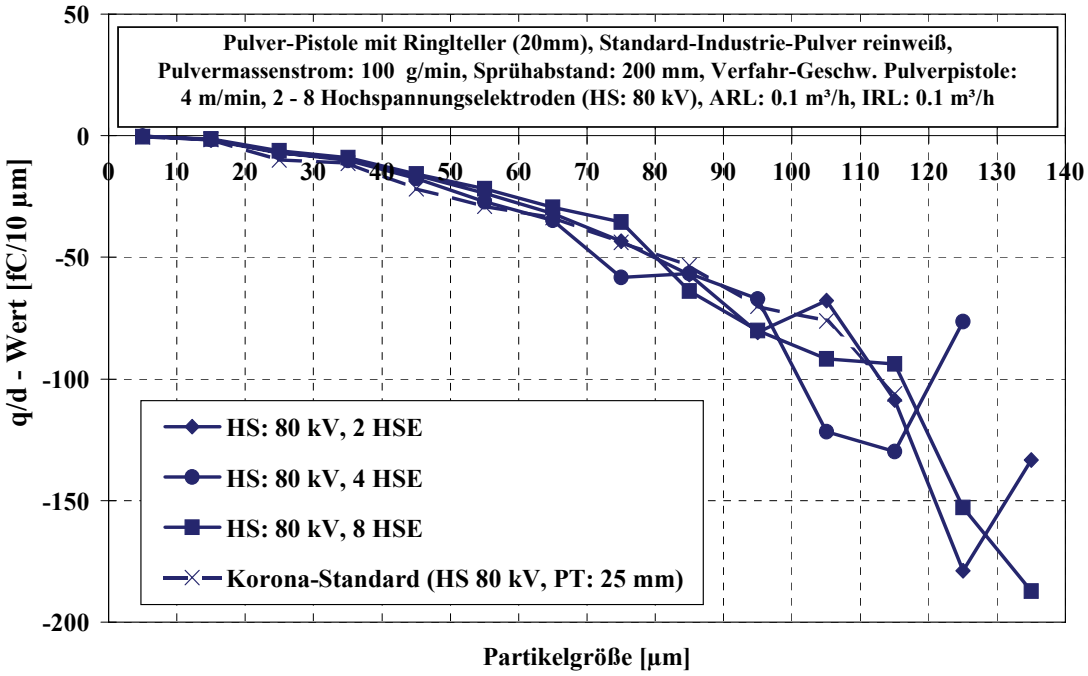


Abb. 4.22: Partikelgrößenbezogene Ladungswerte bei unterschiedlichen Aufladungspositionen und bei gleicher Sprühwolke

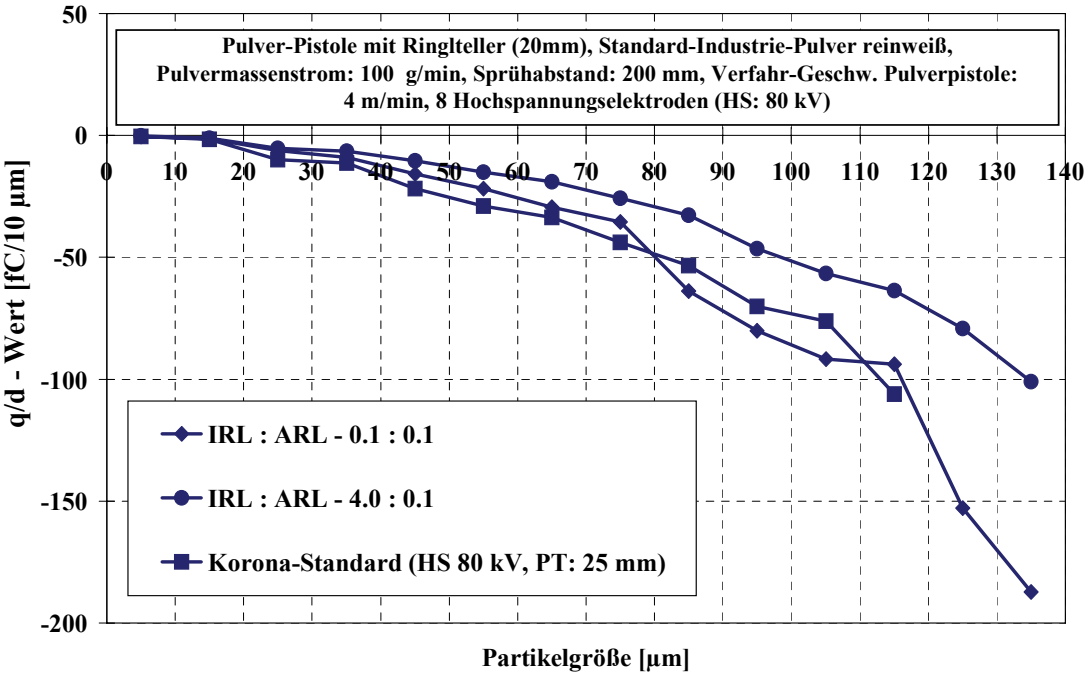


Abb. 4.23: Partikelgrößenbezogene Ladungswerte bei unterschiedlicher Aufladeposition und bei unterschiedlich großen Pulversprühwolken

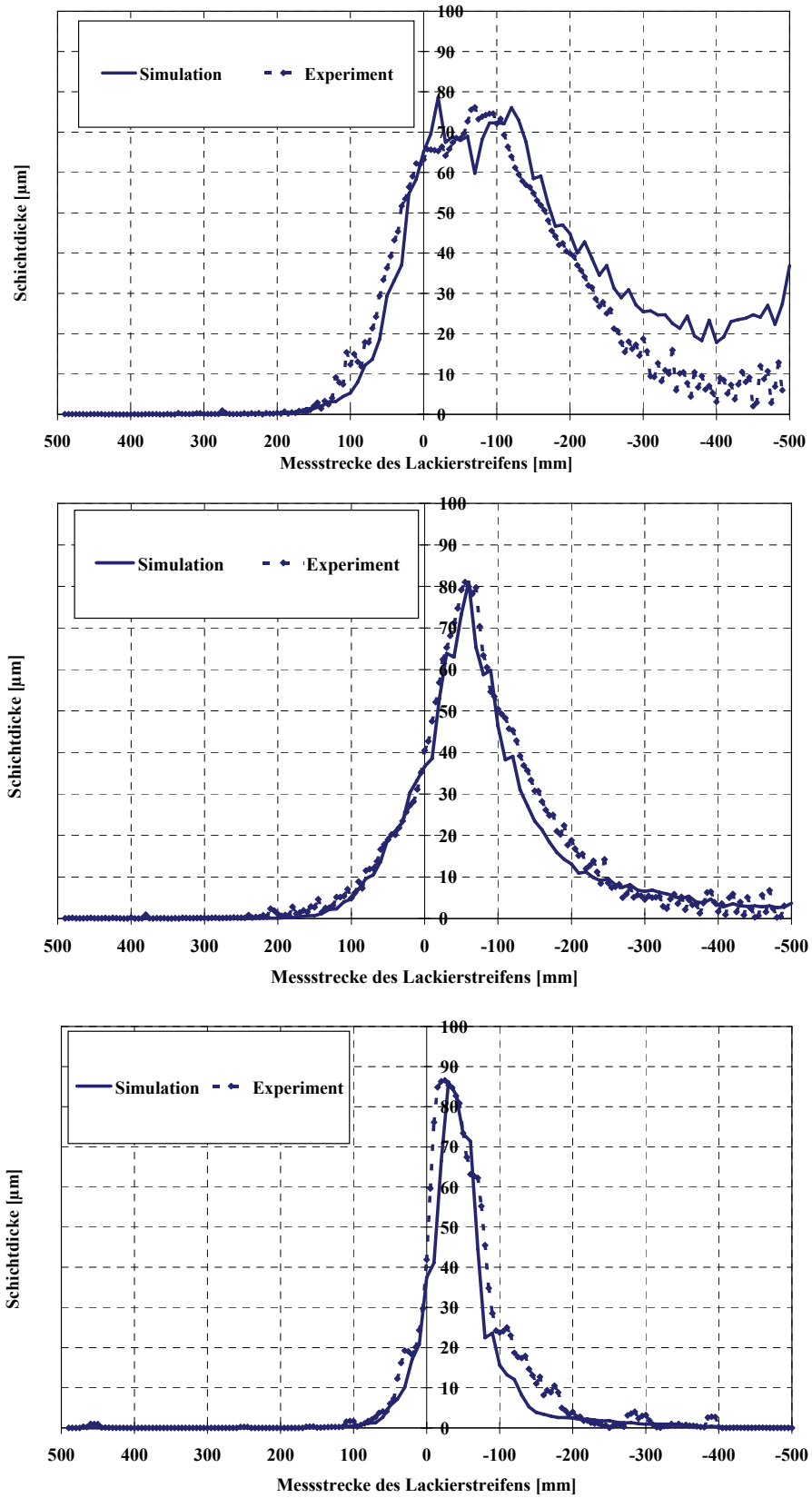


Abb. 4.24: Vergleich der dynamischen Sprühprofile zwischen Simulation und Experiment

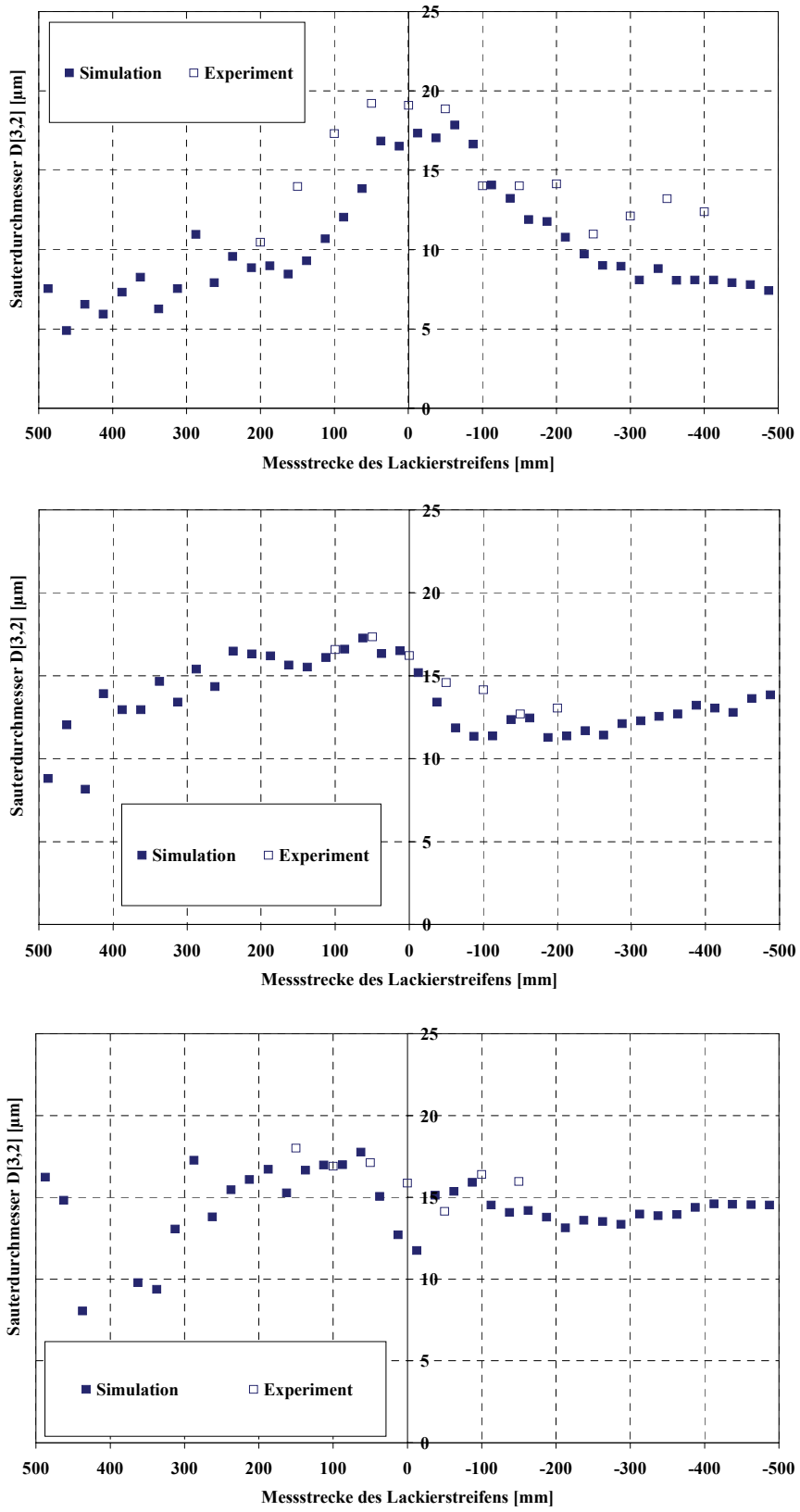


Abb. 4.25: Vergleich der gemessenen und berechneten Partikelgrößenverteilungen auf dem Prüfblech

4.3.4 Abschließende Untersuchungen mit dem Pulversprühgerät und Ausblick auf künftige Arbeiten

Bei der Auslegung der Pistole mittels Simulation wurde als Ablenkkörper für die Innenringluft ein Prallteller mit 17 mm Durchmesser eingesetzt. Damit konnte die Sprühwolke um den Faktor 2,5 bis 3,0 variiert werden.

Im Folgenden soll geklärt werden, welchen Einfluss der Durchmesser und die Form des Ablenkkörpers auf die Sprühwolkenvariation hat. Neben dem bereits getesteten Prallteller mit 17 mm Durchmesser werden auch Prallteller mit 25 mm und 32 mm Durchmesser und ein Ringteller mit 20 mm Durchmesser getestet. Für die Auswertung wird der mittlere Profildurchmesser SB50-Wert, die Partikelgrößenseparierung und der Auftragswirkungsgrad herangezogen.

Die Ergebnisse zeigen, dass mit zunehmendem Pralltellerdurchmesser die Variationsbreite der Sprühwolkenformung noch weiter vergrößert werden kann. Bei einem Prallteller von 32 mm Durchmesser kann die Sprühwolke um den Faktor 4 vergrößert werden. Größere Prallteller kommen nicht in Frage. Mit Pralltellerdurchmessern größer 32 mm besteht die Gefahr, dass sich auf die Sprühwolke der „Coanda-Effekt“ auswirkt, d.h. die Sprühwolke strömt entlang der nächst gelegenen Oberfläche, in diesem Fall über die Pistolenoberfläche, also nach hinten. Bei den Pralltellern ist für die Ausweitung der Sprühwolke die Innenringluft verantwortlich, für die Einschnürung der Wolke die Außenringluft. Die größte Variationsmöglichkeit ergibt sich jedoch mit einem Ringteller von 20 mm Durchmesser. Hier lässt sich die Sprühwolke um den Faktor 5 variieren. Hier wird die Sprühwolke vor allem durch die Innenringluft vergrößert (Abb. 4.26 und Abb. 4.27).

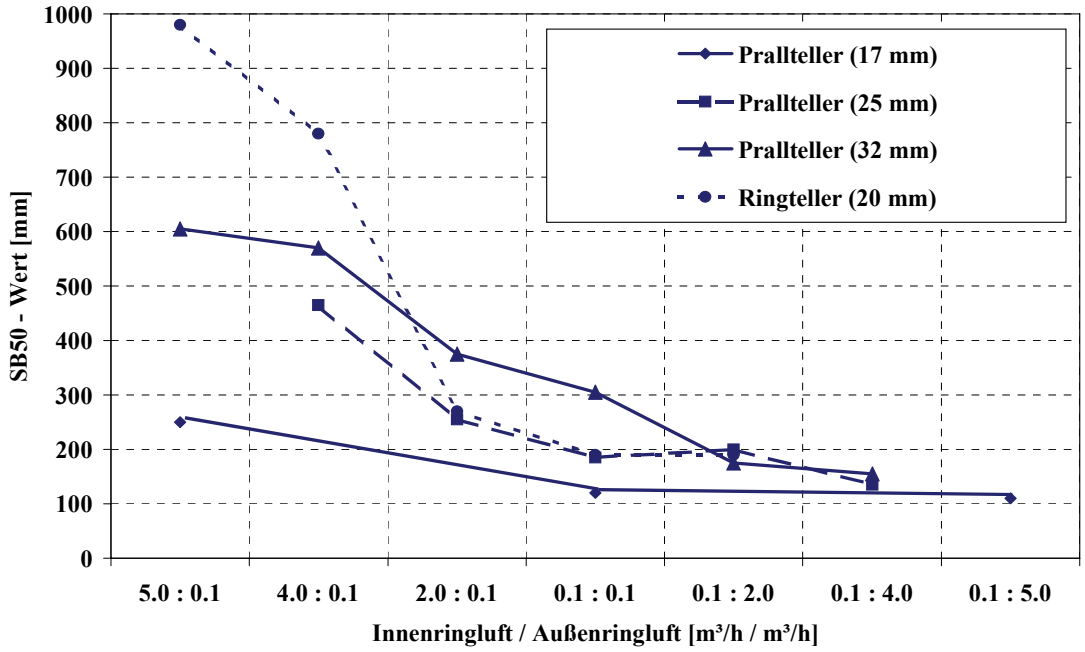


Abb. 4.26: Variationsbereiche der Sprühwolken bei verschiedenen Ablenkkörpern

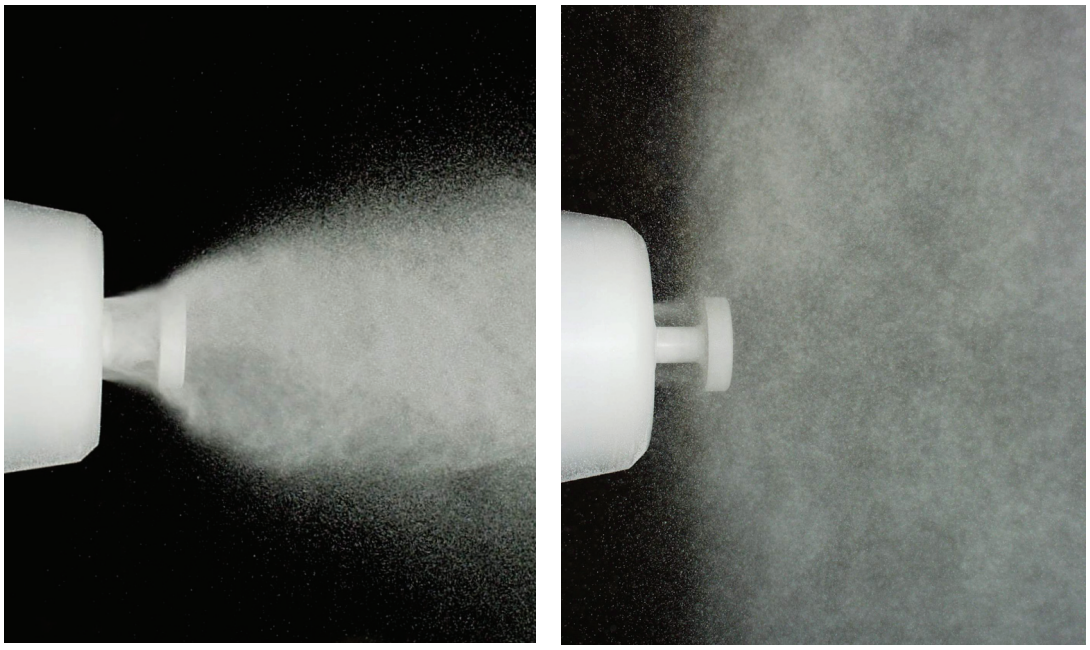


Abb. 4.27: Schmaler und breiter Sprühstrahl durch Steuerung der Ringlüfte

Die Sprühwolke kann dabei von einem sehr schmalen Strahl, wie sie z.B. bei einer konventionellen Pulverpistole mit kleinem Prallteller entsteht, stufenlos zu einer großen Sprühwolke beträchtlicher Breite, wie sie z.B. mit einer Pulverglocke entsteht, variiert werden. Eine Sprühwolke mit einem SB50-Wert größer als 1000 mm lässt sich bei horizontaler Anordnung der Pistole kaum ermöglichen. Bei größeren Sprühwolken nimmt auch die Tendenz der Partikel zum Werkstück zu strömen ab (Auftragswirkungsgrad nimmt drastisch ab).

Für Sonderbeschichtungen, z.B. sehr schmale, fast punktförmige Sprühwolken, wie z.B. bei der Nahtabdichtung, kann man kleinere Ringteller (Durchmesser 12 mm oder 15 mm) einsetzen.

Die Bilderserie 4.28 bis 4.31 zeigt die Partikelseparierung bei den verschiedenen Sprühwolken mit unterschiedlichen Verteilungskörpern. Besonders bei kleinen Sprühprofilen fällt die Separierung gering aus, da hier die Partikel stärker auf das Werkstück gerichtet werden. Dabei werden also auch vermehrt die kleinen Partikel abgeschieden, da sie unempfindlicher auf Kabinensinkluft und Schwerkraft reagieren.

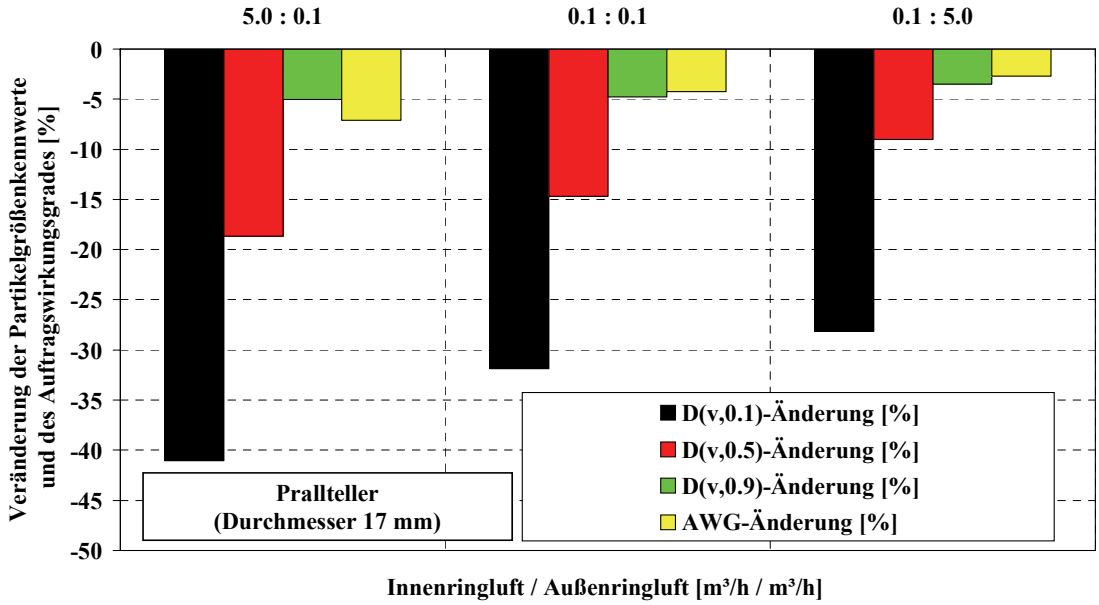


Abb. 4.28: Partikelgrößenseparierung bei unterschiedlich großen Pulversprühwolken (Prallteller, Durchmesser 17 mm)

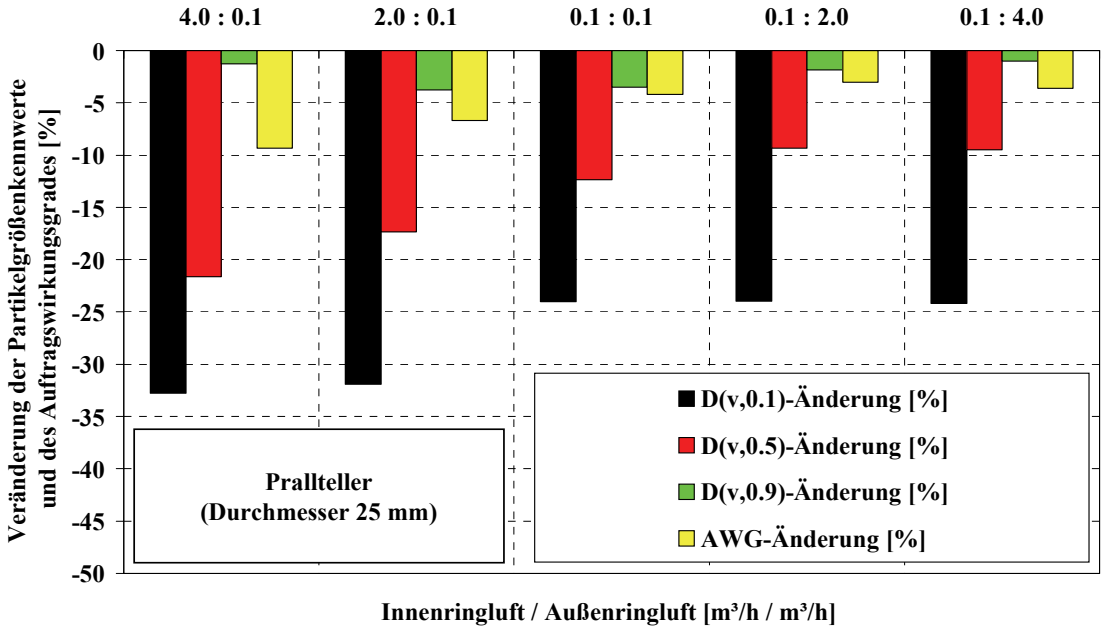


Abb. 4.29: Partikelgrößenseparierung bei unterschiedlich großen Pulversprühwolken (Prallteller, Durchmesser 25 mm)

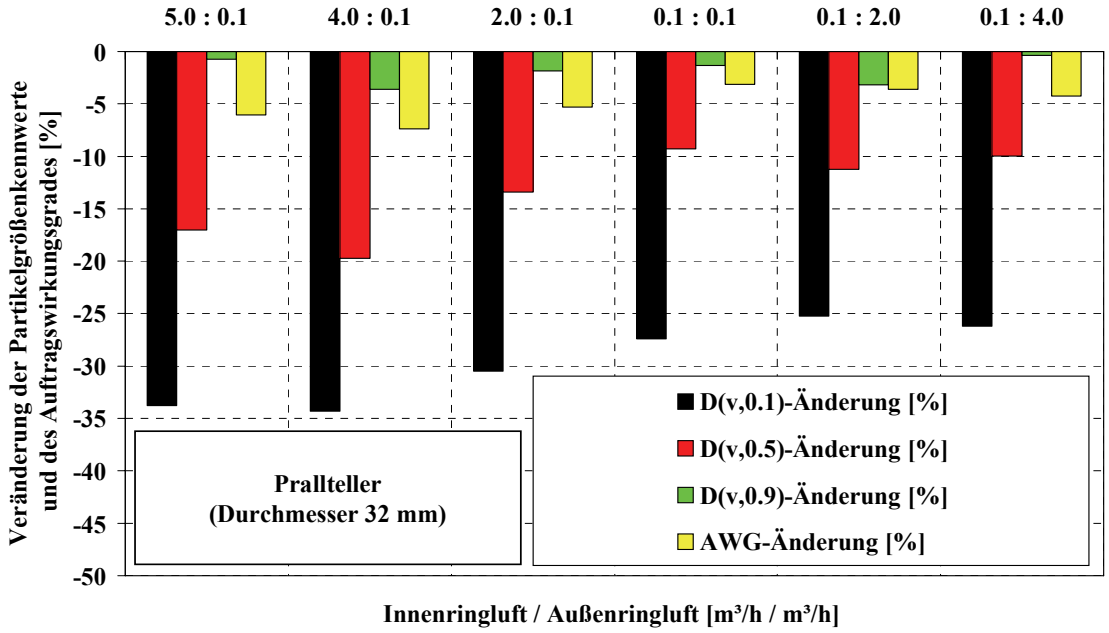


Abb. 4.30: Partikelgrößenseparierung bei unterschiedlich großen Pulversprühwolken (Prallteller, Durchmesser 32 mm)

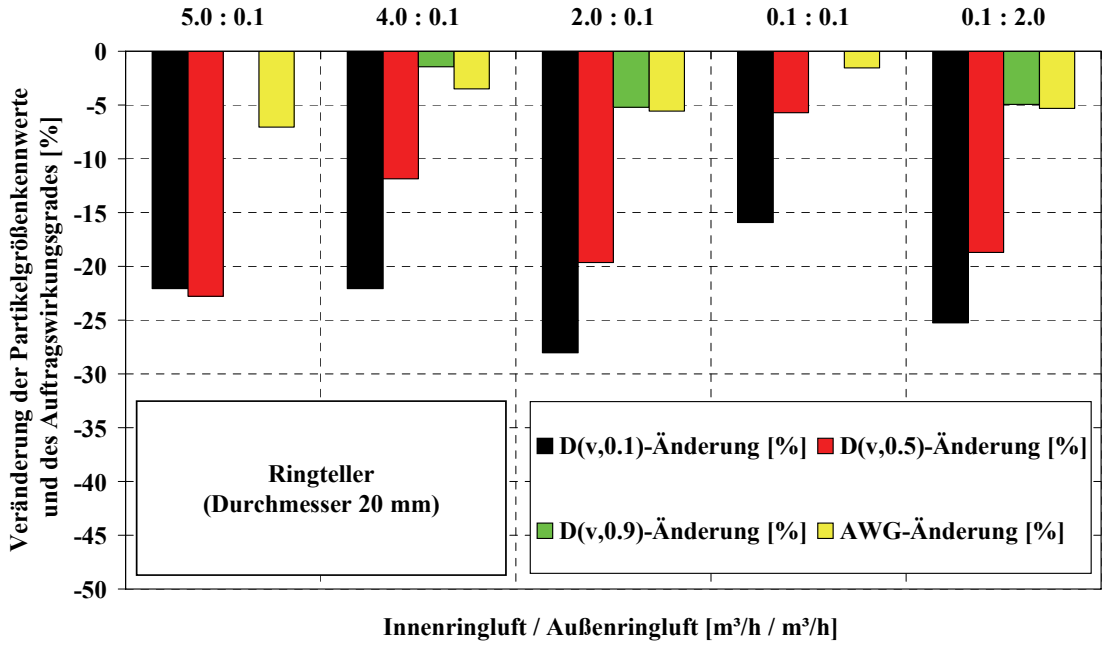


Abb. 4.31: Partikelgrößenseparierung bei unterschiedlich großen Pulversprühwolken (Ringteller, Durchmesser 20 mm)

Beim Ringteller ist die Partikelseparierung, unabhängig von den Steuerlüften, also von der Sprühwolkengröße, bei allen Einstellungen relativ gering. Dies hängt sicherlich damit zusammen, dass die Pulverpartikel unabhängig von ihrer Größe durch die Innenringluft stark durchmischt werden und sich somit bezüglich der Partikelseparierung gleichmäßiger auf dem Werkstück abscheiden. Infolge der homogenen Vermischung der Partikel wird auch der axiale Rückströmungsimpuls feiner Partikel, wie sie bei den konventionellen Pralltellerdüsen entstehen, vermieden (siehe Kapitel 3.1.1).

Beim Auftragswirkungsgrad sind die Zusammenhänge einfacher zu erklären. Je kleiner die Pulversprühwolke wird, desto größer wird der Auftragswirkungsgrad, da die Partikel weniger abgelenkt werden. Eine kleine Sprühwolke wird durch eine große Außenringluft bei gleichzeitig kleiner Innenringluft erzeugt. Die Steigung des Pralltellers hat ebenfalls Einfluss auf den Auftragswirkungsgrad. Je größer die Steigung der Pralltelleroberfläche desto stärker die Ablenkung der Partikel durch die Innenringluft. Besonders beim Prallteller mit 17 mm Durchmesser ist diese Steigung gegenüber den Pralltellern mit 25 mm und 32 mm Durchmesser relativ groß. Deshalb ist hier der Auftragswirkungsgrad besonders bei hoher Innenringluft deutlich geringer als bei den größeren Pralltellern. Der Ringteller mit einem Anströmwinkel von 90° und einem Durchmesser von 20 mm stellt den Grenzfall dar. Bei maximaler Pulverwolkenausdehnung ist der Auftragswirkungsgrad am geringsten. Mit zunehmender Außenringluft bei gleichzeitig abnehmender Innenringluft wird die Pulverwolke kleiner und der Auftragswirkungsgrad größer. Durch größere Ringteller lässt sich dies kaum noch beeinflussen (Abb. 4.32).

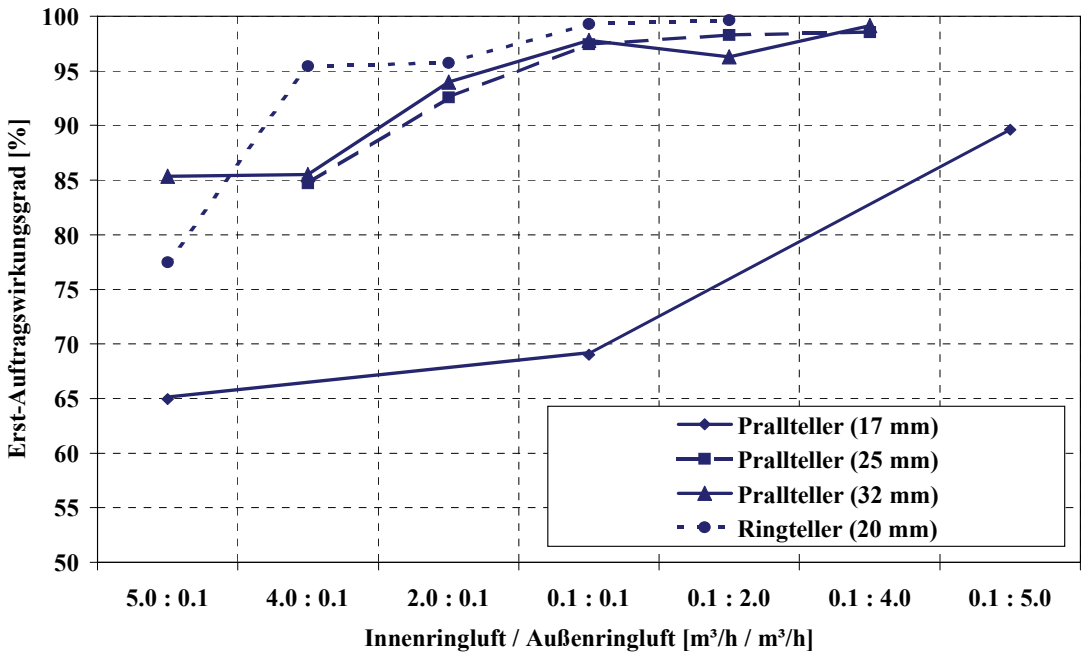


Abb. 4.32: Einfluss verschiedener Verteilungskörper bei unterschiedlich großen Sprühwolken auf den Auftragswirkungsgrad

Für eine gleichmäßige und rotationssymmetrische Ausbringung der Pulverteilchen durch innere und äußere Steuerlüfte müssen Abmessung und Form (Rundheit und Koaxialität) sowie die Oberflächen der Strömungskanäle bestimmte Genauigkeitsanforderungen, ähnlich wie bei den Lackierpistolen im Nasslackbereich, erfüllen. Daher sind auch für diese Bauteile Toleranzen vorzugeben. Besonders die Bauteile des Innenringkanals und des Außenringkanals müssen sehr genau gefertigt werden. Es muss jedoch beachtet werden, dass im Pulverbereich nicht leitfähige Materialien (z.B. Kunststoffe) eingesetzt werden müssen, während im Nasslack metallische Werkstoffe eingesetzt werden. Bei Nasslackpistolen können daher für die Bauteile genaue Toleranzen leichter eingehalten werden, als bei den Teilen für Pulverpistolen. Es ist somit auch eine Frage neuer Werkstoffe für Pulverpistolen.

Mit Hilfe der Strömungssimulation wird deshalb getestet, wie empfindlich die Sprühwolke auf geringste Verschiebungen des Innenringstegs reagiert. Bereits eine Verschiebung des Innenringsteges von 0,1 mm nach oben verursacht eine deutlich ausgeprägte Asymmetrie der Sprühwolke, die in diesem Fall stärker nach unten abgelenkt wird. Wird der Innenringsteg 0,2 mm nach oben verschoben, weicht die Sprühwolke gänzlich nach unten. Abb. 4.33 zeigt dazu die Ergebnisse der Strömungssimulation.

In einer ersten Abschätzung können für die Bauteile des Innen- und Ausringkanals folgende Maßtoleranzen festgelegt werden:

- Durchmesser bzw. Rundheit der Kanäle ca. ± 0,01 mm.
- Die Koaxialität der Innen- und Außenringkanäle 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 ± 0,05 mm. Notfalls muss der Abstand zwischen Halterung und Strömungsaustritt verkleinert werden.
- Für die übrigen Bauteile werden zunächst allgemeine Form- und Maßtoleranzen (Freimaßtoleranzen) festgelegt.

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

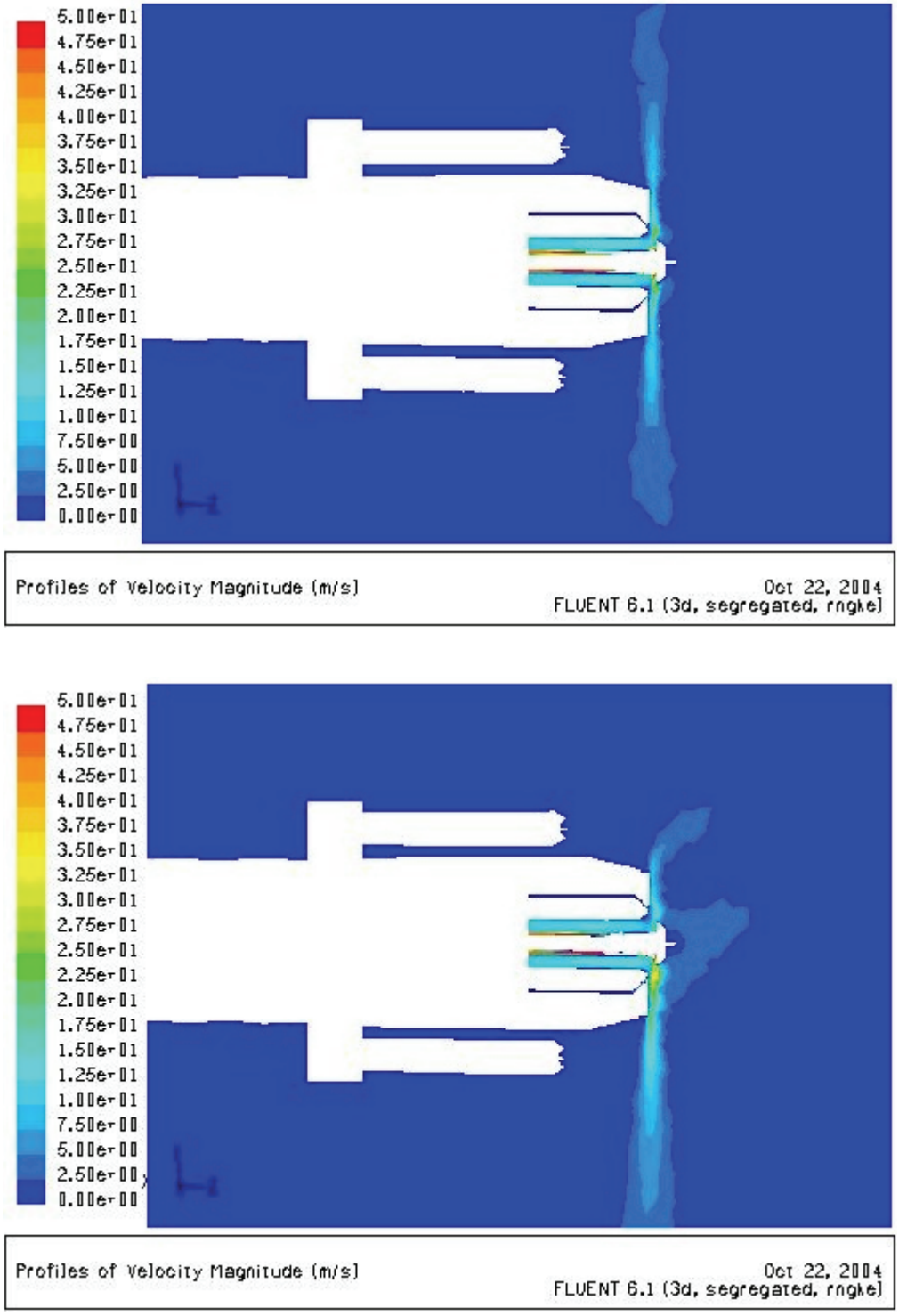


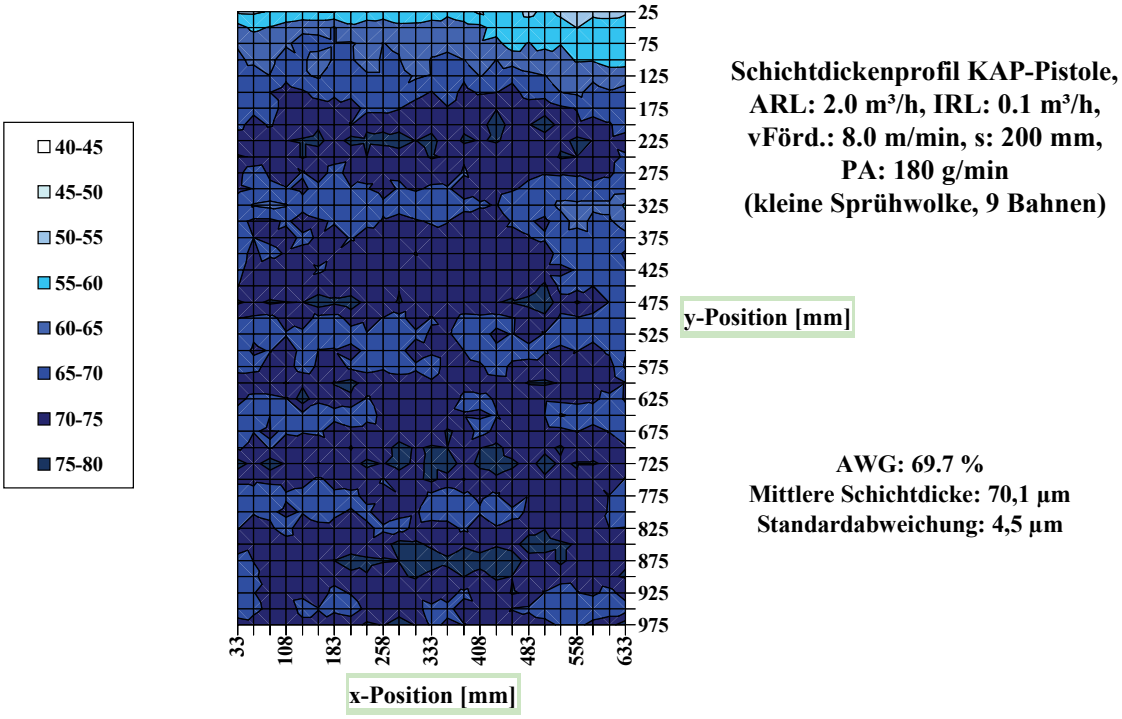
Abb. 4.33: Einfluss der Empfindlichkeit der Maßtoleranzen auf die Sprühwolkenformung (oben: homogene Sprühwolke bei genauen Toleranzen, unten: unsymmetrische Sprühwolke bei Verschiebung des Innenstegs um 0,2 mm nach oben)

Zum Abschluss muss die Praxistauglichkeit der Pistole, bei der vor allem die Handhabung der Pistole, der Verschleiß der Pistolenbauteile und die Verschmutzungsneigung der Pulverpistole zu überprüfen ist, bei sogenannten Langzeittests überprüft werden. Ferner muss auch die Reproduzierbarkeit der Beschichtungsergebnisse geprüft werden.

Bezüglich der Handhabung der Pistole sollte vor allem darauf geachtet werden, dass die Bauteile nicht allzu leicht beschädigt werden können, d.h. die Pistole mit den Bauteilen sollte 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 sollte möglichst einfach und schnell durchgeführt werden können. Ideal wäre ein einfaches Abblasen der Pistole mit Druckluft und ohne zusätzliche Reinigungsmittel.

Bei den Beschichtungsvorgängen, insbesondere Beschichtungen, bei denen der Sprühkörper vertikal angeordnet ist und nach unten sprüht, sollte die Verschmutzungsneigung in und außerhalb der Pistole so gering wie möglich sein. Vor allem Pulverablagerungen an den Elektroden, am Verteilungskörper oder in den Strömungskanälen innerhalb und außerhalb der Pistole müssen verhindert werden, da sich dieses Pulver fallweise ablösen kann und auf dem Werkstück zu sogenannten „Pulverspucker“ führen kann. In den meisten Fällen ist dabei der Verteilungskörper eine Schwachstelle. Bei der variablen Pulverpistole ist dies nicht der Fall, die Innenringluft, die das Pulver über den Verteilungskörper aufweitet, hat eine „kontinuierlich reinigende Wirkung“. Die Verschmutzung des Pistolenkörpers wird durch einen abnehmenden Durchmesser des Pistolenkörpers (Zylinder) zur Pulveraustrittsseite hin vermindert. Dadurch wird auch der eingangs erwähnte „Coanda-Effekt“ verhindert.

Bei den abschließenden, anwendungsbezogenen Tests werden die einzelnen schmalen bis breiten Sprühprofile mehrfach überlappt, um eine Komplettbeschichtung mit möglichst gleichförmiger Schichtdickenverteilung zu erzeugen. Die Beschichtungsparameter sind die gleichen, wie bei den vorherigen Versuchen (Tab. 4.3). Beschichtet werden Blechtafeln mit den Abmessungen 1000 x 670 mm. Die Schichtdickenverteilung wird zweidimensional dargestellt (Abb. 4.34 u. Abb. 4.35). Die Ergebnisse zeigen, dass sowohl mit einem sehr schmalen Profil (kleine Sprühwolke, 9 Bahnen), als auch mit einem sehr breiten Sprühstrahl (große Sprühwolke, 2 Bahnen) eine gleichmäßige Schichtdicke über das gesamte Werkstück erzeugt wird. Die Standardabweichungen der Schichtdicken sind dabei im Vergleich zu anderen Pulverpistolen überdurchschnittlich gut. Dies bedeutet, dass die Sprühwolken relativ symmetrisch und homogen sind und sich deshalb gut überlappen lassen (Kapitel 2.2.2.). Gleichzeitig sieht man, dass sich die Sprühwolkengröße stark variieren lässt, wobei diese Komplettbeschichtung eher mit einer großen Pulverwolke erzeugt würde.



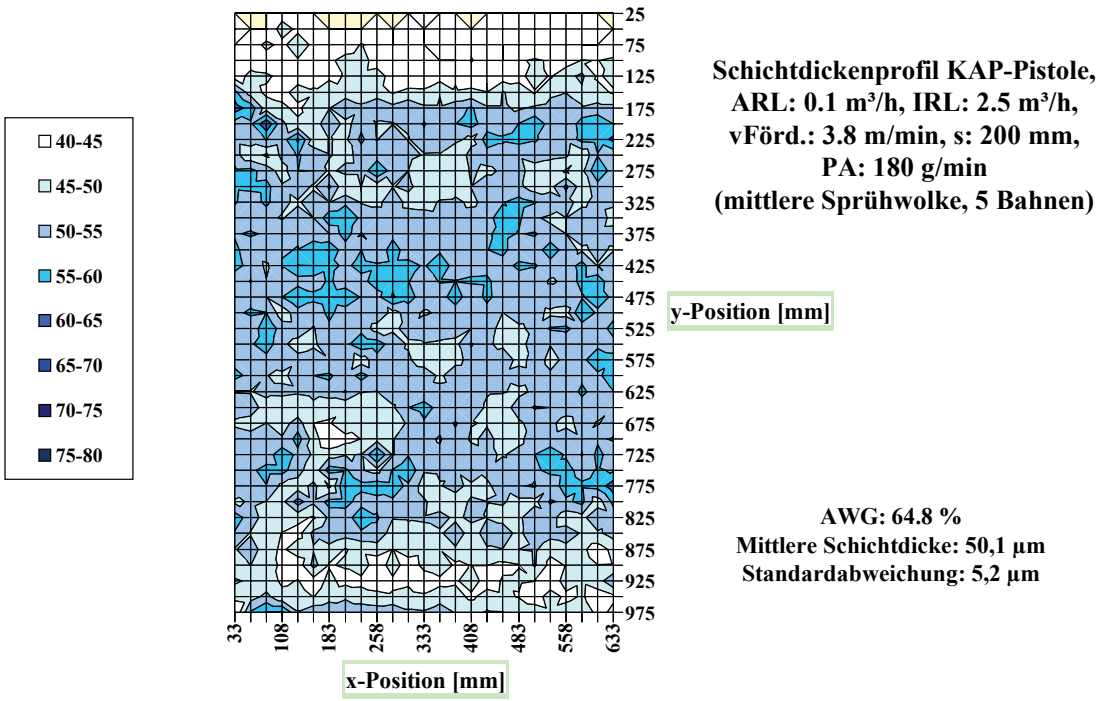
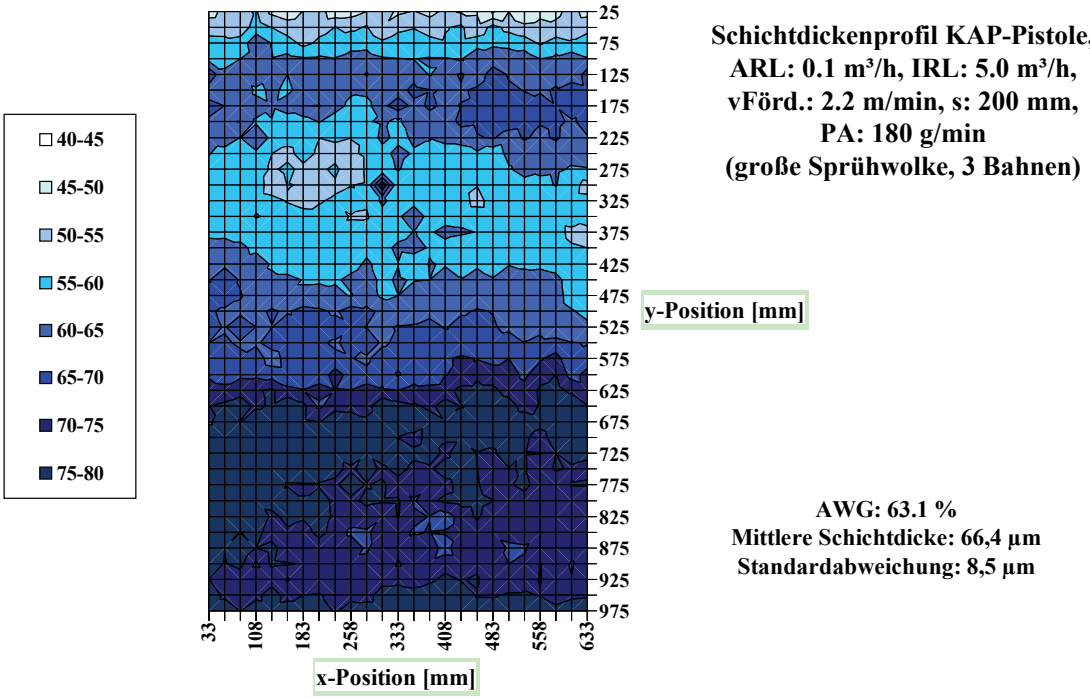


Abb. 4.34: Überlappungsversuch mit 9 Beschichtungsbahnen (oben, sehr kleine Sprühwolke) und mit 5 Beschichtungsbahnen (unten, kleine bis mittlere Sprühwolke)



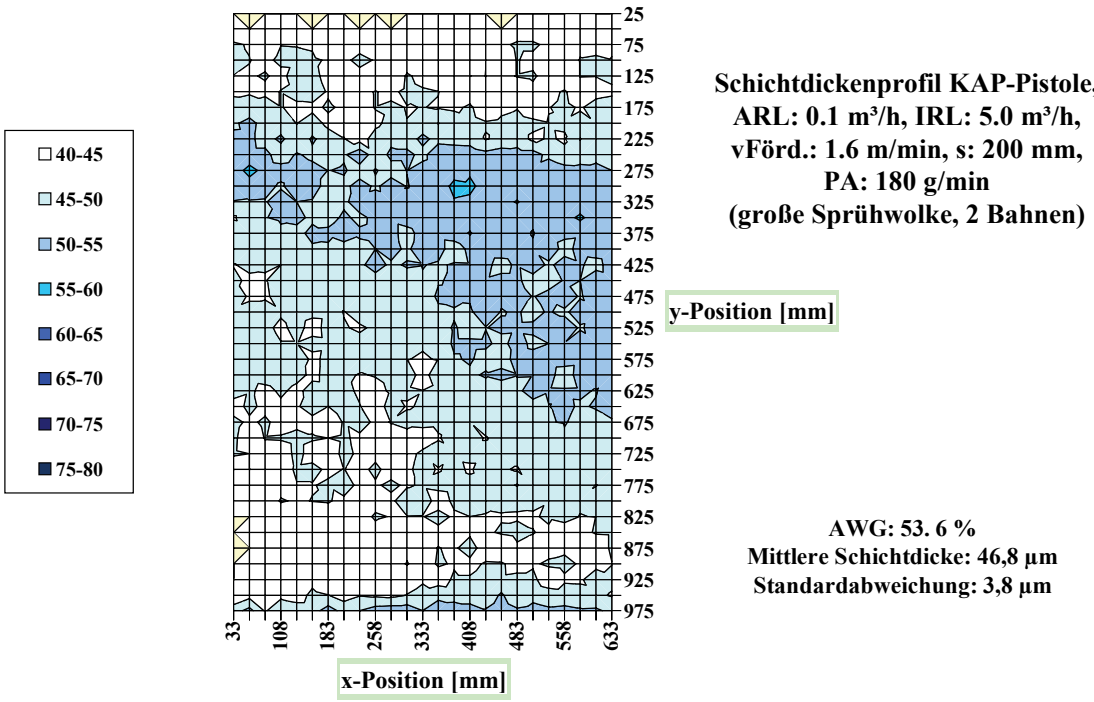


Abb. 4.35: Überlappungsversuch mit 3 Beschichtungsbahnen (oben, mittlere bis große Sprühwolke) und 2 Beschichtungsbahnen (unten, sehr große Sprühwolke)

5 Zusammenfassung

Für einen zunehmenden Einsatz der Pulverbeschichtungstechnologie müssen die komplexen Zusammenhänge bei der Pulverapplikation, insbesondere die der Partikelgrößenverteilung, und deren Auswirkungen verstanden werden. Dazu mussten im ersten Schritt neue Messverfahren entwickelt werden, um die Problematik sichtbar zu machen und im nächsten Schritt diese dann zu lösen. Dazu zählen:

- die Überwachung der Prozesssteuergrößen (Pulvermassenstrom, Partikelgrößenspektrum, Elektrostatik, Luftströmung und Klima)
- die Entwicklung eines neuen Testverfahrens für Pulversprühorgane
- die Entwicklung einer Simulationsmethode zur Vorhersage des Kreislaufverhaltens (KAP-Sim-Verfahren)
- der Einsatz eines neu entwickelten Ladungsspektrometers für Pulverlacke.

Die durch das KAP-Sim-Verfahren ermittelten Korngrößenwerte und die Auftragswirkungsgrade sind im stabilen Endzustand des Pulverkreislaufes vergleichbar mit den experimentell ermittelten Werten. Künftig kann dieser Versuchsaufwand deshalb erheblich reduziert werden (es genügt eine einmalige Partikelmessung am Prozessanfang). Untersuchungen zur Pulver-Kreislaufführung können deshalb auch in der industriellen Pulverlackierung durchgeführt werden (z.B. Anlagenoptimierung und Anlagenneuentwicklungen).

Im ersten Schritt wurde das KAP-Sim-Verfahren auf die Auswirkungen des Kreislaufverhaltens bei verschiedenen Behältergrößen bzw. Pulvernachdosierzeiten bei einem konventionellen Pulvermaterial und bei einem gesichteten Pulvermaterial eingesetzt.

Bei den meisten Rückgewinnungssystemen wird das Overspraypulver sofort oder in kurzen Zeitabschnitten zurückgeführt, das Frischpulver jedoch meistens dann, wenn der Pulverbehälter auf ein bestimmtes Niveau leergefahren wurde. Während dieser Zeit kommt nur das in der Regel feinere Overspraypulver zurück, das zu versprühende Pulver verfeinert sich stärker. Erst wenn Frischpulver nachdosiert wird, vergröbert sich das Pulver wieder. Bei fortlaufender Kreislaufführung kommt es daher zu Schwankungen in der Partikelgrößenverteilung, im Auftragswirkungsgrad und in der Schichtdickenverteilung. Generell sind die Schwankungen dabei stärker, je größer die Nachdosierzeit ist. Über den Pulververbrauch und über die Partikelseparierung am Anfang des Kreislaufprozesses kann dabei die Pulverbehältergröße so ausgelegt werden, dass die daraus resultierenden Schichtdickenschwankungen minimiert werden können.

Bei den experimentellen Optimierungsmaßnahmen wurden folgende Prozessparameter betrachtet:

- Partikelgrößenspektrum des Pulverlacks
- Pulverlack-Rückgewinnungsmethode
- Verteilerdüsen der Sprühorgane.

Bei den Untersuchungen des Korngrößenspektrums auf das Kreislaufverhalten wurde neben der Standardkornverteilung eines handelsüblichen Industriepulvers auch gesichtetes Pulver mit

überwiegend reduziertem Feinkornanteil eingesetzt. Die Kreislaufversuche zeigen, das durch den reduzierten Feinanteil des Originalpulvers der Kreislauf wesentlich stabiler verläuft und das Kreislaufpulver sich weniger verfeinert als bei den Standardpulvern. Beim Einsatz des feinkornreduzierten Pulvers wurden weitere Vorteile festgestellt:

- geringe Staubentwicklung beim Pulverhandling und bei der Fluidisierung (Arbeitsschutz)
- homogene Pulversprühwolke
- bessere Verlaufsqualität.

Die Sichtung des Pulverlacks ist jedoch mit Pulververlust verbunden, der nicht mehr wiederverwertet werden kann.

Bei der industriellen Pulverlackbeschichtung werden für die Rückgewinnung des Oversprays überwiegend Patronenfilter oder Mono- bzw. Multizyklonanlagen eingesetzt. Bei den Patronenfiltern wird das Overspray nach der Filtersättigung nahezu vollständig zurückgewonnen, während beim Fliehkraftabscheider Feinpulververlust entsteht, das Overspraypulver quasi gesichtet wird. Filtersysteme haben im Vergleich zum Zyklon jedoch den Nachteil, dass sie schwer oder kaum zu reinigen sind und somit für einen Mehrfarbenbetrieb nicht in Frage kommen. Eine denkbare Erweiterung zur Zyklon-Rückgewinnung wäre der Zyklonsichter, bei dem die Trennung der Partikel bis zu einem gewissen Grad gesteuert werden kann und somit maßgeschneiderte Pulverlacke erzeugt werden können.

Ein weiterer wichtiger Punkt ist die Pulversprühpistole. Das Pulversprühsystem ist in Verbindung mit den Applikationsparametern eine der wichtigsten Einflussgröße auf das Kreislaufverhalten. Die Achillesverse der Pulverpistolen sind dabei die Düsen. Nach einer speziellen Prüfmethode wurden die gängigen Prallteller- und Flachstrahldüsen bezüglich Sprühwolkenform und Partikelseparierung untersucht und aus diesen Erkenntnissen heraus neue Düsen entwickelt, bei denen sich das Kreislaufpulver deutlich weniger separiert und das Sprühprofil homogener wird, wodurch bei der Komplettbeschichtung auch die Schichtdickenschwankungen reduziert werden.

Für die künftig vermehrte und vor allem effizientere Anwendung von Pulverlacksystemen werden vom Anwender u.a. flexiblere Pulversprühpistolen gefordert, d.h. Pulversprühpistolen, bei denen die Ausdehnung der Sprühwolke stufenlos formbar ist. Die vorliegende Arbeit zielte u.a. darauf ab, solche Pulversprühsysteme unter Anwendung aerodynamischer und elektrostatischer Lösungsansätze zu entwickeln und in Form von Pulversprühpistolen zu realisieren. Entwickelt wurden dabei zwei völlig unterschiedliche Lösungen, die getrennt realisiert wurden. 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. Bei der Pulveraufladung mittels Reibung (Tribo-Aufladung) ließ sich die Sprühstrahlausdehnung durch Variation der Lenkelektrodenspannung etwa um den Faktor 3 variieren. Bei der Korona-Aufladung zeigten die Lenkelektroden keine signifikante Wirkung. 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 einer praxisnahen Sprühpistole umgesetzt und erprobt. Die experimentellen Schichtdickenprofile, Auftragswirkungsgradwerte und die Korngrößenwerte auf dem Werkstück zeigen dabei sehr gute Übereinstimmungen mit den Ergebnissen der Simulation. Die Lösungskonzepte können auch kombiniert werden.

In abschließenden Tests wurde die Praxistauglichkeit der Pistole erfolgreich getestet. Derzeit wird in Kooperation mit einem industriellen Anwender die Pulverpistole in der Praxis getestet.

Die Simulation stellt somit künftig ein wichtiges Instrumentarium bei der Vorausberechnung komplexer Pulver-Beschichtungsprozesse dar. Die nächsten Schritte werden dabei die Simulation komplexerer Werkstückgeometrien (Kanten, Vertiefungen Hohlräume, etc.) sein, die mit dem Experiment noch verglichen werden müssen. Anschließend sind Schritte zur Pulver-Applikatoren-Weiter- und –Neuentwicklungen geplant, mit dem Ziel den experimentellen Aufwand zu reduzieren.

Für einen zunehmenden Einsatz der Pulverlacktechnologie steigen auch die technischen Anforderungen der Applikationssysteme. Neben der zunehmenden Überwachung und Steuerung der Beschichtungsparameter (Klima, Pulverdosierung, Aufladung, Korngrößenverteilung) müssen u.a. auch die Genauigkeitsanforderungen der Pulverpistolen, ähnlich wie im Nasslackbereich, verbessert werden. Bei der Konzipierung solcher Systeme wird dabei vermehrt die Simulation eingesetzt. Damit verkürzt sich auch die Produktentwicklungszeit. Die Pulversprühpistole stellt dabei nur eine Komponente im Beschichtungsprozess dar. Künftig werden nicht nur einzelne Pulver-Applikatoren am Computer simuliert und entwickelt, sondern auch ganze Beschichtungsprozesse und -anlagen.

6 Summary

In the course of an increasing employment of powder coating technology, the complex interrelations in the powder application, mainly the particle size distribution and its influence, must be understood. For that, in the first part a new measuring method had to be developed, to make visible the problematics and in the next part to find a solution for it. This includes:

- the monitoring of the process control parameters (powder mass flow rate, particle size distribution, electrostatics, air flow and climate)
- the development of a new testing method for powder spray systems
- the development of a simulation method to predict the recycling behaviour (KAP-SIM method)
- the employment of a newly developed charge spectrometer for coating powder.

The particle sizes and the transfer efficiencies in the steady final state of the powder cycle determined by the KAP-SIM method are comparable to the experimental values. Therefore, in the future the experimental efforts will be considerably reduced (one single particle measurement at the beginning of the process is sufficient). With this, analyses of the powder recycling process can also be carried out in industrial powder coating (e.g., in the optimization of plants and new plant developments).

In the first part, the KAP-SIM method has been used to study the effects of the powder recycling behaviour for different powder box sizes and for different powder dosage times using a conventional and a classified powder.

In most powder recovery systems, the overspray powder is recovered immediately or in short time intervals, the virgin powder, however, mostly when the powder box has reached a certain level. During that time only the generally finer overspray powder is reclaimed. The coating powder will be even more refined. Only when virgin powder is refilled the powder gets coarser again. In the continuous powder circuit it therefore comes to variations in the particle size distribution, in the transfer efficiency and in the film thickness distribution. The variations become stronger the longer the dosage time is. Therefore, through the powder consumption and the particle separation at the beginning of the circuit process, the powder box size is layed out in such a way that the resultant variations of the film thickness can be minimized.

In the experimental optimization measures the following process parameters were taken into consideration:

- particle size spectrum of coating powder
- coating powder recovery method
- distribution nozzles of the spray systems.

In the investigations on the influences of the particle size spectrum on the behaviour of the particle recycling, a standard particle distribution of a conventional industrial coating powder and a classified powder with mostly reduced content of fine particles were used. The recycling experiments show that through the reduced content of fine particles in the virgin powder the circuit

runs more stable and the recycling powder gets less fine than the standard powders. By using particle powder reduced in fine content further advantages could be found:

- less formation of dust in the powder handling and in the fluidization (safety of work place)
- homogeneous powder spray cloud
- better appearance quality.

The classifying of the powder, however, results in loss of powder which can not be recycled anymore.

In industrial powder coating for the reclaiming of the overspray mainly cartridge filters, mono cyclones or multi cyclones are used. With cartridge filters the overspray is completely recycled after filter saturation while with cyclones loss of fine powders is generated. The overspray so to speak will be sifted. In comparison with cyclones, filter systems have the disadvantage that they are hard to clean and therefore do not come into question in multi colour operation. A possible extension to cyclone recovery are cyclone classifiers where the separation of the particles can be controlled to a certain degree and, consequently, optimum coating powders can be produced.

Another important point concerns the powder spray gun. Together with the application parameters, the powder coating system is one of the most importing variables for the recycling behaviour. The nozzles are the weak point of the powders guns. By a special testing method, usual round spray nozzles and flat spray nozzles have been investigated with regard to spray cloud pattern and particle separation. With these results new nozzles have been developed with which the recycling coating powder is separated less strongly, the spray pattern is more homogeneous, and in the complete coating process the film thickness deviations are reduced.

For an increasing and efficient use of powder coating systems in the future, the users demand more flexible powder spray guns. That means powder guns with which the dimensions of the spray cloud may be shaped continuously. The present thesis was aimed at realizing such powder spray systems in form of powder spray guns using aerodynamical and electrostatical solution approaches. Two completely different solutions were separately realized. On the field of electrostatics mainly the influence of steering electrodes was tested. In combination with tribo charging powder this electrodes are very effective. For powder charging through friction (tribo charging) the spray expansion could be varied by a factor of 3. In corona charging the steering electrodes showed no significant effects. On the other hand, a new pistol could be dimensioned and optimized with the help of numerical simulation. The continuous regulation of the spray cloud was realized with additional controlling airs. The variation range reached a factor of 5. The optimum layout found was realized and tested by a practical spray gun. The experimental film thickness distributions, the transfer efficiencies and the particle size values were in good agreement with the results of the simulation. In addition, both solution concepts may be combined.

In final tests the practical capability of the powder gun was successfully tested. In cooperation with an industrial user the powder gun is currently tested in practice.

In the future, the simulation will be an important tool in the investigation of complex powder coating processes. The next step will be the simulation of complex workpiece geometries (edges, depressions and hollow spaces, etc.) and comparison with the experiment. Subsequent steps of

further and new development of powder applicators are planned with the aim to reduce the experimental expenditure.

With an increasing use of powder coating technology also the technical requirements for the application systems do increase. In addition to the increasing tasks in monitoring and controlling the coating parameters (climate, powder dosage, charging, particle size), the precision requirements for the powder guns must be improved similar to liquid paint guns. In the development of such systems the simulation will be used more and more. With it, the development time of the product is reduced. Therein the powder guns are only one part in the coating process. In the future, not only powder applicators will be simulated on the computer but also whole coating processes and coating lines.

7 Literatur

[01] Cudazzo, M.; Hoffmann, U.; Hruschka, R.; Obst, M.; Pulli, K.; Strohbeck, U.:
„Untersuchung der Einflußgrößen und ihrer Zusammenhänge beim Pulverlackkreislauf“
In: Deutsche Forschungsgesellschaft für Oberflächenbehandlung e.V. (DFO), Düsseldorf, durchführende Stelle: Fraunhofer IPA, Stuttgart, 1997

[02] Cudazzo, M.; Epping, R.H.; Knofe, R.; Küttner, A.; Lenz, N.; Pulli, K.; Strohbeck, U.:
„Pulver-Rückgewinnung bei aktuellen und neuen Anwendungen“
In: Deutsche Forschungsgesellschaft für Oberflächenbehandlung e.V. (DFO), Düsseldorf, durchführende Stellen: Fraunhofer IPA, Stuttgart und Fa. Epping GmbH PES Laboratorium, Neufahrn, 2000

[03] Bauch, H.; Schmidt, H.J.; Poetzschke, C.:
„Rechnergestützte Sprühbildauswertung als Grundlage für die Entwicklung von Zerstäubern und die Einstellung von Anlagenparametern“
In: Technik+Kommunikation Verlags GmbH, Berlin, EPS-Praxis, Bad Nauheim, 1992, S. 155-180

[04] Stötzel, H.; Auerbach, D.; Schmidt, H.-J.; Förtsch, B.:
„Untersuchungen zur Erhöhung der Einsatzbreite der triboelektrischen Pulverlackierung sowie zu Mess- und Kontrollmethoden für die Anlagenoptimierung“
In: Deutsche Forschungsanstalt für Luft- und Raumfahrt e.V., Bonn, durchführende Stelle: Hochschule für Technik und Wirtschaft Dresden (FH), 1994-1996

[05] Chen, H.; Sims, R.A.; Mountain, J.R.; Burnside, G.; Reddy, R.N.; Mazumder, M.K.; Gatlin, B.:
„Powder coating process parameters for a transfer efficiency model“
In: Particulate Science Technologie 14 (1996), S. 239–254

[06] Adamiak, K.:
„Numerical Modelling of Tribo-Charge Powder Coating Systems“
In: Journal of Electrostatics 40 (1997), S. 395–400

[07] Woolard, D.E.; Ramani, K.:
„Electric field modeling for electrostatic powder coating of a continuous fiber bundle“
In: Journal of Electrostatics 35 (1995), S. 373–387

[08] Sommerfeld, M.; Zivkovic, G.:
„Recent advances in the numerical simulation of pneumatic conveying through pipe systems“
In: First European Computational Fluid Dynamics Conference and First European Conference on Numerical Methods in Engineering, Brussels, 1992, S. 201–212

[09] Sommerfeld, M.:
„The structure of particle-laden, underexpanded free jets“
In: International Journal Shock Waves Vol. 3 (1994), S. 299–311

[10] Simonin, O.:
„Prediction of the dispersed phase turbulence in particle-laden jets“
In: Gas-Solid Flows, ASME, FED-Vol. 121 (1991), S. 197–206

[11] Sommerfeld, M.; Böttner, C.-U.; Domnick, J.; Steigleder, T.:
„Wechselwirkung zwischen Elektrostatik und Strömungsmechanik bei der Herstellung dünner Pulverschichten“
In: Deutsches Zentrum für Luft- und Raumfahrt e.V., Bonn, durchführende Stellen: Lehrstuhl für Strömungsmechanik, Universität Erlangen-Nürnberg und Institut für Mechanische Verfahrenstechnik und Umweltschutztechnik, Universität Halle-Wittenberg, Laufzeit 1996–1999

[12] Cudazzo, M.; Domnick, J.; Pulli, K.; Steigleder, T.; Strohbeck, U.; Ye, Q.:
„New Approaches in Improving the Reliability of Powder Application and Recovery“
In: Powder Coating Europe, Amsterdam (Vincentz Verlag, Hannover), 2000

[13] ABB Schutzrecht DE 196 14 192 A1 (16.10.1997)

[14] ABB Schutzrecht DE 196 14 193 A1 (16.10.1997)

[15] Wagner International Schutzrecht DE 3611577 A1 (15.10.1987)

[16] N.N.:
„CompuStatic – Pulverbeschichtungstechnologie der 4. Generation“
Ransburg-Gema AG, St. Gallen (Schweiz), 1982 - Firmenschrift

[17] Ondratschek, D.; Hoffmann, U.; Eichhorn, J.; Hruschka, R.:
„Entwicklung von fertigungstechnischen Maßnahmen zur Anwendung elektrostatischer Lackierverfahren für Kunststoffteile“
In: Institut Industrielle Fertigung und Fabrikbetrieb Universität Stuttgart, September 1998

[18] Löffler, F.:
„Grundlagen der Partikelabscheidung mit Faserfiltern oder Tropfen“
In: Technik der Gas-Feststoff-Strömung, GVC-Dezembertagung am 02.-03.12.1986, Köln

[19] Siegel, W.:
„Pneumatische Förderung“
1. Auflage
Würzburg: Vogel Fachbuch Verfahrenstechnik, 1991
S. 245-258

[20] Steffens, W.:
„Optimal funktionsfähige Filtermedien“
In: Verfahrenstechnik 11 (1977), Nr.10, S. 592- 600

[21] Smilge, E.:
„Pulver optimal filtern“
In: JOT (1997), Nr. 2, S. 28-29

[22] Barth, W.:
„Berechnung und Auslegung von Zyklonabscheidern aufgrund neuerer Untersuchungen“
In: Brennstoff-Wärme-Kraft 8 (1956), Nr. 1, Seite 1-9

[23] Krambrock, W.:
„Berechnung des Zyklonabscheiders und praktische Gesichtspunkte zur Auslegung“
In: Aufbereitungs-Technik 12 (1971), Nr. 7, S. 391–401 und Nr. 10, S. 643-649

[24] Krambrock, W.:
„Kritische Anmerkung zur Untersuchung an Zyklonabscheidern“
In: Chemie-Ingenieur-Technik 51 (1979), Nr. 5, S. 493-496

[25] Muschelknautz, E.; Krambrock, W.:
„Aerodynamische Beiwerte des Zyklonabscheiders aufgrund neuerer und verbesserter Messungen“
In: Chemie-Ingenieur-Technik 42 (1970), Nr. 5, S. 247-255

[26] Muschelknautz, E.; Brunner, K.:
„Untersuchungen an Zyklonen“
In: Chemie-Ingenieur-Technik 39 (1967), Nr. 9/10, S. 531-538

[27] Keuschnigg, J.; Kaufmann, M.:
„Neues Zyklon-Fliehkraftabscheider-Konzept „Hurriclon“ mit definierter Feinkornabscheidung und minimiertem Reinigungsaufwand“
In: Technik+Kommunikation Verlags GmbH, Berlin, EPS-Praxis, Bad Nauheim, 1993, S. 77-81

[28] Staudinger, G.; Obermair, S.; Meisl, C.:
„Treffsicherheit und Zuverlässigkeitsbereich der heutigen Zyklonberechnung“
In: VDI-Fachtagung „Zyklonabscheider in der Energie- und Verfahrenstechnik“, 27.–28. 10. 1999, Leverkusen

[29] Talbert, R.:
„Powder Coater’s Manual“
Hannover: Curt R. Vincentz Verlag, Germany, 1998
S. 10-22

[30] Pietschmann, J.:
„Industrielle Pulverbeschichtung“
1. Auflage
Braunschweig/Wiesbaden: Friedr.Vieweg & Sohn Verlagsgesellschaft mbH, 2002
S. 1-36 und S. 41-164

[31] Wadenpohl, C.; Krahnen, J.; Pulli, K.; Strohbeck, U.:
„Einsatz von Zyklonsichtern zur Erzeugung definierter Partikelgrößenverteilungen am Beispiel der Pulverlackherstellung“
In: VDI-Fachtagung „Zyklonabscheider in der Energie- und Verfahrenstechnik“, 27.–28. 10. 1999, Leverkusen

[32] Galk, J.; Peukert, W.:
„Windsichten mit Zyklonsichtern im Inline-Betrieb“
In: „Agglomeration- und Schüttguttechnik; Partikeltechnik und Zerkleinern“, GVC-Fachausschuß, 6.-8. Mai 1996, Schliersee

[33] Galk, J.; Peukert, W.:
„Wirtschaftliche Pulverlackherstellung durch optimierte Windsichtung“
In: JOT (1997), Nr. 6, S. 32-34

[34] Schwamborn, K.-H.:
„Zyklonsichter für Pulverlacke“
In: farbe + lack (1991), Nr. 10, S. 893-895

[35] Mayer-Schwinning, G.; Rennhack, R.:
„Neuere Erkenntnisse und Anwendungen bei der elektrischen Abscheidung von Stäuben und Nebeltröpfchen“
In: Chemie-Ingenieur-Technik 52 (1980), Nr. 5, S. 375-383

[36] Koch, P.:
„Aerosolbehandlung in der Abluft“
In: mo 50 (1996), Nr. 12, S. 980-982

[37] Stachel; Büsing:
„Pulverrückgewinnung: Filter gestorben“
In: Oberfläche (1973), Nr. 9, S. 620-623

[38] Bauch, H.:
„Theoretische und experimentelle Untersuchungen zum Einfluss der Korngrößenverteilung und deren Änderung bei der Pulverlackierung“
In: Technik+Kommunikation Verlags GmbH, Berlin, EPS-Praxis, Bad Nauheim, 1990, S. 198–209

[39] Bauch, H.:
„Auflademechanismen in Pulversprühgeräten und ihr Einfluss auf die physikalischen Prozesse bei der Schichtbildung“
In: Technik+Kommunikation Verlags GmbH, Berlin, EPS-Praxis, Bad Nauheim, 1989, S. 16–33

[40] Neubauer, E.:
„Kreislaufstabile Tribo-Pulverlacke“
In: mo 51 (1997), Nr. 2, S. 110-111

[41] Fawer, B.:
„Powder coatings processing – new developments and insights“
In: Powder Coating (1993), Nr. 11, S. 25-33

[42] Horinka, P.R.:
„Powder particle size: Its role in electrostatic charging“
In: Powder Coating (1995), Nr. 4, S. 51-58

[43] Horinka, P.R.:
„Powder particle size: Its effects on coating line performance“
In: Powder Coating (1995), Nr. 2, S. 37-46

[44] Kleber, W.:
„Ausgereizt ? Wirkungsgradverbesserung bei elektrostatischen Sprühverfahren – wie viel ist noch möglich ?“
In: mo 55 (2001), Nr. 9, S. 49-53

[45] Galk, J.; Peukert, W.:
„Herstellung definierter Partikelgrößenverteilungen für die Pulverlackierung“
In: Elektrostatisches Pulverbeschichten, München, 30.-31. Januar 1997

[46] Russell, D.:
„Die Physik ist wichtig – Kontrollierte Größe, Form und Oberflächenladung von Pulverpartikeln verbessert die Applikation“
In: Farbe & Lack (2001), Nr. 7, S. 46-51

[47] Metzger, G.:
„Pulverausstoß optimal geregelt“
In: JOT (2000), Nr. 2, S. 24-28

[48] Strohbeck, U.; Cudazzo, M.; Paustian, S.:
„Anwendungsorientierter Vergleich von Pulversprühsystemen“
In: Fraunhofer IPA, Stuttgart, 1994 (nicht veröffentlicht)

[49] Fraunhofer, J.:
„Bestimmung des Brechungs- und Farbzerstreungsvermögens verschiedener Glasarten“
In: Gilberts Annalen der Physik 56 (1817), S. 193ff

[50] Müller, R.H.; Schuhmann, R.:
„Teilchengrößenmessung in der Laborpraxis“
Stuttgart: Wissenschaftliche Verlagsgesellschaft mbH, 1996
S. 55-100

[51] Heuer, M.; Leschonski, K.:
„Erfahrungen mit einem neuen Gerät zur Messung von Partikelgrößenverteilungen aus Beugungsspektren“
In: 3. Europäisches Symposium Partikelmesstechnik, 9. bis 11. Mai 1984, Nürnberg

[52] Teipel, U.; Siegl, T.; Aksel, N.:
„Größenanalyse transparenter Partikel mit Hilfe der Laserbeugungsspektrometrie“
In: Der Versuchs- und Forschungsingenieur (VFI) 28 (1995), Nr. 2, S. 39-41

[53] Horinka, P.R.:
„Particle-Size Management“
In: Industrial Paint & Powder (1995), Nr. 12, S. 26-30

[54] Horinka, P.R.:
„Powder particle size: Measurement and communication“
In: Powder Coating (1995), Nr. 6, S. 69-75

[55] Schoofs, T.:
„Auflösung in der Partikelgrößenmessung mit Laserbeugung“
In: Chemie-Technik (1993), Nr. 9, S. 16-20

[56] Schoofs, T.:
„Reproduzierbarkeit in der Partikelgrößenmessung mit Laserbeugung, Teil 1“
In: Chemie-Technik (1993), Nr. 10, S. 104-108

[57] Schoofs, T.:
„Reproduzierbarkeit in der Partikelgrößenmessung mit Laserbeugung, Teil 2“
In: Chemie-Technik (1993), Nr. 11, S. 876, 890

[58] Kleber, W.; Lang, A.; Nalop, H.:
„Ermittlung der Aufladekenngrößen zur Optimierung der Anlagenparameter bei der Pulverbeschichtung“
In: DFO-Pulverlack-Praxis, Boppard, 1998, S. 55-64

[59] Auerbach, D.; Schmidt, H.-J.:
„Praxisorientierte Messmethode zur Bestimmung der spezifischen Pulverladung bei Korona- und Tribo-Pulversprühgeräten“
In: Technik+Kommunikation Verlags GmbH, Berlin, EPS-Praxis, Bad Nauheim, 1995, S. 119-132

[60] Mandel, A.:
„Untersuchung und Festlegung der Eigenschaften elektrostatischer Beschichtungspulver“
Fa. Robert Bosch GmbH, 1979 - Firmenschrift

[61] Epping, R.H.; Münz, M.; Mehlin, M.:
„Electrical charge and conductivity measurement with modern mono-component developers“
In: Electrophotography 27 (1988), S. 528-532

[62] Mehlin, M.; Hess, R.M.:
„Electrical Charge Measurement of Toner Particles using q/d Meter“
In: Journal of Imaging Science and Technologie 36 (1992), Nr. 2, S. 142-150

[63] Epping, R.H.:
„Messung der elektrostatischen Ladungsverteilung von Pulverlacken“
In: DFO-Pulverlack-Praxis, Bonn, 1995, S. 113-117

[64] Epping, R.H.:
„Neues Ladungsmessverfahren zur Ermittlung der Anteile positiver und negativer Partikel, ihres mittleren Ladungs-/Durchmesser-Verhältnisses und ihrer Durchmesser-Verteilungen im Pulverstrahl“
In: Technik+Kommunikation Verlags GmbH, Berlin, EPS-Praxis, Bad Nauheim, 1994, S. 25-28

[65] Domnick, J.; Pulli, K.:
„Neue Pulversprühorgane zur Erweiterung der Anwendbarkeit der Pulverlackiertechnik“
In: Programm Lebensgrundlage Umwelt und ihre Sicherung (BWPlus), Karlsruhe, 2001

[66] Goldschmidt, A.; Hantschke, B.; Knappe, E.; Vock, G.-F.:
„Glasurit-Handbuch Lacke und Farben der BASF Farben+Fasern AG“
Hannover: Curt R. Vincentz Verlag, 1984
S. 384-391

[67] Kittel, H.:
„Lehrbuch der Lacke und Beschichtungen - Untersuchung und Prüfung Pulverbeschichtung“
2. Auflage
Stuttgart: HIRZEL Verlag, 2006

[68] Hughes, J.F.:
„Electrostatic Powder Coating“
Hertfordshire, England: Research Studies Press LTD, 1984
Seite 1-28

[69] Wu, S.:
„Electrostatic Charging and Deposition of Powder Coatings“
In: Polym. Plas. Technol. Eng. (1976), Nr. 2, S. 119-220

[70] Zorll, U.:
„Ausnutzung elektrostatischer Effekte bei Beschichtungsprozessen“
In: Adhäsion (1977), Nr. 9, S. 238-243

[71] Zorll, U.:
„Praktische Ausnutzbarkeit elektrostatischer Adhäsionswirkungen“
In: Adhäsion (1979), Nr. 8, S. 241-243 und Nr. 9, S. 262-265

[72] Lapps, D.:
„Pulverbeschichten mit Corona- oder Tribo-Aufladung ?“
In: JOT (1995), Nr.2, S. 22-26

[73] Strohbeck, U.:
„Pulverbeschichten“
In: Vincentz Verlag: Jahrbuch für Lackierbetriebe 2002, Hannover, S. 206–226

[74] Bailey, A.G.:
„The science and technology of electrostatic powder spraying, transport and coating“
In: Journal of Electrostatics 45 (1998), S. 85-120

[75] Bate, D.A.:
„The Science of Powder Coatings–Applications“
London: SITA Technology, 1990
S. 63-148

[76] Vala, L.:
„Triboelektrische und Korona-Pulveraufladung im Vergleich“
In: JOT (1991), Nr. 8, S. 33-37

[77] Kleber, W.:
„Physikalische Grundphänomene der Elektrostatik zur Nutzung bei der Pulverlackierung“
In: Technik+Kommunikation Verlags GmbH, Berlin, EPS-Praxis, Bad Nauheim, 1991, S. 4-17

[78] Pauthenier, M.; Moreau–Hanot, M.:
„La Charge des Particules spheriques dans un champ ionise“
Journal d’ Physique Radium 7 (1932), No. 12, S. 590-613

[79] Toedter, O.:
„Untersuchungen zur Korona-Entladung als Beschichtungsverfahren“
Saarland, Technische Fakultät der Universität des Saarlandes, Diss. 1998

[80] Sampuran-Singh; O’Neill, B.C.; Bright, A.W.:
„A Parametric Study of Elektrostatic Powder Coating“
In: Journal of Electrostatics 4 (1978), S. 325-334

[81] Kleber, W.; Bauch, H.:
„Was ist mit Tribo-Pulversprühpistolen“
In: Oberfläche+JOT (1986), Nr. 1, S. 19-21

[82] Kleber, W.:
„Triboelektrische Pulveraufladung – Der lange Weg zur Erkenntnis“
In: mo 50 (1996), Nr. 7, S. 564-567

[83] Kleber, W.:
„Charakterisierung triboelektrischer Pulversprühpistolen aus sicherheitstechnischer Sicht“
In: DFO-Pulverlack-Praxis, Düsseldorf, 1994, S. 69-78

[84] Auerbach, D.:
„Erhöhung der Einsatzbreite der Tribo-Beschichtung“
In: DFO-Pulverlack-Praxis, Düsseldorf, 1994, S. 57-68

[85] Auerbach, D.; Stötzel, H.; Schmidt, H.-J.:
„Tribo-Pulverlackierung im Verfahrensvergleich“
In: DFO-Pulverlackpraxis, Bonn, 1995, S. 75-90

[86] Mendler, H.:
„Tribobeschichtung – Anforderungen an den Lackhersteller und –verarbeiter“
In: DFO-Pulverlackpraxis, Bonn, 1995, S. 91-98

[87] Kleimann, T.; Erkrath, D. H.:
„Pulverbeschichtung mit Tribo-Elektrostatik“
In: Metalloberfläche 40 (1986), Nr. 7, S. 267-270

[88] Ye, Q.; Steigleder, T.; Scheibe, A.; Domnick, J.:
„Numerical simulation of the electrostatic powder coating process with a corona spray gun“
In: Journal of Electrostatics 54 (2002), S. 189-205

[89] Ye, Q.; Domnick, J.:
„On the simulation of space charge in electrostatic powder coating with a corona spray gun“
In: Powder Technology 135-136 (2003), S. 250-260

[90] Schmid, H.-J.:
„Zum Partikeltransport in Elektrischen Abscheidern“
Karlsruhe, Universität Fridericiana zu Karlsruhe (Technische Hochschule), Diss. 1998

[91] Matek, W.; Muhs, D.; Wittel, H.:
„Roloff/Matek Maschinenelemente“
Braunschweig: Friedr. Vieweg & Sohn Verlagsgesellschaft mbH, 1987
Seite 1-15

Lebenslauf

Persönliche Daten:

Geburtsdatum:
12.09.1969

Geburtsort:
Besigheim

Familienstand:
ledig

Schulbildung:

1976 – 1980:	Grundschule in Besigheim
1980 – 1985:	Grund- und Hauptschule in Besigheim
1985 – 1987:	Zweijährig gewerblich-technische Berufsfachschule - Berufsfeld Metall in Bietigheim-Bissingen
1987 – 1990:	Technisches Gymnasium in Bietigheim–Bissingen

Hochschulausbildung:

1990 – 1996:	Studium des Faches Maschinenwesen an der Universität Stuttgart

Berufliche Tätigkeit:

1996:	6 Monate wissenschaftliche Hilfskraft am Fraunhofer Institut für Produktionstechnik und Automatisierung (IPA) in Stuttgart
1996 - 1997:	Wissenschaftlicher Mitarbeiter an der Gesellschaft für Industrielle Technik und Organisation mbH (ITO) in Stuttgart
seit 01.02.1997:	Wissenschaftlicher Mitarbeiter am Institut für Industrielle Fertigung und Fabrikbetrieb (IFF) in Stuttgart.