

Abschlussbericht zum
Verbundforschungsauftrag

**Pistolenlose Pulverbeschichtungstechnologie für die
platz- und prozesszeitminimierte Stückgutfertigung**

-durchgeführt im Auftrag des Wirtschaftsministeriums Baden-Württemberg
mit Mitteln der Landesstiftung Baden-Württemberg

Aktenzeichen:

2-4332.62-IPA/24

Gesamtlaufzeit des Projektes:

01.06.2007 bis 30.05.2009 (2 Jahre, kostenneutral verlängert bis 30.09.2009)

Ansprechpartner:

Markus Cudazzo, Ulrich Strohbeck
Fraunhofer Institut Produktionstechnik und Automatisierung IPA,
Nobelstraße 12, 70569 Stuttgart,
Tel: +49(0)711-970-1761 / -1764
Markus.Cudazzo@IPA.Fraunhofer.de
Ulrich.Strohbeck@IPA.Fraunhofer.de
Fax: +49(0)711-970-1035

Konsortium:

Fa. Durst, Fraunhofer IPA, Fa. Gramm, Fa. Hege, Fa. Meeh, Fa. Schnier, Fa. Wörwag

Inhalt

Abbildungen	1
Kurzfassung	3
Ausgangssituation und Ziel	4
I1/I2 Lösungskonzepte 3-D Werkstücke/Aufbau neuer Versuchseinrichtungen	6
I3 Iterative Optimierungen	9
Modellbildung zur Simulation des elektrostatischen Fluidisierbehälters mit Gleichspannung	9
Mess- und Bewertungsmethoden zur Unterstützung der Modellbildung und Simulation	28
Modellbildung zur Simulation des elektrostatischen Fluidisierbetts mit gepulster HS	36
Entwicklung einer Messmethode zur Bestimmung der Entladezeit von Pulvern	43
Entwicklung einer einfachen Haftungsprüfung für uneingebrannte Pulverlackschichten	44
Aufbau einer zusätzliche Versuchsanlage für begleitende Versuche	45
Elektrostatisches Fluidisierbett für begleitende Versuche	46
Durchführung von begleitenden Beschichtungsversuchen	48
Simulationen mit gepulster Hochspannung	58
II.1-3 Applikationen für komplexe 3-dimensionale Werkstücke	62
Fluidisierbettgestaltung für dreidimensionale Werkstücke	62
Aufbau eines Demonstrators für 3-dimensionale Kleinteile	74
Schnelle und energieeffiziente Einbrenntechnik für 3-D Werkstücke	77
Gepulste Hochspannung, kostengünstiger Schalter	79
III Bewertung der Umsetzungsmöglichkeiten	79
Literatur	81
Verwendete Formelzeichen und Symbole	85
Projektbegleitende Projektbesprechungen bzw. Sitzungen	87
Anhang	88

Abbildungen

Abb. 1:	elektrostatisches Fluidisierbett zur Beschichtung 2-dimensionaler Substrate	4
Abb. 2:	CAD-Studie Bewegungsabläufe Portal	6
Abb. 3:	CAD-Studie Bewegungsabläufe Roboter	7
Abb. 4:	modulares Beschichtungskonzept	7
Abb. 5:	Hochspannungsverstärker	8
Abb. 6:	Feldstärken idealisiert dargestellt	14
Abb. 7:	q/d-Messungen	14
Abb. 8:	Simulation der Strömungsverhältnisse im Fluidisierbett ohne el. Kräfte	17
Abb. 9:	Abhängigkeit des Strömungswiderstandswertes C_w von der Reynoldszahl	19
Abb. 10:	Partikelgeschwindigkeit und maximale Abscheideleistung	21
Abb. 11:	Partikel-Volumenverteilung von Frischpulver und Pulver in Sprühwolke	22
Abb. 12:	Anreicherung feiner Partikel in der Sprühwolke	22
Abb. 13:	Partikelgrößen Frischpulver und auf dem Werkstück appliziertem Pulver	23
Abb. 14:	Partikelrelativgeschwindigkeit in Abhängigkeit vom Partikelradius	24
Abb. 15:	Schematische Darstellung von Entladeprozessen	27
Abb. 16:	Beispielhafte Darstellung der Partikelgrößenkennwerte	28
Abb. 17:	Darstellung der Partikelgrößenkennwerte (verschiedene Mahlungen)	29
Abb. 18:	Messprinzip eines Laser-Doppler Anemometers (LDA)	30
Abb. 19:	Partikel folgen den Feldlinien	31
Abb. 20:	Partikelgeschwindigkeitsmessung mittels LDA	32
Abb. 21:	Erhöhung der Abscheideleistung durch höheren Fluidisierluftvolumenstrom	33
Abb. 22:	Verringerung von Feldstärke und Partikelgeschwindigkeit	33
Abb. 23:	Partikelgeschwindigkeiten an Flächen und Kanten	34
Abb. 24:	Einfluss der Partikelgröße auf die Partikel-Geschwindigkeit	35
Abb. 25:	Zerwellprozesse bei Flüssiglackzerstäubung und Pulver-Sprühwolke	35
Abb. 26:	Sichtbarmachung von Luftströmungen mittels Strömungsprüfröhrchen	36
Abb. 27:	Partikel- und Ionenwindgeschwindigkeit in Abhängigkeit zur Pulsbreite	37
Abb. 28:	Rechtecksignal 15 Hz	38
Abb. 29:	berechneten Partikelgeschwindigkeiten über das Partikelgrößenspektrum	39
Abb. 30:	Partikelgeschwindigkeit bei ausgeschalteter Elektrode	39
Abb. 31:	Laserlichtschnittaufnahme Gleichspannung	40
Abb. 32:	Bandbreite der Partikelgeschwindigkeiten	41
Abb. 33:	gepulste Hochspannung mit erkennbaren kleinen Wirbeln	41
Abb. 34:	Koronaelektrode, blau leuchtend (links) und Gegenkorona (rechts)	42
Abb. 35:	Einsatz einer passiven Elektrode bei guter Kantenbeschichtung	42
Abb. 36:	Schichtdickenverteilung, Variation von Signalform und Anordnungen	43
Abb. 37:	Prinzipielle Bauweise Versuchs-Messanordnung	44
Abb. 38:	Haftungsprüfung für uneingebrannte Pulverlackschichten	45
Abb. 39:	Versuchsanlage für Grundlagenversuche, CAD (oben), Foto (unten)	46
Abb. 40:	Elektrodenanordnung im Fluidisierbett	47
Abb. 41:	in den Versuchsreihen verwendete Spannungssignale, exemplarisch dargestellt	47
Abb. 42:	Ergebnisse Haftungsprüfung bei 30 mm Abstand Elektrode/Werkstück	48
Abb. 43:	Ergebnisse Haftungsprüfung bei 60 mm Abstand Elektrode/Werkstück	49

Abb. 44:	Ergebnisse Haftungsprüfung bei 60 mm Abstand Elektrode/Werkstück	50
Abb. 45:	Ergebnisse Haftungsprüfung bei 90 mm Abstand Elektrode/Werkstück	50
Abb. 46:	Ergebnisse der Verlaufsmessung (Wd-Wert)	52
Abb. 47:	Ergebnisse der Verlaufsmessung (Wc-Wert)	52
Abb. 48:	Korrelation zwischen Verlauf und Rückionisationsneigung	53
Abb. 49:	Schichtdickengleichmäßigkeit bei Einsatz unterschiedlicher Hochspannungsformen	54
Abb. 50:	gute Schichtdickengleichmäßigkeit bei einer Pulsbreite von 2/3 (Beispiel 15 Hz)	54
Abb. 51:	mäßige Schichtdickengleichmäßigkeit bei Gleichspannung	55
Abb. 52:	geringe Schichtdickengleichmäßigkeit bei 1/3 Pulsbreite (Beispiel 15 Hz)	55
Abb. 53:	Feldstärkeverteilung im elektrostatischen Fluidisierbett, Fluent-Simulation	56
Abb. 54:	Feldstärkeverteilung am Beschichtungsbeispiel „Zaungitter“	56
Abb. 55:	Nebel im elektrischen Feld, Beispiel Dosenbeschichtung	57
Abb. 56:	2-dimensionale Darstellung der Potenziale ohne Raumladungseinfluss	60
Abb. 57:	2-dimensionale Darstellung der Potenziale mit Raumladungseinfluss	61
Abb. 58:	2-dimensionale Darstellung der Partikelbewegungsbahnen	62
Abb. 59:	Elektrodenanordnung im Fluidisierbett (Draht- und wahlweise Punktelektroden)	63
Abb. 60:	Restpulver nach Schlagtest	64
Abb. 61:	relative Standardabweichung der Schichtdicke	64
Abb. 62:	2 Punktelektroden mit unterschiedlichen Hochspannungswerten	65
Abb. 63:	eine Punktelektrode und 4 Drahtelektroden	65
Abb. 64:	2 Punktelektroden, Drahtelektrode, zusätzlich passive geerdete Elektrode	65
Abb. 65:	Drahtbeschichtung mittels des elektrostatischen Fluidisierbetts	66
Abb. 66:	Verbesserung der Beschichtung von Stirnflächen an Abdeckteilen	67
Abb. 67:	Kombination einer Linearbewegung mit einer Drehbewegung	67
Abb. 68:	Taumbewegung zur Erzeugung gleichmäßiger Schichtdicken	68
Abb. 69:	gepulste Gleichspannung (links), Gleichspannung (rechts)	68
Abb. 70:	Pyramidales Modellwerkstück mit Roboteradaption	69
Abb. 71:	Strömungsgeschwindigkeit des Ionenwinds bei Drahtelektroden/Punktelektroden	70
Abb. 72:	aktive negative Corona (links) und aktive positive Corona (rechts)	70
Abb. 73:	mit dem Flügelradanemometer gemessene Ionenwindgeschwindigkeit	71
Abb. 74:	Eindringvermögen	71
Abb. 75:	aktive Punktelektrode und passive, geerdete Spitze mit sichtbarer Gegenkorona	72
Abb. 76a-c:	Versuchsreihen Taguchi DoE	73
Abb. 77:	Prozessablauf Lackierzelle „Lernfabrik“	75
Abb. 78:	Modul Lackierzelle, integriert in die „Lernfabrik“	76
Abb. 79:	Montagesystem ist um eine mobile Pulverbeschichtungsanlage erweitert	76
Abb. 80:	Aufheizkurven an den Aluminium-Modellwerkstücken	77
Abb. 81:	6 wabenförmig ums Werkstück angeordnete Carbon-Strahler	78

Kurzfassung

Die unzureichende Beschichtungsqualität der elektrostatischen Fluidisierbetttechnik hat bisher eine breite Anwendung verhindert, lediglich bei der Ankerpaketbeschichtung wird sie im breiten Maß angewendet. Das Fraunhofer IPA hat in Kooperation mit dem IFF Stuttgart dieses Verfahren aufgegriffen und für qualitativ hochwertige Beschichtungen zweidimensionaler Substrate (z.B. Holzwerkstoffplatten und metallische Endlosmaterialien) mit sehr hohen Prozessgeschwindigkeiten bis ca. 3 m/s grundlegend neu gestaltet.

Um zukünftig diese platzsparende und prozesszeitminimierte, pistolenlose Pulverbeschichtungstechnik auch für 3-dimensionale Substrate (Stückgut) einsetzen zu können, wird im Rahmen *dieses* Projektes das elektrostatische Fluidisierbett *grundlegend weiterentwickelt*. Zum Einsatz kommen einzeln steuerbare und anpassbare Elektroden, beispielsweise aktiv hochspannungsführende Draht- und Punktelektroden sowie passive (geerdete) Gegenelektroden (passive Ionisatoren) in Verbindung mit gepulsten Hochspannungssignalen. Begleitend zu den Beschichtungsversuchen werden die elektrostatischen und aerodynamischen Kräfte mittels Computersimulation analysiert. Zusätzlich werden die beschichtungstechnisch kritischen Werkstückbereiche (wie z.B. Kanten) mit optischen Methoden wie Laserlichtschnitt und Laser-Doppler-Anemometrie untersucht. Dabei zeigt sich, dass gepulste Hochspannungssignale dort Vorteile hinsichtlich der Beschichtungsgleichmäßigkeit aufweisen, wo die an Spitzen und Kanten auftretende Gegenkorona durch den dort entstehenden Ionenwind die Werkstückkante freibläst wenn herkömmliche Gleichspannung zur Aufladung und Abscheidung der Pulverlackpartikel eingesetzt wird.

Anders als bei der elektrostatischen Pulverbeschichtung mit Sprühpistolen bleibt bei der pistolenlosen Pulverbeschichtung mittels des elektrostatischen Fluidisierbetts das Sprühaggregat (der Fluidisierbehälter) starr, das Werkstück bewegt sich über das Fluidisierbett. Als Handhabungssystem für die Versuchsanlage und den am Fraunhofer IPA aufgebauten Demonstrator dient ein Knickarmroboter, an dem das Werkstück mit Saughebern, Magneten oder Haken befestigt ist. Die thermisch härtenden Pulverlacke werden in einer Infrarotzone geschmolzen und vernetzt. Mit auf der elektrostatischen Fluidisierbetttechnik basierenden Neuentwicklungen werden außer den Modellwerkstücken u.a. Werkstücke wie Schraubenfedern, Filterstützgewebe, Lampengitter und Lochbleche, Zaunelemente aus verzinktem und unverzinktem Stahl sowie Küchenfronten im Versuchsmaßstab pulverbeschichtet. Zusätzlich zur Versuchsanlage wird als Demonstrator mit den beteiligten Firmen ein Beschichtungsmodul für wandlungsfähige, rekonfigurierbare Fabrikprozesse (Gesamtprojektmanagement: Fraunhofer IPA, Kooperation IFF Stuttgart) aufgebaut, wobei die Aufgaben wie folgt verteilt werden:

- Fa. Durst: Mithilfe beim Aufbau des el. Fluidisierbetts (Sinterbodenfertigung etc.),
- Fa. Schnier: Einbindung der Hochspannungstechnik,
- Fa. Meeh: Pulverzudosierung, kompakte Absaugtechnik,
- Fa. Wörwag: Auswahl, Modifikation und Bereitstellung geeigneter Pulverlacke,
- Fa. Hege: Aufbau der Infrarot-Einbrenntechnik,
- Fa. Gramm: Aufbau der Plasma-Vorbehandlungszone (Werkstück: Aluminium).

Ausgangssituation und Ziel

Funktionelle und dekorative Beschichtungen mittels lösungsmittelfreiem Duroplast- und Thermoplastpulver kommen den auch in der Oberflächentechnik immer höher werdenden Anforderungen hinsichtlich Umweltverträglichkeit, Qualität und Produktvielfalt entgegen. Grenzen der heutigen Pulverbeschichtungstechnologie sind insbesondere die heute üblichen Anlagenkonzepte, bei denen der Pulverlack mittels manuell oder automatisch bewegter Pistolen auf die Teile aufgesprüht wird. Diese relativ langsamen Prozesse sowie die dazu erforderlichen platz- und kostenintensiven Kabinen und Absaugeinrichtungen schränken die Wirtschaftlichkeit klassischer Pulverbeschichtungsanlagen ein.

Vor diesem Hintergrund wurde die elektrostatische Fluidisierbett-Technologie (heute nur noch bekannt zur Beschichtung von Ankerpaketen für Kleinst-Elektromotoren im Kfz-Bereich [1]) bereits in den 70er Jahren als Alternative zur elektrostatischen Pulverbeschichtung mittels Sprühpistolen vorgeschlagen [2][3]. Aufgrund der auftretenden ungleichmäßigen Beschichtungen bzw. langen Beschichtungszeiten konnten sich diese damaligen Systeme nicht durchsetzen [4].

Im Rahmen mehrerer Fördervorhaben wurden am Fraunhofer IPA verschiedene bestehenden Ansätze überdacht [5][6][7][8][9], die elektrostatische Fluidisierbett-Technologie [10][11] weiterentwickelt und im Technikumsmaßstab für sehr schnelle Prozessgeschwindigkeiten bis ca. 2,5 m/s auf zweidimensionalen Substraten (z.B. metallisches Coil, MDF-Platten, Abb. 1), sehr vereinzelt auch für Stückgutbeschichtungen (mit geringeren Prozessgeschwindigkeiten) eingesetzt [12][13][14][15][16][17].

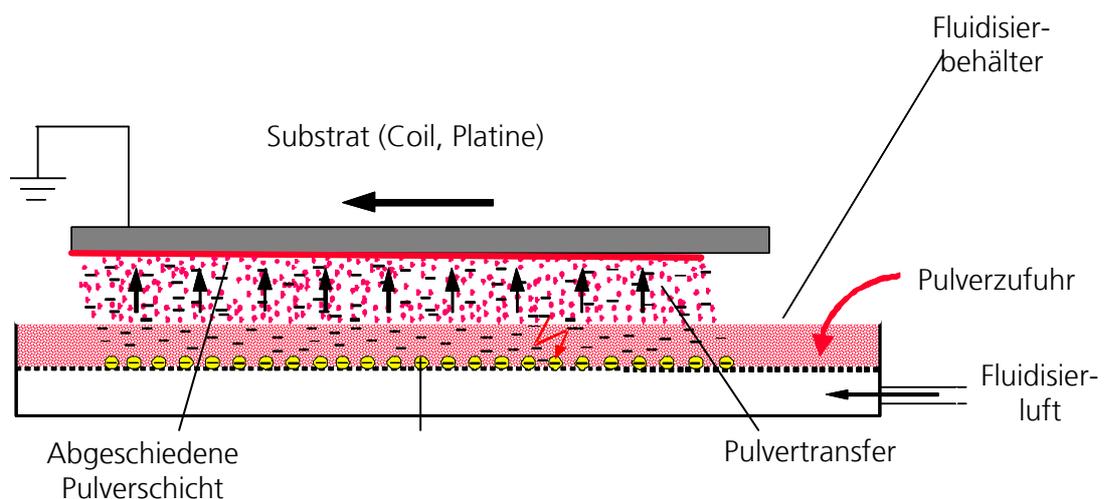


Abb. 1: elektrostatisches Fluidisierbett zur Beschichtung 2-dimensionaler Substrate

Der Schritt von zweidimensionalen zu komplexen dreidimensionalen Werkstücken stellt die zentrale Innovation des Verbundprojektes dar. Dies erfordert eine wissenschaftliche Untersuchung des elektrostatischen Fluidisierbettsystems hinsichtlich der

elektrostatischen und aerodynamischen Einflussgrößen. Eine Schlüsselstellung nimmt dabei die werkstückgeometriebezogene Steuerung des elektrischen Feldes in Verbindung mit werkstückangepassten Luftströmungen ein. Hierzu wird das Fraunhofer IPA ein wissenschaftliches Instrumentarium zur theoretischen und experimentellen Untersuchung und Optimierung der Applikation des Beschichtungspulvers aus dem elektrostatischen Fluidisierbett auf komplexe dreidimensionale Werkstücke einsetzen. Es besteht aus physikalischen Modellen, numerischen Simulationsmethoden [18][19][20] und experimentellen Einrichtungen einschließlich geeigneter Messtechnik (auch zur Charakterisierung der Beschichtungspulver) [21][22].

Zur Steuerung des elektrischen Feldes und der Luftströmung sind unter Anderem folgende neuartigen Ansätze vorgesehen:

- Matrix mit einzeln ansteuerbaren Elektroden,
- bewegliche an das Werkstück anpassbare Elektroden zur dynamischen Feldsteuerung,
- Überlagerung mehrerer Elektrodensysteme mit unterschiedlichen Potenzialen sowie
- gezielt steuerbare Zusatzluftvolumenströme.

Dabei ist auch der Einsatz gepulster Hochspannung vorgesehen. Diese Technologie wird u. A. im Bereich der elektrostatischen Staubabscheidung eingesetzt [23][24][25]. Die wenigen im Bereich der elektrostatischen Pulverschichtungstechnik bisher hierzu durchgeführten Untersuchungen und vorhandenen Techniken zeigen einen noch erheblichen Entwicklungsbedarf [26][27][28]. Unter anderem wurde auch der Einsatz der internen Korona diskutiert, der sich aufgrund der zu hohen Verschmutzungsneigung der Elektrode nicht durchsetzen konnte [29]. Vorversuche am IPA zeigen neue erfolgversprechende Ansätze im niederfrequenten Bereich beim Einsatz von Rechtecksignalen [15]. In Kooperation mit dem beteiligten Fachunternehmen soll hier insbesondere der Einfluss auf die Partikelaufladung und die elektrostatische Dosierung der auf das Werkstück übertragenen Pulvermenge untersucht werden.

Zur Handhabung und Förderung der dreidimensionalen Werkstücke ist der Aufbau eines automatischen Handhabungssystems (Abb.2) erforderlich, das die Randbedingungen bezüglich kompakter Beschichtungsmodule, kurzer Taktzeiten und schnellem Materialwechsel berücksichtigt. Dies umfasst auch die Übernahme der Werkstücke aus dem vorgelagerten Prozessschritt (z.B. Vorbehandlung) und die Übergabe zum Einbrennprozess.

Zum schnellen Vernetzen der Pulverschicht werden mit den Industriepartnern neuartige Kombinationen aus Konvektionserwärmung und Infrarot- bzw. Ultraviolett-Strahlungssystemen entwickelt und mit dem Handhabungssystem verknüpft.

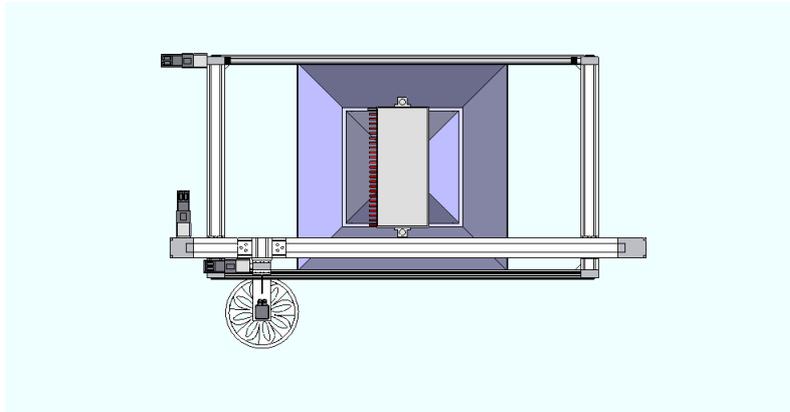


Abb. 2 CAD-Studie
Bewegungsabläufe
Portal gemeinsam mit
Fa. Gramm, Fa. Meeh,
Fa. Hege

Meilenstein M1: Erarbeitung von Lösungskonzepten für rotationsymmetrische Werkstücke (alle Firmen) abgeschlossen im August 2007

I1/I2 Lösungskonzepte für dreidimensionale Werkstücke/Aufbau neuer Versuchseinrichtungen

Im Rahmen dieser Arbeiten sollte eine geeignete Anlagentechnik gefunden werden, um automatisierte Bewegungsabläufe zur Beschichtung komplexer Bauteile mittels pistolenloser Fluidisierbetttechnik zu ermöglichen. Dazu wurde das bestehende Linienportal zur schnellen Beschichtung 2-dimensionaler Bauteile gemeinsam mit der Fa. Gramm auf Erweiterbarkeit interpolierter Linearmodule geprüft. Ferner wurden alternative Bewegungsautomationskonzepte erarbeitet und ausgewertet.

Die Untersuchungen (in Zusammenarbeit mit der Fa. Gramm) ergaben, dass aus ökonomischer, steuerungstechnischer und mechanischer Sicht eine Modifizierung der bestehenden Einrichtung nicht sinnvoll ist. Mit einem gebrauchten Knickarmroboter KUKA KR 30L 15/2 EX wurde eine kostengünstige Lösung gefunden um die Zielsetzungen zu erreichen (Abb.3).

Durch die Montage des Knickarmroboters auf einen Sockel, wurde der maximale Wirkradius des Roboters erreicht.

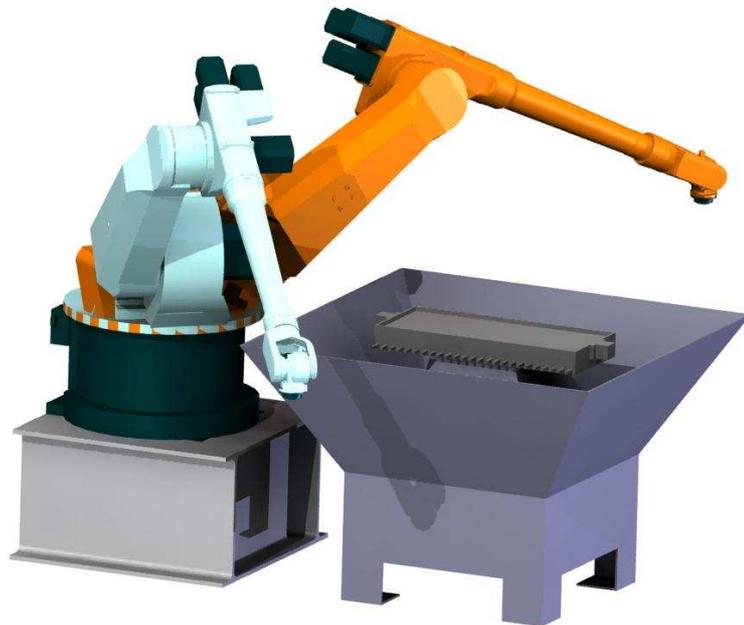


Abb. 3: CAD-Studie Bewegungsabläufe Roboter gemeinsam mit Fa. Gramm, Fa. Meeh, Fa. Hege

In Kombination mit der neuen, filigranen Vakuum-Saughebertechnik bildet die neue Einheit eine ausgereifte Handhabung, welche mechanisch und kinematisch den Anforderungen an die Applikation gerecht wird. Zusätzlich wurde ein Teil der bestehenden Gas-Infrarotstrahler in die Einheit so integriert, dass In Line beschichtet und (ohne Abnehmen des Werkstücks vom Roboter) die Pulverlacke geschmolzen/vernetzt werden können (Abb. 4). Bauteile mit geringer elektrischer Leitfähigkeit können Inline vor der Pulverlack-Applikation in einer Carbonstrahler-Zone (Rollenbahn-Fördertechnik) vorgewärmt werden (nicht im Bild ersichtlich).



Abb. 4: modulares Beschichtungskonzept mit Vorwärmzone, Applikationsbereich und Infrarot-Aufschmelz- bzw. Vernetzungszone (gemeinsam mit Fa. Hege)

Zur Erzeugung der Hochspannung wurde für diese Versuche ein Hochspannungsverstärker der Fa. TREK (MODEL 30/20A) eingesetzt. Dieses Gerät verstärkt frei wählbare Signale aus einem Funktionsgenerator (TEKTRONIX AFG 3022B) bis ca. 30 kV (siehe Abb.5). Damit können z.B. Wechselspannungen oder pulsierende Gleichspannungen, Sinuskurven oder Rechtecksignale bis in den kHz-Bereich erzeugt werden. Der Hochspannungserzeuger liefert in den niedrigen Frequenzbereichen bis ca. 100 Hz noch sehr exakt die vom Funktionsgenerator vorgegebenen Kurvenformen. Die Signale des Funktionsgenerators sowie des Hochspannungserzeugers werden vom Oszilloskop (Hameg Combiscope HM1008) aufgenommen und während der Versuche ständig überwacht. Diese sehr aufwändige und kostspielige sowie schwierig zu bedienende Anordnung wäre für den industriellen Einsatz nicht praktikabel. Für Versuchsreihen eignet sich dieser Aufbau sehr gut, da damit auch Signale kostengünstiger Hochspannungserzeuger simuliert werden können, die z.B. einen Offset bzw. ein „unsauberes“ Rechtecksignal liefern. Alle Versuche mit dem Hochspannungsverstärker werden in Zusammenarbeit mit Fa. Schnier durchgeführt bzw. interpretiert.



Abb. 5:
Hochspannungsverstärker (unten), Oszilloskop (Mitte) und Funktionsgenerator (oben), Aufbau gemeinsam mit der Fa. Schnier

Meilenstein M2: Aufbau neuer Versuchseinrichtungen zur Prüfteilfertigung abgeschlossen im Februar 2008

13 Iterative Optimierungen

Modellbildung zur Simulation des elektrostatischen Fluidisierbehälters mit Gleichspannung

Voraussetzung dafür, dass Partikel aufgeladen werden ist der Koronaeinsatz, der im inhomogenen elektrischen Feld stattfindet. Die Korona-Einsatzspannung U_K berechnet sich nach Peek [30] (Gleichung 1) durch

$$U_K = E_{DL} \cdot f \cdot r_0 \cdot \left(1 + 0,301 \cdot \sqrt{\frac{\rho_{Lr}}{100 \cdot r_0}} \right) \cdot \ln\left(\frac{S}{r_0}\right) \quad (1)$$

und liegt im Fallbeispiel bei ca. 4.600 V.

- U_K : Korona-Einsatzspannung [V]
- E_{DL} : Durchbruchfeldstärke der Luft ($3 \cdot 10^6$ V/m)
- ρ_{Lr} : relative Dichte der Luft (1 angenommen)
- f : Rauheitsfaktor der Luft ($0,5 < f < 1$; angenommen ca. 0,75)
- r_0 : Radius Elektrode [m] (Fallbeispiel $60 \cdot 10^{-6}$)
- S : Abstand Elektrode/Werkstück [m] (Fallbeispiel 0,065)

Für numerische Simulationen (Finite Elemente Methode) dient die Laplace-Gleichung, bei der der Vektor der Feldstärke (ohne Raumladungseinfluss) als Gradient eines Potentials (Gleichung 2) im mehrdimensionalen Raum über den Nabla-Differenzialoperator (∇) ausgedrückt wird.

$$\vec{E} = -\nabla\Phi \quad (2)$$

Für erste Erwägungen und für die Modellbildung beim elektrostatischen Fluidisierbehälter kann als Näherung idealisiert die analytische Lösung für Zylinderkoordinaten (Gleichung 3)

$$E = \frac{\Phi_0}{x \cdot \ln\left(\frac{S}{r_{0kor.}}\right)} \quad (3)$$

herangezogen werden, bei der die Feldstärke umgekehrt proportional zum Zylinderumfang ist.

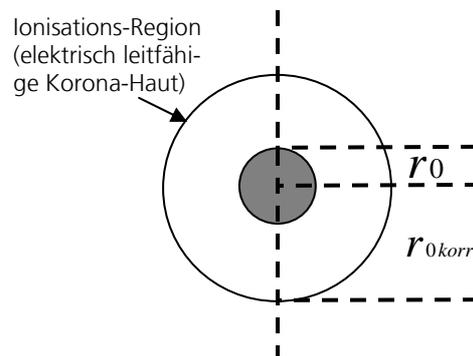
- E / \vec{E} : Feldstärke / als Vektor dargestellte Feldstärke [V/m]
- x : Bereich zw. Elektrode u. Werkstück an dem Feldstärke ermittelt wird [m]
- Φ / Φ_0 : Potential / angelegtes Potential [V]
- $r_{0kor.}$: korrigierter Elektrodenradius [m]

Für Fallbeispiele und Modellbildung eignet sich als Wert für die mittlere Feldstärke recht gut ein Abstand Elektrode/Werkstück von $x = \frac{S}{\sqrt{2}}$, bei dem die Kreisfläche des Zylinders gerade halbiert ist (Gleichung 4).

$$E = \frac{\Phi_0}{\frac{S}{\sqrt{2}} \cdot \ln\left(\frac{S}{r_{0korr.}}\right)} \quad (4)$$

Der Elektrodenradius (im Fallbeispiel typischerweise 60 μm) wird aufgrund der sich darum befindenden elektrisch leitfähigen Koronahaut für analytische Berechnungen auf 1 mm Radius korrigiert (Schätzwert aus der Literatur). Für die FEM wird nach Peek [30] der korrigierte Elektrodenradius berechnet durch (Gleichung 5, Bild unten).

$$r_{0korr} = 0.301 \frac{\sqrt{r_d}}{100 \cdot \sqrt{\delta}} \quad (5)$$



Die Sättigungsaufladung von Partikeln liegt nach Rohmann [31] bei (Gleichung 6):

$$q_{\max} = 4\pi r_p^2 \epsilon_0 \cdot \left(3 \frac{\epsilon_r}{\epsilon_r + 2}\right) \cdot E_0 \quad (6)$$

- q_{\max} : Sättigungsaufladung (Partikel) [As (C)]
- ϵ_0 : Permittivität des Vakuums ($8,86 \cdot 10^{-12}$) [As/Vm]
- ϵ_r : relative Permittivität (Werte von 1 bis ∞)
- E_0 : Anfangsfeldstärke [V/m]
- r_p : Radius (Partikel) [m]

Der Quotient $\left(3 \frac{\epsilon_r}{\epsilon_r + 2}\right)$ wird auch als Pauthenier-Faktor p bezeichnet und variiert

zwischen 3 für sehr gut polarisierbare und 1 für unpolare Materialien. Die Sättigungsaufladung ist proportional zur Feldstärke und der (in der Pauthenier-

Gleichung vereinfacht (sphärisch angenommenen) Oberfläche des Partikels. Außerdem hängt sie von der Permittivität ϵ ab, die das Produkt aus Permittivität des Vakuums ϵ_0 und relativer Permittivität ϵ_r des Pulvers (stoffspezifische Konstante) ist (Gleichung 7). Für Pulverpartikel wurden bei Messungen mittels der Time Domain Reflektometrie (TDR) [32] aus dem schüttgutförmigen Zustand Werte der relativen Permittivität im Bereich von 1,3 bis 1,7 ermittelt.

$$\epsilon = \epsilon_0 \cdot \epsilon_r \quad (7)$$

ϵ : (absolute) Permittivität [As/Vm]

Die Aufladung von Partikeln stellt allerdings einen zeitlichen Prozess dar und wird nach Pauthenier und Moreau-Hanot [33] (Gleichung 8) wie folgt dargestellt:

$$q = 4\pi r_p^2 \epsilon_0 \cdot \left(3 \frac{\epsilon_r}{\epsilon_r + 2} \right) \cdot E \cdot \frac{t}{t + \tau_A} \quad (8)$$

q : Aufladung (Partikel) [As (C)]

τ_A : Aufladekonstante [s]

t : Aufladezeit [s]

Die Aufladekonstante τ_A ist von der Feldstärke und der Ionenstromdichte (Gleichung 9) abhängig:

$$\tau_A = \left(\frac{4\epsilon_0 E}{J} \right) \quad (9)$$

J : Ionenstromdichte der Luftionen [A/m²]

Bei einer Feldstärke von angenommen 500.000 V/m und einer Ionenstromdichte der Luftionen von typischerweise 1 mA/m² liegt der τ_A -Wert bei 0,018 s.

Um die sich während des Partikelflugs ändernden Feldstärken berücksichtigen zu können wird eine partiell differenzierte Form der Pauthenier-Gleichung (Gleichung 10)

$$\delta q = 4\pi r_p^2 \epsilon_0 \cdot \left(3 \frac{\epsilon_r}{\epsilon_r + 2} \right) \cdot E \cdot \frac{\tau_A}{t + \tau_A^2} \cdot \delta t \quad (10)$$

für die numerische Simulation (Finite Elemente Methode) angewandt. In einem sehr kleinen Zeitbereich δt wird dabei die Feldstärke in der Näherungslösung konstant angesetzt und jeweils der Ladungsanstieg δq berechnet.

Raumladungen wirken sich im elektrischen Feld wie kleine Hochspannungsquellen zwischen Elektrode und Werkstück aus und setzen damit die (für die Aufladung der Pulverpartikel relevante) Feldstärke in der Nähe der Hochspannung führenden Elektrode herab, in der Nähe des Werkstückes herauf. Bei der elektrostatischen Pulverbeschichtung mittels Sprühpistolen wirkt sich dieser Effekt, der die Korona unterdrücken kann nur geringfügig aus, da nur verhältnismäßig geringe Mengen an Pulver/ Zeiteinheit mittels Injektor aus dem Fluidisierbehälter zur Elektrode gefördert werden.

Zur Berechnung des Einflusses der Raumladungen ρ auf die Feldstärke für numerische Simulationen (Finite Elemente Methode) dient die aus der ersten Maxwell-Gleichung (11)

$$\nabla \cdot \vec{E} = \frac{\rho}{\epsilon} \quad (11)$$

folgende Poisson-Gleichung (Gleichung 12)

$$\nabla^2 \Phi = -\frac{\rho}{\epsilon} \quad (12)$$

und, da das elektrische Feld ein konservatives Feld darstellt, da es nur vom Ort abhängig ist (Gleichung 13) folgende Gleichung:

$$\nabla \cdot \vec{J} = 0 \quad (13)$$

Trotzdem weniger als 10 % der Luftionen zur Partikelaufladung beitragen und mehr als 90 % der Luftionen sich frei zum Werkstück hin bewegen, ist deren Einfluss auf die Raumladungsdichte gering. Die Raumladungsdichte ergibt sich aus der Ionenstromdichte und der Geschwindigkeit der Ionen (Gleichung 14),

$$\rho = \frac{J_P}{v_P} + \frac{J_I}{v_I}, \quad (14)$$

- ρ : Raumladungsdichte [As/m³]
- J_P : Ionenstromdichte der Pulverpartikel [A/m²]
- J_I : Ionenstromdichte der Luftionen [A/m²]
- v_P : Geschwindigkeit Pulverpartikel [m/s]
- v_I : Geschwindigkeit Luftionen [m/s]
- ∇^2 : Laplace-Differenzialoperator

die Geschwindigkeit der Luftionen ist der Faktor aus Ionenbeweglichkeit, die in der Literatur für Luft mit $220 \cdot 10^{-6} \text{ m}^2/\text{Vs}$ angegeben ist, und der Feldstärke, die als mittlere Feldstärke mit ca. 160.000 V/m angenommen werden kann, liegt im Fallbeispiel also bei 35 m/s (Gleichung 15).

$$v_I = \mu \cdot E \quad (15)$$

μ : Ionenbeweglichkeit [$\text{m}^2/(\text{Vs})$]($220 \cdot 10^{-6}$ für Luft)

Bei pulverlacktypischen 0,1-50 μm Partikeldurchmesser liegt die Relativgeschwindigkeit im Bereich zwischen 0,01 und 2 m/s (s.u.), also so viel geringer als die Geschwindigkeit der Luftionen, dass durch die aufgeladenen Partikel der größte Einfluss auf die Raumladungsdichte zu erwarten ist.

Für erste Modellbildungen kann anlehnend an das einfache analytische Modell basierend auf Zylinderkoordinaten der Raumladungseinfluss bei angenommen homogener Raumladung wie folgt abgeschätzt werden (Gleichung 16)[34]:

$$E = \frac{(\Phi_0 - \Phi_P) - \frac{\rho S^2}{4\epsilon}}{x \cdot \ln\left(\frac{S}{r_{0\text{kor.}}}\right)} + \frac{\rho x}{2\epsilon} \quad (16)$$

Φ_P : Potenzial Pulverschicht (vernachlässigbar bei geringen Schichtdicken) [V]
 ρ : Raumladungsdichte durch Luftionen und geladenes Pulver [As/m³]

Auch für Kugelkoordinaten (bei Punktelektroden) besteht die Möglichkeit überschlägige analytische Berechnungen durchzuführen [35].

Während bei der elektrostatischen Pulverbeschichtung mittels Sprühpistolen die Pulverdosierung (Injektorförderung aus Fluidisierbett) und Aufladung zwei voneinander separate Prozesse darstellen, wird die Dosierung und Aufladung des Pulvers beim elektrostatischen Fluidisierbett fast ausschließlich von den elektrostatischen Kenngrößen bestimmt. Die aus den Luftionen und den geladenen Partikeln zwischen Elektrode und Werkstück resultierenden Raumladungen wirken sich wie kleine zusätzliche Elektroden aus und reduzieren die Feldstärke in unmittelbarer Nähe zur Elektrode. Dadurch reduziert sich die Aufladung der Pulverpartikel. Beim elektrostatischen Fluidisierbett ist aufgrund der hohen Pulverabscheidemengen pro Zeiteinheit bei kleinem Platzangebot den Raumladungen besondere Beachtung zu schenken.

Die Raumladung steigt während des Betriebs des elektrostatischen Fluidisierbetts so weit an, bis die Korona-Einsatzspannung gerade noch überschritten wird. Dabei ist die maximale Raumladungsdichte $\rho_{\text{max.}}$ zu berechnen durch (Gleichung 17)

$$\rho_{\text{max.}} = \frac{(\Phi_0 - \Phi_P - U_K) \cdot 4\epsilon}{S^2}, \quad (17)$$

im Fallbeispiel entspricht das ca. 320 $\mu\text{C}/\text{m}^3$.

Die Raumladung bewirkt eine geringere Feldstärke in unmittelbarer Nähe der Elektrode und damit eine abgeschwächte Aufladung der Partikel. Dies zeigen auch Untersuchungen im Vorfeld. Mittels einer aus der Tonerbranche stammenden, vom IFF für die elektrostatische Pulverbeschichtung angepassten Messmethode [21] wurden die partikelgrößenspezifischen Ladungsverteilungen gemessen (q/d-Messmethode). In der Nähe des Werkstücks sind die Feldstärken erhöht (Abb. 6). Bei der elektrostatischen Pulverbeschichtung mittels Sprühpistolen sind aufgrund der geringeren Abscheidemengen/Zeiteinheit auf größerem Raum die Raumladungseffekte geringer ausgeprägt, so dass Partikel etwas höher aufgeladen werden (Abb. 7).

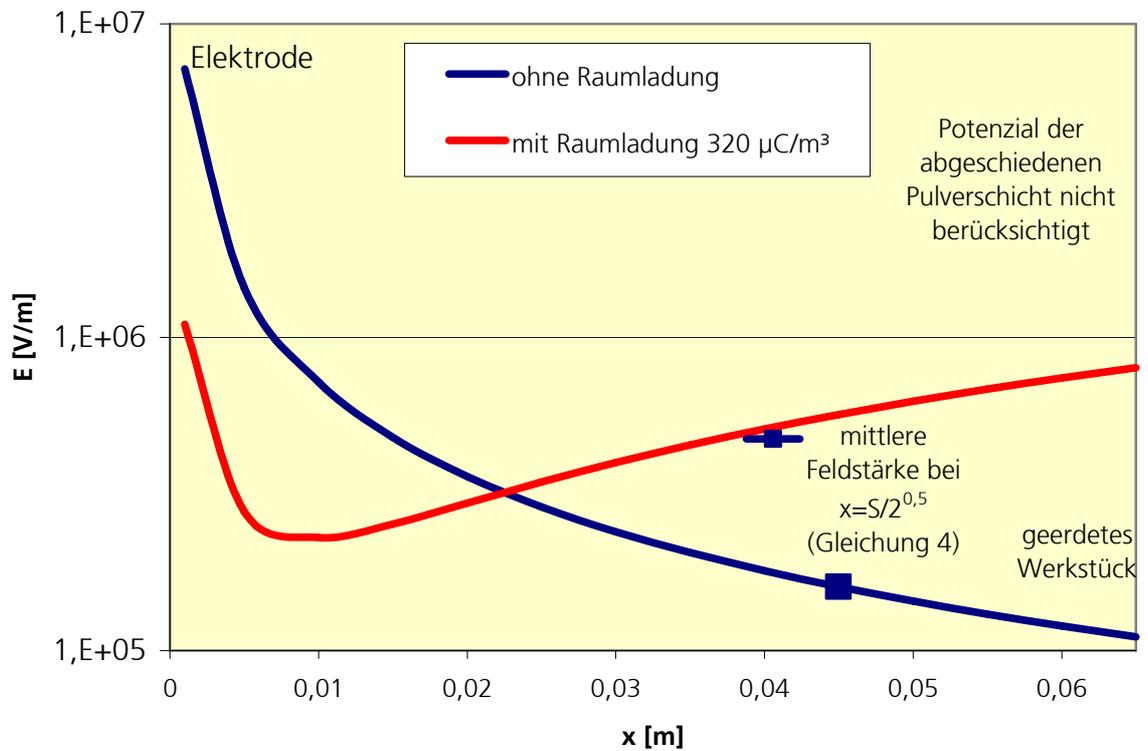


Abb. 6: Feldstärken (idealisiert, mit u. ohne Raumladung, $S=0,065$ m und $\Phi_0=30$ kV)

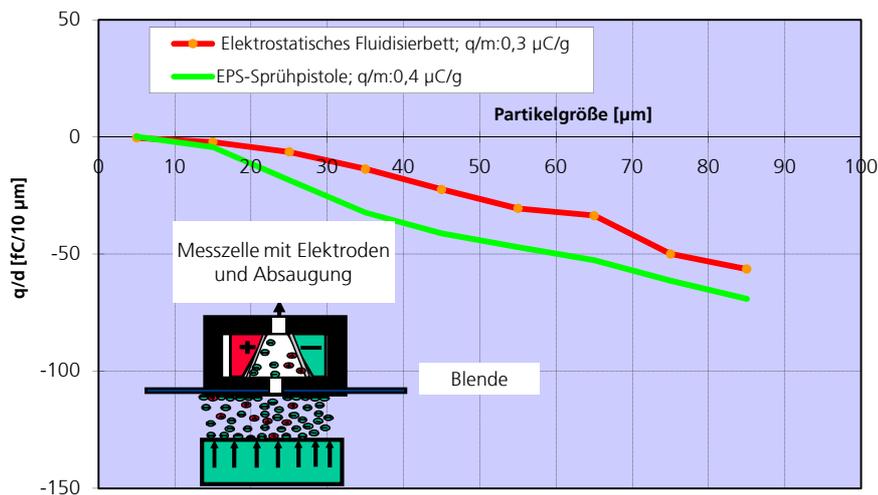


Abb. 7: q/d-Messungen Pulversprühen und elektrostatisches Fluidisierbett

Für die numerische Simulation (FEM) wird die inhomogene Raumladungsverteilung im mehrdimensionalen Raum berechnet nach Gleichung 18.

$$\nabla \rho = -\frac{\rho^2}{\varepsilon \cdot E} \quad (18)$$

Die bei der Koronaaufladung entstehenden Luftionen reißen neutrale Luftmoleküle mit und erzeugen damit den Ionenwind v_{iw} . Dieser kann vereinfacht berechnet werden über die Gleichung 19 [36]:

$$v_{iw} = \sqrt{\frac{\varepsilon_0}{\rho_L}} \cdot E \quad (19)$$

ρ_L : Dichte Luft [kg/m³] (1,2)

In unmittelbarer Nähe zur Elektrode liegt die Luftgeschwindigkeit durch den Ionenwind sehr hoch (Fallbeispiel bis ca. 20 m/s), bei zwischen Elektrode und Werkstück typischen Feldstärken von ca. 160.000 V/m (Abb. 5) liegt die Geschwindigkeit des Ionenwinds im Bereich von ca. 0,4 m/s, also wesentlich höher als die Fluidisierluftströmungsgeschwindigkeit (ca. 0,02 m/s).

Zur Bestimmung der Geschwindigkeit der Pulverpartikel sind insbesondere drei Kräfte zu berücksichtigen: Die elektrische Feldkraft F_E , die Schwerkraft F_G und die Stoke'sche Reibungskraft F_R , (Gleichung 20).

$$F_E = F_R + F_G \quad (20)$$

F_E : elektrische Feldkraft [N]
 F_G : Schwerkraft [N]
 F_R : Stoke'sche Reibungskraft [N]

Für die elektrische Feldkraft gilt (Gleichung 21):

$$F_E = E \cdot q \quad (21)$$

Im Fluidisierbett wirkt idealisiert betrachtet die Schwerkraft (Gleichung 22)

$$F_G = -m \cdot g \quad (22)$$

m_p : Masse Partikel[kg](Dichte Pulver, angenommen sphärisch: 1300 kg/m³)
 g : Erdbeschleunigung [m/s²](9,81)

sowie die Reibungswiderstandskraft F_R (Gleichung 23, für analytische Betrachtungen wird ein Gleichgewichtszustand ohne Partikelbeschleunigung „Stoke’sche Reibungskraft“ angenommen, Reynoldszahl < 2 s.u.)

$$F_R = -6\pi\eta\Delta v r_p \quad (23)$$

- Δv : Partikelrelativgeschwindigkeit [m/s]
 η : dynamische Viskosität der Luft ($17,2 \cdot 10^{-6}$) [Pas]
 r : Teilchenradius [m]
 F_R : Reibungswiderstandskraft [N]

der Feldkraft genau entgegen.

Kleine Partikel werden durch die Luftströmung (Summe aus Ionenwind und ferner Fluidisierluftströmung) getragen (Gleichung 24, Δv gegen Null), bei mittleren Partikelgrößen dominiert die elektrische Feldkraft, bei sehr groben Partikeln hat die Gewichtskraft den größten Einfluss auf die absolute Partikelgeschwindigkeit v_P (Gleichung 25):

$$\Delta v = \frac{F_E - F_G}{6r_p\pi\eta} \quad (24)$$

Die absolute Partikelgeschwindigkeit ergibt sich aus der relativen Partikelgeschwindigkeit δv und der Summe aus der durch die Luftionen entstehende Ionenwindgeschwindigkeit v_{IW} (ca. 0,5 m/s) und der Fluidisierluftgeschwindigkeit v_{Fl} (typischerweise ca. 0,02 m/s beim Austritt aus dem Sinterboden, bis $> 0,1$ m/s an Werkstückkanten durch Strömungsquerschnittsverengung). Sie liegt damit in derselben Größenordnung wie die Absaugluftgeschwindigkeit, bei der die zwischen der Oberkante des Fluidisierbehälters und dem Werkstück horizontale Strömung nach unten hin zur Absaugung abgelenkt wird. Der mit der Querschnittsverengung verbundene Druckanstieg und Wandreibungseffekte führt zu dem bekannten Effekt der Wirbelbildung an Kanten (Abb. 8) [37, S. 318]. Dieser Effekt kann auch bei Beschichtungsversuchen im Fluidisierbett beobachtet und mittels Laserlichtschnittaufnahmen sichtbar gemacht werden.

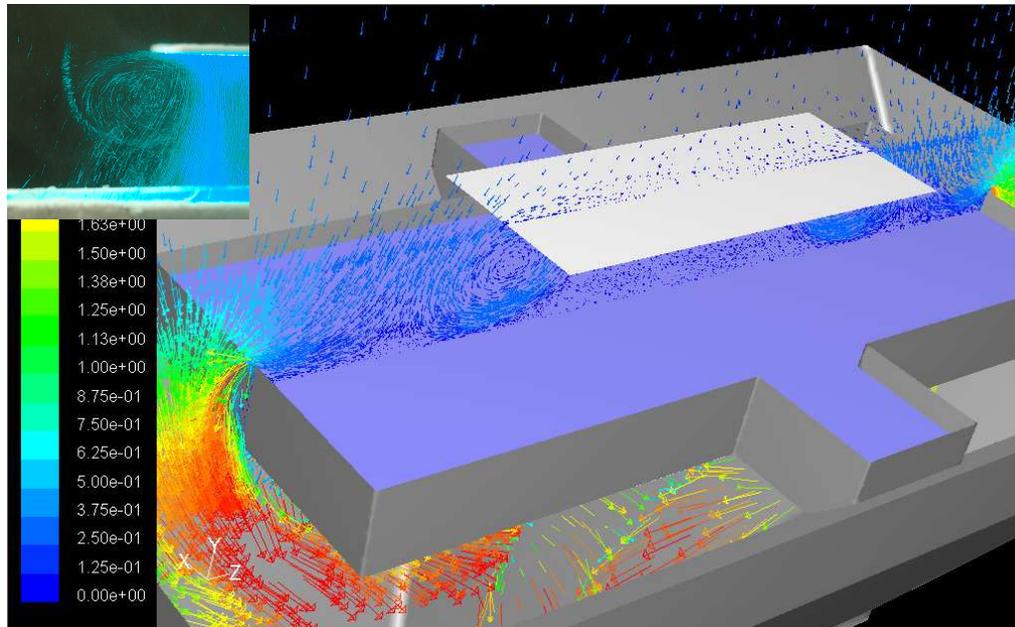


Abb.8: Simulation Strömungsverhältnisse im Fluidisierbett ohne elektrostatische Kräfte, Sichtbarmachung durch Laserlichtschnittaufnahmen im Fluidisierbett links oben

$$v_p = \Delta v + v_{FI} + v_{IW} \quad (25)$$

v_{IW} : Ionenwindgeschwindigkeit [m/s] (s. Gleichung 15, ca. 0,5)
 v_{FI} : Geschwindigkeit Fluidisierluft [m/s] (ca. 0,02)

Für die numerische Simulation (FEM) wird noch zusätzlich die (sehr geringe) Auftriebskraft F_A in die Berechnungen (Gleichung 26) mit eingebunden.

$$F_A = \frac{4}{3} \pi r_p^3 \rho_L g \quad (26)$$

Zusätzlich wird für die FEM die Beschleunigung der Partikel mit berücksichtigt, die bei den groben und schnellen Partikeln eine Rolle spielt bei denen die Reynoldszahl > 2 liegt. Die Reynoldszahl stellt das Verhältnis von Trägheits- und Zähigkeitskräften dar und berechnet sich nach Gleichung 27.

$$Re = \frac{2r_p \Delta v}{\nu} \quad (27)$$

Die kinematische Viskosität ν ist definiert als Quotient aus dynamischer Viskosität und der Dichte der Luft ρ_L (Gleichung 28)

$$\nu = \frac{\eta}{\rho_L} \quad (28)$$

ν : kinematische Viskosität der Luft ($14,2 \cdot 10^{-6}$) [m²/s]

Die Reibungswiderstandskraft vom Objekt das sich in der Luft bewegt ist proportional zum Querschnitt des Objekts und zu der Energie pro Volumeneinheit des Objekts (Newton'sche Regel, Gleichung 29)

$$F_R = C_w \underbrace{\frac{\pi}{4} (2r_p)^2}_{\text{Querschnitt}} \underbrace{\left(\frac{1}{2} \rho_L \Delta v^2 \right)}_{\text{Energie pro Volumeneinheit}} \quad (29)$$

C_w : Strömungswiderstands-Koeffizient

Der Strömungswiderstands-Koeffizient ist abhängig von der Reynoldszahl (Abb. 9). Bei Reynoldszahlen < 2 (kleine, langsame Partikel, laminare 2-Phasen Strömung) gilt die Stoke'sche Regel (Gleichung 30)

$$C_w = \frac{24}{\text{Re}} \Rightarrow F_R = -6\pi\eta\Delta v r \quad (\text{siehe Gleichung 23}) \quad (30)$$

Für große, schnelle Partikel ist die Reynoldszahl $> 2 < 500$, so dass die Beschleunigung der Partikel eine Rolle spielt. Der Bereich wird als Übergangsphase bezeichnet und nach der Allan'schen Regel (Gleichung 31) berechnet.

$$C_w = \frac{18.5}{\text{Re}^{0.6}} \quad (31)$$

Für extrem große Partikel und sehr hohe Geschwindigkeiten (Reynoldszahlen zwischen 500 und 200.000) können turbulente 2-Phasenströmungen auftreten die mit der Newton'schen Regel berechnet werden (mit $C_R \approx 0,44$). Dieser Fall tritt in den hier betrachteten Fallbeispielen nicht auf, könnte aber bei sehr groben Sinterpulvern grundsätzlich auftreten.

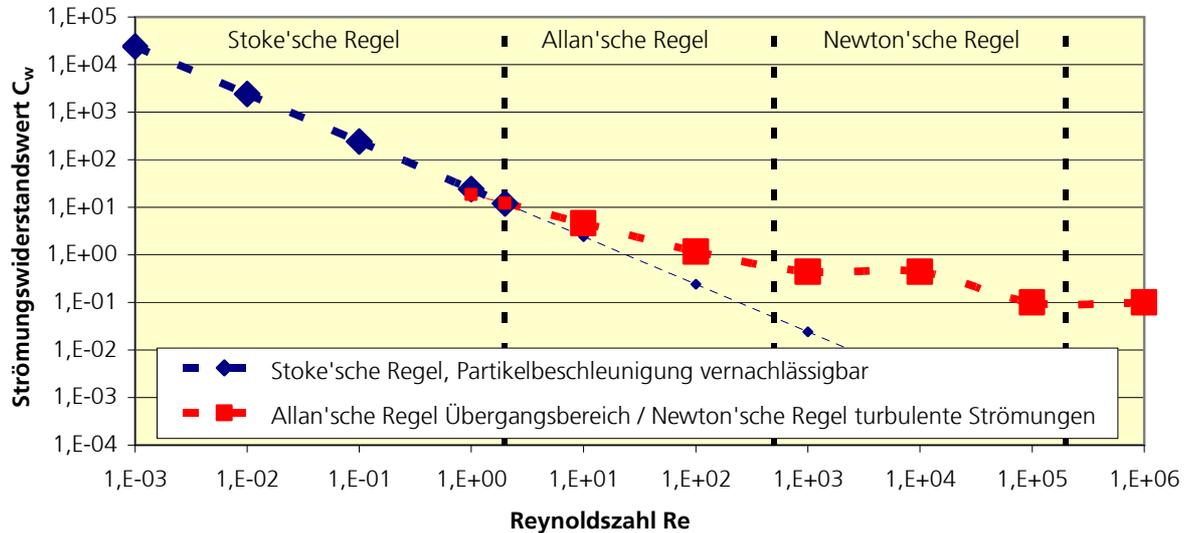


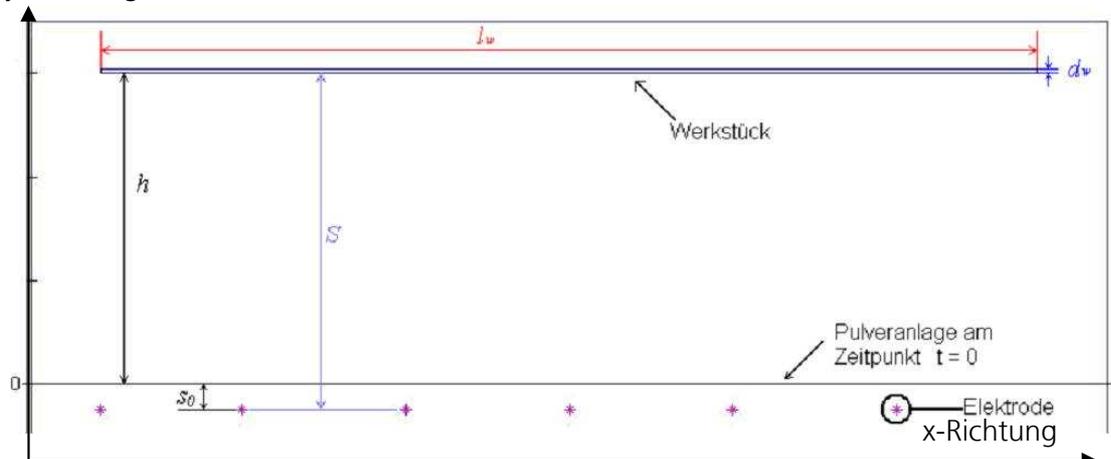
Abb. 9: Abhängigkeit des Strömungswiderstandswertes C_w von der Reynoldszahl

Bei der FEM wird die Beschleunigung der Partikel $\frac{dv_{x/y}}{dt}$ 2-dimensional in x-Richtung (waagrecht) und y-Richtung (senkrecht) berechnet (siehe Abbildung unten). In waagerechter Richtung spielt nur die Feldkraft F_E und die Reibungswiderstandskraft F_R eine Rolle, in senkrechter Richtung kommen die Schwerkraft F_G und die Auftriebskraft F_A zum Tragen (Gleichung 32 und 33).

$$\frac{dv_x}{dt} = F_{Ex} + F_{Rx} \quad (32)$$

$$\frac{dv_y}{dt} = F_{Ey} + F_{Ry} + F_G + F_A \quad (33)$$

y-Richtung



In den Darstellungen zum elektrostatischen Fluidisierbett (Abb. 10 und 11) wird von maximaler Raumladung und einem Abstand Elektrode/Partikel bei der Aufladung von 10 mm bei Sättigungsaufladung ausgegangen. Nur bei sehr groben Partikeln dominiert die Schwerkraft und die Partikelrelativgeschwindigkeit nimmt entsprechend ab. Bei pulverlacktypischen 0,1-50 µm Partikeldurchmesser liegt die Relativgeschwindigkeit im Bereich zwischen 0,01 und 2 m/s. Die aus der maximalen Raumladungsdichte ρ_{\max} (siehe Gleichung 15) sich ergebende maximale Abscheideleistung A_{\max} errechnet sich näherungsweise aus der Partikelmasse m_p (über die Dichte/angenommen sphärische Partikel), der Geschwindigkeit der Partikel v_p (Gleichungen 16-22) und der sich aus der Sättigungsaufladung des Partikels (Gleichung 5) und der max. Raumladungsdichte ρ_{\max} (Gleichung 15, Fallbeispiel 320 µC/m³) ergebenden Partikelanzahl (Gleichung 34).

$$A_{\max} = m_p \cdot v_p \cdot \frac{\rho_{\max}}{q_{\max}} \quad (34)$$

A_{\max} : maximale Abscheideleistung [kg/(m²·s)]
 v_p : Geschwindigkeit der Partikel [m/s] (Gleichung 16-22)

Je größer das Pulver, desto höher ist die maximale Abscheideleistung, da feinere Partikel aufgrund ihrer niedrigen Geschwindigkeit im Verhältnis zu ihrem Volumen einen höheren Beitrag zur maximalen Raumladung beitragen. Da beim elektrostatischen Pulversprühen Raumladungen eine untergeordnete Rolle spielen und die Aufladung der Partikel höher ist (Abb. 7) haben diese insgesamt höhere Geschwindigkeiten und höhere partikelgrößenspezifische Geschwindigkeitsdifferenzen. Beim elektrostatischen Pulversprühen mittels Sprühpistolen ist die Abscheideleistung vergleichsweise sehr gering und hängt nicht direkt vom Raumladungseinfluss ab, da Pulveraaufladung und Dosierung separate Verfahrensschritte darstellen. Zur Bewertung des Einflusses der Raumladung auf die Feldstärke beim elektrostatischen Pulversprühen (siehe Gleichung 14), lässt sich diese als Quotient aus Ionenstromdichte J_p (nur Pulverpartikel, siehe Gleichung 35 und 36) und der Geschwindigkeit der Pulverpartikel v_p ausdrücken (Gleichung 25, ca. 2 m/s, siehe Abb. 10), wobei die Ionenstromdichte J_p über den Pulverausstoß/(m²·s) \dot{m}' , die Sättigungsaufladung q_{\max} und die Masse (angenommen $r=10$ µm) eines Pulverpartikels m_p berechnet werden kann.

$$J_p = \frac{\dot{m}' \cdot q_{\max}}{m_p} \quad (35)$$

\dot{m}' Pulverausstoß [kg/(m² · s)] (angenommen ca. 0,01)

Die Ionenstromdichte durch Pulverpartikel liegt bei ca. $20 \cdot 10^{-6}$ A/m²

$$\rho_p = \frac{J_p}{v_p} \quad (36)$$

ρ_p : Raumladungsdichte durch Pulverpartikel [$\text{As(C)}/\text{m}^3$]

J_p : Ionenstromdichte durch Pulverpartikel (s.o.) [A/m^2]

Die Raumladungsdichte liegt bei einer Geschwindigkeit der Pulverpartikel von ca. 2 m/s (s. Abb. 10) im Bereich von ca. $10 \mu\text{C}/\text{m}^3$, also auf einem niedrigen Niveau (Vergleich elektrostatisches Fluidisierbett Gleichung 14, $320 \mu\text{C}/\text{m}^3$).

Da die feinen Partikel des Partikelgrößenspektrums sich langsamer bewegen, reichern sie sich in der Sprühwolke an. Da beim Einsatz der elektrostatischen Sprühpistole höher aufgeladene Partikel erzeugt werden (kaum Feldstärkeerniedrigung durch Raumladungen) ist der Effekt dort stärker ausgeprägt obwohl Strömungsgeschwindigkeiten (die insbesondere die kleinen Partikel bewegen) etwas höher sind (Abb. 11/12). Viele kleine Partikel im Pulverlack führen zur Erhöhung der Raumladungsdichte und damit beim elektrostatischen Fluidisierbett zur Erniedrigung der maximalen Abscheideleistung (Abb. 10).

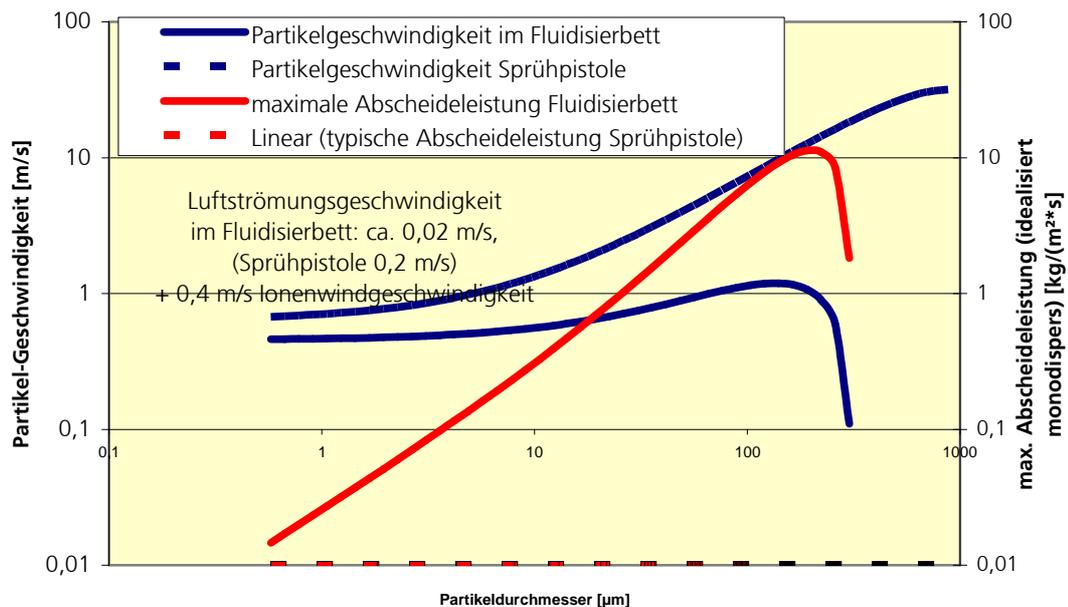


Abb. 10: Partikelgeschwindigkeit u. max. Abscheideleistung des elektrostatischen Fluidisierbetts in Abhängigkeit von der Partikelgröße beim Einsatz von Gleichspannung

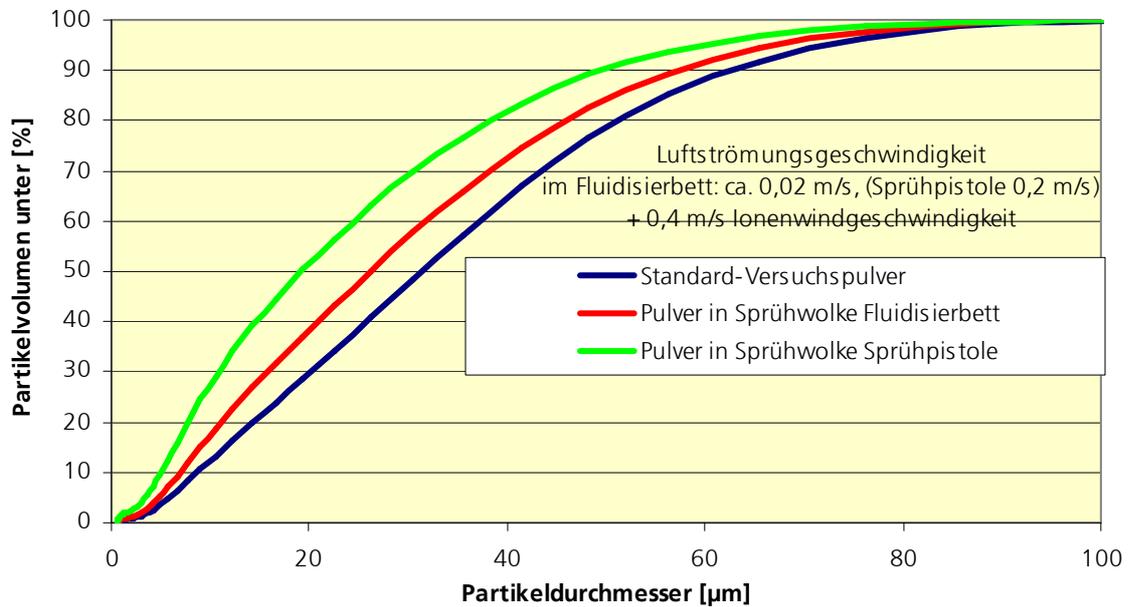


Abb. 11: Partikel-Volumenverteilung von Frischpulver und Pulver in Sprühwolke

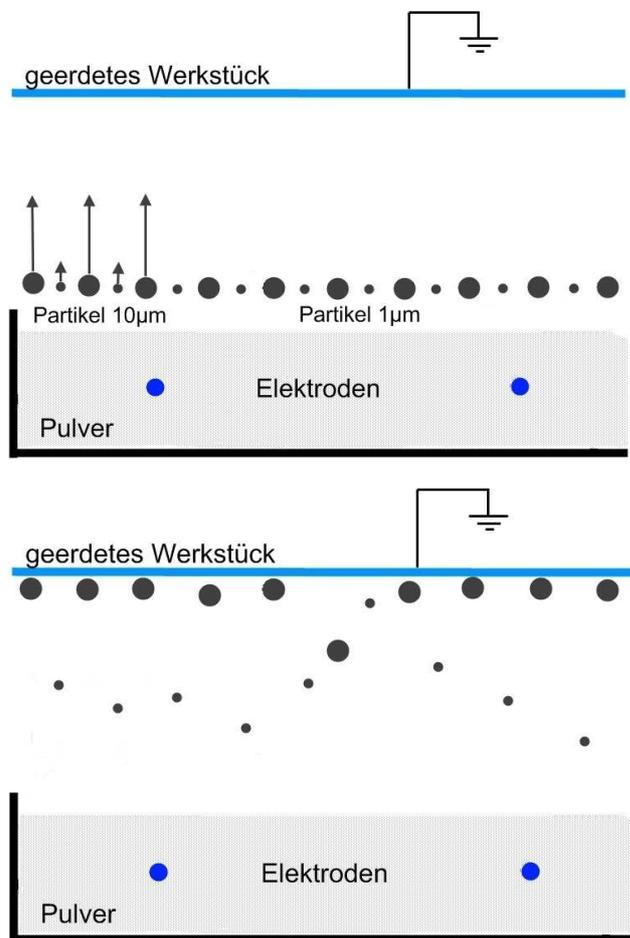


Abb. 12: große Partikel haben eine hohe Geschwindigkeit, dadurch Anreicherung feiner Partikel in der Sprühwolke

Im elektrostatischen Fluidisierbett kann trotz dieser Anreicherungen in der Sprühwolke die Partikelgrößenseparierung im Kreislauf durch Anpassung der elektrostatischen Parameter auf einfache Weise minimiert werden (Abb. 13). Gründe dafür sind, dass die Stoke'sche Reibungskraft sowie die Schwerkraft der Feldkraft zum Werkstück hin genau entgegenwirken. Dies ist bei der klassischen elektrostatischen Pulverbeschichtung mit den meist horizontal sprühenden Pistolen nicht der Fall. Darüber hinaus werden die sich in der Sprühwolke besonders beim Einsatz von Sprühpistolen anreichernden feinen Partikel von Querströmungen erfasst und durch die Kabinenströmung abgesaugt.

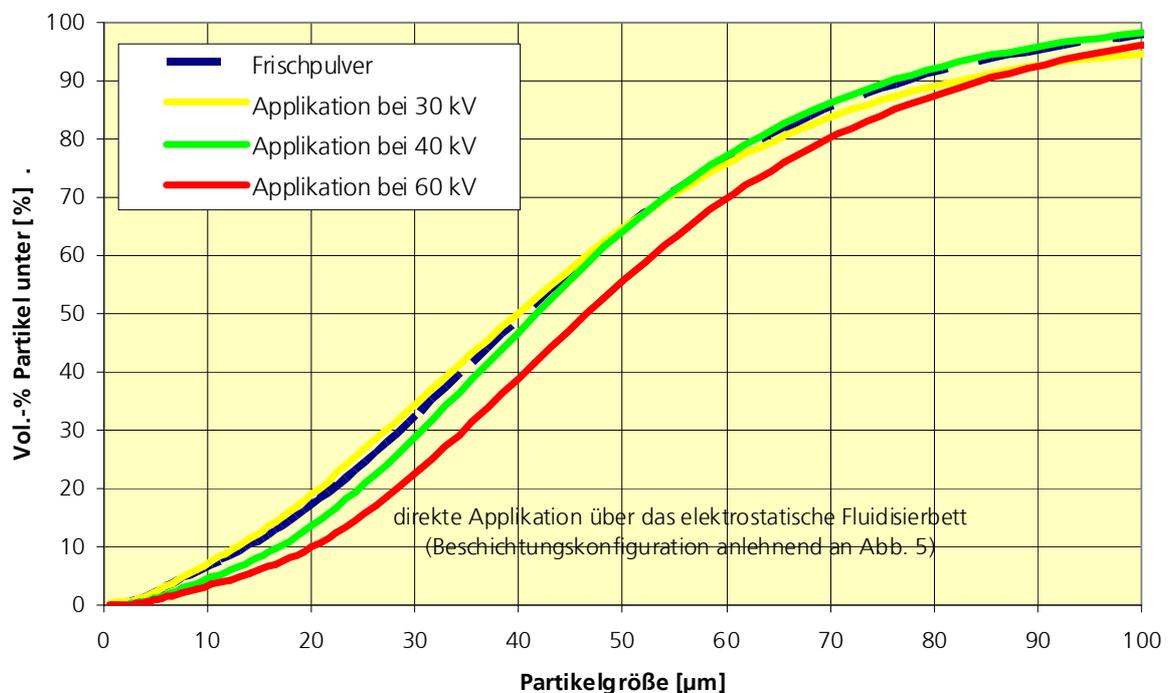


Abb. 13: Summenverteilungskurve der Partikelgrößen von Frischpulver und auf dem Werkstück appliziertem Pulver

Während die ganz feinen Pulverpartikel fast ausschließlich dem Ionenwind und der Fluidisierluftströmung folgen (δ_p annähernd 0), folgen die mittleren Partikelgrößen überwiegend den elektrostatischen Feldkräften. Nur extrem grobe Partikel folgen dem Schwerkrafteinfluss (Abb. 14).

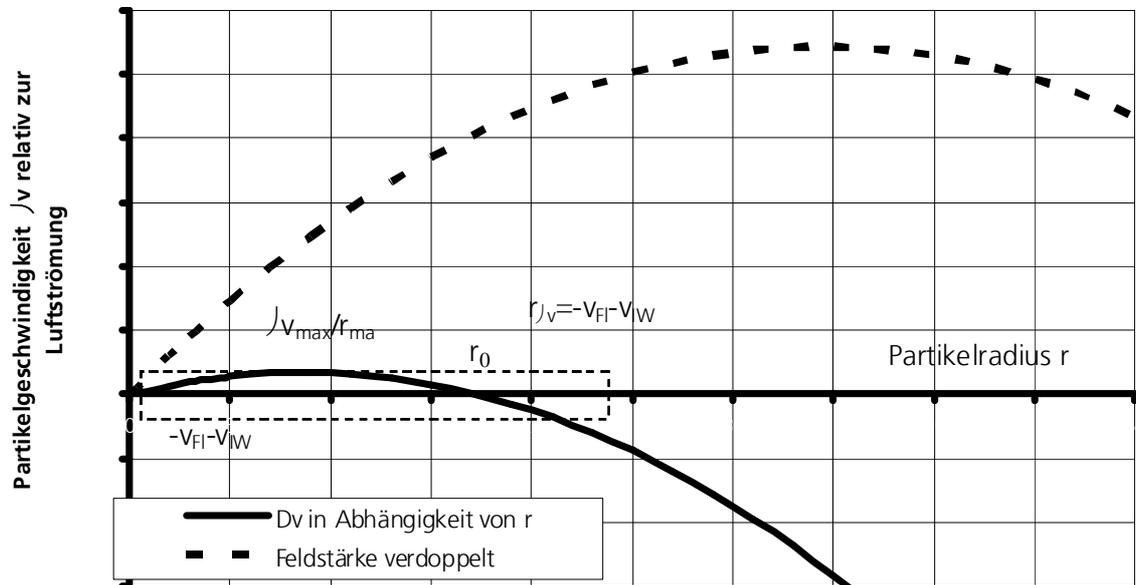
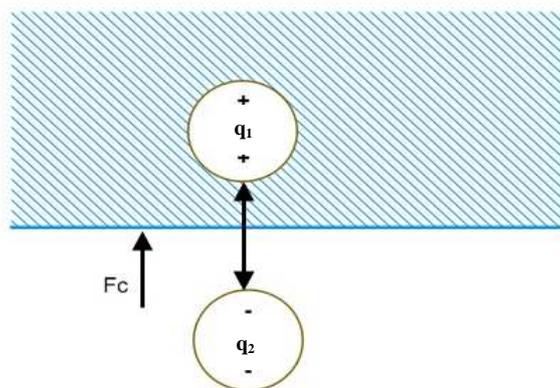


Abb. 14: Partikelrelativgeschwindigkeit in Abhängigkeit vom Partikelradius

Die Coulomb'sche Kraft (Gleichung 37)

$$F_C = \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \cdot \frac{q_1 \cdot q_2}{\epsilon_r \cdot a^2} \quad (37)$$

- F_C : Coulomb'sche Kraft [N]
- a : Mittelpunktabstand [m]
- $q_1 \cdot q_2$: Ladung · Spiegelladung [As (C)]



wird vor allem dann wirksam, wenn die Partikel sich sehr nahe am Werkstück befinden. Sie bewirkt, dass die Partikel nach der Applikation vor dem Einbrennen am

Werkstück haften, da die elektrisch hochisolierenden Pulverpartikel ihre Ladung nur sehr langsam ans Werkstück bzw. die Umgebung abgeben. In die FEM fließt die Berechnung der Coulomb'schen Kraft mit ein.

Die Entladung von Pulvern kann idealisiert durch die Zeitkonstante τ_E angegeben werden, die den Faktor aus elektrischem Widerstand R_{sp} und Permittivität ϵ darstellt (Gleichung 38). Da Pulverlacke i.d.R. elektrisch hochisolierend sind, liegt der τ_E -Wert bei $\gg 1000$ s. In der kurzen Zeit zwischen Pulverapplikation und Einbrennen des Pulvers ist das Pulver daher i.d.R. noch sehr hoch aufgeladen, so dass die Coulomb'schen Haftkräfte ein Herabrieseln des Pulvers vom Werkstück verhindern.

$$\tau_E = R_{sp} \cdot \epsilon \quad (38)$$

τ_E : Selbstentladezeitkonstante [s]
 R_{sp} : spezifischer Widerstand des Pulvers [Ω m]

Der ideale Verlauf der Entladung kann beschrieben werden durch (Gleichung 39):

$$\Phi(t) = \Phi_0 e^{\frac{-t}{\tau_E}} \quad (39)$$

$\Phi(t)$: Potential nach Zeit [V]
 Φ_0 : maximales Potential [V]
 t : Laufzeit [s]

Bei der Entladung von Pulvern fließt die Ladung nicht so homogen ab wie in Gleichung 39 beschrieben, sondern der Entladeprozess kann (ebenfalls idealisiert!) in drei Entladephasen eingeteilt werden. Die Funktion für den dreistufigen Entladeprozess lautet idealisiert (Gleichung 29):

$$\Phi(t) = \Phi_1 e^{\frac{-t}{\tau_{E1}}} + \Phi_2 e^{\frac{-t}{\tau_{E2}}} + \Phi_3 e^{\frac{-t}{\tau_{E3}}} \quad (40)$$

Φ_1, Φ_2, Φ_3 : maximale Potentiale [V]
 $\tau_{E1}, \tau_{E2}, \tau_{E3}$: Selbstentladezeitkonstanten [s]

Der erste Entladeprozess beginnt bereits nach der Aufladung der Partikel an der Elektrode und hat eine andere Charakteristik als die Entladung der applizierten Pulverschicht, da Partikel sich in der Vereinzelnung schneller entladen als Partikel in einer dicht gepackten Pulverschicht. Die zur Berechnung des τ_{E1} -Wertes erforderlichen Algorithmen wurden bereits in den 70-er Jahren für das elektrostatische Fluidisierbett beschrieben [38] und in der neueren Literatur [39] wieder aufgegriffen. Die Gleichung 41 für Pulverpartikel in Vereinzelnung lautet

$$\tau_{E1} = \frac{(\epsilon_r + 2) \cdot \epsilon_0 \cdot r_P}{2\sigma_o} \quad (41)$$

wobei die Oberflächenleitfähigkeit σ_o sich berechnet nach Gleichung 42

$$\sigma_o = \frac{2r_P}{\pi R_{sp}} \cdot \ln\left(\frac{2r_P}{r_K}\right) \quad (42)$$

σ_o : Oberflächenleitfähigkeit [AVV]

r_K : Kontaktradius [m]

Da die τ_{E1} -Werte je nach den Stoffeigenschaften des Pulvers und dem Abstand der Partikel zueinander Werte im Bereich $\gg 10$ s annehmen und die Partikel im Allgemeinen $\ll 1$ s Zeit benötigen um sich zum Werkstück hin zu bewegen, ist der Einfluss gering und wird in der Simulationsrechnung beim aktuellen Stand nicht berücksichtigt.

Im Vorfeld konnte am Fraunhofer IPA aber nachgewiesen werden, dass der schnelle Entladeprozess unmittelbar nach dem Auftreffen des Pulvers (τ_{E2} [siehe auch 40]) am Werkstück mit der Rücksprühneigung des Pulvers [siehe auch 41] korreliert (Abb. 15). Insbesondere Pulver mit hoher Permittivität und damit hoher maximaler Aufladung neigen dazu und haben einen kleinen τ_{E2} -Wert. Rücksprühen führt zu Kratern und Orangenhauteffekt (Abb.14) und findet in der Literatur wenig Beachtung [42]. Der τ_{E2} -Wert liegt im Bereich von 0,1-3 s. Danach folgt (bei den meist elektrisch hochisolierenden Pulverpartikeln) eine sehr langsame Entladung des Pulvers am Werkstück. Der τ_{E3} -Wert ist in der Regel bei Pulverlacken so hoch, dass er für industrielle Pulverbeschichtungsprozesse ohne Bedeutung ist, da die Pulverlackschicht kurze Zeit nach der Applikation aufgeschmolzen und vernetzt wird ($\gg 10.000$ s).

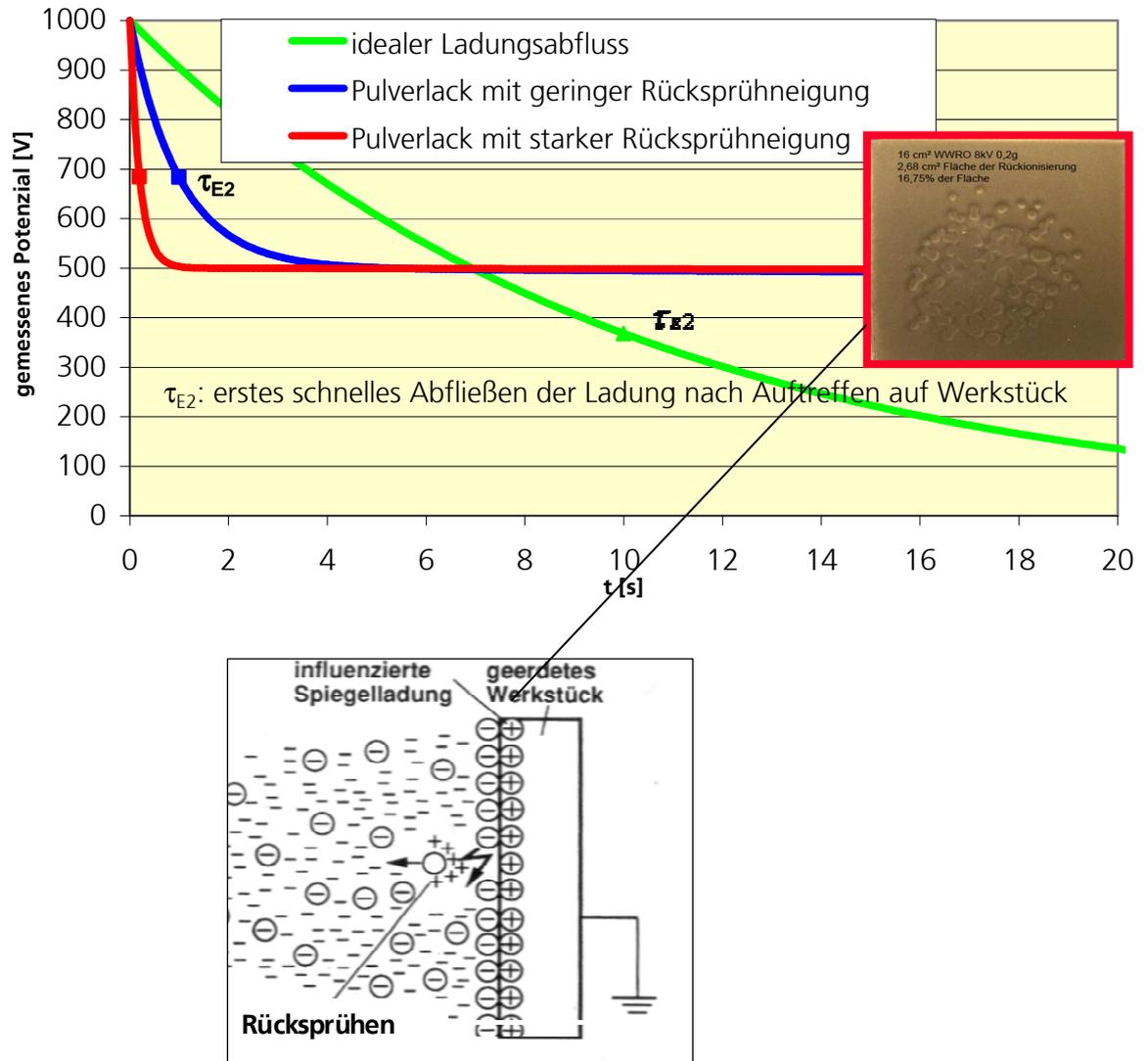


Abb. 15: Schematische Darstellung von Entladeprozessen

In der FEM wird die optische Verlaufsqualität und Rückionisationsneigung nicht simuliert. Die Selbstentladezeit wird dennoch in den Simulationen mit berücksichtigt und fließt beim Einsatz von gepulster Hochspannung mit ein, da das Potenzial der abgetrennten Pulverlacksschicht sich durch Entladung verringert, so dass sich dadurch die Feldstärke hin zum Werkstück (geringfügig!) erhöht.

Meilenstein M3: Iterative Optimierung für Produkte und Pulverlackiertechnologie abgeschlossen im Oktober 2008

Mess- und Bewertungsmethoden für Strömungsverhältnisse im elektrostatischen Fluidisierbett zur Unterstützung der Modellbildung und Simulation

Die verwendeten Pulverlacke werden mittels des Laserbeugungsmessverfahrens (Malvern Mastersizer X) hinsichtlich ihrer *Partikelgrößenverteilung* untersucht. In der Praxis werden zur Charakterisierung Volumen basierende Kenndaten wie $D(v.0,1/0,5/0,9)$ dokumentiert wobei der $D(v.0,5)$ -Wert den Mittelwert darstellt. Er liegt beim verwendeten Epoxidpolyester-Mischpulver (Fa. Wörwag) bei $31,3 \mu\text{m}$. Betrachtet man zu diesem Pulver die Anzahl basierende Verteilung $D(n.0,1/0,5/0,9)$ so liegt der größte Teil der Partikel im $< 1 \mu\text{m}$ -Bereich (Abb.16)!

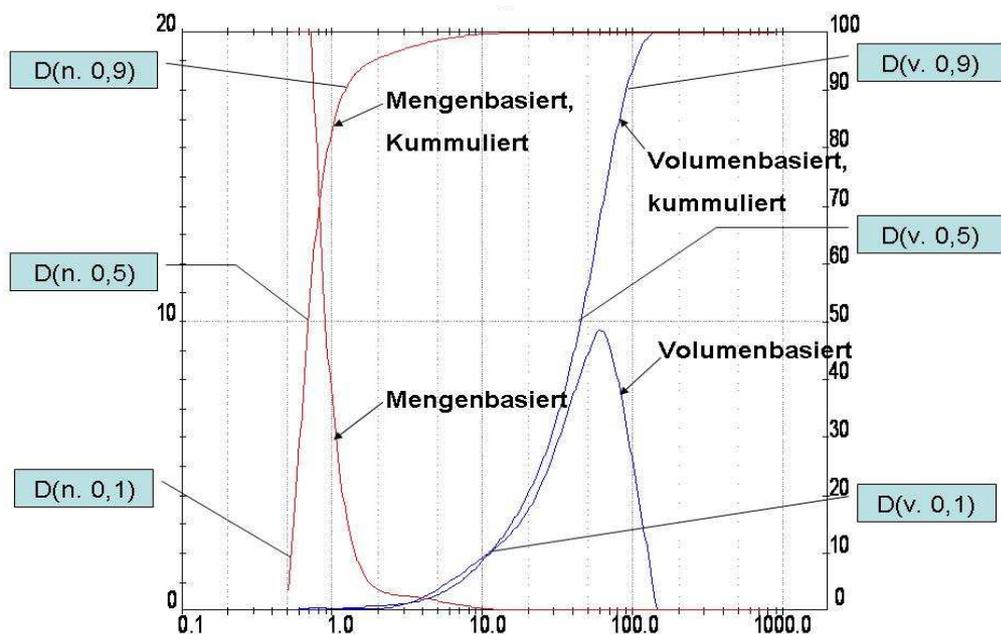


Abb. 16: Darstellung der Partikelgrößenkennwerte am Beispiel des Standardpulvers

Die Summenverteilung der im Projekt überwiegend verwendeten Pulver ist in Abb. 17 dargestellt. Die feinste Mahlung kann aufgrund ihrer schlechten Rieselfähigkeit und Verarbeitbarkeit im elektrostatischen Fluidisierbehälter nur bedingt eingesetzt werden.

Die Partikel-Geschwindigkeitsmessung erfolgt über Laser-Doppler Anemometrie (LDA) [43][44] mit einem Laser der Firma Coherent Innova 90 und einem Dantec Fibre PDA. Die LDA ist ein berührungsloses optisches Messverfahren zur Bestimmung der Geschwindigkeitskomponenten von in der Strömung mitgeführten Partikeln über die Streulichtfrequenz beim Durchgang eines Interferenzgitters. Hierbei wird ein monochromatischer und kohärenter Laserstrahl eines Ar-Ion-Lasers mit Hilfe eines Strahlteilers (Bragg-Zelle) in zwei gleichstarke Strahlen aufgeteilt, wobei die Frequenz einer der beiden Lichtstrahlen leicht verändert wird.

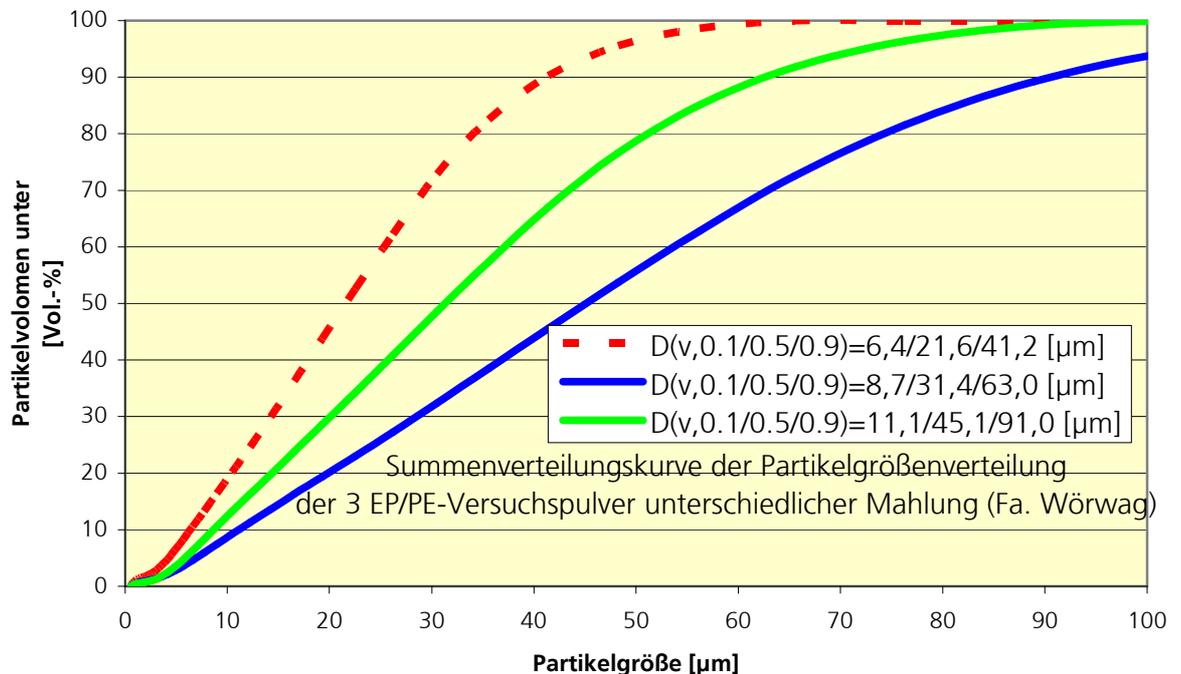


Abb. 17: Darstellung der Partikelgrößenkennwerte (verschiedene Mahlungen)

Die Strahltaille bezeichnet den engsten Querschnitt eines Laserstrahls und wird durch die Brechungseigenschaften der Optik vorgegeben. Die zum Schnitt gebrachten Laserstrahlen bilden das Messvolumen, in dem die Geschwindigkeitsmessung durchgeführt wird. Das Messvolumen muss in der Strahltaille der beiden Laserstrahlen gebildet werden, weil nur dort (und im Unendlichen) ebene Wellenfronten eines Laserstrahls vorhanden sind. Die ebenen Wellenfronten in den jeweiligen Strahlen bilden im Messvolumen ein stationäres Interferenzstreifenmuster, das parallel zur Strahlachsenhalbierenden verläuft. Ein Detektor misst die beiden Streuwellen, die von den Strömungspartikeln erzeugt werden. Die zu messenden Partikel dürfen weder zu klein noch zu groß sein. Wenn die Partikel zu klein sind, wird das reflektierte Licht zu schwach, um vom Empfänger detektiert zu werden. Aufgrund des begrenzten Messvolumens dürfen die Pulverpartikel auch nicht zu groß sein. Das für die Versuche verwendete Pulver liegt jedoch im Messbereich. Das empfangene Messsignal ist eine Überlagerung der beiden Streuwellen, die durch die Frequenzverschiebung (Doppler-Effekt) eine Schwebung erzeugen. Die Frequenz der Schwebung ist proportional zur Geschwindigkeitskomponente der Partikel und nennt sich Dopplerfrequenz (Abb. 18).

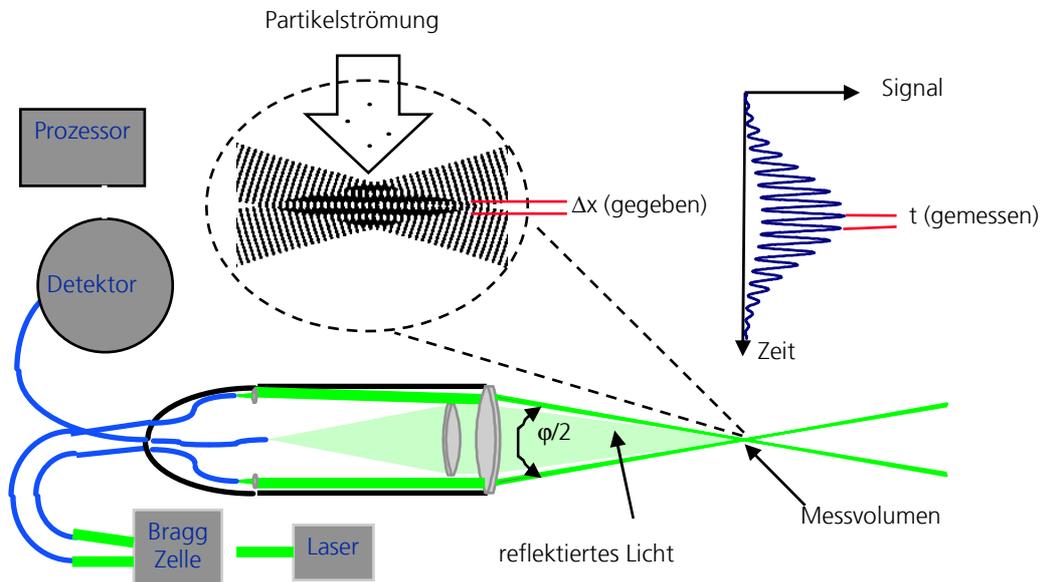


Abb. 18: Messprinzip eines Laser-Doppler Anemometers (LDA)

Durchquert ein Pulverpartikel das Messvolumen, wird in der integrierten Sende- und Empfangseinheit ein Streulichtsignal registriert, welches entsprechend der Verteilung der Lichtintensität des Interferenzebenenfeldes moduliert ist. Dieses Streulichtsignal wird in der Literatur auch als "Doppler-Burst" bezeichnet.

Zwischen dem gemessenen reflektierten Licht und dem ausgesandten Licht herrscht aufgrund des Doppler-Effektes ein Frequenzunterschied. Aus diesem Frequenzunterschied berechnet eine Auswertungssoftware die Geschwindigkeit. Der Abstand Δx der Interferenzstreifen ist eine Funktion der Wellenlänge λ des ausgesandten Laserstrahles und des Kreuzungswinkels φ (Gleichung 30).

$$\Delta x = \frac{\lambda}{2 \sin\left(\frac{\varphi}{2}\right)} \quad (43)$$

Δx : Abstand der Interferenzstreifen [m]
 λ : Wellenlänge [m]
 φ : Kreuzungswinkel [°]

Bei den durchgeführten Versuchen beträgt der Abstand der Interferenzebenen $\Delta x = 4,295 \mu\text{m}$, die Wellenlänge ist $\lambda = 514,5\text{nm}$ (grünes Licht) und der Winkel $\varphi = 6,86^\circ$. Das Messvolumen hat eine Länge von 4,207mm und einen Durchmesser von 0,252mm.

Vereinfacht betrachtet, stellt das Interferenzmuster eine Ebene aus einer Reihe von Gebieten maximaler und minimaler Lichtintensität dar. Ein sich durch dieses Muster

mit der Geschwindigkeit v_p bewegendes Teilchen reflektiert dann Streulicht, dessen Intensität mit der Frequenz f_D moduliert ist. Diese Frequenz wird Dopplerfrequenz genannt. Aus einer rein geometrischen Betrachtung kann man erkennen (Gl. 44), dass

$$f_D = \frac{v_p}{\Delta x} \quad (44)$$

ist. Daraus ergibt sich die Partikelgeschwindigkeit (Gl. 45):

$$v_p = \frac{f_D \lambda}{2 \sin \varphi} \quad (45)$$

f_D : Dopplerfrequenz [Hz]

λ : Wellenlänge [m]

Die Geschwindigkeit v ist neben der Abhängigkeit von der Doppler-Frequenz ausschließlich eine Funktion geometrischer (Schnittwinkel beider Laserstrahlen) und optischer (Wellenlänge des Lasers) Parameter, wodurch eine Kalibrierung des LDA-Systems nicht notwendig ist. Die Geschwindigkeitsrichtung ist mit der verwendeten Anordnung nicht messbar. Da das Pulver sich bei der Applikation in alle drei Raumrichtungen bewegt, z.T. bei Wirbelbildung und bei Rücksprühen sogar negative Geschwindigkeitsrichtungen in den Mittelwert einfließen wird die tatsächliche Geschwindigkeit der Partikel immer etwas größer sein als die gemessene, so dass die LDA-Messung nur die Größenordnung der Partikelgeschwindigkeiten liefert (siehe Abb. 19).

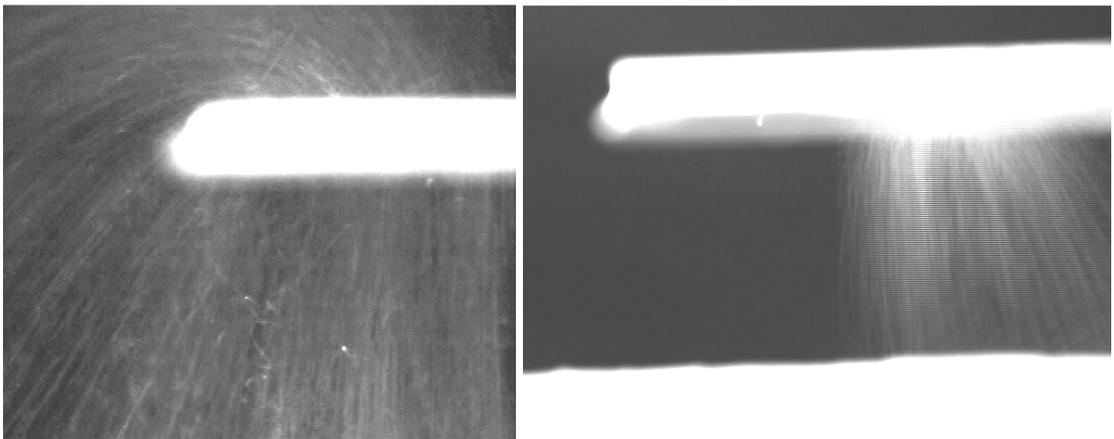


Abb. 19: Partikel folgen bei der Abscheidung den „Feldlinien“ im dreidimensionalen Raum (links), bei Überbeschichtung erfolgt „Rücksprühen“ (rechts)

Da Anzahl basierend Mittelwerte der Partikelgeschwindigkeiten gebildet werden, lehnen sich die erfassten Partikelgrößen an die Anzahl basierende Verteilung an. Das bedeutet, dass im Mittel sehr feine Partikel $< 1 \mu\text{m}$ (Abb. 16) erfasst werden, bei denen das Δv (siehe Abb. 14) annähernd 0 ist, so dass die Partikel nur noch geringfügig den

Feldkräften oder der Schwerkraft folgen, sondern überwiegend die Ionenwindströmung und ferner die Fluidisierluftströmung abbilden (Gleichung 24/25).

Die gemessenen Partikelgeschwindigkeiten liegen bei Gleichspannung und bei den in der Modellrechnung angenommenen Parametern im Bereich von ca. $0,3-0,4 \text{ m/s}$ (vgl. Gleichung 19 [36], Ionenwindgeschwindigkeit ca. $0,4 \text{ m/s}$), also geringfügig niedriger als die teilempirisch berechnete Ionenwindgeschwindigkeit (Erklärung s.o.).

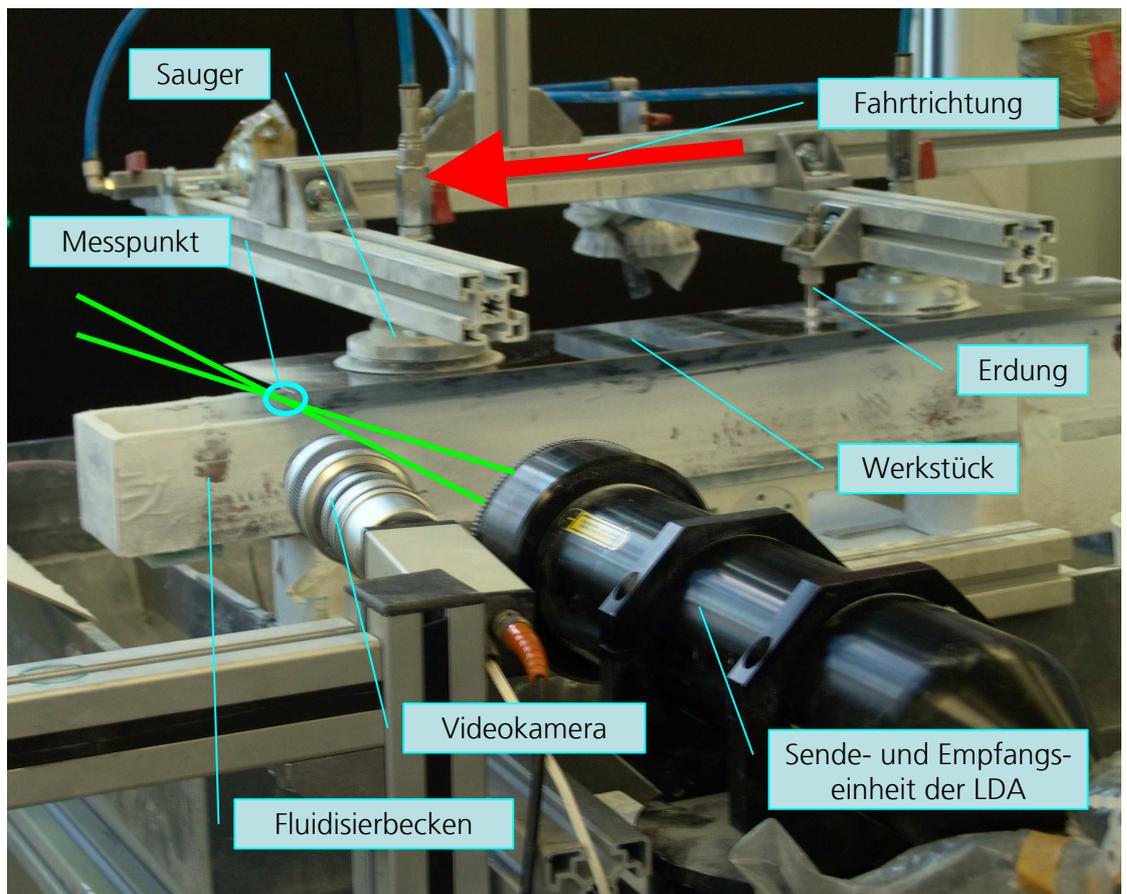


Abb. 20: Partikelgeschwindigkeitsmessung mittels LDA

Erste Messungen mit dem LDA (Abb. 20) zeigen Ergebnisse zum Einfluss der Fluidisierluftströmung auf die Partikelgeschwindigkeit und auf die Abscheideleistung. Während die Partikelgeschwindigkeiten sich bei höherer Fluidisierluftströmungsgeschwindigkeit kaum ändern, da diese eine untergeordnete Bedeutung im Kräfteverhältnis hat, erhöht sich die abgeschiedene Pulvermenge ($\text{kg}/(\text{m}^2\text{s})$) erheblich (Signifikanzniveau 95%). Offensichtlich können bei aufgelockertem Pulverfluid mehr Pulverpartikel pro Zeiteinheit aufgeladen werden. Die Raumladungsdichte dürfte in unmittelbarer Nähe der Elektrode verringert sein. Dies erleichtert das Aufladen größerer Pulvermengen/Zeiteinheit (Abb. 21). Aufgrund der stärkeren Turbulenzen wird bei höheren Fluidisierluftströmungsgeschwindigkeiten sogar eine mäßig geringere Partikelgeschwindigkeit vorgetäuscht.

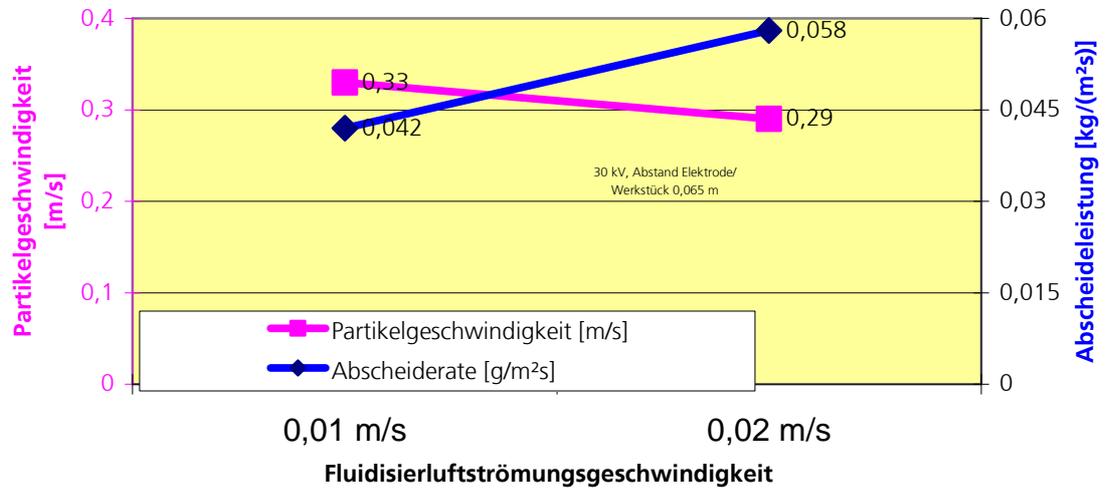


Abb. 21: Erhöhung der Abscheideleistung durch höheren Fluidisierluftvolumenstrom

Steigendes Potenzial der applizierten Pulverschicht Φ_P führt bei hohen applizierten Pulverschichten zu einer Verringerung der Feldstärke (Gleichung 16) und damit zu verringerten Partikelgeschwindigkeiten (Abb. 22). Aufgrund der höheren Feldstärke an Kanten/Spitzen ist dort die Partikelgeschwindigkeit höher als an Flächen (Abb. 23).

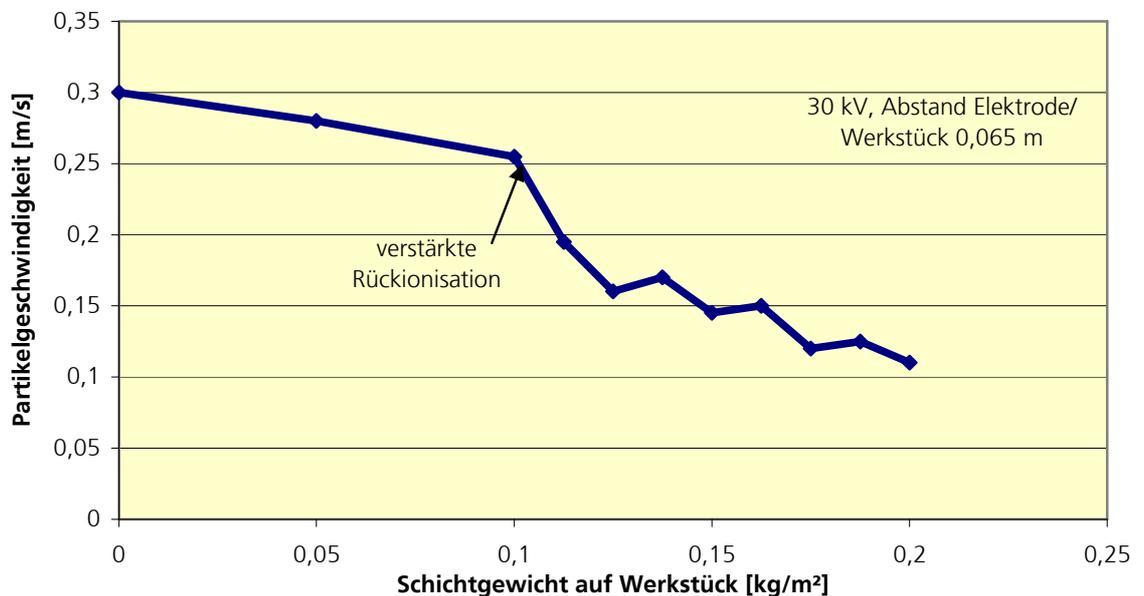


Abb. 22: Verringerung von Feldstärke und Partikelgeschwindigkeit bei steigendem Potenzial der applizierten Pulverschicht

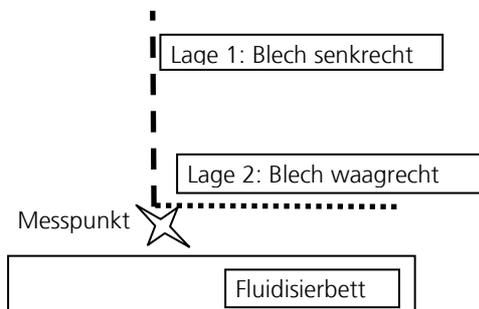
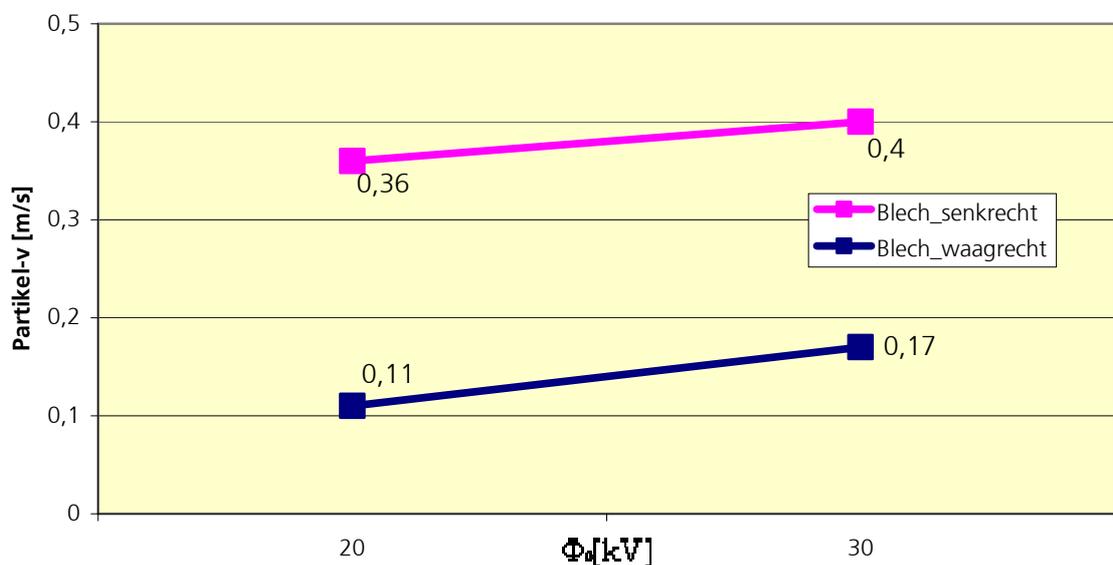


Abb. 23: Partikelgeschwindigkeiten an Flächen (geringe Feldstärke) und Kanten (Blech senkrecht, hohe Feldstärke) bei unterschiedlichem Potenzial Φ_0



Trotz des oben beschriebenen Effektes, dass bei der LDA-Messung eher feine Partikel für die Geschwindigkeitsmessung erfasst werden, kann der (eher auf die gröberen Partikel Einfluss nehmende) Feldkrafteinfluss mit der LDA-Messmethode quantifiziert werden, wobei größere Partikel eine höhere Geschwindigkeit erreichen (Abb. 24).

Der für die LDA verwendete Laser kann über eine Zylinder-Linse in eine Richtung aufgeweitet werden. Der „Laserlichtschnitt“ dient dem zweidimensionalen Schnitt einer an sich dreidimensionalen Sprühwolke und dient der Unterstützung der LDA-Untersuchungen, da mit diesem Werkzeug Strömungsrichtungen sichtbar gemacht werden können. Dabei können die meist inhomogenen Strömungen in der Sprühwolke beobachtet werden, die sehr entfernt an „Zerwellprozesse“ bei der elektrostatischen Flüssiglackapplikation erinnern, aber abweichend zum Fluidisierbett aus einer (Abb. 25) Überlagerung von Feldkraft und Coulomb'scher Abstoßung gleichnamig geladener Tröpfchen resultieren.

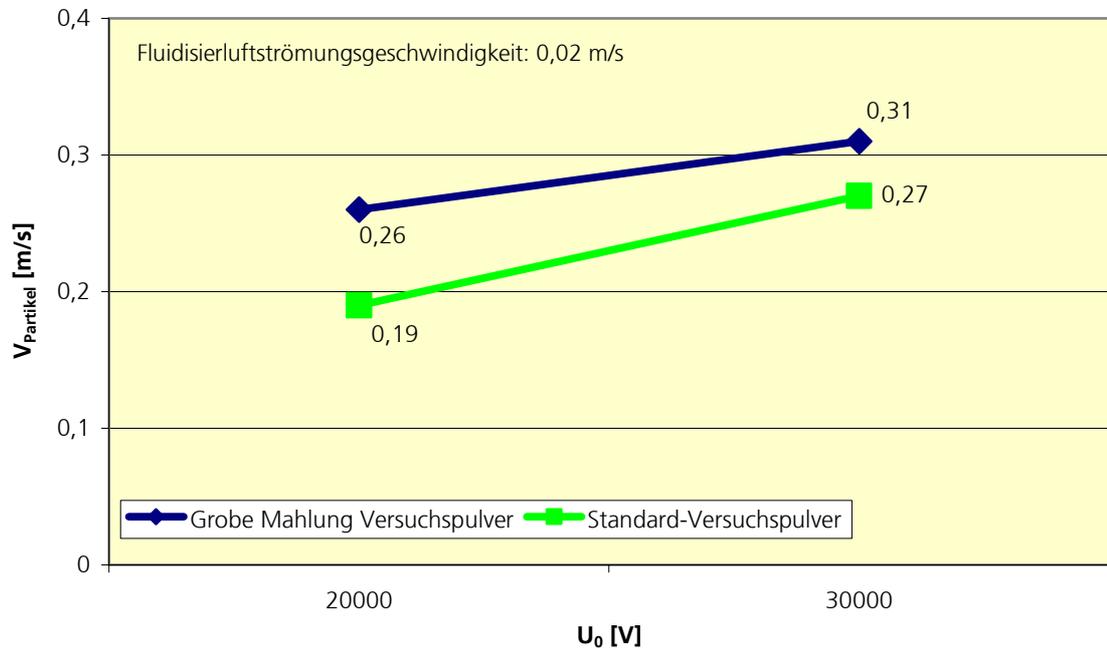


Abb. 24: Einfluss der Partikelgröße auf die Partikel-Geschwindigkeit

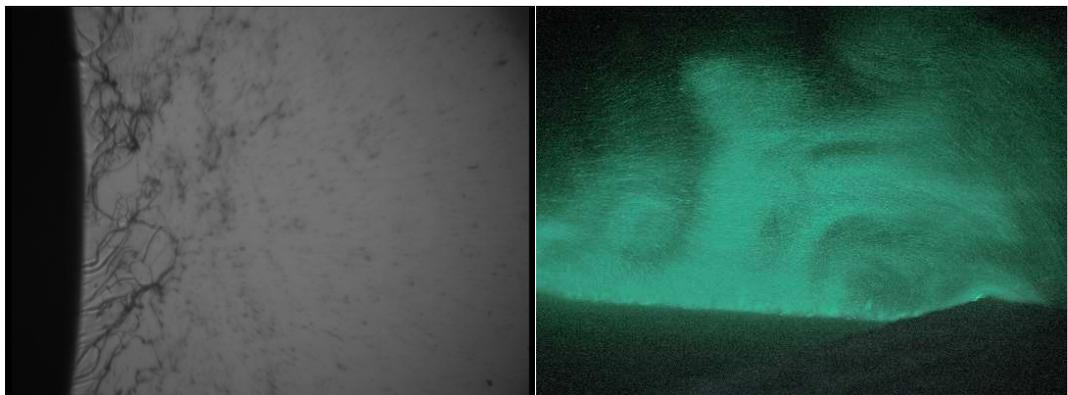


Abb. 25: Zerwellprozesse bei der elektrostatischen Flüssiglackzerstäubung (Hochrotationsglocke, links) und Pulver-Sprühwolke (elektrostatisches Fluidisierbett rechts)

Werden dabei statt des Pulverlacks feine Tröpfchen beispielsweise aus einer Nebelmaschine oder einem Raucherhörnchen (Aerosoltröpfchen) in die Strömung eingebracht, deren Größe noch ca. eine Zehnerpotenz unterhalb der Größe von Pulverlackpartikeln liegt, so kann dabei besser die reine Luftströmung aus Ionenwind und Fluidisierluft ohne Feldkraft beobachtet werden (siehe Abb. 14). Da im Gegensatz zur Pulverbeschichtung kein Potenzial von der am geerdeten Werkstück abgeschiedenen Schicht Φ_P (siehe Gleichung 16) ausgeht, weil die elektrisch leitfähigen Tröpfchen ein sehr kleines τ_E (Selbstentladezeitkonstante siehe Gleichung 38) besitzen und somit auch

keine Rückionisation stattfindet, können Prozesse über längere Zeitintervalle ohne Störeffekte beobachtet bzw. gefilmt werden (Abb. 26).

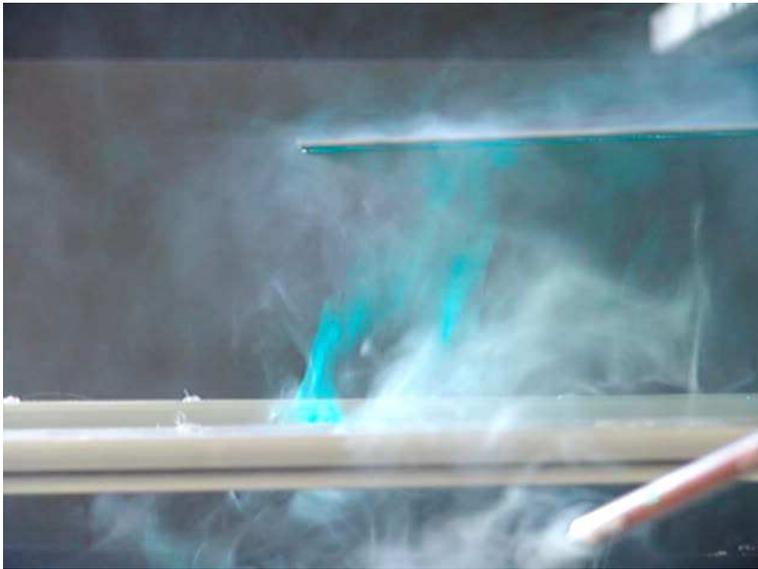


Abb. 26: Sichtbarmachung von Luftströmungen, insbesondere des Ionenwinds mittels Strömungsprüfröhrchen (Rauchröhrchen)

Modellbildung zur Simulation des elektrostatischen Fluidisierbetts mit gepulster Hochspannung

Ist die Spannung innerhalb einer Pulsationssequenz *angeschaltet*, dominiert die elektrische Feldkraft auf die Partikel-Relativgeschwindigkeit. Dabei erhält man für kleine Partikelgrößen geringe Geschwindigkeiten und für große Partikel hohe Geschwindigkeiten, die aufgrund der größeren Oberfläche höher aufgeladen sind. Dadurch reichern sich in der Sprühwolke bei eingeschalteter Hochspannungsquelle insbesondere sehr feine Partikel aufgrund ihrer sehr geringen Geschwindigkeit an (Abb. 11). Partikel, die erst am Ende der Anschaltzeit in den Einflussbereich der Elektrode kommen, werden evtl. aufgrund der kurzen Aufladezeit etwas geringer aufgeladen.

Die relative Partikelgeschwindigkeit innerhalb einer Pulsations-Sequenz bei *ausgeschalteter Elektrode* relativ zur Fluidisierluftströmungsgeschwindigkeit kann vereinfacht berechnet werden mit Gleichung 46:

$$\Delta v = \frac{-F_G}{6r\pi\eta} \quad (46)$$

Für die Absolutgeschwindigkeiten bei angeschalteter sowie ausgeschalteter Hochspannungsquelle gelten für die Ionenwindgeschwindigkeiten andere Gesetzmäßigkeiten als beim Einsatz der Gleichspannung, da der Ionenwind aufgrund seiner Trägheit die Pulsation nicht abbildet, sondern schon bei Frequenzen > 3 Hz visuell eine nicht pulsierende Strömung darstellt. Die für die Simulation für pulsierende Hochspannung zu komplexe inkompressible Navier-Stokes-Gleichung [35, S. 262], mit der grundsätzlich die Ionenwindgeschwindigkeit im Gegensatz zur teilempirischen Gleichung 19 [36] für numerische Simulationen dreidimensional abgebildet werden kann, wird

Thema zukünftiger Arbeiten sein. Die Ergebnisse der Laser-Doppler-Anemometrie, bei der (beim elektrostatischen Fluidisierbett) überwiegend die Ionenwindgeschwindigkeit abgebildet wird, zeigt, dass die Partikelgeschwindigkeit in Abhängigkeit zur Pulsbreite steigt (Abb. 27),

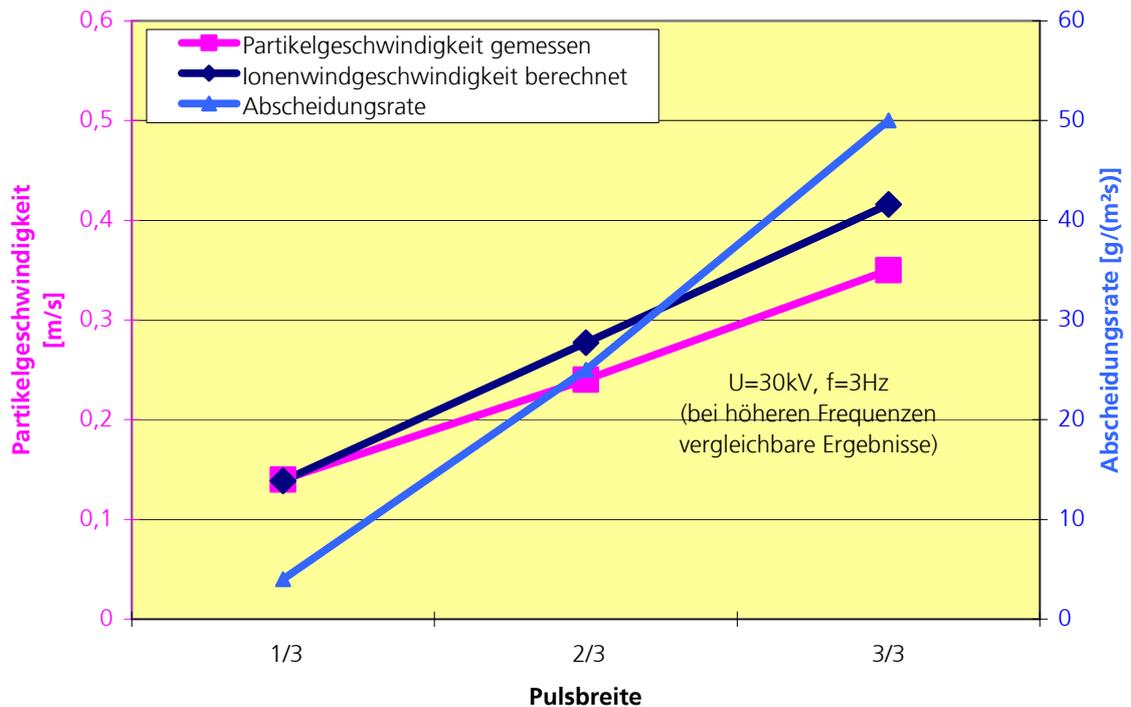


Abb. 27: Partikelgeschwindigkeit (LDA-Messung, Partikelanzahl basierend) und Ionenwindgeschwindigkeit (berechnet s.u.) sowie Abscheidungsrate in Abhängigkeit zur Pulsbreite

so dass vereinfacht (ohne aufwändige Implementierung der Navier-Stokes-Gleichung) der Ionenwind einfluss auf die Partikelgeschwindigkeit anlehnend an Gleichung 19 (bei der bei einer räumlich gemittelten Feldstärke von ca. 160.000 V/m ein Fallbeispiel gerechnet wurde) teilempirisch (Gleichung 47, eingebunden in die FEM) dargestellt werden kann als

$$v_{iw} = \sqrt{\frac{\epsilon_0}{\rho_L} \cdot \overline{E}} \quad (47)$$

ρ_L Dichte der Luft (1,2 kg/m³)

\overline{E} : zeitlich gemittelte Feldstärke über die zeitlich gemittelte Spannung U_0 als Fläche unter der Kurve siehe Abb. 26 mit $\overline{U}_0 = 10$ kV

Je höher die gemittelte Feldstärke, desto höher ist auch die flächenbezogene Abscheiderate pro Zeiteinheit [g/(m²s)](Abb.28), so dass beim Einsatz kleiner Pulsbreiten für gleiche Abscheideraten das Fluidisierbett entweder größer dimensioniert werden muss, oder die Anzahl an Elektroden/Fläche wird erhöht.

In den Darstellungen wird angelehnt an das Fallbeispiel *mit Raumladungen* und einem Abstand Elektrode/Partikel von 10 mm bei der Aufladung von einer Sättigungsaufladung der Partikel ausgegangen. Die errechnete Ionenwindgeschwindigkeit stimmt gut mit der im LDA gemessenen Anzahl basierenden ($D(n, 0.5) < 1 \mu\text{m}$, $\Delta v \sim 0$) Partikelgeschwindigkeit überein, sie liegt etwas höher, da die Geschwindigkeitsrichtung vom LDA nicht erfasst wird.

Die berechneten Partikelgeschwindigkeiten über das gesamte Partikelgrößenspektrum sind in Abb. 29 dargestellt. Die Volumen basierenden Mittelwerte ($D(v, 0.5) \sim 31 \mu\text{m}$) liegen etwas höher als die im LDA gemessenen, da bei größeren Partikeln die Feldkraft die Partikelgeschwindigkeit erhöht. Insgesamt werden beim Einsatz gepulster Hochspannung über das gesamte Spektrum gleichmäßigere Partikelgeschwindigkeiten erzielt, so dass sich der Feinanteil in der Sprühwolke nicht so sehr anreichern kann. Bei *ausgeschalteter Elektrode* reichert sich tendenziell sogar grobes Pulver in der Sprühwolke an (Abb. 30) und feine Anteile werden verstärkt abgeschieden.

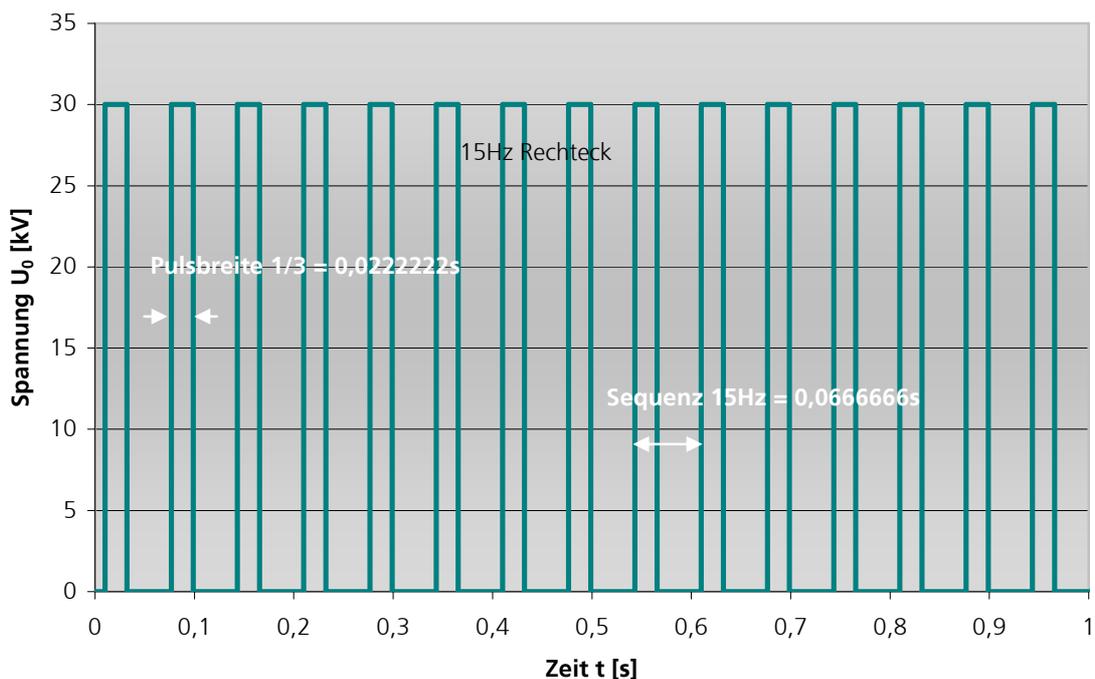


Abb. 28: Rechtecksignal mit einer gemittelten max. Spannung von $\overline{U_0} = 10 \text{ kV}$

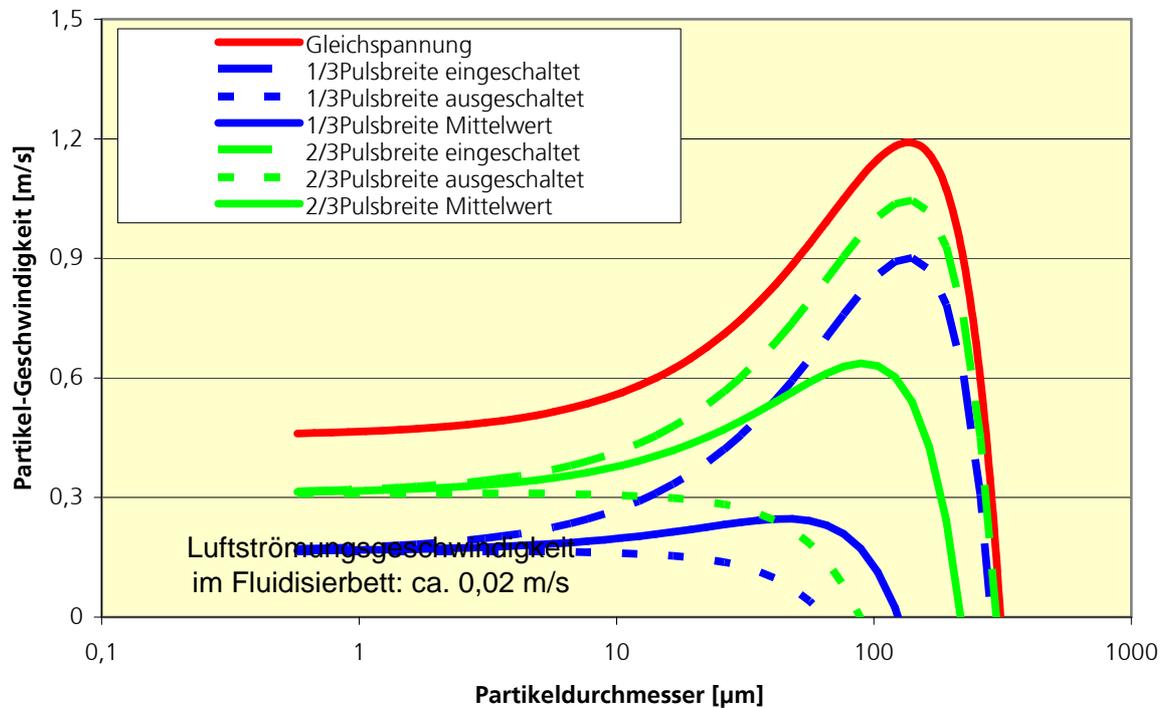


Abb. 29: berechneten Partikelgeschwindigkeiten über das Partikelspektrum

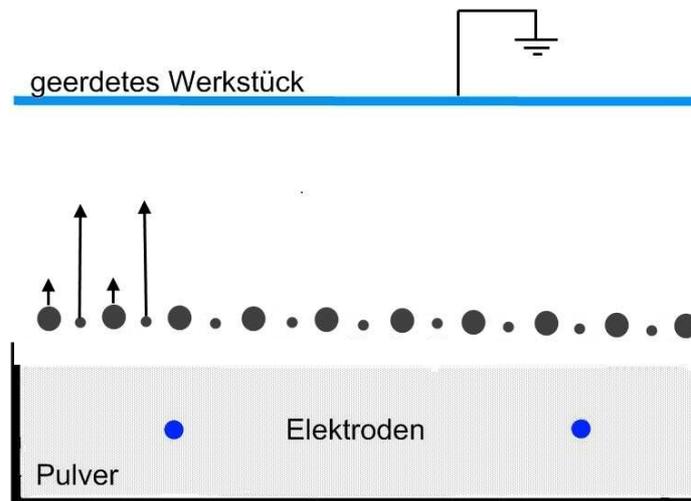


Abb. 30: Partikelgeschwindigkeit bei ausgeschalteter Elektrode

Die bei abgeschalteter Hochspannungsquelle durch die Fluidisierluftströmung und den durch die Trägheit weiterhin vorhandenen Ionenwind kontinuierlich nachgelieferten Partikel hin zum Werkstück werden bei geringem Abstand der Partikel zum Werkstück durch die Coulomb'sche Kraft abgeschieden. Hierzu muss die Coulomb'sche Kraft (Gleichung 26) im Falle des elektrostatischen Fluidisierbetts größer sein als die Schwerkraft. Das geschieht je nach den dielektrischen Eigenschaften der Partikel und

der Partikelgröße sowie der Partikeldichte im Bereich von < 1 mm Abstand Partikel/Werkstück und lässt sich durch $F_G=F_C$ berechnen (Gleichung 48):

$$a = \sqrt{\frac{q_1 \cdot q_2}{\epsilon_r \cdot F_G \cdot 4\pi \cdot \epsilon_0}} \quad (48)$$

Durch den sich fortsetzende Prozess der Abscheidung insbesondere feiner Partikel während der Ausschaltphase werden die feinen Partikel aus der Raumladungswolke entfernt. Dadurch minimiert sich die Raumladung, so dass beim Einschalten zeitweilig eine höhere Feldstärke zu höherer Partikelaufladung führt. Dieser Sachverhalt lässt sich aufgrund der komplexen zeitlichen und räumlichen Zusammenhänge nur noch durch numerische Simulation, nicht mehr durch einfache Algorithmen darstellen. Die Nutzung des Ionenwinds, z.B. bei der Chipkühlung oder im Luft- und Raumfahrtbereich gewinnt in jüngster Zeit zunehmend an Bedeutung [45]. Bei der elektrostatischen Pulverbeschichtung stellen zu hohe Ionenwindgeschwindigkeiten einen parasitären Effekt dar. An Werkstückkanten entstehen beim Einsatz von Gleichspannung hohe Ionenwindgeschwindigkeiten durch Ausbildung einer Gegenkorona. Dadurch wird die Kante unzureichend beschichtet (Abb. 31 links). Wird zur Reduzierung der Ionenwindgeschwindigkeit die Feldstärke erniedrigt, dann wird die Kante aufgrund des auf die Partikel einwirkenden zunehmenden Schwerkrafteinflusses ebenfalls unterbeschichtet (Abb. 31 rechts, siehe Simulationsergebnisse, z.B. Abb. 56).

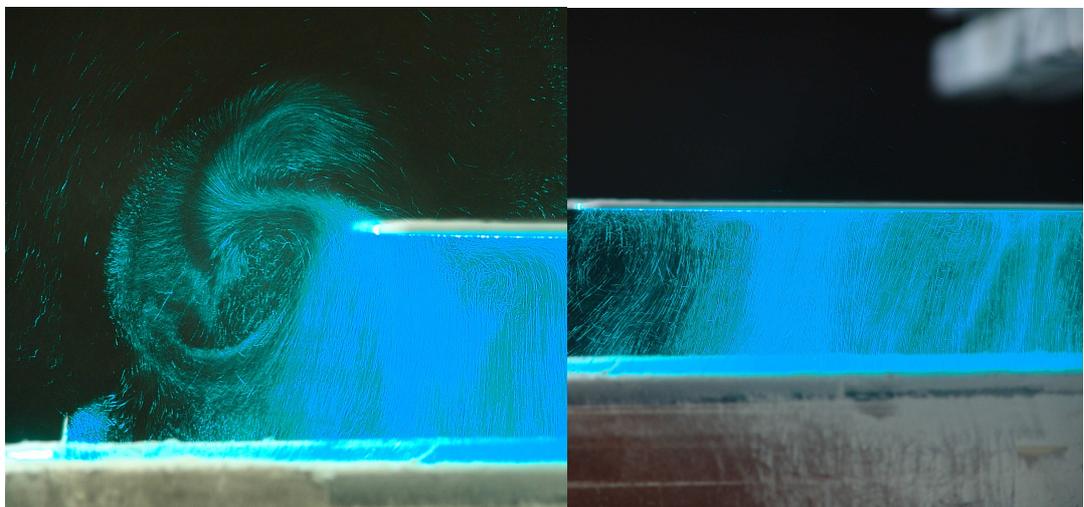


Abb. 31: Laserlichtschnittaufnahme; starke Wirbelbildung beim Einsatz von Gleichspannung durch Ausbildung einer Gegenkorona *bei hoher Feldstärke (links)*, *bei reduzierter Feldstärke (rechts)* durch Schwerkrafteinfluss minimierte Kantenabdeckung

Die Verringerung der Ionenwindgeschwindigkeit durch Einsatz von gepulster Hochspannung beim elektrostatischen Fluidisierbett führt zu einer verbesserten Abscheidung von Partikeln an Kanten und Spitzen. Bei gleicher, zeitlich gemittelter \bar{E} , aber unterschiedlicher Frequenz ist die flächenbezogene Abscheideleistung vergleichbar hoch. Die Partikelgeschwindigkeiten bei unterschiedlichen Frequenzen weisen keine

signifikanten Unterschiede auf. Der Mittelwert der LDA-Messung resultiert aber aus Einzelwerten mit häufig sogar umgekehrter Strömungsrichtung (negative Anteile). Bei gepulsten Spannungssignalen werden kleine Wirbel in der Sprühwolke erzeugt, die hohe Negativanteile bewirken, sich aber auf die applizierte Schichtdickengleichmäßigkeit vorteilhaft auswirken. Bei höherer angelegter Spannung ist die Partikelgeschwindigkeit höher (Abb. 32/33).

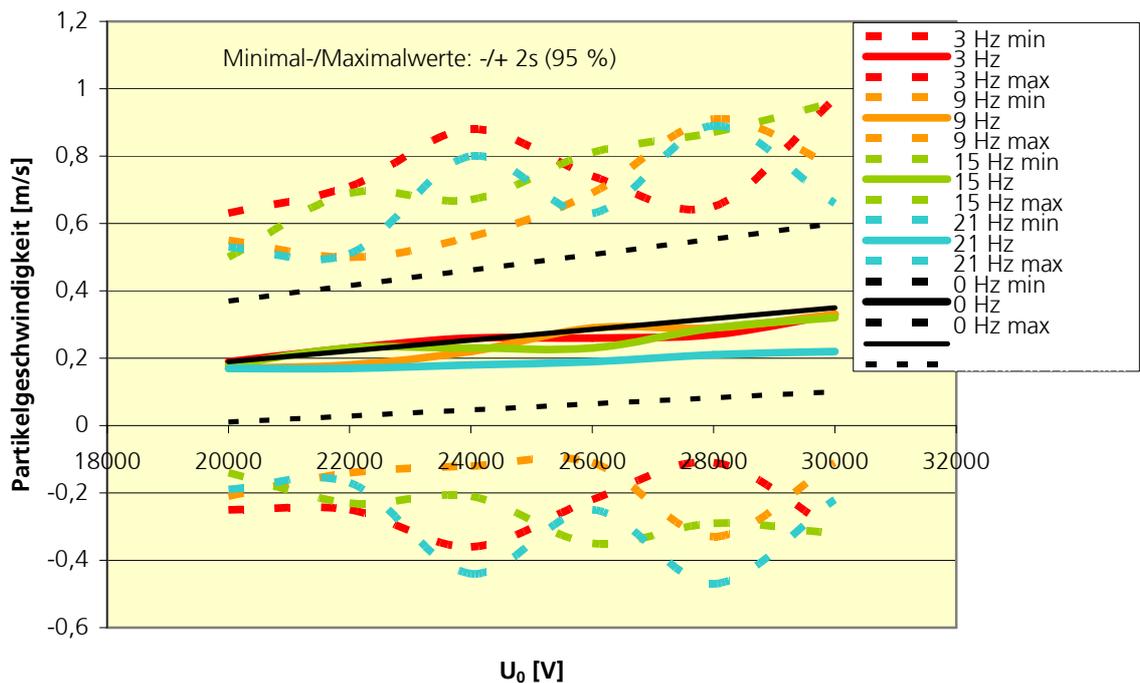


Abb. 32: Bandbreite der Partikelgeschwindigkeiten in Abhängigkeit vom angelegten Potenzial bei unterschiedlichen Frequenzen der gepulsten Hochspannung

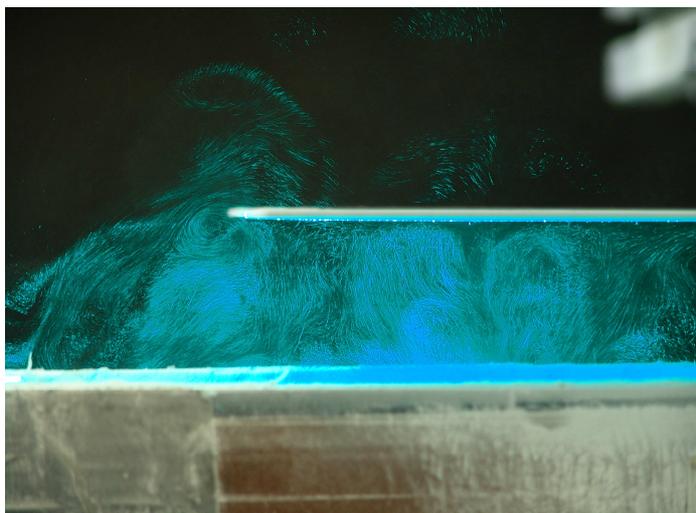


Abb. 33: 15 Hz gepulste Hochspannung mit erkennbaren kleinen Wirbeln guter Beschichtungsgleichmäßigkeit auch an Kanten

Um die Gleichmäßigkeit der Kantenbeschichtung zu erhöhen, kann eine passive (gedröht) Elektrode im Randbereich eingesetzt werden, falls die Fördertechnik dies zulässt. Diese muss einen so geringen Durchmesser haben, dass dort eine „Gegenkoro-

na“ einsetzt, wie sie (blau leuchtend) am geerdeten Draht rechts sichtbar wird [46] (Abb. 34). Dadurch wird der Sprühstrahl sichtlich in Richtung Kante abgelenkt (Abb. 35). Durch abwechselndes Erden bzw. Nicht-Erden des dünnen Drahtes kann mittels eines einfachen Relais eine Pulsation erzeugt werden. Ein bisher ungeklärter Effekt, bei dem als Spannungssignal eine Rechteckspannung einen Offset (Nulldurchgang in die andere Polarität) macht, dabei aber die Koronaeinsatzspannung nicht überschreitet, bewährt sich als positiv hinsichtlich der Kantenbeschichtung. Die besten Ergebnisse werden mit einer Pulsbreite von 2/3 und höherer Frequenz (z.B. 15 Hz) erzielt (Abb. 36).



Abb. 34: Koronaelektrode, blau leuchtend (links) und geerdeter, dünner Draht mit (blau leuchtender) Gegenkorona (rechts)

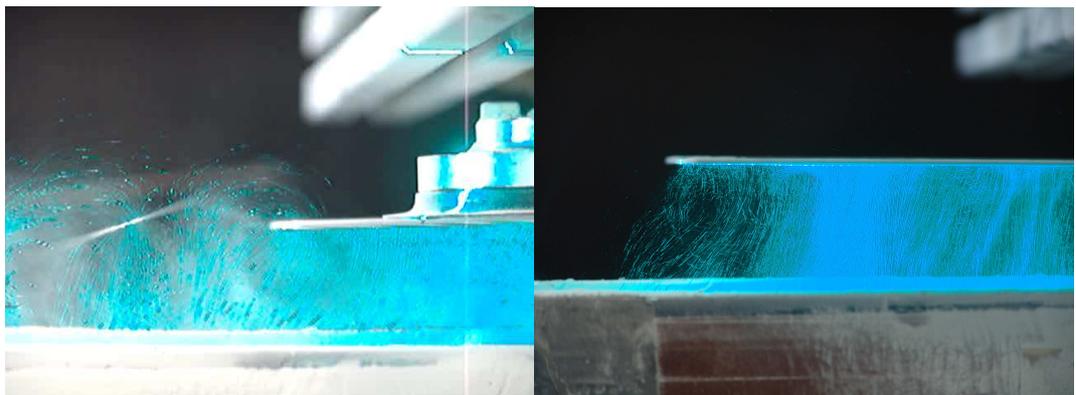


Abb. 35: Einsatz einer passiven Elektrode bei guter Kantenbeschichtung, rechts ohne passive Elektrode Kante unzureichend beschichtet.

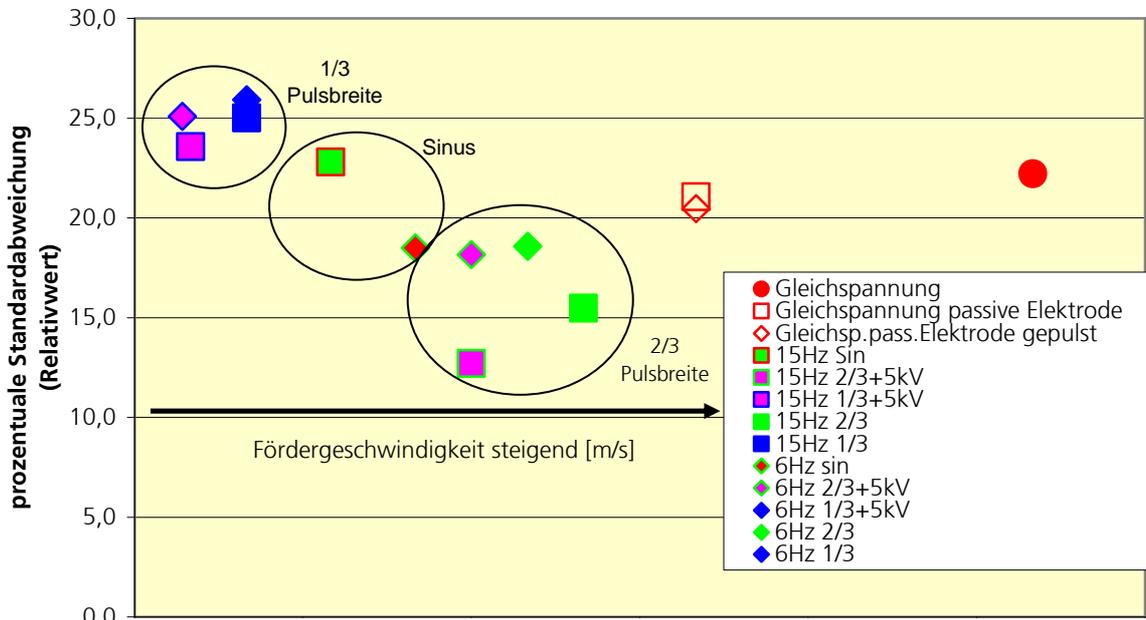


Abb. 36: Schichtdickenverteilung, Variation von Signalform und Anordnungen

Entwicklung einer Messmethode zur Bestimmung der Entladezeit von Pulvern

Bei der „Charge Decay“-Messmethode wird das Potenzial über die Zeit mittels einer Feldmühle nach definierter Aufladung des Schüttguts durch eine Korona-Elektrode gemessen. Da im Standard-Messgerät („John Chubb“-Messgerät [47], siehe auch [48]) eine Gleichspannungsquelle integriert ist, ist es für Messungen mit variablen Spannungssignalen nicht einsetzbar. Hierzu muss eine neuentwickelte Versuchsanordnung mit einer gekapselten, hochspannungsbeständigen Feldmühle eingesetzt werden.

Dabei können beliebige Hochspannungserzeuger-Typen mit unterschiedlichen Spannungssignalen (Gleichspannung / Wechselfeldspannung / pulsierende Gleichspannung / Sinus-Kurven/Rechtecksignale etc.) adaptiert werden. Das Signal der Feldmühle wird über ein Oszilloskop in den Computer eingelesen. Aus den Eingangssignalen werden Maximum und τ -Werte ermittelt. Ebenso ist eine Auswertung der Rückionisationsfläche durch bildverarbeitende Methoden möglich. Dabei wird mithilfe eines Bildverarbeitungsprogramms die Rückionisationsfläche bestimmt und das Verhältnis Probenoberfläche zu Rückionisationsfläche berechnet (Abb. 37).

$$\text{Rückionisationsneigung} = \frac{\text{Rückionisationsfläche}}{\text{Gesamtoberfläche}} \%$$

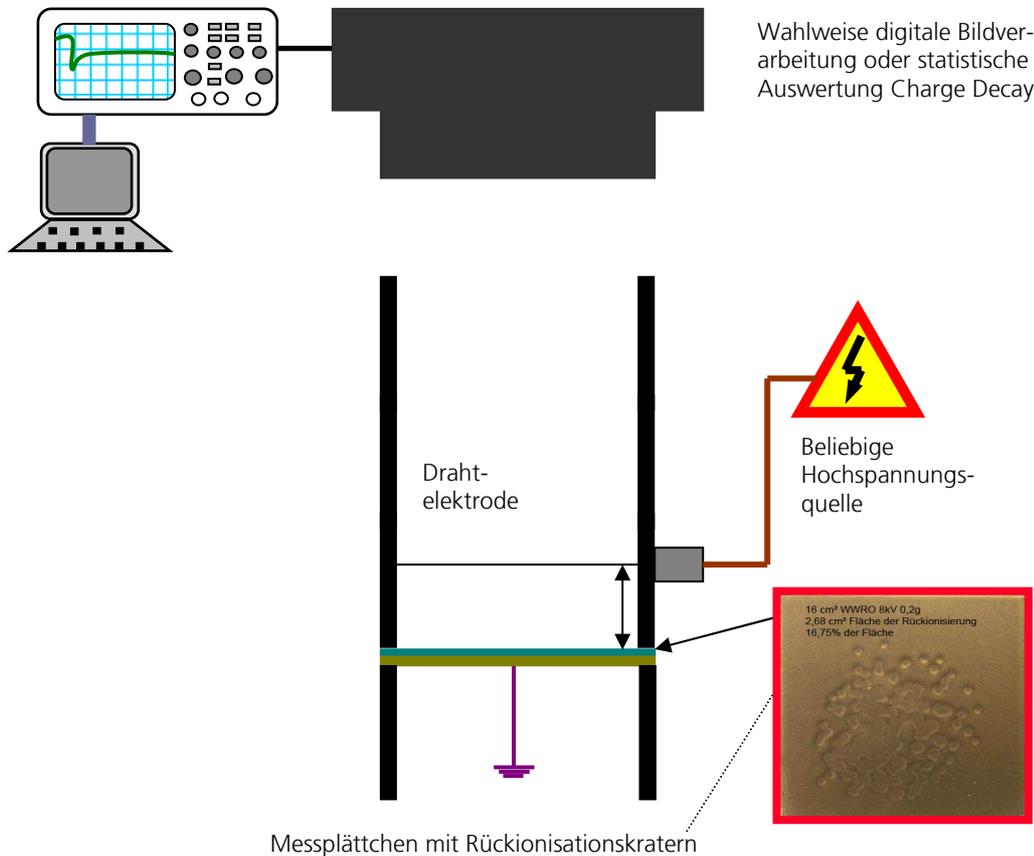


Abb. 37: Prinzipielle Bauweise Versuchs-Messanordnung

Bereits im Vorfeld wurden am Fraunhofer IPA vielversprechende Untersuchungen mit gepulster Hochspannung und deren Einfluss auf Partikelaufladung und Rückionisation gemacht. Die besten Ergebnisse wurden bei Frequenzen zwischen 3 und 20 Hz erzielt, bei 50 Hz „Steckdosenwechselspannung“ wurden keine Vorteile gegenüber Gleichspannung gefunden. Zusätzlich zu den oben erwähnten Messmethoden wurde eine einfache Haftungsprüfung entwickelt.

Entwicklung einer einfachen Haftungsprüfung für uneingebrannte Pulverschichten

Die Haftung der uneingebrannten Pulverschicht am Werkstück korreliert mit der Aufladung der Pulverpartikel. Vor diesem Hintergrund wurde eine einfache Messmethode entwickelt, bei der das Probeblech mit der beschichteten Seite nach unten auf einen Profilrahmen gelegt und ein definiertes Gewicht aus definierter Höhe auf das Probeblech (mit der pulverbeschichteten Seite unten) mit definierter Energie (4,3 J) fallen gelassen wurde (Abb. 38). Dabei wird das Pulver je nach Haftungsgrad mehr oder weniger stark abgeschlagen. Durch Wiegen des Bleches vor und nach dem Abschlagen kann die Pulverrestmenge relativ zur aufgetragenen Pulvermenge berechnet werden. Um unterschiedliche Versuchsvarianten miteinander vergleichen zu können, muss dabei immer die gleiche Pulvermenge bezogen auf den m² appliziert werden

(z.B. 100 g/m^2). Dies wurde i.d.R. in den Versuchen durch Anpassung der Fördergeschwindigkeit über das Fluidisierbett erreicht.

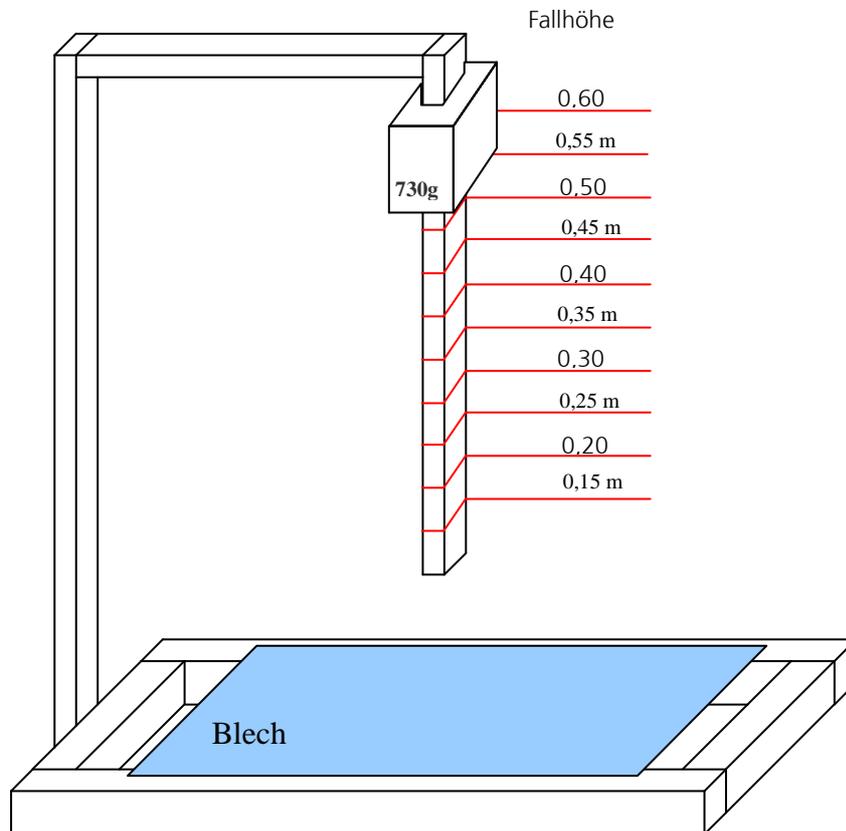


Abb. 38: Haftungsprüfung für uneingebrannte Pulverlackschichten

Meilenstein M4: Erarbeitung von Lösungskonzepten für komplexe dreidimensionale Werkstücke (alle Firmen), abgeschlossen Dezember 2008

Aufbau einer zusätzlichen Versuchsanlage für begleitende Versuche

Die Grundlagenversuche werden nicht mit der für anwendungsorientierte Versuche vorgesehenen Roboterversuchsanlage sondern mit einer Linearschiene und einer höhenverstellbaren Saugheberteknik durchgeführt, die mit Boschprofilen aufgebaut ist (Abb.39).

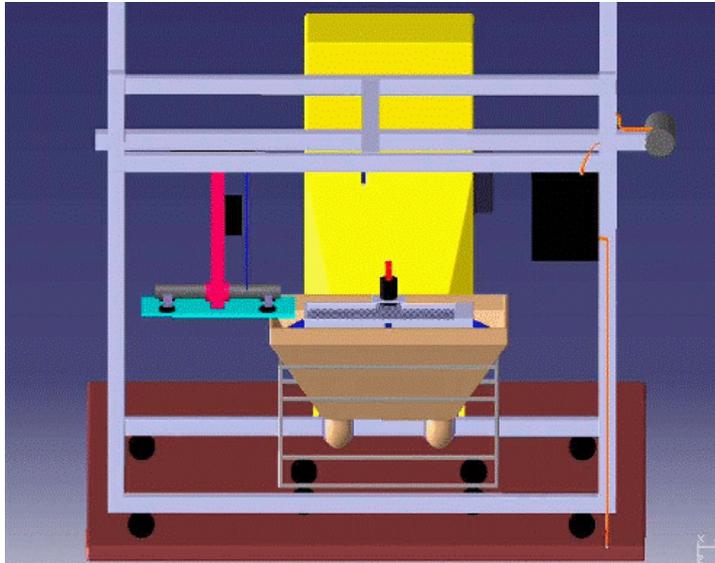


Abb. 39: Versuchsanlage für Grundlagenversuche, CAD (oben), Foto (unten), gemeinsam aufgebaut mit Fa. Meeh, Fa. Schnier, Fa. Durst



Elektrostatisches Fluidisierbett für begleitende Versuche und als Basis für zukünftige Simulationen

Im Fluidisierbett sind 5 Hochspannung führende Elektroden quer zur Förderrichtung im Abstand von 35 mm und zu einer geerdeten, nicht Hochspannung führenden Elektrode 70 mm (für spezielle Versuchsreihen) angeordnet (Abb. 40).

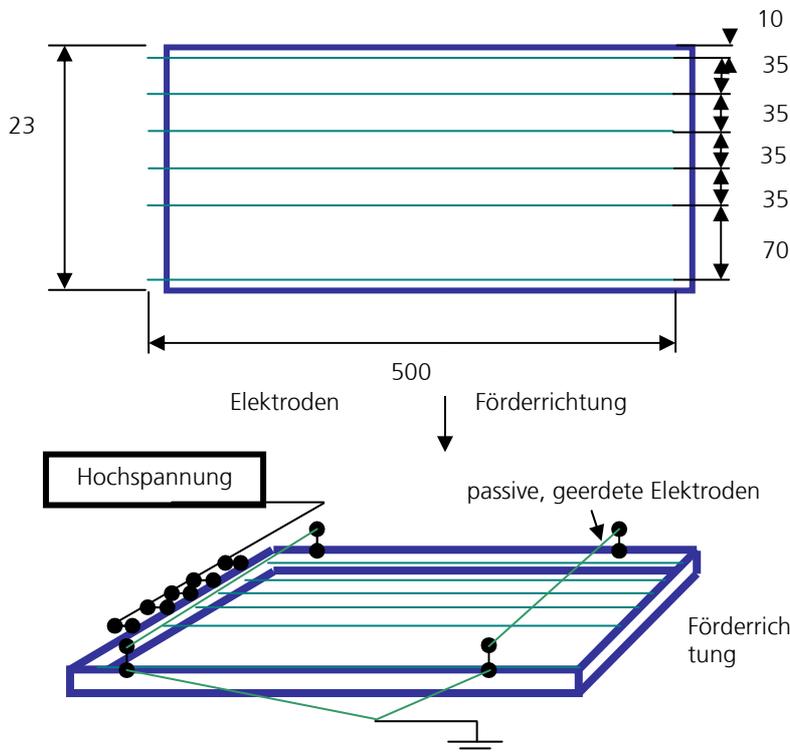


Abb. 40: Elektrodenanordnung im Fluidisierbett (Sinterbodenfertigung: Fa. Durst)

Als Hochspannung kommen Gleichspannung sowie verschiedene pulsierende Signale (überwiegend negativer Polarität) zum Einsatz. Beim Offset und Nulldurchgang in die positive Polarität darf die Koronaeinsatzspannung nicht überschritten werden, da sonst positiv und negativ geladene Partikel starke Orangenhaut in der Pulverlackschicht bilden (Abb. 41).

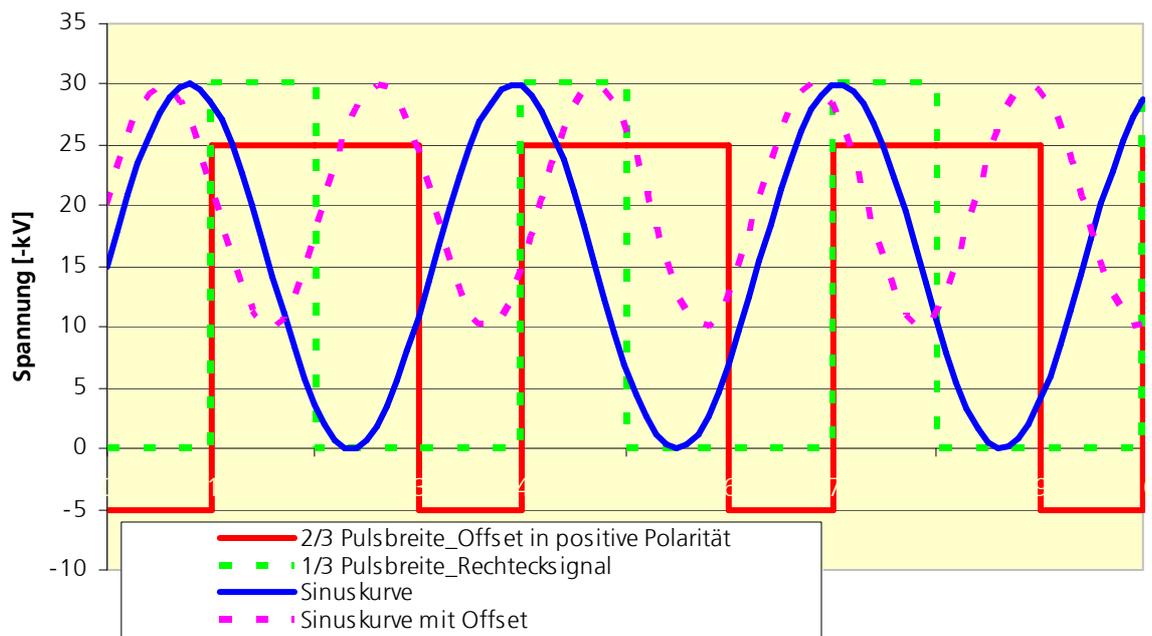


Abb. 41: in den Versuchsreihen verwendete Spannungssignale

Durchführung von begleitenden Beschichtungsversuchen

Durch Anpassung des Hochspannungswertes an den Abstand Elektrode/Werkstück wird die Feldstärke auf einen Durchschnittswert von 330.000 V/m bei allen Versuchen konstant gehalten. Die Fördergeschwindigkeit wird so variiert, dass bei allen Versuchen ein Schichtgewicht von ca. 100 g/m² appliziert wird, da sonst die Werte aus der Haftungsprüfung nicht vergleichbar wären.

Zusätzlich werden geerdete passive Elektroden eingesetzt. Die Elektroden im Fluidisierbett werden dabei an Gleichspannung geschaltet. Um bei diesen Versuchen ebenfalls eine Pulsation zu erzeugen, werden die passiven Elektroden über ein Relais bei einer Frequenz von ca. 5 Hz wechselweise geerdet bzw. nicht geerdet. Beim geringen Abstand Elektrode/Werkstück (30 mm) werden hinsichtlich der Haftung des Pulvers im uneingebrannten Zustand folgende Ergebnisse erzielt (Abb. 42).

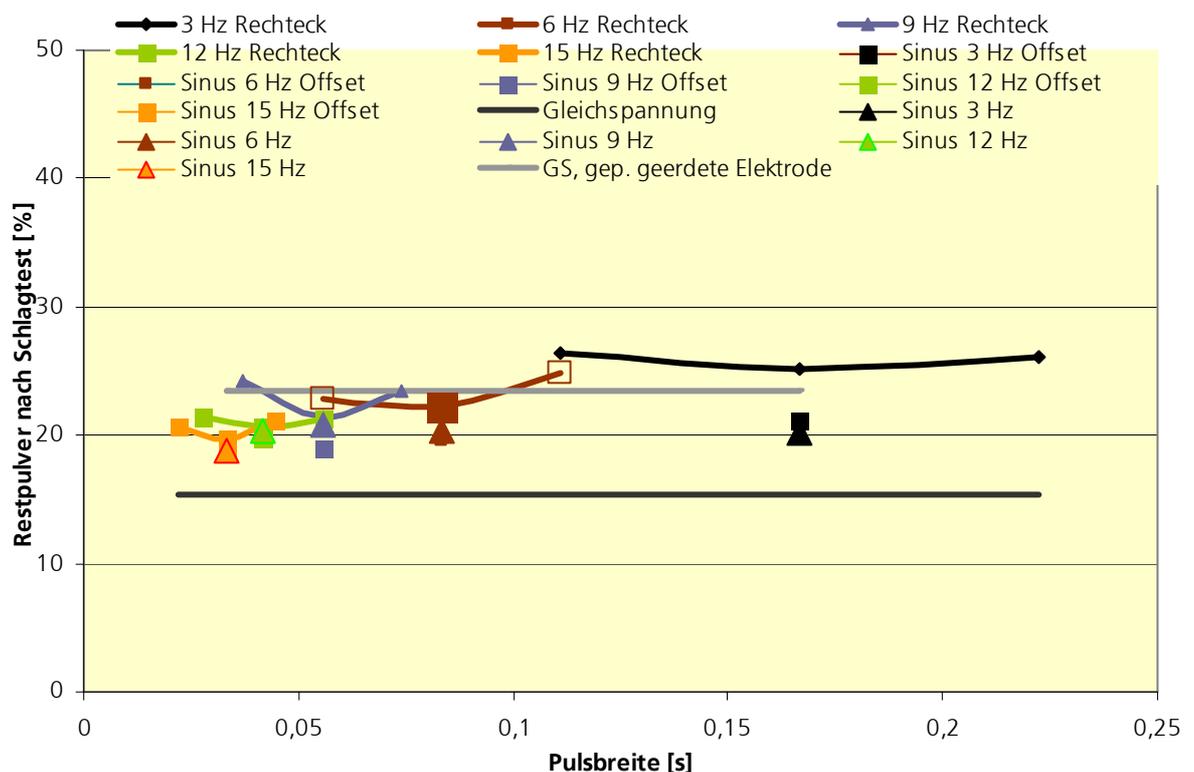


Abb. 42: Ergebnisse Haftungsprüfung bei 30 mm Abstand Elektrode/Werkstück

Durch verminderte Raumladung und dadurch verbesserte Aufladung der Partikel ist das Haftungsergebnis, das mit der Pulveraufladung korreliert, (Restpulver [%]) bei gepulster Hochspannung deutlich besser als beim Einsatz von Gleichspannung. Die Haftungsergebnisse bei Sinuskurven bzw. Sinuskurven mit Offset sind zwar besser als die Ergebnisse mit Gleichspannung, liegen aber unter den mit gepulster Hochspannung erzielten Werten, da innerhalb einer Sequenz teilweise geringe Feldstärken zu minimierter Aufladung führen. Beim Einsatz des gepulsten passiven Ionisators werden ähnliche Werte erzielt wie bei gepulster (aktiver!) Hochspannung.

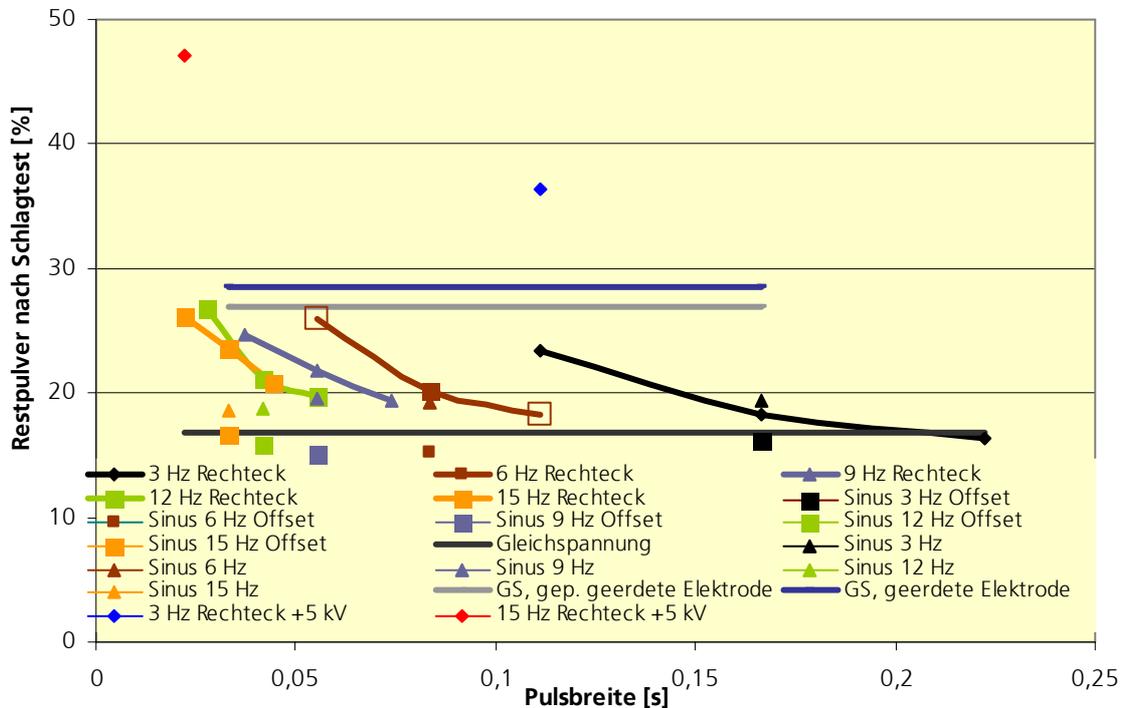


Abb. 43: Ergebnisse Haftungsprüfung bei 60 mm Abstand Elektrode/Werkstück

Bei dem mittleren Abstand Elektrode/Werkstück von 60 mm (Abb. 43) ist das Haftungsergebnis bei gepulster Hochspannung ebenfalls deutlich besser als beim Einsatz von Gleichspannung. Die Haftungsergebnisse bei Sinuskurven sind bei diesem Abstand Elektrode/Werkstück nur noch geringfügig besser als bei Gleichspannung, bei Sinuskurven mit Offset sind die Ergebnisse sogar schlechter. Beim Einsatz des gepulsten und ungepulsten passiven Ionisators werden sogar höhere Werte erzielt als bei gepulster (aktiver!) Hochspannung. Bei geringen Pulsbreiten (1/3) werden insgesamt bessere Haftungsergebnisse erzielt. Beim Einsatz von Rechtecksignalen wie in Abb. 38 rote Kurve (Nulldurchgang in positive Polarität auf + 5 kV) wird überraschend das beste Versuchsergebnis erzielt. Eine mögliche Erklärung hierfür ist die Verringerung der Raumladungsdichte und dadurch verbesserte Aufladung der Partikel, da sich in der Sprühwolke vermehrt grobe Partikel befinden werden, die sich bei positiver Hochspannung zur positiven Elektrode verstärkt zurückbewegen (grobe Partikel folgen verstärkt den elektrostatischen Kräften). Eine Anreicherung grober Partikel in der Sprühwolke führt zu einer Minimierung der Raumladung, da eher die kleinen und langsamen Partikel zur Raumladung beitragen.

Als zusätzliche Referenz werden noch Haftungsprüfungen an mit Korona-Pistole und Tribo-Pistole beschichteten Blechen durchgeführt. Durch die verringerte Raumladungsdichte bei moderater Abscheideleistung, erhöht sich die Aufladung der Partikel und damit der Haftungswert (Abb. 44).

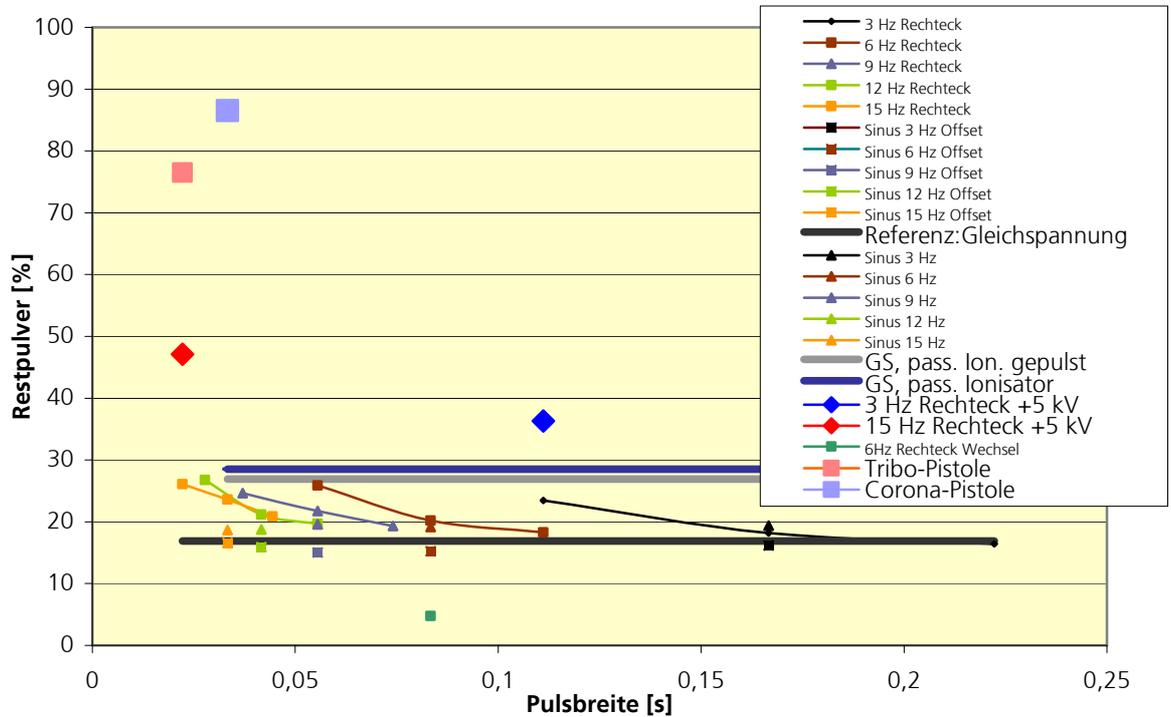


Abb. 44: Ergebnisse Haftungsprüfung bei 60 mm Abstand Elektrode/Werkstück, Vergleich mit Sprühpistolen

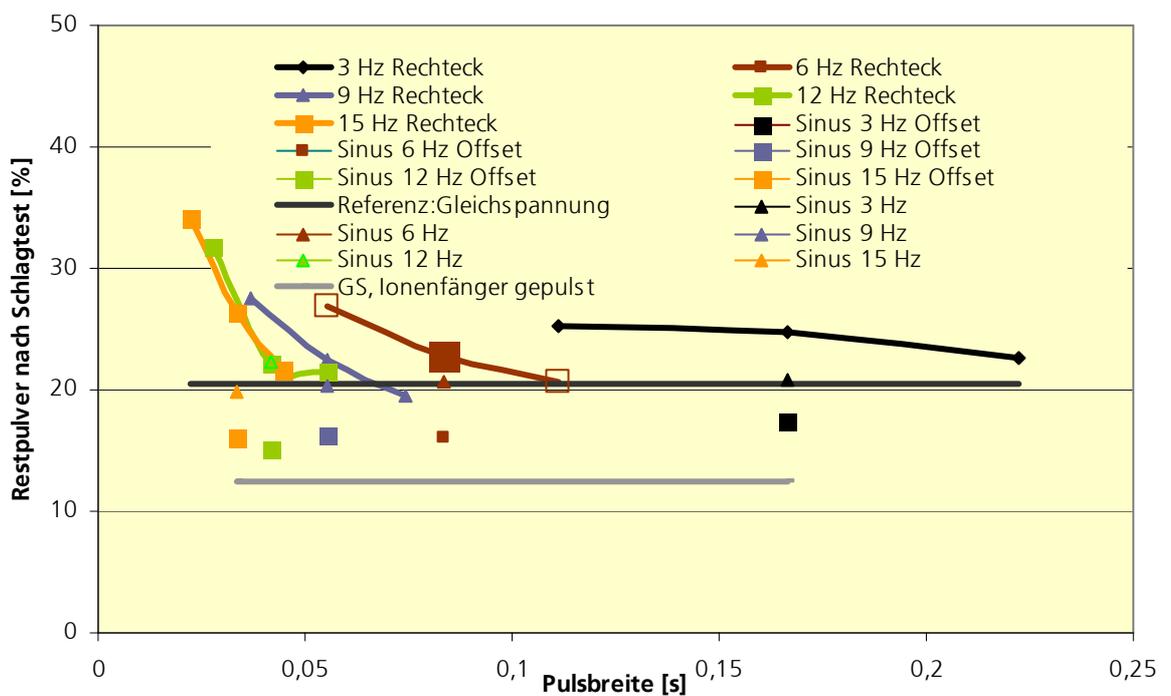


Abb. 45: Ergebnisse Haftungsprüfung bei 90 mm Abstand Elektrode/Werkstück

Bei dem hohen Abstand Elektrode/Werkstück von 90mm (Abb. 45) ist das Haftungsergebnis beim Einsatz des gepulsten passiven Ionisators gering, da die Abstände der passiven Elektroden nicht an den höheren Sprühabstand angepasst sind. Die Haftungsergebnisse bei Gleichspannung sind bei diesem Abstand Elektrode/Werkstück besser als bei Sinuskurven und Sinuskurven mit Offset. Bei geringen Pulsbreiten (1/3) werden, wie beim mittleren Abstand insgesamt, bessere Haftungsergebnisse erzielt.

Mit den unterschiedlichen Versuchsvarianten werden außer unterschiedlichen Haftungsergebnissen auch unterschiedliche optische Verlaufsqualitäten erzielt. Diese können in der uneingebrannten Pulverschicht mit dem Charge-Decay Messaufbau (Rückionisationsneigung) untersucht werden. Die optische Verlaufsqualität der eingebrannten Pulverlackschicht wird mit dem Wave-Scan DOI der Firma Byk-Gardner nach der Norm AA-QW-105 des DAP (Deutsches Akkreditierungssystem Prüfwesen GmbH) gemessen.

Wie mit unserem Auge wird das wellige Helligkeitsmuster auf der Oberfläche optisch abgetastet. Eine Laser - Punktlichtquelle beleuchtet die Probe unter einem Winkel von 60°, ein Detektor auf der Gegenseite misst das reflektierte Licht ebenfalls unter 60°. Das Messgerät wird auf der Probe über eine Strecke von 0,1 m bewegt, alle 0,08 mm wird ein Datenpunkt aufgenommen.

Die gemessenen Daten des Helligkeitsprofils werden durch mathematische Filterung in mehrere Anteile aufgeteilt:

W_a	0,1...	0,3mm Wellenlänge
W_b	0,3...	1mm Wellenlänge
W_c	1...	3mm Wellenlänge
W_d	3...	10mm Wellenlänge
W_e	10...	30mm Wellenlänge

Die kürzeren Wellen (W_a , W_b) vermitteln den Eindruck von guter oder schlechter Brillanz bzw. gutem oder schlechtem Glanzgrad. Der langwellige Verlauf (W_e) ist ein Maß für die Blechunebenheit. Die Orangenhautstruktur wird durch den W_c -Wert und den W_d -Wert beschrieben. Der W_c -Wert beschreibt die eher kurzwellige Orangenhautstruktur, wie sie in den Versuchen bei ungünstiger Parametereinstellung häufig zu sehen ist, der W_d -Wert beschreibt die eher langwellige Orangenhautstruktur und hat sich in der Automobilindustrie als Standardgröße durchgesetzt. Je höher der Wert desto ausgeprägter der Orangenhauteffekt, je geringer desto glatter die Oberfläche.

Wie an den Abbildungen 46-48 zu sehen ist, sind die Trends bei W_d -Werten und W_c -Werten gleich. Gute Verlaufswerte korrelieren mit geringer Rückionisationsneigung (Abb. 44) und (bei den Varianten im Fluidisierbett) mit guten Haftungswerten (Abb. 39-42). Es fällt auf, dass bei gepulster Hochspannung insgesamt sehr gute Verlaufswerte erzielt werden, insbesondere bei der Einstellung mit der ins Positive gehenden Pulsation. Dabei werden im Trend sogar bessere Verlaufsergebnisse erzielt als mit herkömmlichen elektrostatischen Sprühpistolen. Der Einsatz von Gleichspannung im

elektrostatischen Fluidisierbett, selbst in Verbindung mit passiven Ionisatoren, führt zu wesentlich schlechteren Ergebnissen der optischen Verlaufsqualität.

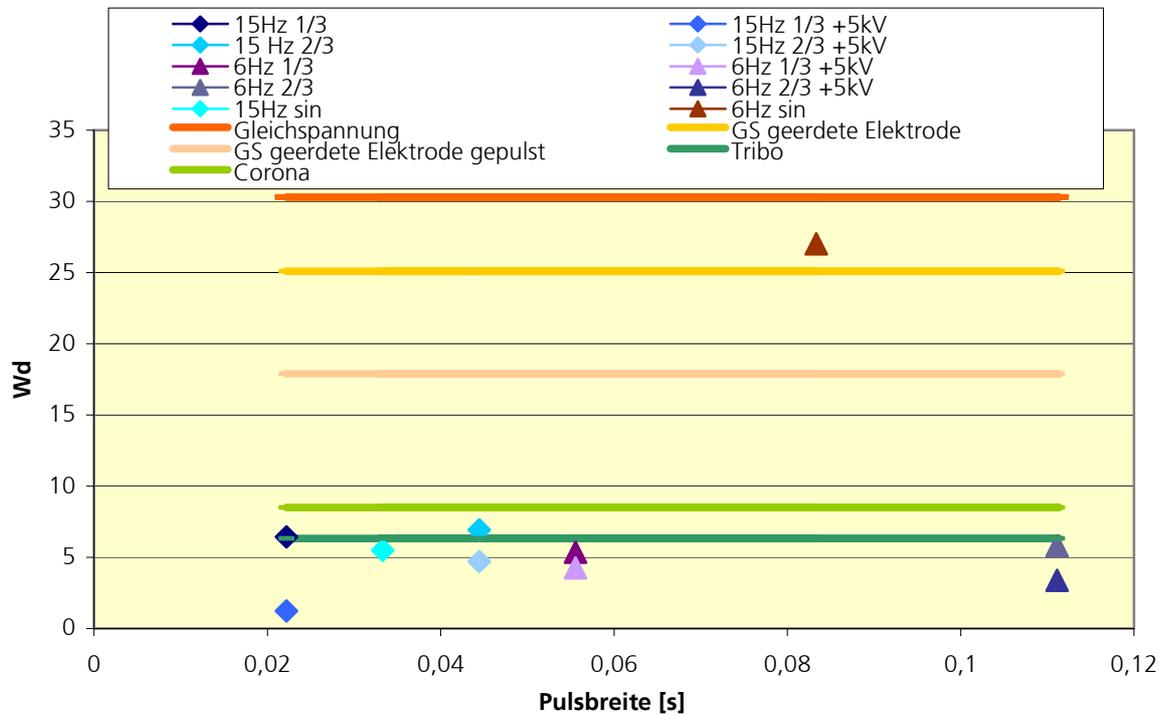


Abb. 46: Ergebnisse der Verlaufsmessung (Wd-Wert)

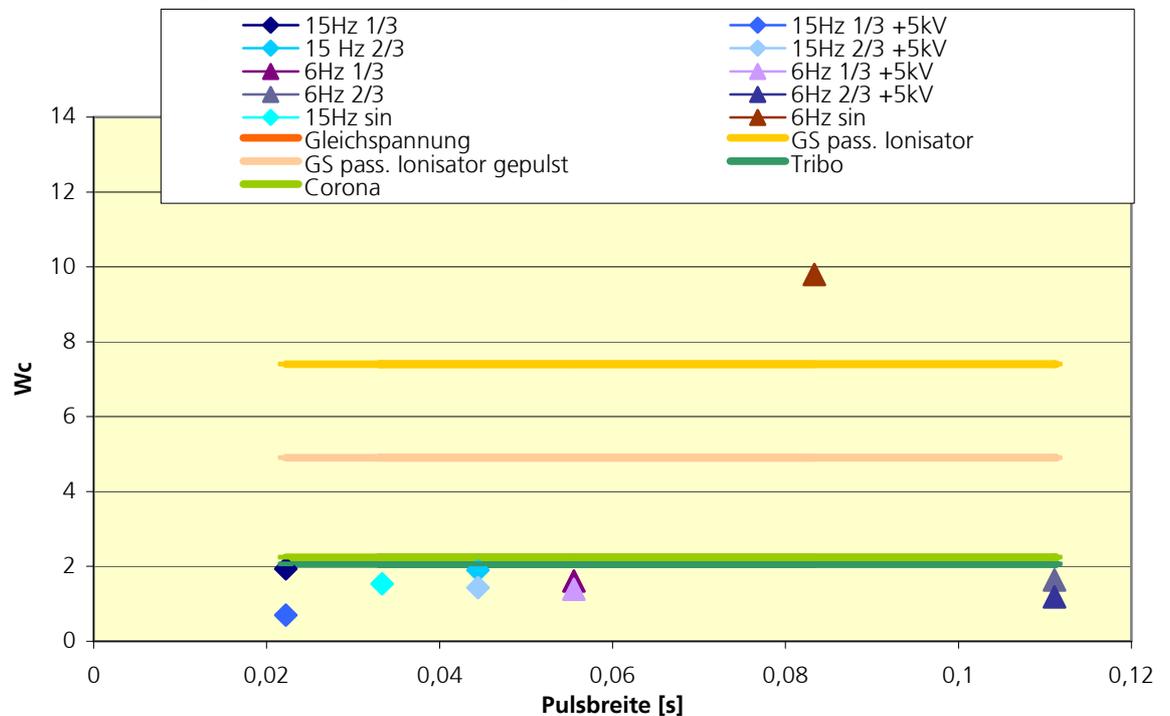


Abb. 47: Ergebnisse der Verlaufsmessung (Wc-Wert)

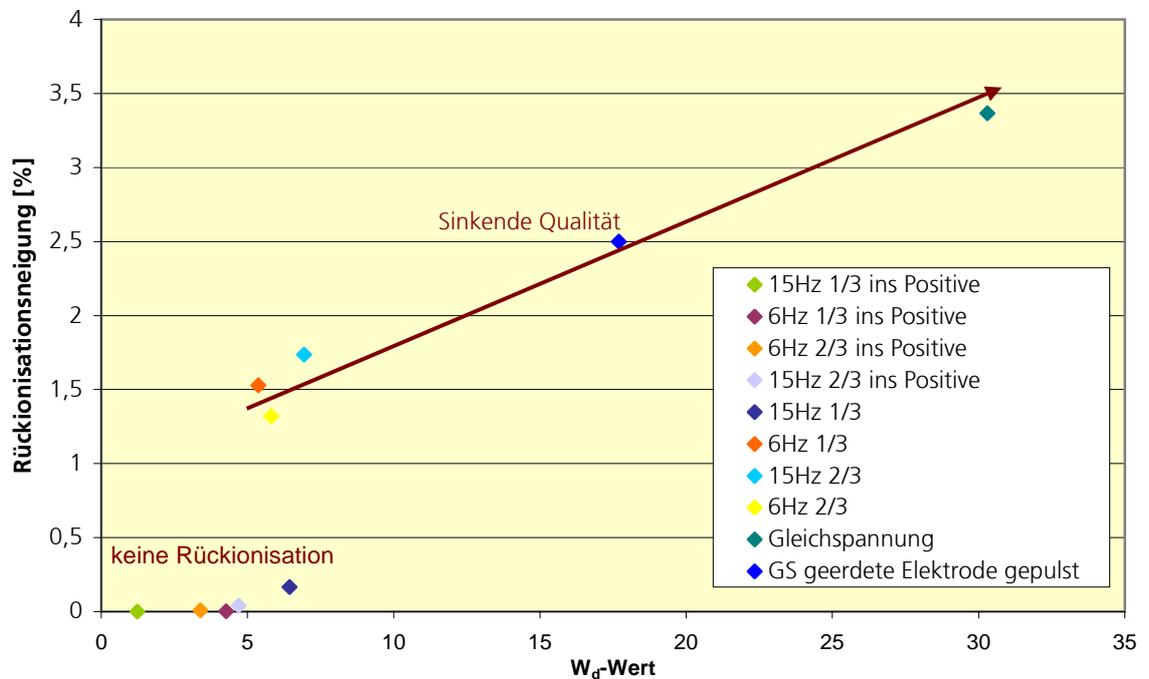


Abb. 48: Korrelation zwischen Verlauf und Rückionisationsneigung

Zusätzlich zur optischen Verlaufsmessung wird an den gleichen Probeblechen die Schichtdickenverteilung gemessen. Um Materialkosten zu minimieren, ist es erforderlich, die Schichtdickenschwankungen möglichst gering zu halten, da bei sehr geringen Schichtdickenschwankungen die mittlere Schichtdicke herabgesetzt werden kann, ohne die vorgegebene Minimalschichtdicke zu unterschreiten. Die Schichtdickenmessung der eingebrannten Lackschicht auf dem Probeblech erfolgt magnetinduktiv nach EN ISO 2178.

Hinsichtlich der Schichtdickenverteilung bietet die gepulste Hochspannung besonders bei der Beschichtung von Kanten und Spitzen Vorteile wenn mit der geeigneten Pulsbreite beschichtet wird. Bei geringer Pulsbreite sind die relativen Standardabweichungen sogar größer als beim Einsatz von Gleichspannung, wobei die Kombination aus Gleichspannung mit passiven bzw. passiven gepulsten Ionisatoren keine Verbesserung bietet. Beim Einsatz einer Sinuskurve wird eine ähnliche Schichtdickencharakteristik erzeugt wie bei Gleichspannung. Die besten Ergebnisse werden bei gepulster Hochspannung mit einer hohen Pulsbreite (2/3) erzielt, wobei die Variante mit dem ins Positive gehenden Hochspannungssignal vorteilhaft ist (Abb. 49). Grund für die hohen Schichtdickenschwankungen bei einer Pulsbreite von 1/3 ist die vergleichsweise geringe Kantenbeschichtung (insbesondere Vorderkante, siehe Abb. 50-52)

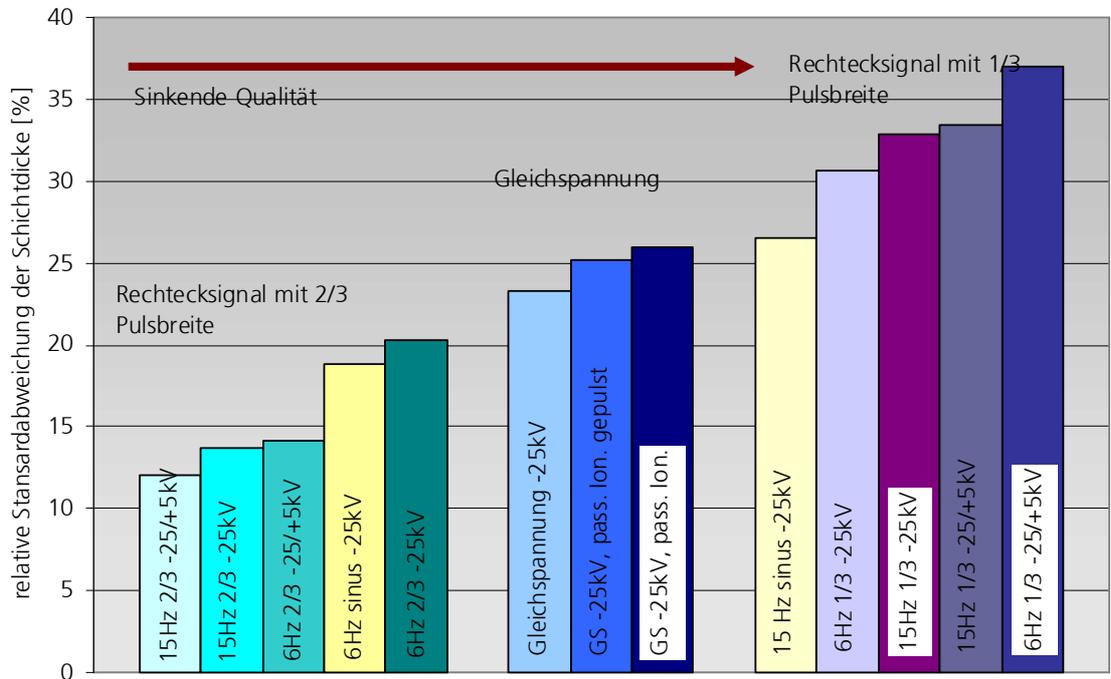


Abb. 49: Schichtdickengleichmäßigkeit bei unterschiedlichen Hochspannungsformen

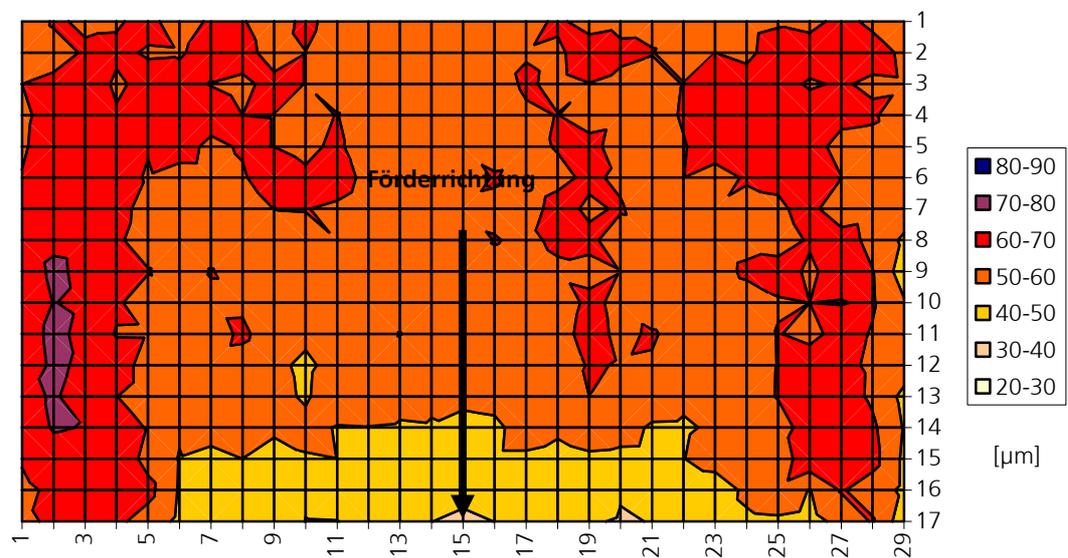


Abb. 50: gute Schichtdickengleichmäßigkeit bei Pulsbreite 2/3 (Beispiel 15 Hz)

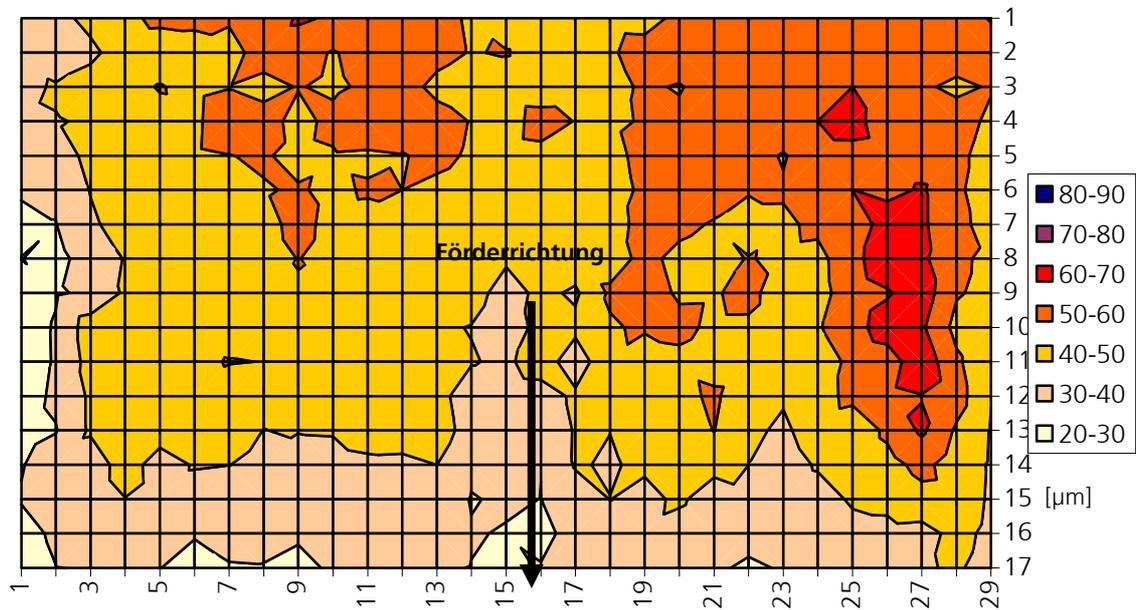


Abb. 51: mäßige Schichtdickengleichmäßigkeit bei Gleichspannung

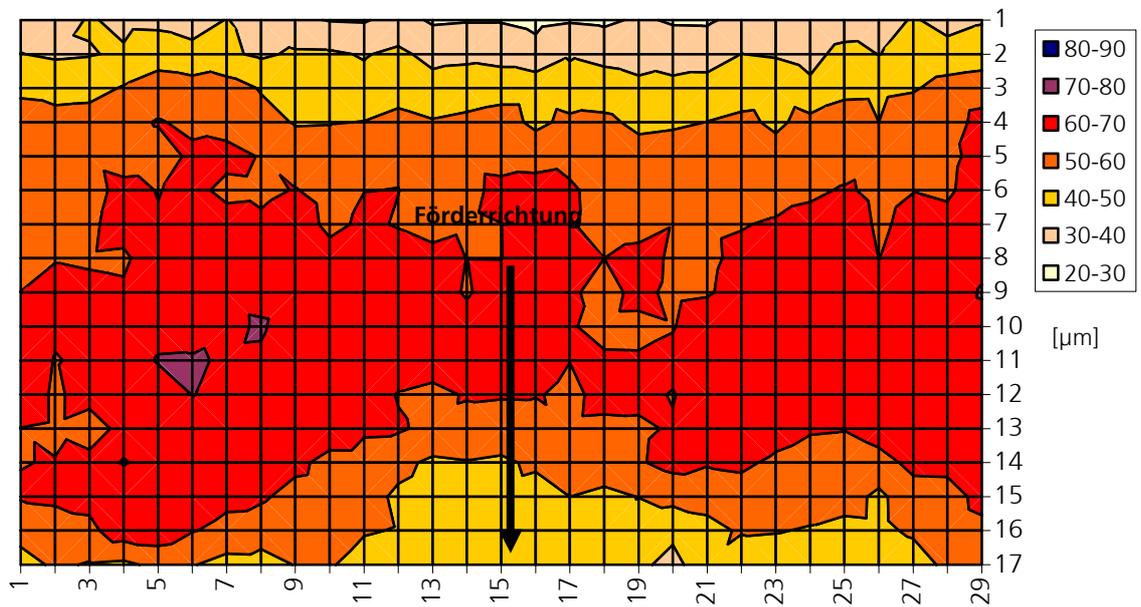


Abb. 52: geringe Schichtdickengleichmäßigkeit bei 1/3 Pulsbreite (Beispiel 15 Hz)

An Werkstückkanten ist die Feldstärke hoch (Äquipotenziallinien dicht beieinander), in diesem Kanten-Bereich ist dafür die Feldstärke im mittleren Bereich zwischen Elektrode und Werkstück abgeschwächt (Äquipotenziallinien weit auseinander, siehe Fluent-Simulation im Vorfeld Abb. 53/54 [18-20]). Anders als beim elektrostatischen Pulversprühen, bei dem in solchen Bereichen die Sprühdüse die Partikel zum Werkstück hin gezielt fördert, werden beim Fluidisierbett die Kanten eher unterbeschichtet da Parti-

kel z.T. nicht das Feldstärke-„Tief“ überwinden können und sich deswegen wieder durch die Schwerkraft nach unten bewegen. Der Effekt wird durch die hohen Raumladungsdichten beim kompakten, hocheffizienten el. Fluidisierbett noch verstärkt.

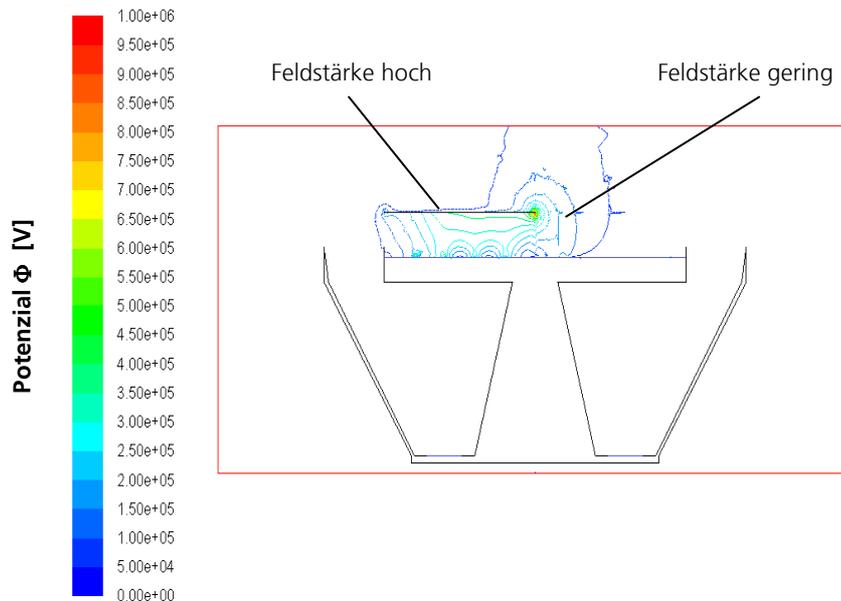


Abb. 53: Feldstärkeverteilung „ebene Platte“, Fluent-Simulation

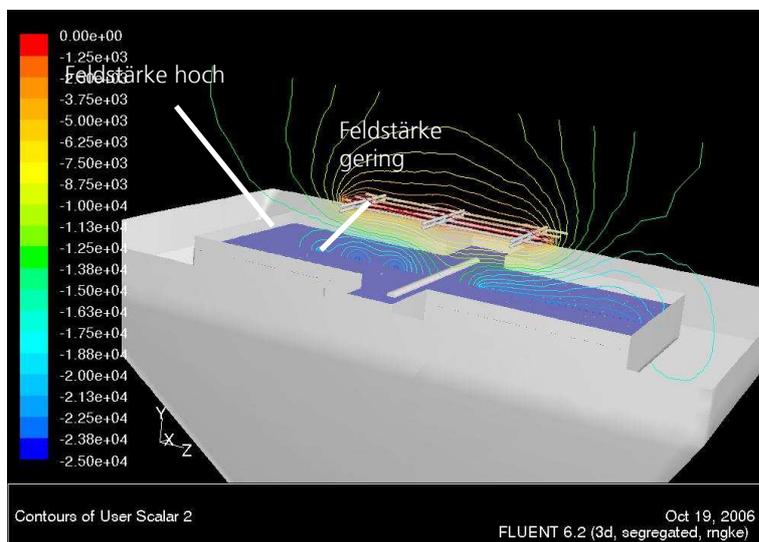


Abb. 54: Feldstärkeverteilung am Beschichtungsbeispiel „Zaungitter“

Zusätzlich ist in diesem Bereich die feldstärkeabhängige Ionenwindgeschwindigkeit reduziert so dass gerade massereiche große Partikel nicht abgeschieden werden. Um die Kante herum ist die Ionenwindgeschwindigkeit erhöht und wirkt als Störgröße, da dort Turbulenzen auftreten und die durch die Absaugung, die Fluidisierluft und den Ionenwind selbst verursachten Querströmungen die dort ankommenden, eher feinen

Partikel in die Absaugung tragen. Um Kanten ausreichend zu beschichten muss bei nicht optimierten Bedingungen daher häufig der mittlere Bereich des Werkstücks etwas überbeschichtet werden. Die nachfolgenden Simulationen befassen sich daher schwerpunktmäßig mit der Kantenproblematik, die im Grundsatz für fast alle 3-D Teile bedeutend ist. Bei der Beschichtung von „idealen“ Geometrien (wie beispielsweise Dosen) muss nicht mit gepulster Hochspannung gearbeitet werden. Fotografische Aufnahmen und Videoaufnahmen (mit Laserlichtschnitttechnik) mit einer Nebelmaschine zeigen, dass der Nebel sich bei Gleichspannung sowie bei gepulster Gleichspannung im elektrischen Feld gleichmäßig um die Dose verteilt.

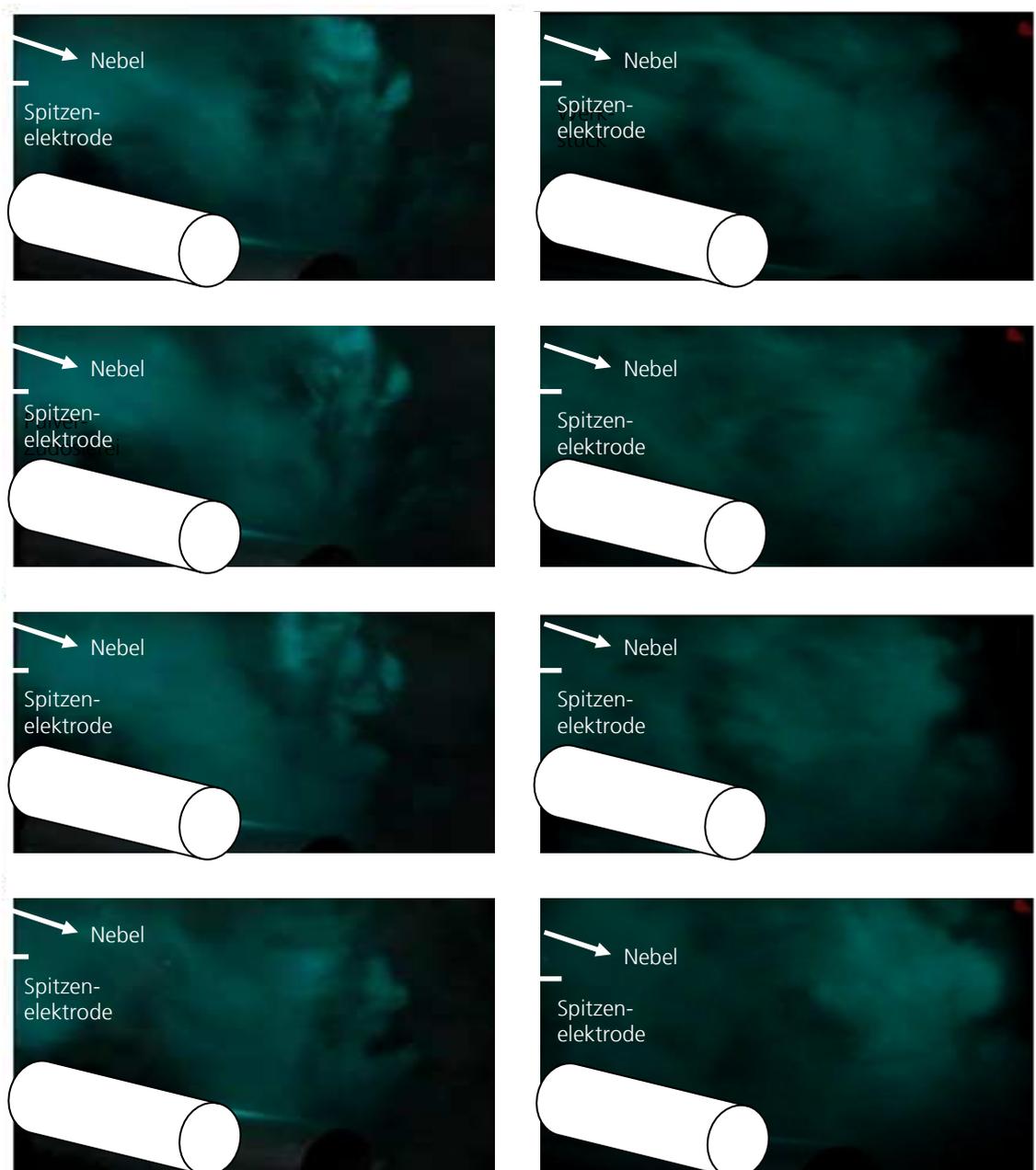
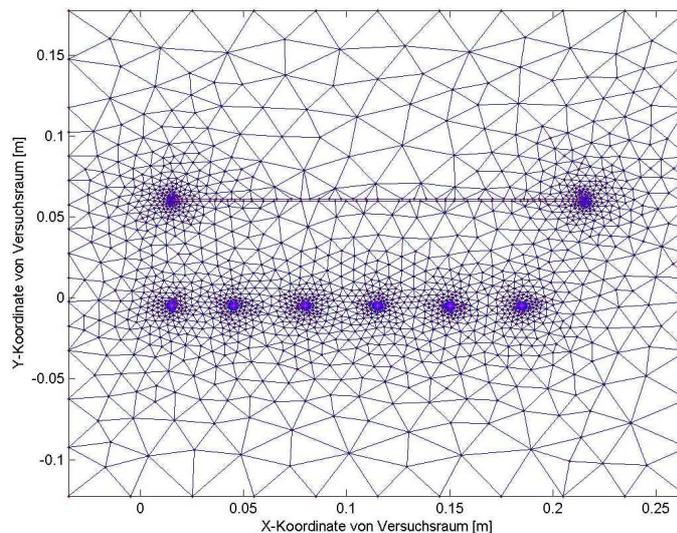


Abb. 55: Nebel im elektrischen Feld, Beispiel Dosenbeschichtung

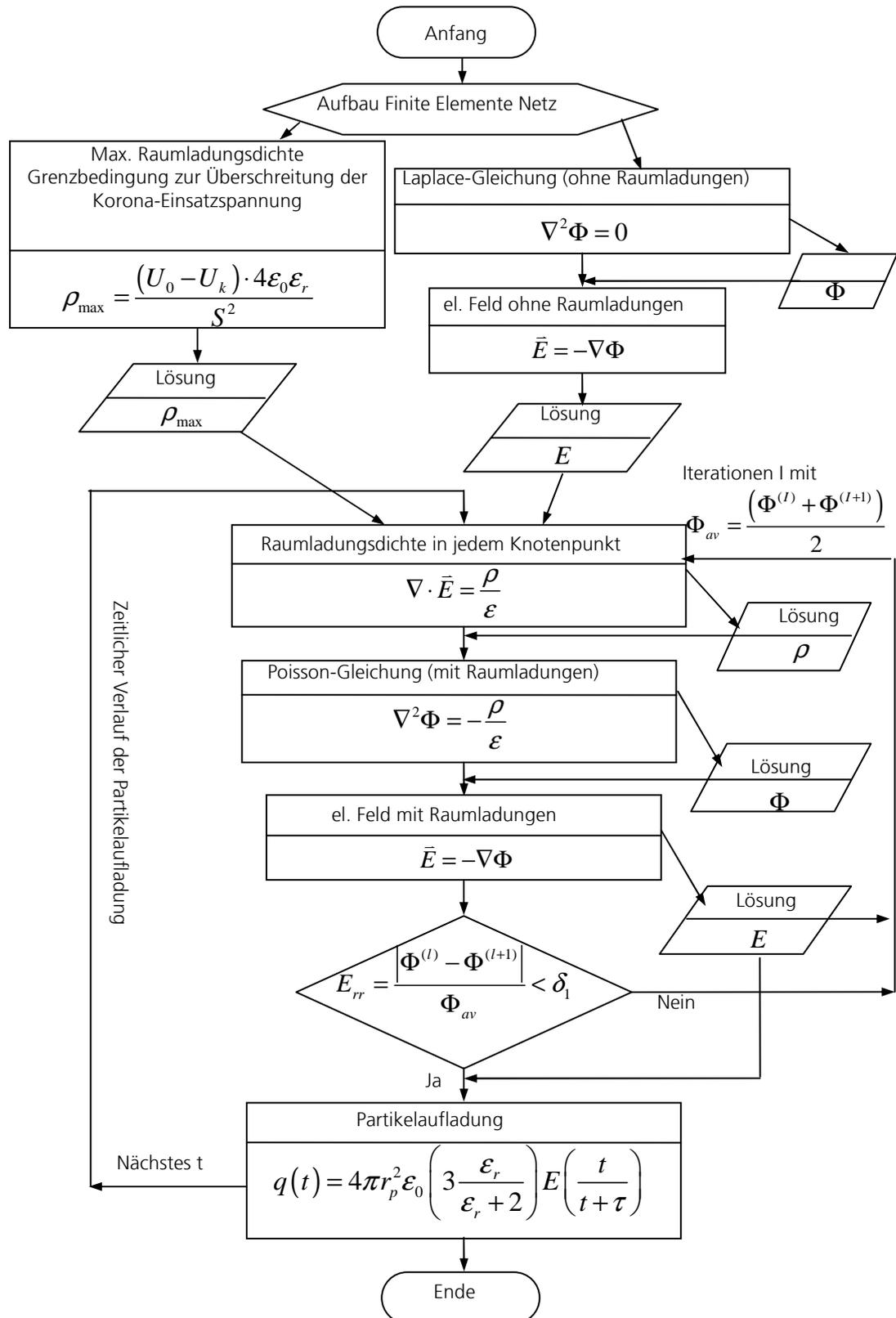
Simulationen mit gepulster Hochspannung

Aufgrund der geometrischen Gegebenheiten wird in Matlab® ein dreieckiges Netz gebildet bei dem an den Elektroden und den Werkstückkanten ein dichteres Netz mit mehr Elementen vorliegt als in den mittleren Bereichen zwischen Elektrode und Werkstück, wo nur eine geringe Änderung der Vektoren und Beträge der Partikelgeschwindigkeiten zu erwarten ist. Jeweils an jedem Knotenpunkt erfolgt die Berechnung.



Der Ablaufplan der Matlab®- Programmierung ist unten dargestellt.

Da die FEM eine Näherungsmethode ist, muss über Iterationen bewertet werden, ob die Potenzialfolge konvergent ist. Iterationen werden so lange wiederholt, bis das maximale Missverhältnis (E_r) zwischen den beiden letzten Schätzungen des Potentials an jedem Knoten, Φ^l und Φ^{l+1} geringer ist als ein im Voraus festgelegter, akzeptierter Fehler (δ_i).



Die Ergebnisse der Simulationen in Matlab stimmen hinsichtlich der Partikelgeschwindigkeiten in Abhängigkeit von Partikelgröße, Feldstärke, Hochspannungsart (gepulst/ungepulst) mit den analytischen Betrachtungen sowie messtechnischen Untersuchungen im Vorfeld (z.B. LDA, Laserlichtschnitt) überein (siehe Abb. 11-14, 21-24, 27-30). Auf diese Ergebnisse wird an dieser Stelle nicht mehr eingegangen. Um elektrische Felder bildhaft darzustellen werden häufig Äquipotenziallinien, also Linien gleichen Potentials dargestellt. Große Abstände der Äquipotenziallinien entsprechen geringen Feldstärken, kleine Abstände hohen Feldstärken. Die als Pfeile dargestellten Feldlinien sind senkrecht zu den Äquipotenziallinien angeordnet und stellen die Vektoren der Feldstärke dar. Abgesehen vom Ionenwindeinfluss, der überwiegend in der Nähe der aktiven Elektroden sowie im Bereich der Kanten des geerdeten Werkstücks Einfluss auf das Beschichtungsergebnis nimmt, würden die Pulverlackpartikel den Feldlinien folgen (Abb. 56). Durch den Schwerkrafteinfluss wird der Winkel, mit dem die Partikel sich zum Werkstück hin bewegen etwas flacher, insbesondere bei groben Partikeln.

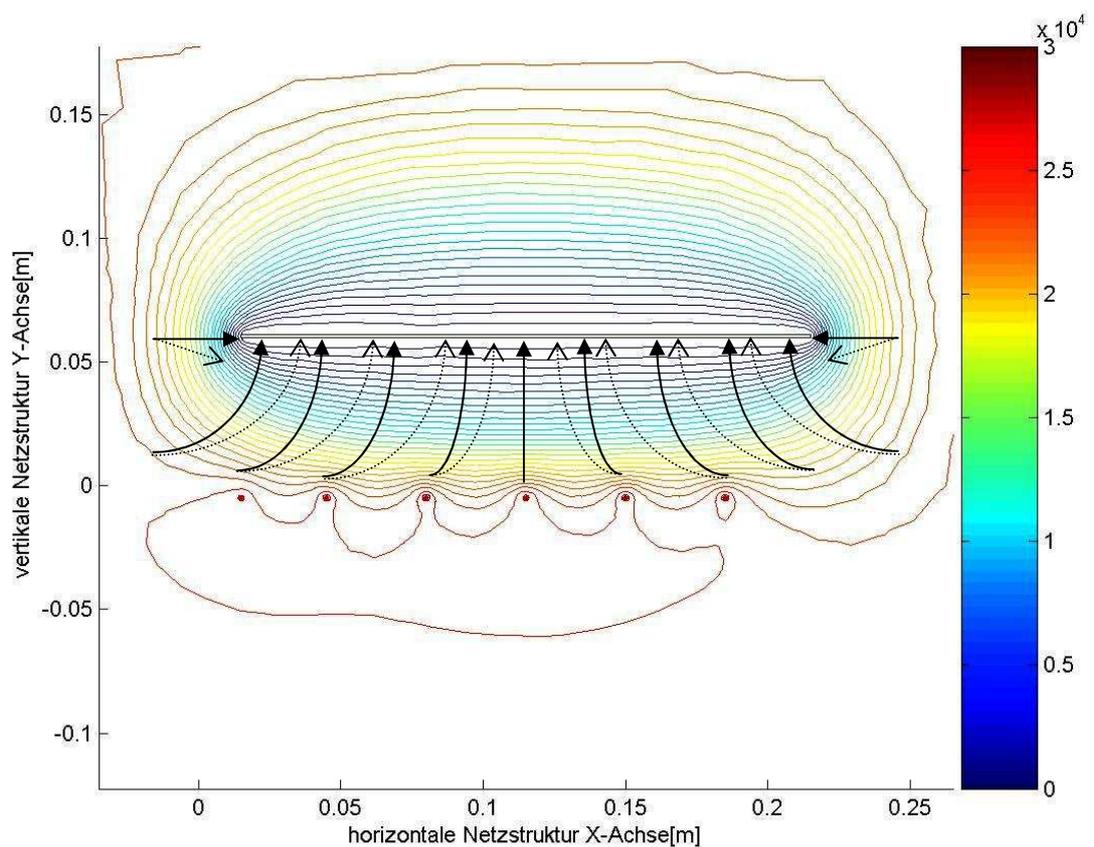


Abb. 56: 2-dimensionale Darstellung der Potenziale zwischen den Drahtelektroden des Fluidisierbehälters und Werkstück ohne Raumladungseinfluss (Gleichspannung)

Raumladungen führen zu einer Herabsetzung der Feldstärke in der Nähe der Elektrode, in Abb. 57 ca. 1-2 cm von der Elektrode weg (großer Abstand der Äquipotenziallinien), zum Werkstück hin erhöht sich die Feldstärke wieder (vgl. Abb. 6).

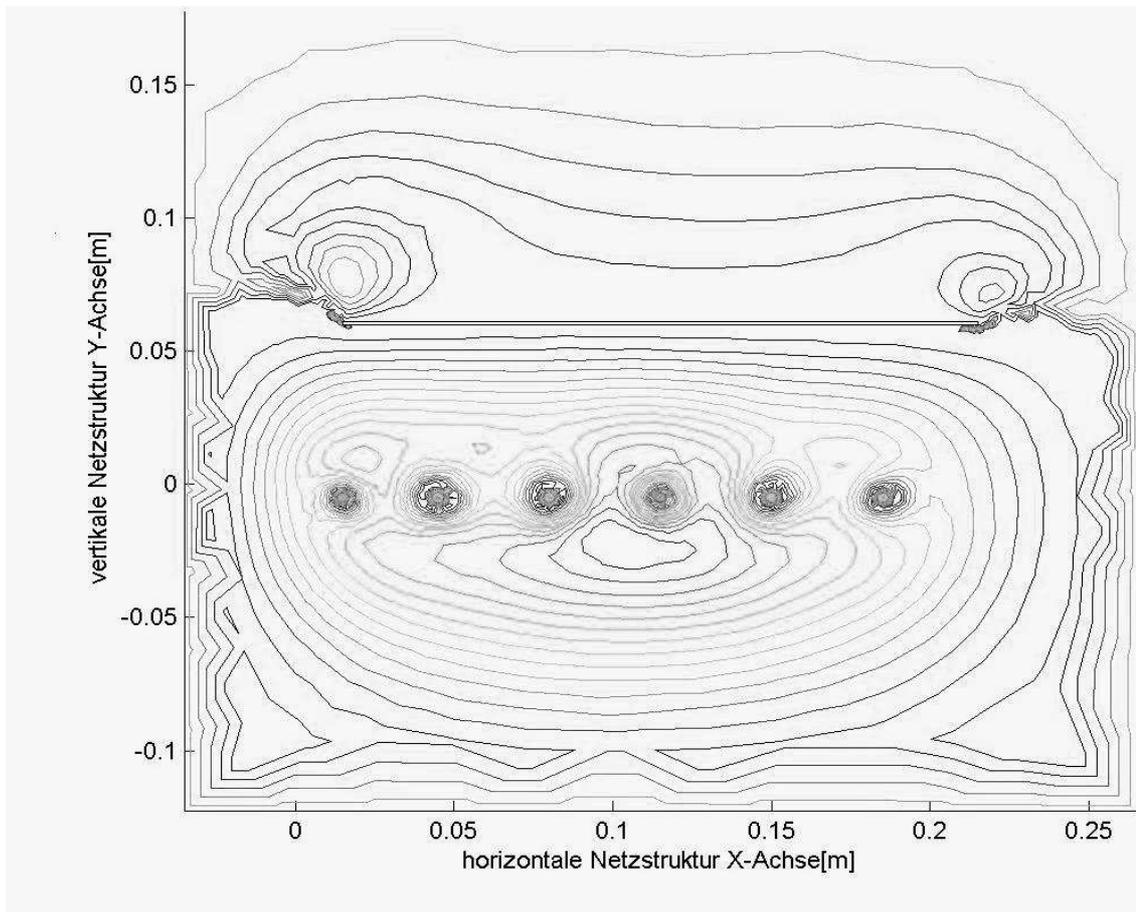


Abb. 57: 2-dimensionale Darstellung der Potenziale zwischen den Drahtelektroden des Fluidisierbehälters und Werkstück mit Raumladungseinfluss (Gleichspannung)

Bei Gleichspannungseinsatz führt der Schwerkrafteinfluss zu einer ungenügenden Kantenabdeckung wie sie auch in den Beschichtungsversuchen zu sehen ist. Auch beim Einschalten der ersten Sequenz bei pulsierenden Hochspannungssignalen wird zunächst die Kante ungenügend beschichtet (siehe Abb. 58 oben). Bei gepulster Hochspannung (Beispiel 15 Hz, grobe Partikel mit Durchmesser 30 μm) erfahren die Partikel während der Ausschaltphase durch den aufgrund der Trägheit der Luftmasse noch wirkenden Ionenwind eine starke Vektor-Komponente senkrecht hin zum Werkstück (Abb. 58 unten, oberer Bereich der Partikelabscheidung hin zum Werkstück). Zusätzlich wirkt der Raumladungseinfluss (Coulomb'sche Anziehung hin zum Werkstück und Coulomb'sche Abstoßung der Partikel untereinander) homogenisierend auf die Partikelabscheidung. Beim Anschalten der Hochspannung werden die Partikel in der Nähe der aktiven Elektrode aufgeladen (Abb. 58 unten, unterer Bereich der Abscheidung) und zum Werkstück hin bewegt, die Partikel im oberen Bereich bekommen einen weiteren Impuls hin zum Werkstück. Da sich viele Partikel bereits in unmittelbarer Nähe zur Kante befinden, wird auch in der ersten Anschaltphase die Kante besser beschichtet als bei reinem Gleichspannungseinsatz. Dies ist zusätzlich zur ver-

ringerten Rücksprühneigung einer der bedeutendsten Vorteile der gepulsten Hochspannung

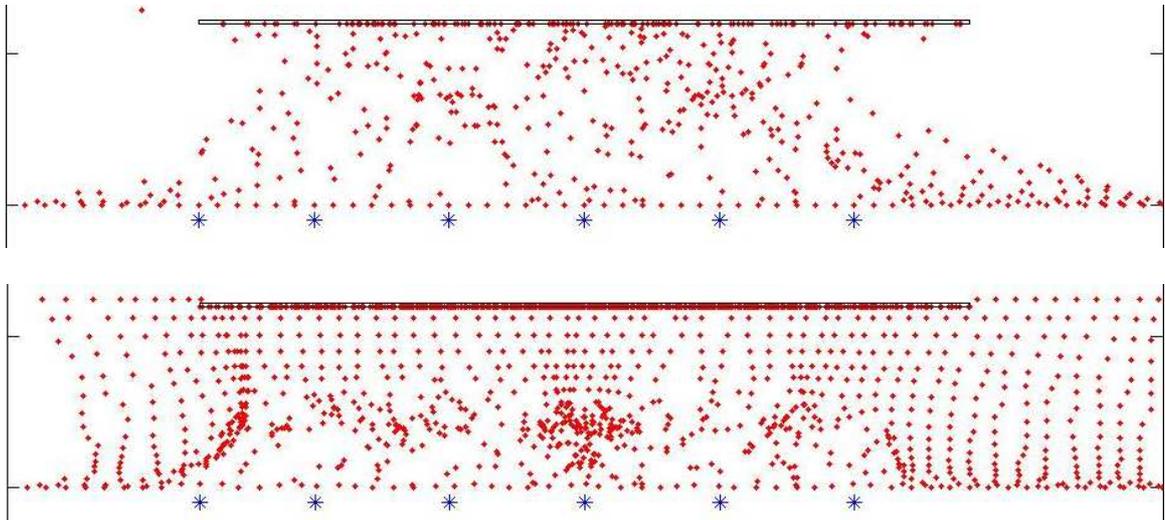


Abb. 58: 2-dimensionale Darstellung der Partikelbewegungsbahnen

II.1-3 Applikationen für komplexe 3-dimensionale Werkstücke

Fluidisierbettgestaltung für dreidimensionale Werkstücke

Grundsätzlich eignen sich für viele Applikationen an dreidimensionalen Werkstücken Drahtelektroden. Diese können mit Punktelektroden kombiniert werden. Für Vergleichstests wird den herkömmlichen Drahtelektroden eine Anordnung an Punktelektroden sowie Versuchsergebnisse mit einer an gepulster Hochspannung anliegenden einzelnen Punktelektrode (Beschichtung von unten nach oben wie Fluidisierbett) mit einem Standardabstand Elektrode-Werkstück von 60 mm gegenübergestellt. Einige Versuche werden mit Hubbewegung durchgeführt wobei die Bewegung nicht mit dem Fluidisierbett sondern mit dem (am Roboter geführten) Werkstück durchgeführt wird. Dabei differieren die Abscheideleistungen erheblich. Mit einer Punktelektrode wird eine Abscheideleistung von jeweils ca. 1 g/s erzielt, bei 8 Elektroden also ca. 8 g/s. Die 8 g/s entsprechen etwa der Abscheideleistung einer einzelnen Drahtelektrode, bei den 5 Drahtelektroden liegt die Abscheideleistung bei etwa 40 g/s (Abb. 59, Gestaltung gemeinsam mit der Fa. Schnier und der Fa. Durst).

Beim Einsatz von punktuellen Elektroden werden durchschnittlich bessere Ergebnisse bei der Haftung des uneingebrannten Pulvers erzielt als bei Drahtelektroden. Aufgrund der geringen Raumladungsdichte beim Einsatz einer einzelnen Punktelektrode und der damit verbesserten Aufladung des Pulvers ist dort die Haftung (in Verbindung mit einer Hubbewegung) am besten (Abb. 60). Beim optischen Verlauf und Rückionisationsneigung zeigen sich keine signifikanten Unterschiede.

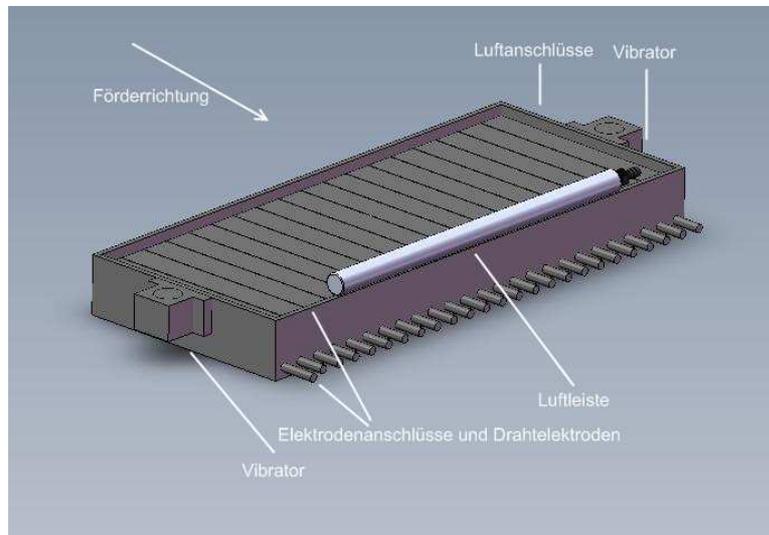


Abb. 59a: Elektrodenanordnung Fluidisierbett (Drahtelektroden / wahlweise Luftleiste)

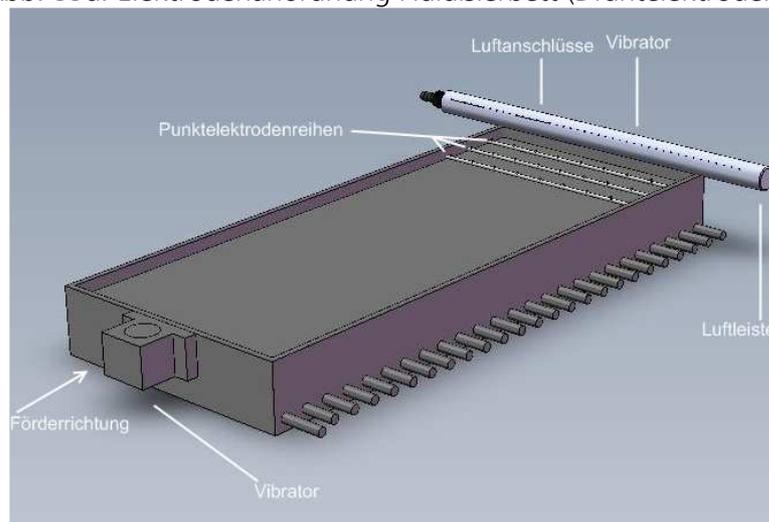


Abb. 59b: Elektrodenanordnung Fluidisierbett (Punktelektroden / wahlweise Luftleiste)

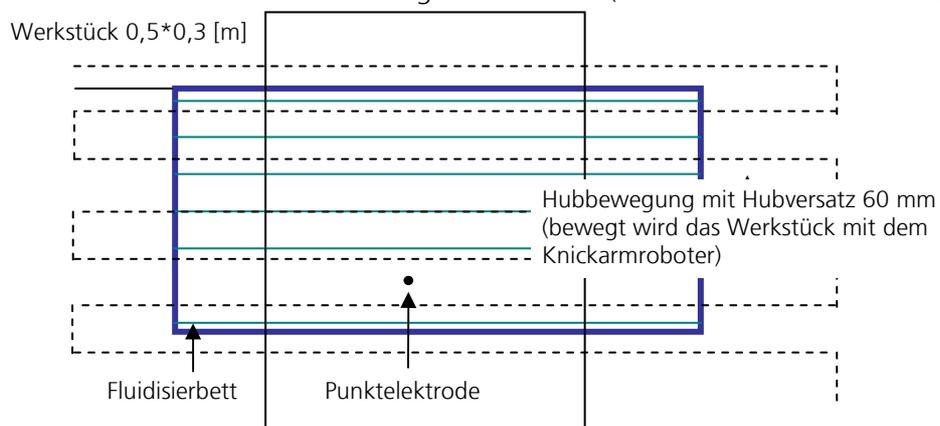


Abb. 59c: Elektrodenanordnung Fluidisierbett (einzelne Punktelektrode)

Hinsichtlich der Schichtdickengleichmäßigkeit (Kantenabdeckung!) zeigt sich beim Einsatz der einzelnen Punktelektrode im Fluidisierbett mit Hubbewegung der gleiche Trend wie bei einer Punktelektrode, bei der die Pulverzudosierung separat über einen Injektor (Sprühpistolenprinzip) gesteuert wird. Gepulste Signale liefern bessere Ergebnisse als der Einsatz von Gleichspannung. Punktelektroden liefern auch bei Integration in den Fluidisierbehälter Vorteile hinsichtlich der Schichtdickengleichmäßigkeit, einerseits beim Einsatz einer Einzelelektrode mit Hubbewegung, andererseits auch ohne Hubbewegung mit mehreren Punktelektroden (Abb. 61).

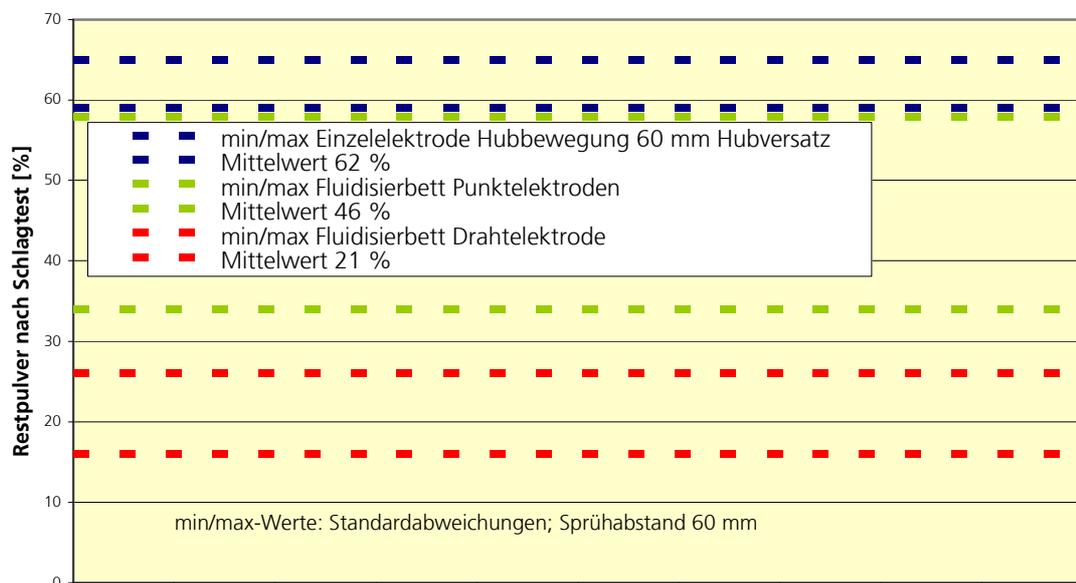


Abb.60: Restpulver nach Schlagtest in Abhängigkeit von Elektrodenanordnung im Fluidisierbett (Draht- und wahlweise Punktelektroden) bei gepulster Hochspannung

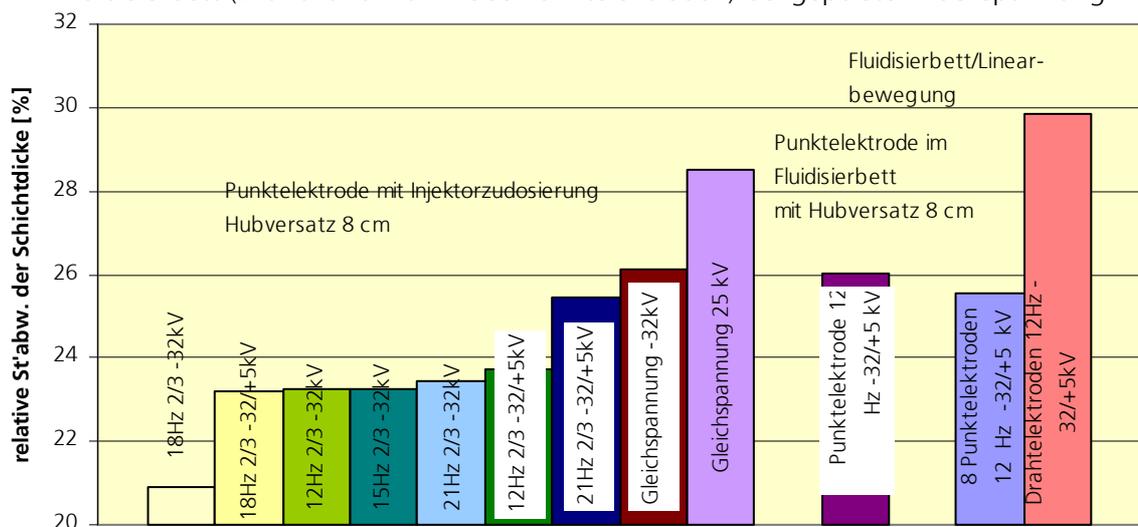


Abb. 61: relative Standardabweichung der Schichtdicke in Abhängigkeit von der Elektrodenanordnung im Fluidisierbett (Draht- und wahlweise Punktelektroden)

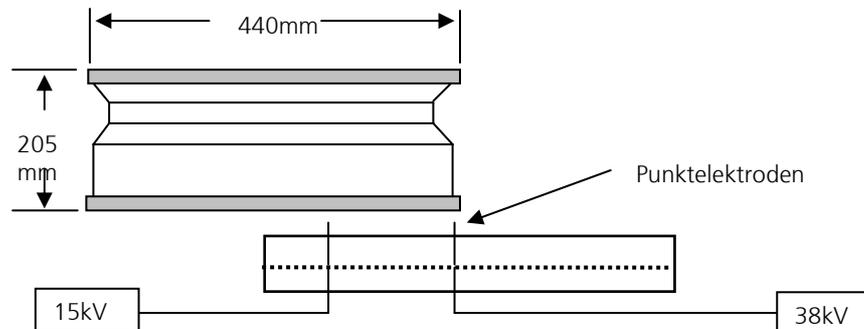


Abb. 62: 2 Punktelektroden zur Felgenlackierung

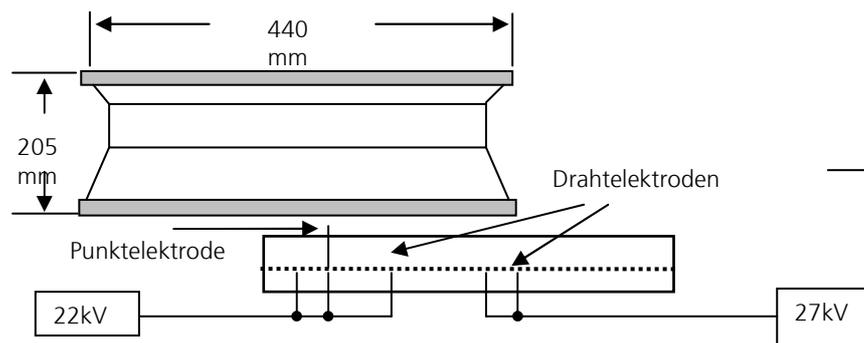


Abb. 63: eine Punktelektrode und 4 Drahtelektroden zur Felgenlackierung

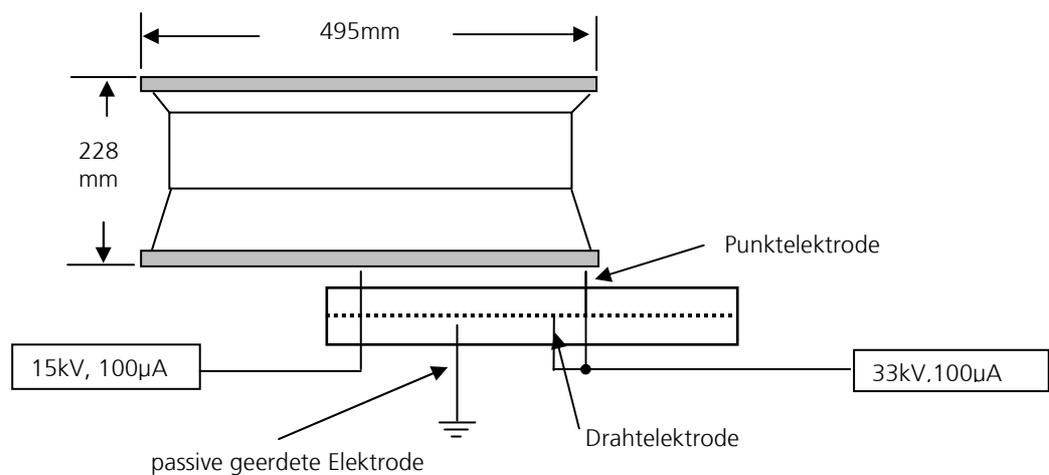


Abb. 64: 2 Punktelektroden und eine (aktive) Drahtelektrode zur Felgenlackierung, zusätzlich Einsatz einer passiven geerdeten Elektrode

Punktelektroden haben zudem beim Eindringen in Teilevertiefungen (Faraday-Käfige) Vorteile, z.B. bei der Felgenbeschichtung. Für homogene Schichtdickenverteilungen ist es vorteilhaft, dass mehrere Hochspannungserzeuger mit unterschiedlicher Spannung eingesetzt werden (Fallbeispiel Abb.62). Um die Vorteile der Punktelektroden (besseres Eindringvermögen) mit dem Vorteil der Drahtelektroden (höhere Abscheideleistungen) zu kombinieren kann beispielsweise folgende Varianten (Abb. 63) eingesetzt werden. Zusätzlich können passive Elektroden das Eindringen in Teilevertiefungen verbessern (Abb. 64).

Aufgrund der schwierig zu beschichtenden Teilevertiefungen bei den meisten Felgentypen und den hohen Qualitätsanforderungen wird dieser Markt als Anwendung für das elektrostatische Fluidisierbett nicht mehr weiterverfolgt da die Marktchancen als gering eingestuft werden. Die Wirkweise der passiven, geerdeten Elektrode zur Verbesserung der Kantenbeschichtung von Stückgut lässt sich an einem Fallbeispiel, der Pulverbeschichtung eines Drahtes veranschaulichen. Mit konventionellen Methoden lassen sich dünne metallische Drähte aufgrund des Rücksprühens nicht mehr beschichten. Werden links und rechts zum zu beschichtendem Draht passive, geerdete Elektrodendrähte gespannt, so reduziert sich die Feldstärke am zu beschichtendem Draht, so dass kein Rücksprühen mehr erfolgt und es können Drähte bis zu $80\ \mu\text{m}\ \varnothing$ beispielsweise mit Elektroisierpulvern (z.B. PES-Pulver) beschichtet werden (Abb. 65).

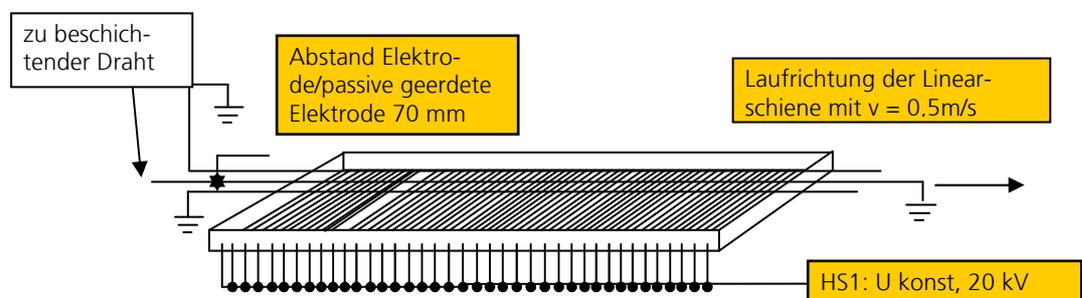


Abb. 65: Drahtbeschichtung mittels des elektrostatischen Fluidisierbetts

Um die Stirnflächen von Abdeckteilen besser beschichten zu können, ist es vorteilhaft in längs- und Querrichtung Bauteile mit geringem Abstand Werkstück-Werkstück ($< 0,05\text{ m}$) ohne „Lücke“ zu bestücken. Im Randbereich kann durch geerdete passive Elektroden die Beschichtungsgleichmäßigkeit verbessert werden (Abb. 66).

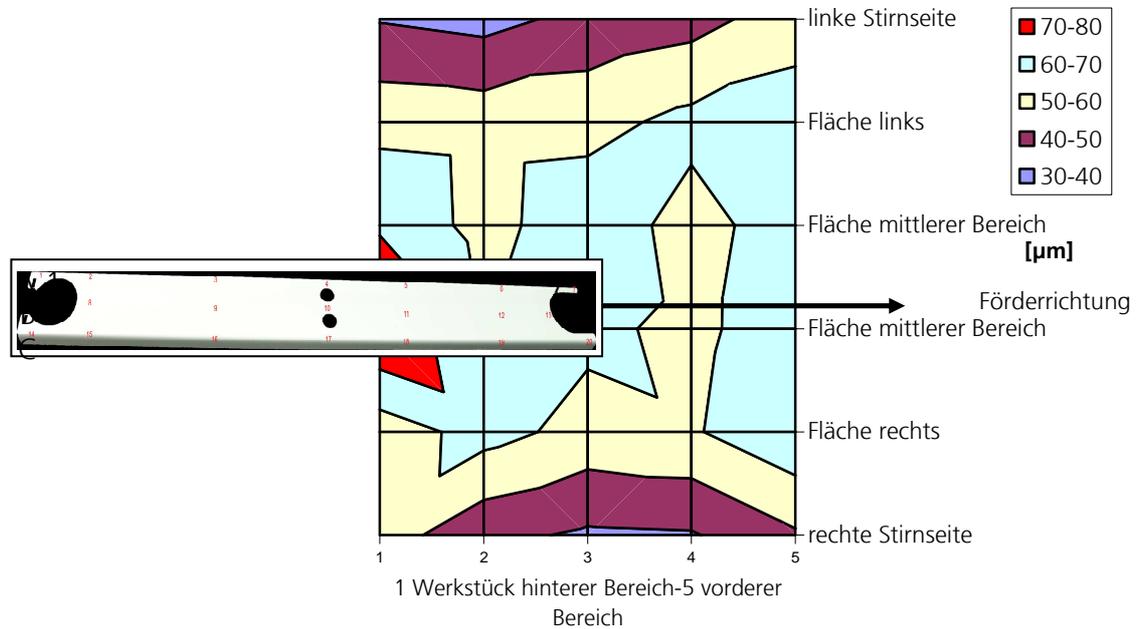


Abb. 66: Verbesserung der Beschichtung von Stirnflächen an Abdeckteilen (gemeinsam mit der Fa. Gramm, Fa. Hege, Fa. Meeh, Fa. Wörwag)

Bei der Beschichtung von Schraubenfedern kann mit einer einfachen Drehbewegung übers Fluidisierbett eine gleichmäßige Schichtdicke erzeugt werden (Abb. 67).



Abb. 67: Kombination einer Linearbewegung mit einer Drehbewegung zur Pulverbeschichtung von Schraubenfedern

Bei verschiedenen Werkstücken, beispielsweise bei der Pulverbeschichtung von Filter-Stützgewebe (als zugeschnittene Einzelstücke) oder Lampengittern bzw. Lochblechen (Schallschluck) eignet sich eine Taumelbewegung zur verbesserten Kantenabdeckung. Dabei lassen sich schon mit herkömmlich gemahlten Standard-Pulvern Schichtdicken unter 50 µm (am Fallbeispiel Filter-Stützgewebe) realisieren (Abb. 68).

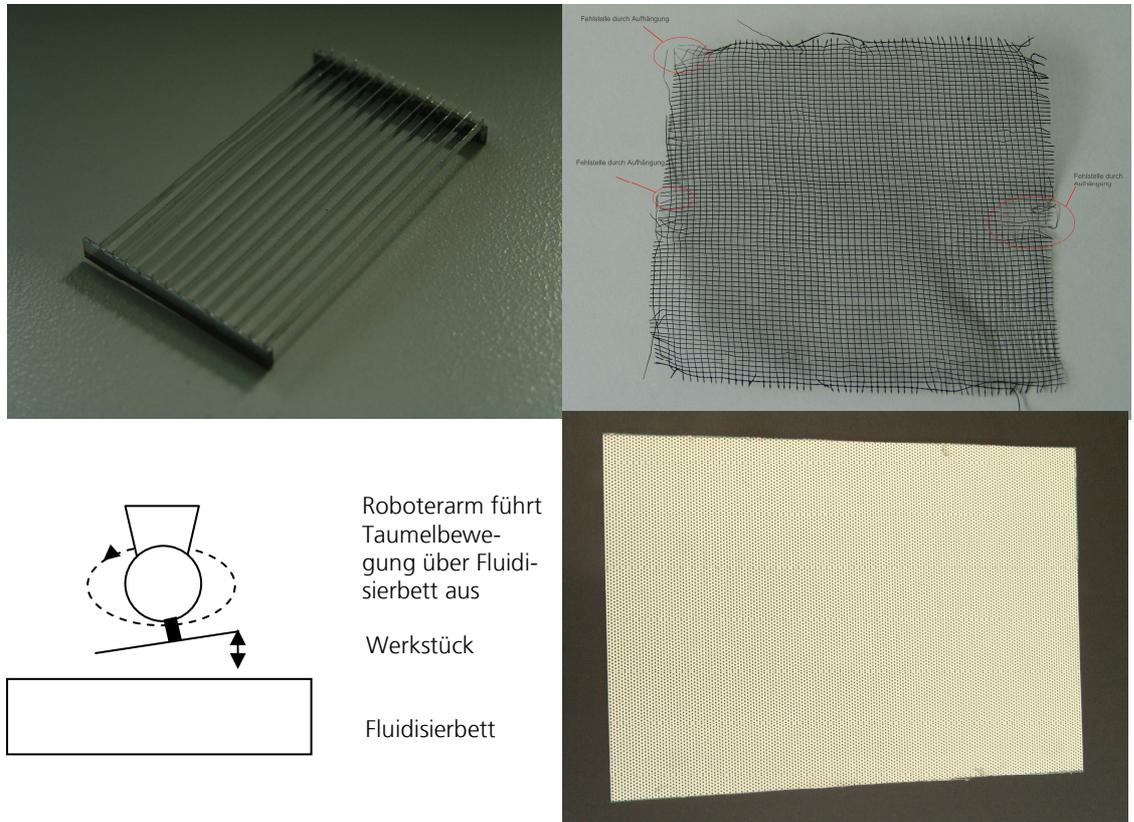


Abb. 68: Taumelbewegung für eine gleichmäßige Schichtdicke

Bei der Beschichtung von Drahtware ist es sehr sinnvoll, gepulste Hochspannung einzusetzen. Durch die reduzierte Ionenwindgeschwindigkeit wird die Anforderung, das Werkstück auf allen Seiten gleichmäßig zu beschichten, am Besten erfüllt. Durch die reduzierte Ionenwindgeschwindigkeit werden Gitterstäbe gleichmäßig von der Pulverwolke umhüllt. In Faradaykäfigen, wie z.B. dem Bereich zwischen den Doppelstäben wird besser eingedrungen. Bei Gleichspannung bleibt die Oberseite der Gitter weitgehend unbeschichtet, da der Ionenwind mit hoher Geschwindigkeit am Werkstück vorbeiströmt und die Pulverpartikel am Werkstück vorbeiführt (Abb. 69).

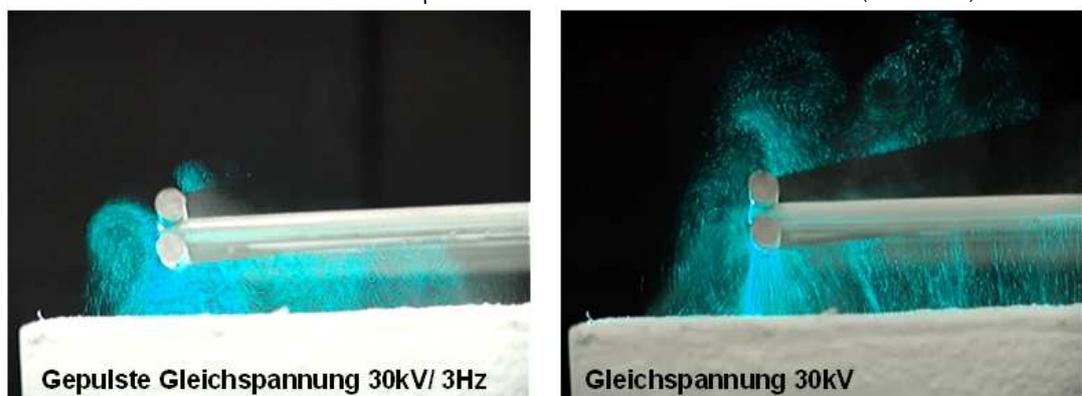


Abb. 69: Gute Umhüllung bei gepulster Gleichspannung (links), bei Gleichspannung (rechts) „schießt“ die Pulverwolke mit dem Ionenwind über das Werkstück hinaus

Alle Vorversuche zur Elektrodenentwicklung in Verbindung mit anwendungsorientierten Beschichtungsversuchen wurden in Zusammenarbeit mit der Fa. Schnier durchgeführt und die Ergebnisse gemeinsam interpretiert. Dabei wurde gemeinsam mit allen Projektpartnern entschieden, dass weitere systematische Versuchsreihen an einem pyramidalen Modellwerkstück (Abb. 70) durchgeführt werden. Die aus einzelnen Dreiecken gefertigte Pyramide, die mit Magneten an der Adaption befestigt wird, erlaubt es, die Bauteile zum Einbrennen und zur Messung der Schichtdicken und Verlaufsqualitäten abzunehmen und dadurch auf einfache Weise im Inneren des Werkstücks zu vermessen.

Dabei wird ein Taguchi-DoE mit Varianzanalyse und Signifikanztest festgelegt wodurch die Anzahl an erforderlichen Versuchsreihen eingegrenzt werden kann. Das Taguchi DoE eignet sich insbesondere zur Bewertung des Einflussgrades eines Parameters. Falls Wechselwirkungen zwischen den Parametern bestehen, sind innerhalb einer zweiten Versuchsreihe mit diesen Parametern Einzelversuche erforderlich. Als Förderbewegung kommt zusätzlich noch (wie bei den Vorversuchen mit den Filterstützgeweben) eine Taumelbewegung zum Einsatz. Die Eindringtiefe in die Pyramide, ein wichtiger Parameter, der ganz allgemein das Eindringen in Faraday-Käfige beschreibt, definiert sich über die prozentuale Schichtdickenabnahme an definierten Messpunkten im Inneren der Pyramide (kleiner prozentualer Wert der Schichtdickenabnahme: gutes Eindringvermögen).

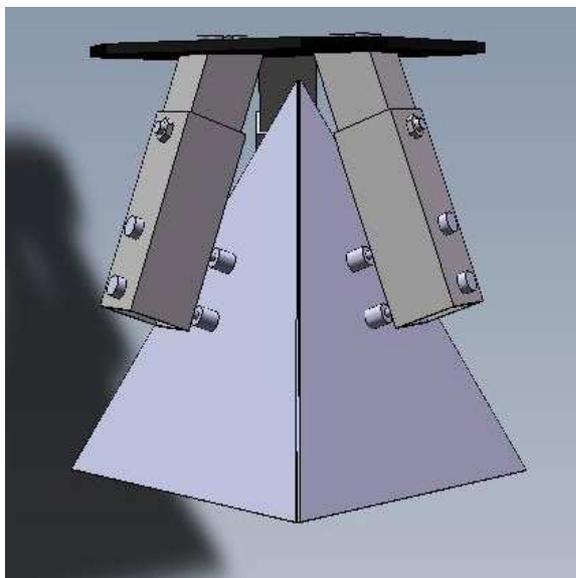


Abb. 70: Pyramidales Modellwerkstück mit Roboteradaption

Mittels eines modifizierten Flügelradanemometers kommt eine einfache Methode zum Einsatz um den Ionenwind an Ecken und Kanten sowie im Bereich der aktiven Elektroden zu messen. Die Methode liefert Aussagen über die Ionenwindrichtung und die Größenordnung der Windgeschwindigkeit ab ca. 0,3 m/s und benötigt keinen zeitaufwändigen Aufbau wie die LDA-Messmethodik. Bei den Messungen zeigt sich folgender Zusammenhang:

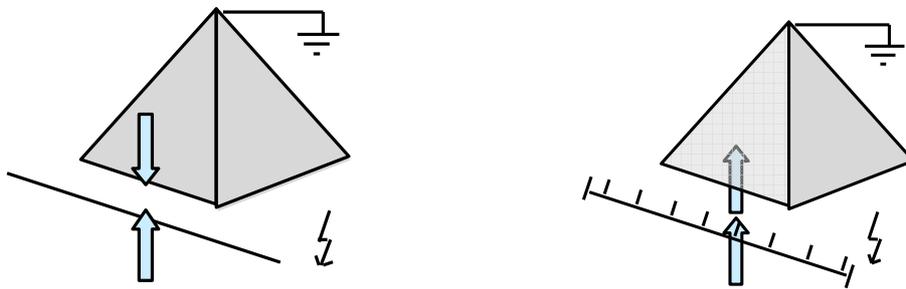


Abb. 71: Strömungsgeschwindigkeit des Ionenwinds bei Drahtelektroden (links) und Punktelektroden (rechts)

Beim Einsatz der Drahtelektrode entsteht an der Kante der Pyramide eine Gegenkorona umgekehrter Polarität. Dieser in der Literatur beschriebene Effekt resultiert aus den am geerdeten Gegenpol entstehenden Spiegelladungen. Bei ausreichend hoher Feldstärke treten umgekehrt gepolte Luftionen aus, die einen Ionenwind in entgegengesetzter Richtung erzeugen und somit die Beschichtung der Kante und auch das Eindringen des Pulvers ins Innere der Pyramide erschweren (Abb. 71 links). Der Effekt der Gegenkorona kann durch fotografische Aufnahmen in einer Dunkelkammer sichtbar gemacht werden. Dabei wird idealisiert eine Hochspannung führende Drahtelektrode einem geerdeten Draht gegenübergestellt. Beim Einsatz aktiv negativer Hochspannung, die (wie im Bild links zu erkennen) größere Unstetigkeiten aufweist, entsteht am geerdeten Draht eine matt Blau leuchtende positive Korona, die den Draht homogen umhüllt. Wird an die aktive Elektrode positive Hochspannung angebracht, dann entsteht eine negative Gegenkorona am geerdeten Draht (Abb. 72 rechts). Visuell unterscheiden sich aktive oder passive Korona nicht, lediglich die Charakteristika des Erscheinungsbildes von negativer und positiver Korona zeigen sich deutlich.

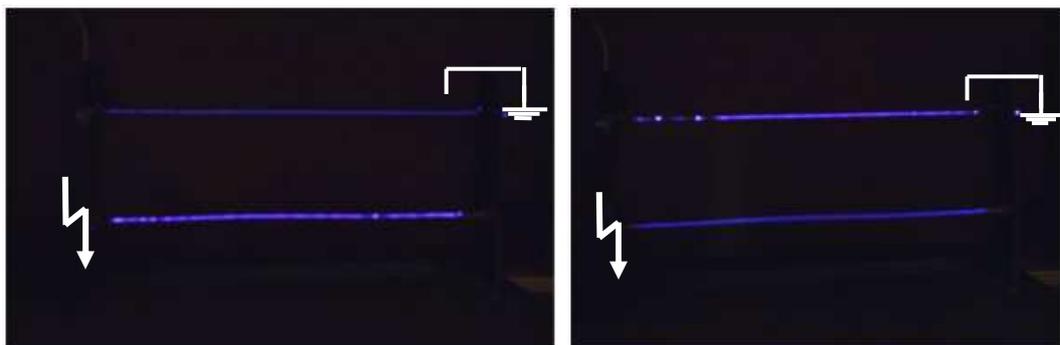


Abb. 72: aktive negative Korona (links) und aktive positive Korona (rechts)

Beim Einsatz einzelner Punktelektroden ist die Feldstärke an der Gegenelektrode (Kante der Pyramide) nicht hoch genug um eine Gegenkorona zu erzeugen aber trotzdem so hoch, dass dort ein beachtlicher Ionenwind entsteht, der sich am Werkstück entlang bewegt und dadurch das Eindringen ins Pyramideninnere erleichtert (Abb. 71 rechts). Hinsichtlich des Eindringvermögens ist beim Einsatz von Punktelektroden dabei der Einsatz der gepulsten Hochspannung nicht erforderlich. Beim Einsatz von Drahtelektroden wird allerdings bei gepulster Hochspannung das Eindringen erleichtert, da der Korona-Gegenwind dadurch verringert wird (Abb. 73/74).

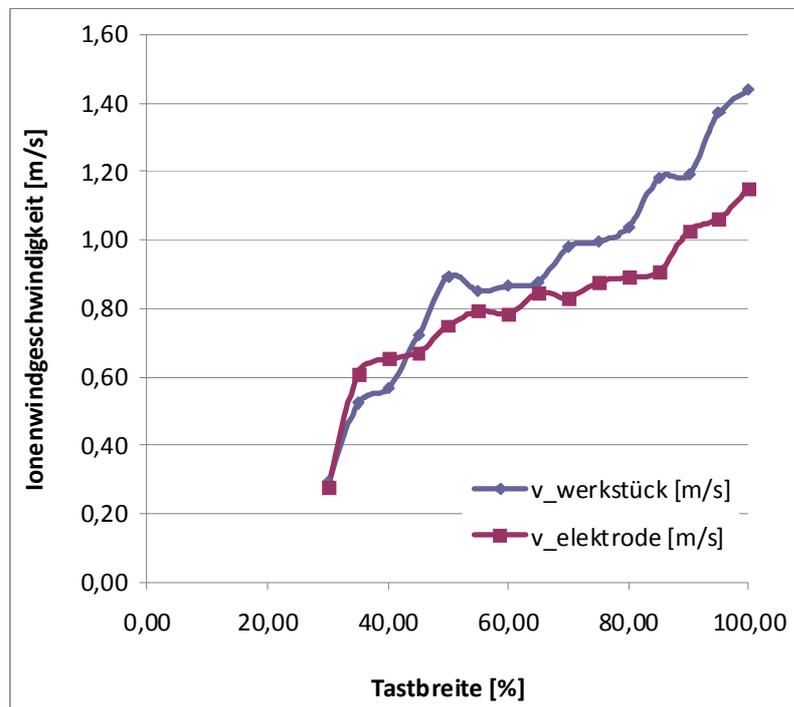


Abb. 73: mit dem Flügelradanemometer gemessene Ionenwindgeschwindigkeit in der Nähe der Elektrode und in unmittelbarer Nähe zum Werkstück

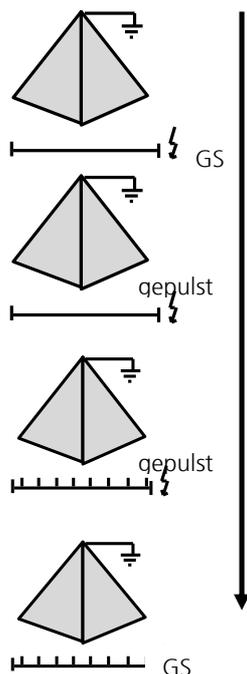


Abb. 74: Eindringvermögen bei Draht und Punktelektroden, gepulste und ungepulste Hochspannung (von oben nach unten steigendes Eindringvermögen)

Lediglich beim Gegenüberstellen einer Punktelektrode zu einer geerdeten Spitze entsteht eine Gegenkorona (Abb. 75). Bei der Beschichtung „realer“ Werkstücke tritt dieser Fall nur sehr selten ein.



Abb. 75: aktive Punktelektrode (unten) und passive, geerdete Spitze mit sichtbarer Gegenkorona

Die im Taguchi-Design [49] durchgeführten Versuchsreihen zeigen folgende Versuchsergebnisse (Abb. 76 a-c):

Hinsichtlich des Eindringvermögens (Zielgröße) sind Punktelektroden den Drahtelektroden überlegen, da an der Werkstückkante keine Gegenkorona und damit kein „Gegen“-Ionenwind entsteht (Erläuterungen siehe oben). Um das Eindringvermögen weiter zu verbessern kann es erforderlich sein, mittels einer Luftleiste die Pulverpartikel zusätzlich weiter ins Werkstückinnere zu bewegen. Bei der Signalform besteht mit der Elektrodengeometrie eine Wechselwirkung. Gleichspannung hat Vorteile beim Einsatz von Punktelektroden, da der Ionenwind stärker ins Werkstückinnere eindringt. Bei Drahtelektroden entsteht an der Kante ein „Gegen“-Ionenwind der beim Einsatz von gepulster Hochspannung minimiert ist, so dass dann gepulste Hochspannung vorteilhaft ist (siehe auch Abb. 72-74). Der Bewegungsablauf während der Beschichtung (Taumbewegung oder Linearbewegung) sowie der Sprühabstand sind nicht mehr signifikant hinsichtlich der Eindringtiefe ($F\text{-Wert} < F_{\text{krit.}}$).

Wie erwartet sind Punktelektroden aufgrund der geringeren Abscheideleistung (damit verbunden geringere Raumladungsdichte), der höheren Aufladung der Partikel bei gleichzeitig größerem Feldstärkeabfall hin zum Werkstück besser hinsichtlich der optischen Verlaufsqualität als Drahtelektroden. Aufgrund der geringeren Rücksprühneigung ist der Einsatz von gepulster Hochspannung zur Verbesserung der optischen Verlaufsqualität vorteilhaft.

Hinsichtlich der Beschichtungsleistung (Fördergeschwindigkeit) sind Drahtelektroden den Punktelektroden überlegen. Bei der Beschichtung von Endlosmaterialien oder Platinen (nicht Inhalt dieses Projektes), aber auch bei einfachen 3D-Teilen ohne kritische Teilevertiefungen (Faraday-Käfige) haben daher Drahtelektroden ihre Berechtigung.

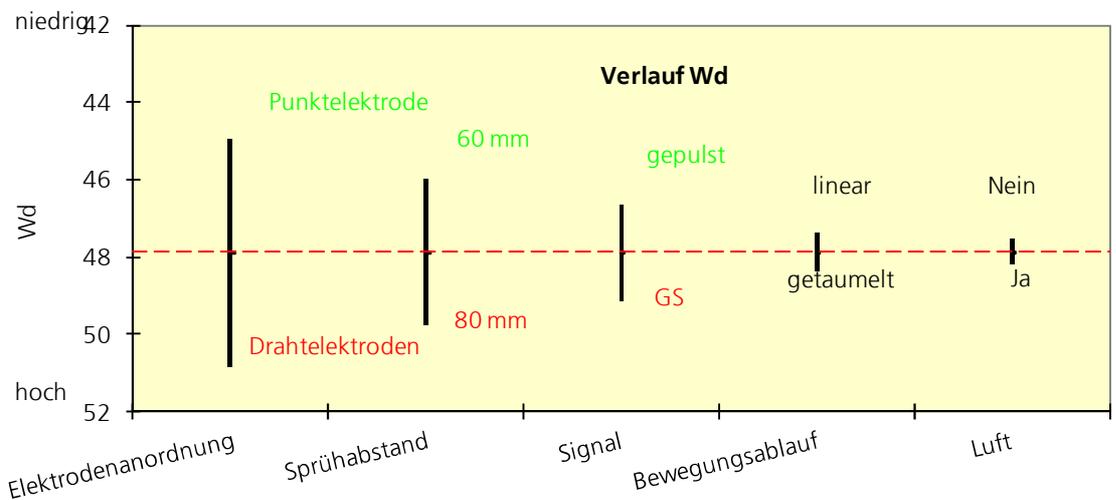
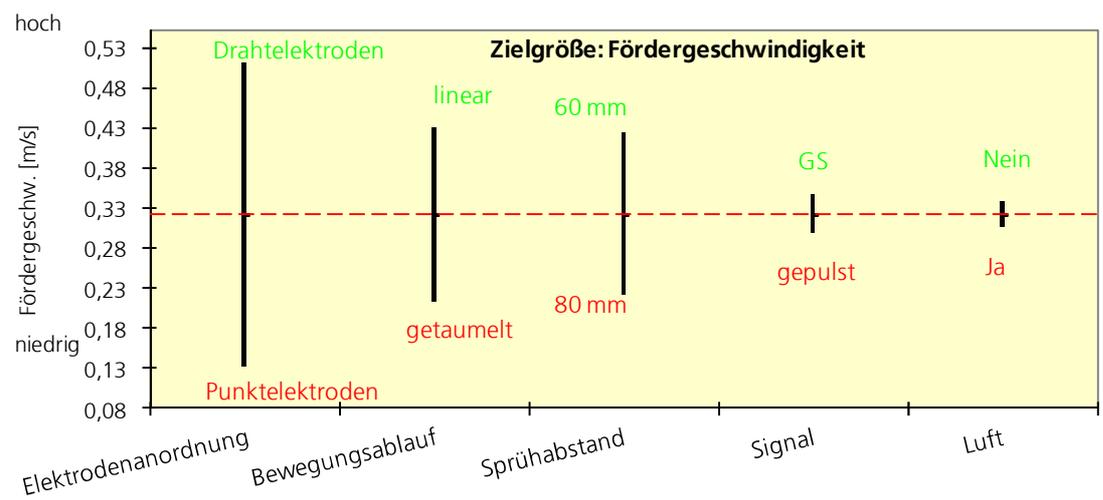
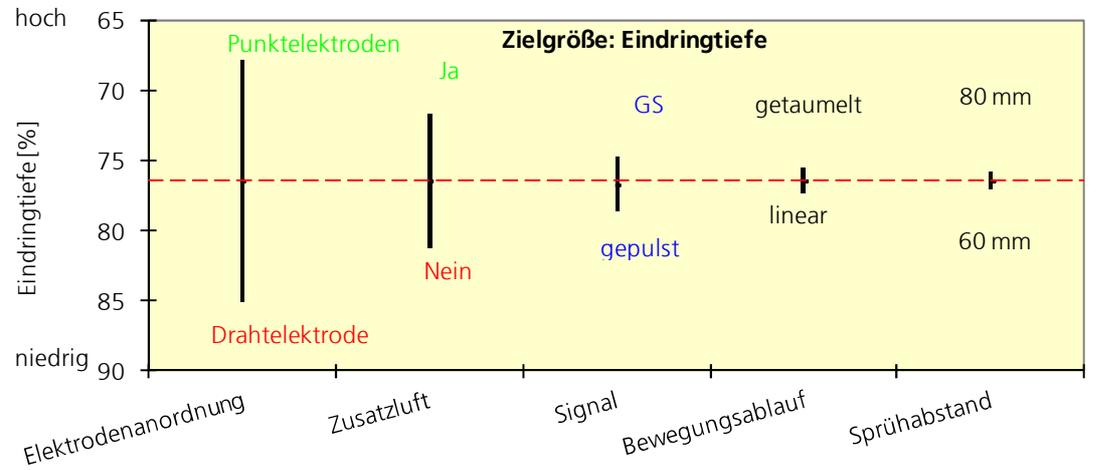


Abb. 76a/b/c: Versuchsreihen Taguchi DoE; *: rote Schrift: nachteilig hinsichtlich der Zielgröße; grün vorteilhaft; blau Wechselwirkung; schwarz insignifikant

Aufbau eines Demonstrators für 3-dimensionale Kleinteile

In Kooperation mit dem Partnerinstitut IFF wird eine Lackierzelle zur Beschichtung von Kleinteilen aufgebaut und auf der Hannover-Messe (April 2009) ausgestellt sowie ihre Funktion vorgeführt. Die Lackierzelle mit Fördertechnik, Steuerung und Robotertechnik wird von Fa. Festo (nicht im offiziellen Projektteam involviert) aufgebaut. Der Aufbau des elektrostatischen Fluidisierbetts mit Absaugung und Einbrenntechnik erfolgt in Zusammenarbeit mit dem Projektteam am Fraunhofer IPA. Zukünftig sollen mit der Lackierzelle Studenten und Techniker / Ingenieure ausgebildet bzw. weitergebildet werden („Lernfabrik“).

Das Schulungskonzept der Lernfabrik umfasst sieben Module. Den Anfang bilden Grundlagen zur Wandlungsfähigkeit von Unternehmensstrukturen und das strategische Unternehmensmanagement. Anschließend werden Methoden zur Planung und Optimierung von Fabriken sowie die dazu notwendigen Werkzeuge erläutert und in Trainings direkt von den Teilnehmern angewendet. So wird das Gelernte unter fachlicher Anleitung einstudiert, damit es anschließend in den eigenen Unternehmen angewendet werden kann [50].

Im offiziellen Projektteam Baden-Württemberg werden folgende Arbeiten zum Aufbau einer in die Lernfabrik integrierten Lackierzelle durchgeführt.

- Auswahl und Bereitstellung geeigneter Sintermaterialien sowie Mithilfe beim Aufbau des Fluidisierbetts (Fa. Durst)
- Vorreinigung / Plasmaanlage, Projektierung und Bereitstellung (Fa. Gramm)
- Mithilfe bei der Projektierung der Einbrenntechnik/Infrarottechnik (Fa. Hege)
- Mithilfe bei der Pulverzudosierung / Rüttelrinne (Fa. Meeh)
- Auswahl und Bereitstellung der Hochspannungstechnik, Mithilfe bei der Elektrodeneinbindung (Fa. Schnier)
- Bereitstellung geeigneter Pulverlacke, Vorversuche, Bereitstellung von Pulverlack RAL 5015 Himmelblau, Standardmahlung, Mischpulver (Innenanwendung, Substrat Aluminium); Voraussetzung: gute Rieselfähigkeit, Eignung für schnelle Infrarottrocknung / schnelle Vernetzung (Fa. Wörwag)

Als Lüftungstechnische „Kleinanlage“ wird ein explosionsgeschützter Staubsauger der Fa. Nilfisk verwendet. Ein Teilstrom wird für die Randabsaugung, ein weiterer Teilstrom für die Absaugung der gesamten Zelle verwendet. Der Prozessablauf in der Lackierzelle (Abb. 77) ist wie folgt geplant:

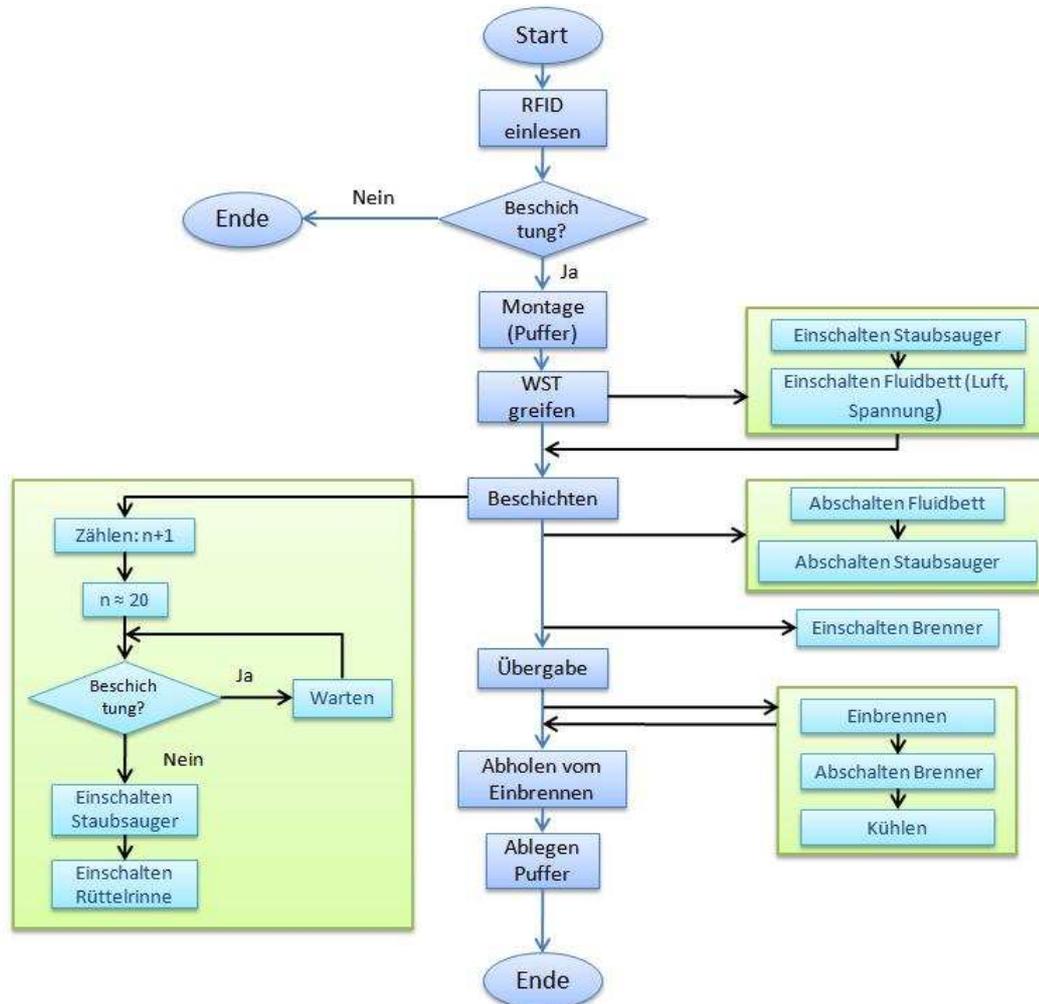


Abb. 77: Prozessablauf Lackierzelle „Lernfabrik“

Die Lackierzelle kann als Modul in die am IFF bestehende „Lernfabrik“ integriert werden (Abb. 78). Dadurch wird das modulare und rekonfigurierbare Montagesystem um eine mobile Pulverbeschichtungsanlage erweitert und stellt dadurch ein wandlungsfähiges und ressourceneffizientes Produktionssystem dar (Abb. 79).

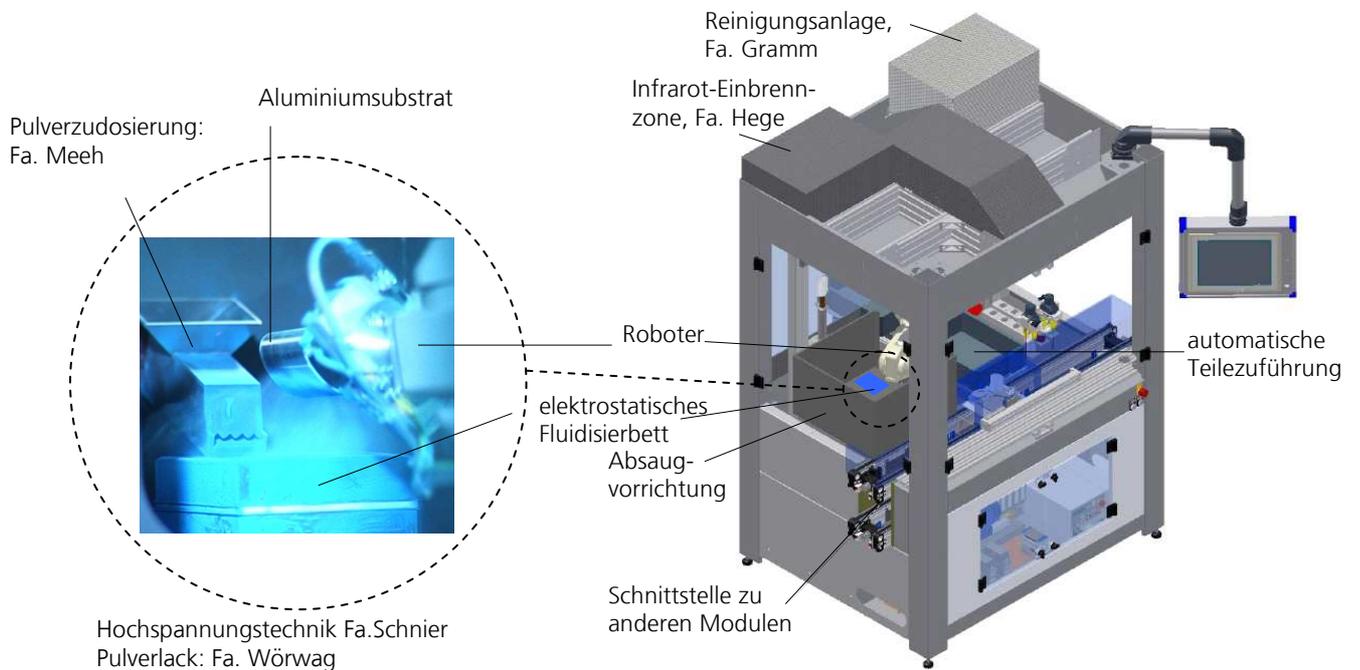


Abb. 78: Modul Lackierzelle, integriert in die „Lernfabrik“

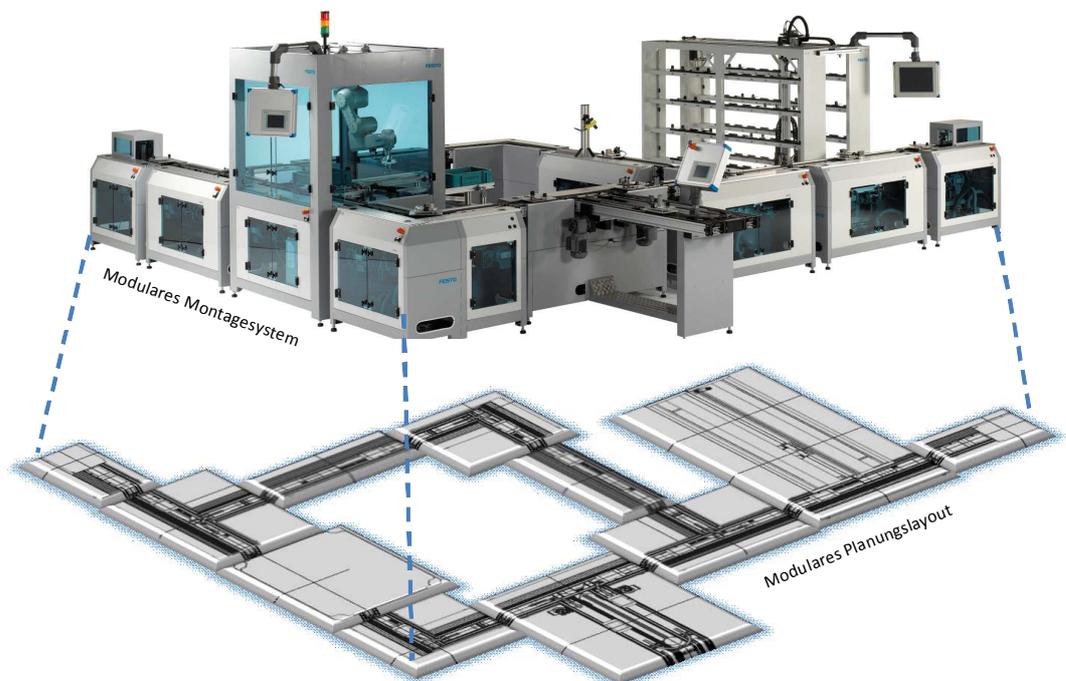


Abb. 79: Das modulare rekonfigurierbare Montagesystem ist um eine mobile Pulverbeschichtungsanlage erweitert

Schnelle und energieeffiziente Einbrenntechnik für 3-D Werkstücke

Versuche mit verschiedenen Einbrenntechniken zeigen, dass mit den gegenübergestellten Techniken vergleichbare Aufheizkurven erzielt werden (Abb. 80).

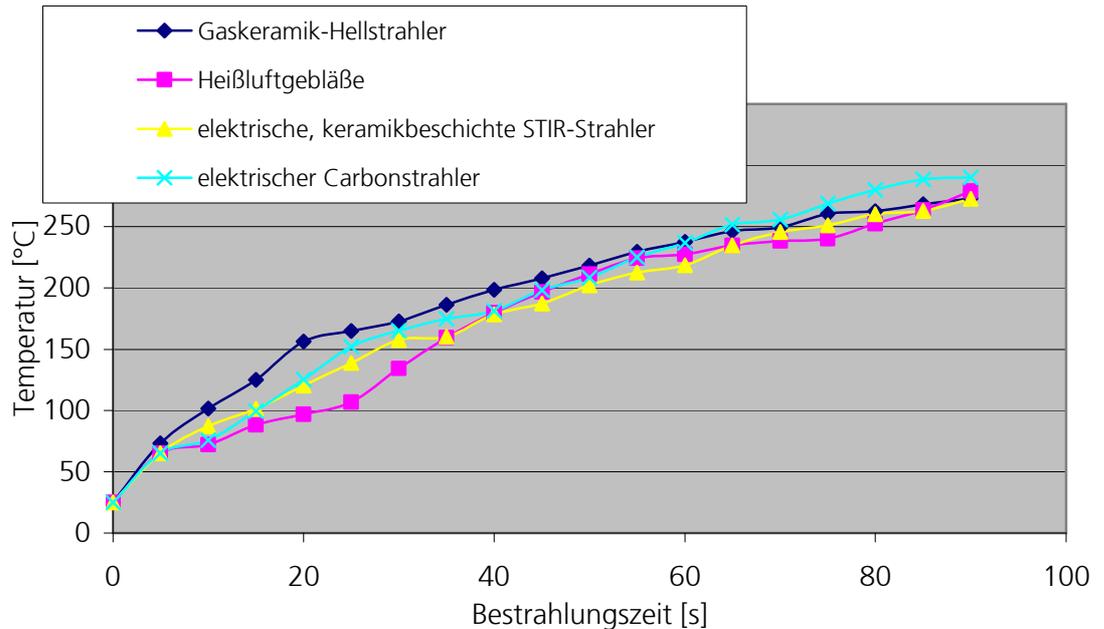


Abb. 80: Aufheizkurven an den Aluminium-Modellwerkstücken

Vom Einsatz von gasbetriebenen Strahlern wird aus sicherheitstechnischen Gründen abgesehen, da in der Lernfabrik z.T. ungeschultes Personal die Anlage bedient. Ein Heißluftgebläse lässt sich hinsichtlich der Temperaturentbreitung wegen des hohen Anteils an Wärmekonvektion nicht so gut eingrenzen, so dass die Gefahr der thermischen Schädigung des Fluidisierbetts groß ist. Elektrisch betriebene STIR-Strahler sind teurer als elektrische Carbonstrahler. Daher erfolgt das Schmelzen und Vernetzen der Pulverlackschicht erfolgt mittels 6 wabenförmig ums Werkstück angeordneter Infrarot-Carbonstrahler in weniger als 30 s (Abb. 80). Beim gut wärmeleitfähigen Aluminium-Substrat ist dabei keine Drehung des Werkstücks erforderlich.



Abb. 81: 6 wabenförmig ums Werkstück angeordnete Carbon-Strahler

Die Auswahl, Versuche und Versuchsauswertungen im Bereich der Aufschmelz- und Vernetzungstechnik werden von der Fa. Hege begleitet. Die Vorbehandlung der Bauteile (Plasmavorbehandlung), die als separates Chassis von der Fa. Gramm adaptiert wird erfordert die Abstimmung mit dem gesamten Projektteam, da Fluidisierbett, Fördertechnik und Pulverlackmaterial aufeinander abgestimmt werden müssen.

Meilenstein M5: Aufbau neuer Versuchseinrichtungen zur Prüfteilefertigung, abgeschlossen März 2009

Die für Flachteile häufig eingesetzten schnellen Infrarot-Einbrenntechniken [51][52][53] kommen für 3-D Werkstücke dann in Frage, wenn Substrate eine gute Wärmeleitfähigkeit besitzen und eine näherungsweise rotationssymmetrische Geometrie aufweisen (z.B. Lernfabrik s.o.). Bei elektrischen Infrarotstrahlern ist der konvektive Anteil für komplexe 3-D Teile oft zu gering, so dass die Strahlungsintensität sich oft nicht ausreichend homogen verteilt. Untersuchungen im Vorfeld zeigen, dass Gasinfrarot-Strahler aufgrund des höheren konvektiven Anteils (über das heiße, ausströmende Verbrennungsgas) einen Vorteil bieten [12][17]. Um aber das Pulver schnell auf fast jeder beliebigen Werkstückgeometrie Schmelzen und Vernetzen zu können, ist der derzeitige Aufbau der Versuchseinrichtung am Fraunhofer IPA nur bedingt geeignet und muss entsprechend modifiziert werden. Die Modifikation besteht darin, dass das heiße Verbrennungsgas im Umluftbetrieb gefahren wird, wobei anteilig Frischluft (in unserem Fall aus der Raumluft) ergänzt wird. Der am Werkstück vorbeiströmende Umluftanteil führt zusätzlich zur Infrarotbestrahlung zu einer konvektiven Trocknung des Werkstücks. Die Trocknungsmethode stellt also eine Mischung aus Infrarot- und Umlufttrocknung dar. Durch bessere Nutzung des konvektiven Anteils steigt der Gesamt-Wirkungsgrad an, so dass energieeffizient eingebraunt werden kann.

Gepulste Hochspannung, kostengünstiger Schalter

Grundlagen der Hochspannungstechnik werden z.B. in [54] beschrieben. Die Versuche am Fraunhofer IPA mit gepulster Hochspannung zeigen, dass außer Rechteckspannungen keine weiteren Spannungsformen erforderlich sind. Frequenzbereiche über 30 Hz sind nicht sinnvoll. Das wichtigste Kriterium für eine gute Beschichtungsqualität ist ein schnelles Abfließen der Ladung beim zurückgehen des Signals auf 0 V. Der für die Versuche verwendete Hochspannungsverstärker der Fa. TREK (MODEL 30/20A), der frei wählbare Signale aus einem Funktionsgenerator (TEKTRONIX AFG 3022B) bis ca. 30 kV erzeugt, dessen Signale vom Oszilloskop (Hameg Combiscope HM1008) aufgenommen und während der Versuche ständig überwacht werden müssen wäre für den industriellen Einsatz nicht praktikabel. Vielmehr eignet sich dafür ein Schalter, der direkt die Hochspannungsseite schaltet, statt den Primärstromkreis eines Funktionsgenerators zu verstärken. Bei dieser Technik ist es wesentlich einfacher, Auflade- bzw. Entladezeiten sehr kurz zu halten. Dafür eignen sich prinzipiell Elektronenröhren. Masuda hat mit pulsierenden Spannungssignalen elektrostatische Applikationen (z.B. für den Pulvertransport) entwickelt und dabei häufig noch Röhrenverstärker eingesetzt [55][56][57]. Diese Technik erfordert jedoch einen hohen Platzbedarf, ist störungsanfällig und verschwindet nach und nach (mit wenigen Ausnahmen) vom Markt. Unbewegliche oder bewegliche, z.B. rotierende Funkenstrecken sind grundsätzlich ebenfalls denkbar [58][59], die Variabilität des Hochspannungssignals sowie dessen Steuerbarkeit/Regelbarkeit sind aber hier stark eingeschränkt. Bekannt sind auch einige Anwendungen von Halbleiterschaltern. Beispielsweise können MOSFET-Transistoren für die Schaltung hoher Spannungen eingesetzt werden wie sie Fa. Behlke anbietet.

Ebenfalls können in Reihe geschaltete Thyristoren [60] für die Anwendung verwendet werden. Der Platzbedarf für diese Schalter ist gering, so dass derartige Schaltungen in ein Fluidisierbett eingegossen und die Wege vom Schalter hin zum Aufladebereich kurz sowie die Kapazität gering gehalten werden kann. Aufgrund dieser Vorteile fällt die Entscheidung für den Aufbau eines derartigen Schalters. Der Schalter wird in gemeinsamer Zusammenarbeit mit der Fa. Schnier aufgebaut. Zur Überwindung kapazitiver Blindlasten beim Schalten des Hochspannungssignals kommt ein für elektrostatische Applikationen untypisch leistungsstarker Generator zum Einsatz. Für die geringen erforderlichen Hochspannungswerte nicht größer als 30 kV ist die gesamte Mimik Hochspannungserzeuger/Schalter nicht signifikant teurer als die konventionelle Technik mit Gleichspannung. Derzeit können alle im Vorfeld eingesetzten Rechtecksignale mit Ausnahme der ins Positive gehenden Hochspannungssignale mit dem vorhandenen Schalter realisiert werden.

III Bewertung der Umsetzungsmöglichkeiten

Besonders kompakte Anlagen bzw. schnelle Prozesse können mittel- bis langfristig bei einfachen Werkstückgeometrien, z.B. bei Abdeckteilen realisiert werden (Abb. 4 Groblayout, Abb. 66 Versuchsergebnis). Um bei solchen Bauteilen eine gute Kantenbeschichtung zu erzielen, können passive Ionisatoren zum Einsatz kommen die auch bei der Beschichtung dünner *Drähte* hilfreich sind (Abb. 65). Zur schnellen Beschich-

tung ist insgesamt der Einsatz von Drahtelektroden vorteilhaft, da damit höhere Abscheideleistungen erzielt werden können. Gut realisieren lässt sich mittel- bis langfristig beispielsweise die Pulverbeschichtung von *Heizkörper-Elementen* oder *Schalt-schrank-Elementen*. Die Werkstück-Förderbewegung erfolgt dabei in der Regel durch eine Linearbewegung über das Fluidisierbett. Bei sehr hohen Anforderungen an die optische Verlaufsqualität sind Punktelektroden vorteilhaft, insbesondere dann, wenn gepulste Hochspannung zum Einsatz kommt. Für gutes Eindringen in Teilevertiefungen stellt der Einsatz von Punktelektroden ebenfalls einen Vorteil dar, insbesondere dann, wenn das Eindringen mit einer Zusatzluft unterstützt wird. Sind an Bauteilen einerseits flächige Bereiche, andererseits auch Teilevertiefungen zu beschichten, dann bietet sich eine Kombination aus Draht- und Punktelektroden, gepulster und ungepulster Hochspannung sowie die Unterstützung durch Zusatzluft an. Zu nennen sind hier *Küchenfronten* bei denen die Realisierungschancen mit entsprechendem Entwicklungsaufwand gut sind. Bei der Beschichtung von *Lampengittern*, *Lochblechen* oder *Filterstützgeweben* (Abb. 68) sind die Realisierungschancen gut, wenn Werkstücke mit einer Taumelbewegung übers Fluidisierbett gefahren werden. *Schraubenfedern* können mit einer einfachen Drehbewegung übers Fluidisierbett gefördert werden. Bei der Beschichtung von Drahtware, beispielsweise *Gitterzäunen*, ist der Einsatz von gepulster Hochspannung besonders vorteilhaft, da dabei ein besserer Umgriff auf die Oberseite der Drähte gewährleistet wird (Abb. 69). Wird eine einfache, rundliche Werkstückgeometrie mit einer Drehbewegung über das Fluidisierbett gefahren (beispielsweise *Dosen*, *Kleinteile*), dann ist der Einsatz von gepulster Hochspannung nicht erforderlich (Abb. 55, Abb. 81). Bei sehr komplexen Bauteilen, die starke Teilevertiefungen (Faraday-Käfige) aufweisen, und bei denen gleichzeitig die Qualitätsanforderungen extrem hoch sind, beispielsweise bei *Auto-Felgen*, sind die Realisierungschancen für den Einsatz des elektrostatischen Fluidisierbetts sehr gering (Abb. 64).

Literatur

- [1] N.N.: Beschichtungsautomat für Kleinstmotoren; Oberfläche + JOT 1985, Heft 10, S. 26-27
- [2] Ringel, J: Elektrostatischer Pulverauftrag im Wirbelbett; Berichte der 6. Vortrags-, Informations- und Arbeitstagung Elektrostatisches Beschichten; Hochschule für Verkehrswesen „Friedrich List“, Dresden, 1975
- [3] Dreßler, P.: Elektrostatisches Wirbelbett mit niedriger Aufladespannung; Berichte der 6. Vortrags-, Informations- und Arbeitstagung Elektrostatisches Beschichten; Hochschule für Verkehrswesen „Friedrich List“, Dresden, 1975
- [4] Singh, A.J.: Electrostatic Fluidized Bed Technique Achieves 30 µm Film Thickness; Conference Finishing 87, Cincinnati, Ohio (USA), 1987
- [5] Kretschmer, M.: Bandpulverbeschichtetes Coil: Technologie und Anwendung; Tagungsband “Die EPS-Praxis 1999”, Bad Nauheim (Veranstalter: Technik + Kommunikation Verlags GmbH, Berlin)
- [6] United States Patent 5,769,276: Powder Atomizer, Anmelder: Terronics Development Cooperation
- [7] Binda, P., van den Berg Jeths, R.: Electro-Magnetic Brush Technology: A Novel Powder Coating Application Process for Coil Coating; ECCA 37th General Meeting, Malta 2003
- [8] PCT-Anmeldung WO 96/15199: Process for Coating a substrate with a Powder Paint Composition, Anmelder: DSM, Michael Huber München GmbH
- [9] AT Patentschrift, Vorrichtung zur Beschichtung von Gegenständen mit pulverförmigen oder körnigen Teilchen bzw. Flocken oder Fasern, Anmelder: Hugo Brennenstuhl KG, Tübingen-Pfrondorf
- [10] Massimiliano Barletta, Electrostatic fluidized bed (EFB) coating of heat sensitive and electrical insulating substrates with low-curing thermoset epoxy-polyester (EP) powders, Progress in Organic Coatings, Volume 56, Issues 2-3, 1 July 2006, Pages 185-198
- [11] Barletta, Gisario, Guarino, Tagliaferri, Fluidized bed coating of metal substrates by using high performance thermoplastic powders: Statistical approach and neural network modelling, Engineering Applications of Artificial Intelligence, Volume 21, Issue 8, December 2008, Pages 1130-1143
- [12] Abschlussbericht *Hocheffiziente Verfahren zur Pulverbeschichtung von Holzwerkstoffen*; Programm Lebensgrundlage Umwelt und ihre Sicherung (BWPLUS) des Landes Baden-Württemberg; Förderkennzeichen: BWT 22003; Ausführende Stelle: Institut für Industrielle Fertigung und Fabrikbetrieb der Universität Stuttgart (in Kooperation mit dem Fraunhofer IPA)
- [13] Markus Cudazzo, Ulrich Strohbeck: Kostengünstiger beschichten ohne Pistolen; JOT 8.2006, S. 26-29
- [14] Europäische Patentschrift EP 1 321 197 A3: Verfahren und Vorrichtung zur Beschichtung von bewegten Substraten; Anmelder: Fraunhofer-Gesellschaft zur Förderung der angewandten Forschung e.V.
- [15] PCT-Anmeldung WO 2004/091805 A1: Vorrichtung und Verfahren zur Beschichtung von Flachteilen; Anmelder: Fraunhofer-Gesellschaft zur Förderung der angewandten Forschung e.V.

- [16] Patentschrift DE 10 2004 010 177 B4: Elektrostatische Fluidisieruvorrichtung und elektrostatisches Wirbelbadverfahren zur Beschichtung von Substraten mit Beschichtungspulver; Anmelder: Fraunhofer-Gesellschaft zur Förderung der angewandten Forschung e.V.
- [17] Vorhaben Hochgeschwindigkeits-Beschichtung mit elektronenstrahlhärtenden Pulverlacken für innovative Oberflächen; Programm „Förderung von innovativen Netzwerken (InnoNet) des Bundesministeriums für Wirtschaft und Technologie (BMWi); Förderkennzeichen IN 4578; Laufzeit 3/2005 – 4/2007)
- [18] Ye, Steigleder, Scheibe, Domnick.: Numerical simulation of the electrostatic powder coating process with a corona spray gun; Journal of Electrostatics 54 (2002), 189-2005
- [19] Ye, Domnick: On the simulation of space charge in electrostatic powder coating with a corona spray gun; Powder Technology 135-136 (2003), 250 – 260
- [20] Domnick, Ye: Simulation of the powder coating process; Conference papers Partec 2004, Nürnberg
- [21] BMBF-Vorhaben: Untersuchung der Einflussgrößen und ihrer Zusammenhänge beim Pulverlackkreislauf; Förderkennzeichen 01 ZH 9310/8; Projektträger: Deutsche Forschungsanstalt für Luft- und Raumfahrt e.V., Bonn; Koordinator: Deutsche Forschungsgesellschaft für Oberflächenbehandlung e.V. (DFO); durchführende Stelle: Fraunhofer IPA/IFF
- [22] BMBF-Vorhaben: Pulver-Rückgewinnung bei aktuellen und neuen Anwendungen; Förderkennzeichen 01 RV 9616/0; Projektträger: Deutsches Zentrum für Luft- und Raumfahrt e.V., Bonn; Koordinator: Deutsche Forschungsgesellschaft für Oberflächenbehandlung e.V. (DFO); durchführende Stelle: Fraunhofer IPA/IFF
- [23] Harry G. White, Entstaubung industrieller Gase mit Elektrofiltern, VEB Deutscher Verlag für Grundstoffindustrie, Leipzig 1969
- [24] Elayan, Bouziane, Waters, Theoretical and experimental investigations of a pulsed ESP, Journal of Electrostatics 56 (2002) 219-234
- [25] Norbert Klippel, The influence of high-voltage pulse parameters on corona current in electrostatic precipitators, Journal of Electrostatics 49 (2000) 31-49
- [26] Marton, K.: Wechselwirkung zwischen Gleich- und Wechselspannungskorona bei der Pulverlackierung; Tagungsband „Die EPS-Praxis 1990“, Bad Nauheim (Veranstalter: Technik+Kommunikation Verlags GmbH, Berlin
- [27] Marton, K.: Hat die Wechselspannungsaufladung bei der Pulverlackierung eine Chance?; Tagungsband „Die EPS-Praxis 1995“, Bad Nauheim (Veranstalter: Technik+Kommunikation Verlags GmbH, Berlin)
- [28] PCT Patent WO 2003/041867, Pulverbeschichtungsvorrichtung und -verfahren, Anmelder: Nihon Parkerizing
- [29] J. Sidney Clements, Richard H. Blair, Electrostatic Powder Coating of Insulating Surface using an Alternating Polarity Internal Corona Gun, Department of Physics and Astronomy, Appalachian State University, NC 28608
- [30] Peek, F.W. Jr.: Dielectric Phenomena in High Voltage Engineering, New York 1929
- [31] Hermann Rohmann, Methode zur Messung der Größe von Schwebeteilchen, 16. Juli 1923
- [32] Dieter Dahlmeyer.: Theorie der Zeitbereichsreflektometrie; elektronik industrie 2-2001, S. 60-64, 3-2001, S. 48-51
- [33] M.M. Pauthenier: J.Phys. Radium, 1932

- [34] S. Wu: Electrostatic charging and deposition of Powder coatings, Polym.-Plast. Technol. Eng., 1976
- [35] Ang, Lloyd: Investigation of charged particle trajectories in electrostatic powder coating systems, Pergamon Journals Elsevier 1987
- [36] Adrian G. Bailey: The science and technology of electrostatic powder spraying, transport and coating, Journal of Electrostatics 45 (1998) 85-120
- [37] H. Sigloch: Technische Fluidmechanik, Springer-Verlag
- [38] Thomas W. Johnson, James R. Melcher: Electromechanics of Electrofluidized Beds, Ind. Eng. Chem. , Fundam., Vol. 14, No. 3 1975, 146-153
- [39] G.M. Colver, An Interparticle Force Model for AC-DC Electric Fields in Powders, Powder Technology 112 (2000) 126-136
- [40] G. Dale Cheever: Electrostatic Charge Acceptance and Decay of Powder Coating Particles, Journal of Applied Polymer Science, Volume 19, Issue 1, Pages 147 – 163, 17. Juni 1974
- [41] Mandel, Adolf: Untersuchung und Festlegung der Eigenschaften elektrostatischer Beschichtungspulver; Schlussbericht, März 1979
- [42] Jacques Cazaux, Critical thicknesses of electrostatic powder coatings from inside Journal of Electrostatics, Volume 65, Issue 12, November 2007, Pages 764-774
- [43] Ruck, G., Lasermethoden in der Strömungsmesstechnik, AT Fachverlag GmbH Stuttgart
- [44] Albrecht, Borys, Damaschke, Tropea, Laser Doppler And Phase Doppler Measurement Techniques, Springer Verlag
- [45] Jolibois, Forte, Moreau, Application of an AC barrier discharge actuator to control air-flow separation above NACA 0015 airfoil: Optimization of an actual location along the chord, Journal of Electrostatics 66 (2008) 496-503
- [46] Magnier, Dong, Hong, Hureau, Action of a pulsed DBD actuator on a slow jet, Journal of Electrostatics 66 (2008) 369-374
- [47] John Chubb, Comments on methods for charge decay measurement, Journal of Electrostatics 62 (2004) 73-80
- [48] DIN EN 61340-2-1, VDE 0300, Elektrostatik, Teil 2-1: Messverfahren- Fähigkeit von Materialien und Erzeugnissen, elektrostatische Ladungen abzuleiten
- [49] Dr.-Ing. habil. Helmut Dreyer.: Design of Experiments (DoE). Nutzen, Möglichkeiten und Anwendungen der Versuchsplanung, Seminarunterlagen, Ostfildern-Nellingen: Technische Akademie Esslingen 2008
- [50] Engelbert Westkämper, Jochen Böck, Mit Pulver mobil beschichten, Intelligenter Produzieren, 2007/4
- [51] US Patent US 6,541,078 B2, Process for Coating Substrates, Anmelder: E.I. Dupont de Nemours and Company
- [52] PCT Patent WO 99/47276, Verfahren zur Pulverlackierung, Anmelder: Industrieservis Gesellschaft für Innovation, Technologie-Transfer und Consulting für thermische Prozessanlagen mbH
- [53] PCT Patent WO 03/002922 A1, Verfahren und Vorrichtung zum Trocknen und/oder Vernetzen oder Erwärmen mittels elektromagnetischer Strahlung, Anmelder: Adphos Advanced Photonics Technologies AG
- [54] Andreas Küchler, Hochspannungstechnik, Springer Verlag
- [55] Masuda, S.: New technologies for electrostatic flocking; lecture 6 conference "Flock 1992"

- [56] Masuda, S.; Hosokawa, S.: Novel charge elimination method in powder handling and transport using surface discharge, *Journal of Electrostatics*, 30 (1993) 191-202
- [57] Masuda, S.: Industrial Applications of Electrostatics, *Journal of Electrostatics*, 10 (1981), S. 1-15
- [58] Yae-Duk Moon.: A compact high-voltage pulse generator using a rotary airhole sparkgap *Journal of Electrostatics* 65 (2007) 527-534
- [59] Yan, van Heesch, Pemen: A triggered spark-gap switch for high-repetition rate high-voltage pulse generation, *Journal of Electrostatics* 57 (2003) 29-33
- [60] US Patent US 4,370,607 Static high voltage switch usable in switchable high voltage D.C. generator, 1983, Anmelder: Thomson-CSF, Paris

Formelzeichen, Symbole und Abkürzungen

a :	Mittelpunktabstand (für Coulomb'sche Kraft) [m]
$A_{\max.}$:	maximale Abscheideleistung (Pulverabscheidung)[kg/(m ² ·s)]
C_w :	Strömungswiderstands-Koeffizient
E_{DL} :	Durchbruchfeldstärke der Luft ($3 \cdot 10^6$ V/m)
E :	elektrische Feldstärke [V/m]
E_0 :	Anfangsfeldstärke (in unmittelbarer Nähe der Elektrode)[V/m]
\vec{E} :	als Vektor dargestellte Feldstärke [V/m]
\bar{E} :	zeitlich gemittelte Feldstärke über die zeitlich gemittelte Spannung U_0 als Fläche unter der Kurve beim Einsatz gepulster Hochspannung [V/m]
ϵ :	(absolute) Permittivität [As/Vm]
ϵ_0 :	Permittivität des Vakuums ($8,85 \cdot 10^{-12}$)[As/Vm]
ϵ_r :	relative Permittivität (Werte von 1 bis ∞ , einheitslos)
f :	Rauheitsfaktor der Luft zur Berechnung der Korona-Einsatzspannung nach der (teilempirischen) Peek'schen Formel ($0,5 < f < 1$; angenommen ca. 0,75)
f_D :	Laser- Doppler Frequenz [Hz]
F_R :	Stoke'sche Reibungskraft [N]
F_G :	Schwerkraft [N]
F_E :	Feldkraft [N]
F_C :	Coulomb'sche Kraft [N]
F_G :	Gewichtskraft [N]
φ :	Kreuzungswinkel (Laser-Doppler Anemometrie)[°]
Φ / Φ_0 :	Potenzial / angelegtes Potenzial [V]
Φ_P :	Potenzial abgeschiedene Pulverschicht [V]
$\Phi(t)$:	Potential nach Zeit zu Definition des Pulver- Entladeprozesses [V]
Φ_1, Φ_2, Φ_3 :	maximale Potentiale zu Definition des Pulver- Entladeprozesses [V]
g :	Erdbeschleunigung [m/s ²](9,81)
η :	dynamische Viskosität der Luft ($17,2 \cdot 10^{-6}$) [Pas]
J :	Ionenstromdichte der Luftionen [A/m ²]
J_P :	Ionenstromdichte der Pulverpartikel [A/m ²]
J_I :	Ionenstromdichte der Luftionen [A/m ²]
λ :	Wellenlänge (für Laser- Doppler Anemometrie) [m]
\dot{m} :	Pulverausstoß [kg/(m ² · s)] (angenommen ca. 0,01)
m_p :	Masse Partikel [kg/m ³](über Dichte ca. 1300, idealisiert runde Partikel)
μ :	Ionenbeweglichkeit [m ² /(Vs)]($220 \cdot 10^{-6}$ für Luft)
q :	Ladung [As (C)]
$q_1 \cdot q_2$:	Ladung · Spiegelladung [As (C)]
q_{\max} :	Sättigungsaufladung (Partikel) [As (C)]
δq :	Ladungsanstieg über einen sehr kurzes Zeitintervall [As(C)]
r_p :	Radius (Partikel) [m]

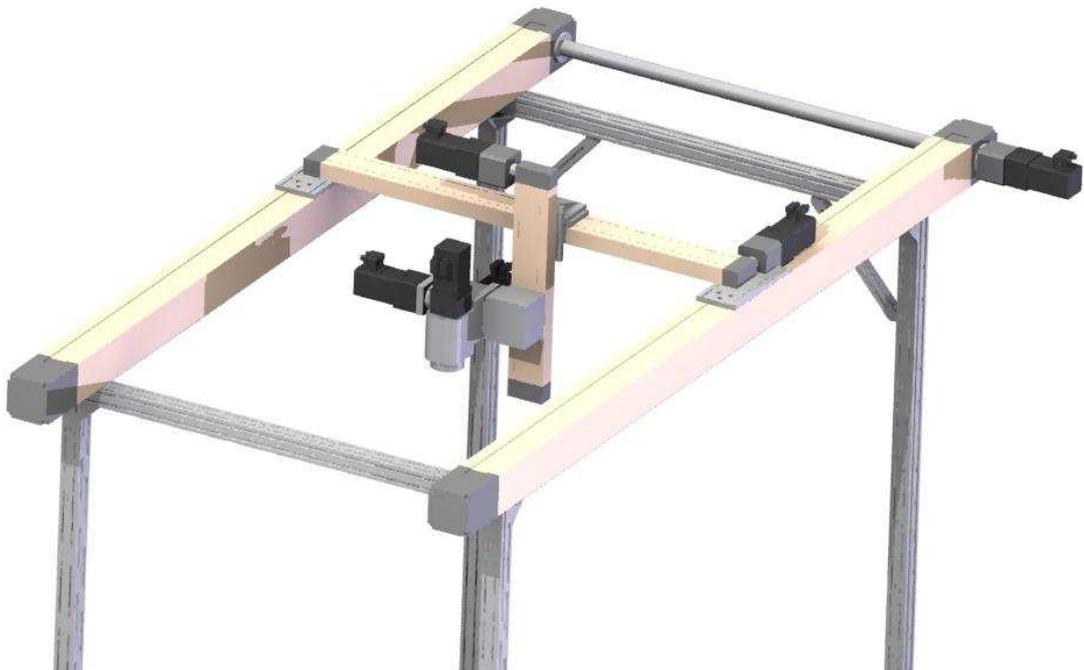
r_0	: Radius Elektrode [m]
$r_{0\text{korrr}}$: korrigierter Elektrodenradius [m]
R_{spez}	: spezifischer Widerstand [Ωm]
ρ	: Raumladungsdichte gesamt (durch Luftionen und geladenes Pulver) [As/m^3]
ρ_{max}	: max. Raumladungsdichte [$\text{As}(\text{C})/\text{m}^3$]
ρ_p	: Raumladungsdichte der Pulverpartikel [$\text{As}(\text{C})/\text{m}^3$]
ρ_i	: Raumladungsdichte der Luftionen [$\text{As}(\text{C})/\text{m}^3$]
ρ_{Lr}	: relative Dichte der Luft (für Peek'sche Formel, 1 angenommen, ohne Einheit)
ρ_L	: Dichte Luft [kg/m^3] (1,2)
S	: Abstand Elektrode/Werkstück [m]
δt	: sehr kleines Zeitintervall (für <u>E</u> nite <u>E</u> lemente <u>M</u> ethode; Aufladezeit) [s]
τ_A	: Aufladekonstante [s]
$\tau_E, \tau_{E1}, \tau_{E2}, \tau_{E3}$: Selbstentladezeitkonstanten [s]
U_K	: Korona-Einsatzspannung [V]
ν	: kinematische Viskosität der Luft ($14,2 \cdot 10^{-6}$)[m^2/s]
v_{IW}	: Ionenwindgeschwindigkeit [m/s]
v_{Fl}	: Geschwindigkeit Fluidisierluft [m/s]
v_p	: Geschwindigkeit Pulverpartikel [m/s]
v_i	: Geschwindigkeit Luftionen [m/s]
Δv	: Partikelrelativgeschwindigkeit [m/s]
x	: Bereich zwischen Elektrode u. Werkstück an dem E ermittelt wird [m]
Δx	: Abstand der Interferenzstreifen (Laser- Doppler Anemometrie) [m]
∇	: Nabla- Differenzialoperator
∇^2	: Laplace- Differenzialoperator
FEM:	<u>E</u> nite <u>E</u> lemente <u>M</u> ethode

Projektbegleitende Projektbesprechungen bzw. Sitzungen

Art der Besprechung	Termin	Inhalte
Erste Arbeitsbesprechung mit allen Projektpartnern	26.09.2007	Zeitplan, grobe Arbeitsverteilung
Gesamtprojektbesprechung „Lernfabrik“	14.11.2008	Aufbau der Lackierzelle „Lernfabrik“ mit allen erforderlichen Komponenten
Bilateral mit Fa. Hege	29.10.2008	Aufbau der Einbrenntechnik
Bilateral mit Fa. Schnier	07.01.2009	Hochspannungstechnik und Elektrodeneinbindung
Bilateral mit Fa. Gramm	7.11.08 und 23.01.2009	Integration der Plasmavorbehandlung für die Lackierzelle „Lernfabrik“
Bilateral mit Fa. Durst (Telefonkonferenzen)	Zeitraum November/Dezember 2008	Auswahl und Bereitstellung geeigneter Sintermaterialien sowie Mithilfe bei der Projektierung des Fluidisierbetts
Bilateral mit Fa. Wörwag (Telefonkonferenzen, Besuch von Herrn Santa)	Kontinuierlich über die Gesamtlaufzeit des Projektes	Bereitstellung geeigneter Pulverlacke, Diskussion Anforderungsspektrum, Vorversuche, Infrarot-eignung etc.
Abschlussbesprechung mit allen Projektpartnern (entschuldigt: Fa. Meeh)	30.09.2009	Darstellung des Gesamtprojekts und weitere Vorgehensweise

Anhang

Idee: Modifizierung der bestehenden Einrichtung (in Zusammenarbeit mit der Fa. Gramm, s.u. Abbildung). Die Studie ergab, dass aus ökonomischer, steuerungstechnischer und mechanischer Sicht ein Knickarmroboter die bessere Lösung für die Beschichtung 3-dimensionaler Bauteile darstellt.



Grobe Darstellung der Aufgaben des Firmenkonsortiums:

Firma/Institut	Firmenprofil	Aufgabe im Projekt
Fraunhofer IPA	FuE auf dem Gebiet der industriellen Lackiertechnik	Entwicklung kompakter Anlagenmodule für 3D-Werkstücke
Durst Filtertechnik GmbH	Entstaubungstechnik, Flüssigfiltration und Sintertechnik	Sinterböden für Fluidisierbecken
Gramm Oberflächentechnik GmbH	Lohnbeschichter/Hersteller von Spezial-Beschichtungsanlagen	Handhabungstechnik, Vorbehandlung
Hege GmbH Anlagen- und Maschinenbau	Hersteller von Lackieranlagen	Kompakte Einbrenntechnik
Meeh Pulverbeschichtungs- und Staubfilteranlagen GmbH	Hersteller von Pulverbeschichtungsanlagen/Lohnbeschichter	kompakte Absaugtechnik/ Zudosiertechnik
Schnier Elektrostatik GmbH	Hersteller von Hochspannungstechnik	Gestaltung und Erprobung der HS-Versorgung
Karl Wörwag GmbH & Co. KG Lack- und Farbenfabrik	Lackhersteller	Herstellung angepasster Beschichtungspulver