

# Spritzstrahl und Düsenstandzeit – Eine Möglichkeit zur Erhöhung der Prozesssicherheit

Mit Hilfe einer speziellen Messtechnik lassen sich charakteristische Werte von Tröpfchen im Sprühstrahl so beschreiben, dass zwischen einer verschlissenen und einer nutzbaren Düse unterschieden werden kann. Dies eröffnet neue Möglichkeiten für eine Inline-Prozessesteuerung und kann zur besseren Beherrschung von industriellen Spritzanwendungen beitragen.

Andreas Hänsel und Meiko Hecker

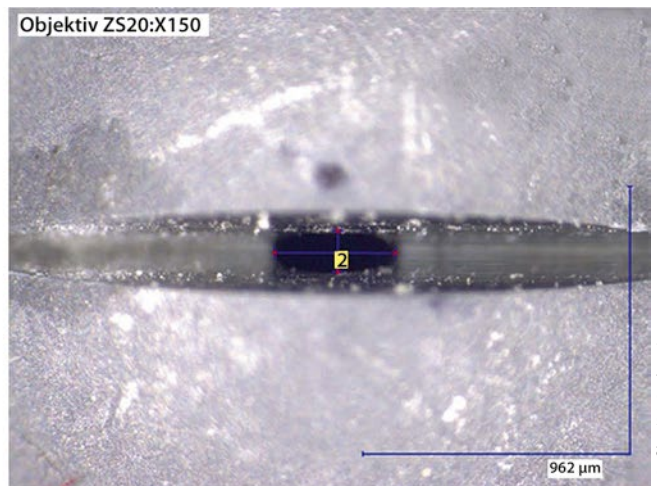
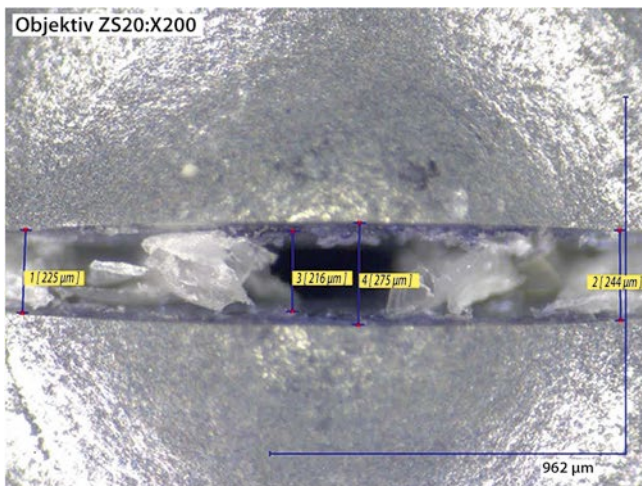
Spritzen ist ein in der Möbelindustrie weit verbreitetes Beschichtungsverfahren. Für die Bildung der Lacktröpfchen ist die Kohäsion des Lackes zu überwinden. Dazu muss der den Lacktropfen deformierende Staudruck größer als dessen innerer Zusammenhalt (Kohäsion) sein. In der Vergangenheit wurden zahlreiche Untersuchungen durchgeführt, um experimentell und mit verschiedenen physikalischen Modellansätzen beziehungsweise numerischer Simulation diesen Prozess besser zu verstehen und weiterzuentwickeln /1, 2, 3/. So beschreibt folgende Formel beispielhaft für eine pneumatische Zerstäubung die

grundlegenden Zusammenhänge zwischen dem Sauter-Durchmesser und verschiedenen Einflussfaktoren nach Lefebvre /4/:

$$D_{32} = \frac{3}{\frac{2}{d} + \frac{C \cdot \rho_{Lack} \cdot u^2}{4 \cdot \sigma \left(1 + \frac{\dot{m}_{Lack}}{\dot{m}_{Luft}}\right)}}$$

$D_{32}$  = Sauter-Durchmesser  
 $u$  = Luftgeschwindigkeit  
 $m$  = Massenstrom  
 $C$  = experimentell bestimmte Konstante  
 $d$  = Düsendurchmesser  
 $\sigma$  = Oberflächenspannung  
 $\rho$  = Dichte

Die quantitative Auswertung der Formel zeigt, dass der Sauter-Durchmesser mit zunehmender Luftgeschwindigkeit asymptotisch abnimmt und eine größere Luftmenge ebenfalls zu kleineren Lacktröpfchen im Spritzstrahl führt. Infolge der zahlreichen stochastischen Einflüsse weist dieser jedoch ein dynamisches Spektrum der Tröpfchengröße auf, dessen mittlere Werte und Verteilungsform beeinflusst werden können. Bezüglich der Größe der Lacktröpfchen bestehen unterschiedliche Ziele: Sie sollten kleiner als 50 µm sein, um gut zu verlaufen, aber eine bestimmte Größe nicht



© Rößler (BA Sachsen)

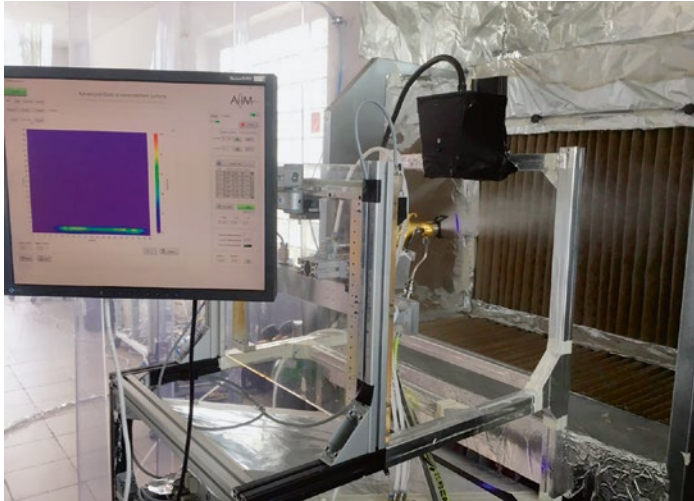
**Bild 1** > Zustand einer Spritzdüse am Ende der Standzeit (links), Zustand einer neuen Spritzdüse (rechts).

## Nie mehr ROST!

- über 6.000 Std. Salzsprühtest, Chemiebeständig
- Oberflächentechnik: Garantie bis 50 Jahre
- viel besser und günstiger als Zink



[www.OR6000.de](http://www.OR6000.de)



**Bild 2** > Für die Untersuchungen wurde eine fabrikneue Spritzdüse mit einer verschlissenen Düse verglichen. Dazu wurden gemäß einem randomisierten Versuchsplan die Düsen in die Spritzpistole der Versuchsanlage eingesetzt.

finden, die die Standzeit einer Spritzdüse möglichst eindeutig beschreibt.

### Experimenteller Vergleich i.O.- und n.i.O.-Düsen

Den Einfluss des Verschleißes auf die Geometrie einer Spritzdüse zeigt *Bild 1*. Es sind deutliche Veränderungen hinsichtlich der Gleichmäßigkeit der Ausgangsgeometrie zu erkennen, die Auswirkungen auf die Tröpfchengrößenverteilung sowie die Gleichmäßigkeit des Spritzstrahls vermuten lassen.

Die für die experimentellen Untersuchungen genutzten Parameter sind in *Tabelle 1* zusammengefasst. Die Abweichungen von Einstellgrößen in realen industriellen Prozessen sind in den experimentellen Möglichkeiten begründet und beeinträchtigen die grundsätzliche Aussagekraft der Ergebnisse nicht.

Für die Untersuchungen wurde eine fabrikneue Spritzdüse mit einer nach den technologischen Vorschriften eines Möbelherstellers als verschlissene eingestufte Düse verglichen. Dazu wurden zunächst gemäß einem randomisierten Versuchsplan die Dü-

unterschreiten. Sonst besteht Gefahr, dass sie vor dem Auftreffen auf das Bauteil durch Verdunsten des Lösemittels eine Viskosität erreichen, die einen guten Verlauf erschwert /5/. Die Qualität einer gespritzten Fläche ist damit von verschiedenen stofflichen, technischen und technologischen Einflussfaktoren abhängig.

### Düsenverschleiß bestimmt Prozessqualität

Aktuell geht der Anteil manuell ausgeführter Spritzprozesse zurück und wird durch Durchlauf-Spritzautomaten bezie-

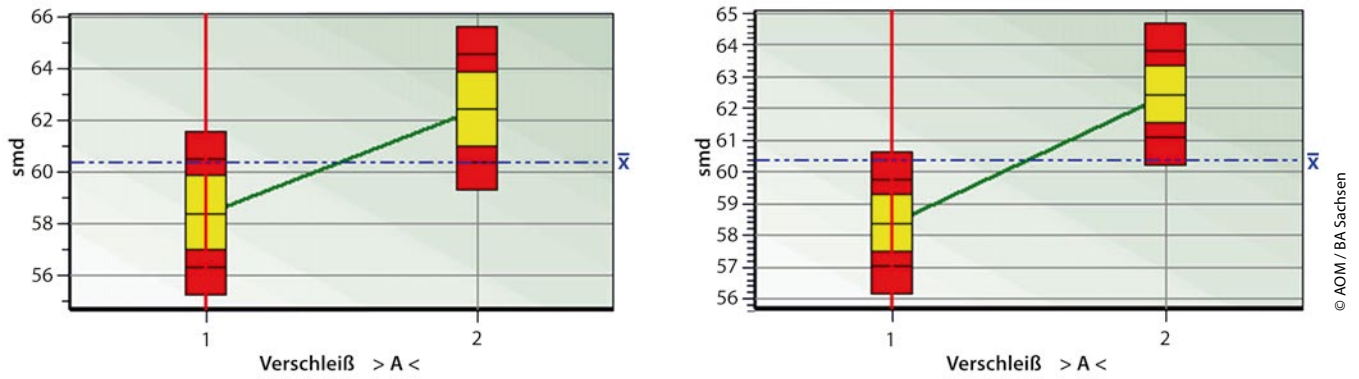
hungsweise Robotertechnik ersetzt. Damit gewinnt eine vorausschauende objektivierte Bewertung der Prozessqualität, die unter anderem vom Verschleiß der Düse bestimmt wird, an Bedeutung. Ziele können dabei die Bestimmung des optimalen Zeitpunkts zum Austausch verschlissener Spritzdüsen sein oder eine Anpassung technologischer Parameter zur Einhaltung akzeptabler Charakteristika des Spritzstrahls und damit der Beschichtungsqualität.

Die nachstehenden Ausführungen beschreiben den Versuch, anhand der Untersuchung des Spritzstrahls Kriterien zu

**IST Metz GmbH**  
Excimer/UV/LED UV/IR

**Ihr SpecialIST für matte und kratzfeste Oberflächen mit Excimer-Technologie!**

IST Metz GmbH info@ist-uv.com www.ist-uv.de



**Bild 3** > Links: Verteilung der Sauter-Durchmesser der Tröpfchen bei neuer (1) und verschlissener Düse (2) auf Basis einer Varianzanalyse; rechts: Verteilung der Sauter-Durchmesser der Tröpfchen bei neuer (1) und verschlissener Düse (2) auf Basis einer Kovarianzanalyse.

sen in die Spritzpistole der Versuchsanlage eingesetzt (Bild 2). Eine vertikale und horizontale Bewegung der aktiven Spritzpistole ermöglichte die Erfassung der Verteilung von Tröpfchengröße und Geschwindigkeit in einem definierten Bereich des Spritzstrahls mit Hilfe des Messgeräts SpraySpy von AOM-Systems.

**Digitale Spritzbilder erzeugen**

Die SpraySpy Technologie basiert auf der Lichtstreuung eines bewegten Tropfens oder Partikels, der von einem inhomogenen Lichtstrahl beleuchtet wird. Die resultierende Lichtstreuung wird in die individuellen Streuordnungen zeitlich getrennt und von Photonenempfängern registriert. Die

Charakteristika der Streuordnungen korrelieren eindeutig mit der Größe, Geschwindigkeit und Opazität des Tropfens oder Partikels. Damit ist diese Technologie ein direktes und zählendes Messverfahren. Die Methode und ihre Umsetzung ist in der Literatur /6, 7, 8/ umfänglich erklärt. In der hier beschriebenen Arbeit wurde ein SpraySpy Modell Saturn genutzt. Um aus den Punktmessungsergebnissen eine räumliche Information abzuleiten, ist das Messsystem mit einer Traverse gekoppelt. Durch die automatisierte Punkt-Rasterung des Sprühkegels werden unter anderem Falschfarbener, sogenannte „digitale Spritzbilder“ erstellt. Die Charakterisierung von Spritzstrahlen und deren Kenngrößen sind in DIN SPEC 91325 /6/ ausführlich beschrieben.

**Deutliche Unterschiede im Sprühstrahl erkennbar**

Für die statistische Auswertung der Versuche wurden die Varianz- und die Diskriminanzanalyse genutzt. Diese Methoden kommen zur Anwendung, wenn in einem vorliegenden Datensatz von vornherein eine Strukturierung in unterschiedliche Gruppen bekannt ist. Mit der Varianzanalyse wird die Beeinflussung der Gruppenzugehörigkeit durch bestimmte Einflussgrößen untersucht. Bei der Diskriminanzanalyse lassen sich durch die Bildung neuer künstlicher Merkmale Verhältnisse zwischen Gruppen ohne größeren Informationsverlust systematisieren.

Die gemessenen Werte wurden zunächst mit Hilfe des Programms destra von Q-das einer Varianzanalyse unterzogen. Die Datensätze erfüllten die Voraussetzung zur Anwendung des Verfahrens, das heißt die Varianzen aller Zellen waren auf dem Niveau  $\alpha = 0,1\%$  gleich (modifizierter Levene Test), die Residuen stammten aus einer Normalverteilung (Epps-Pulley-Test).

Es konnte nachgewiesen werden, dass sich die Sprühstrahlen einer fabrikneuen und einer verschlissenen Düse hinsichtlich mittleren Tröpfchengröße, Sauter-Durchmessers der Tröpfchen sowie Tröpfchen-Geschwindigkeit deutlich unterscheiden.

Ein durch mechanische Beanspruchung der Düsenöffnung nachgestellter Fortschritt des Verschleißes bestätigte die dabei gefundene Tendenz.

**Viskosität beeinflusst die Tröpfchenbildung**

Um den Einfluss der während der Messung angestiegenen Viskosität des Lacks zu quantifizieren, wurde die Auswertung

Parameter	
Pistole	Xcite Airmix (Sames Kremlin)
Düse	Buse Airmix 09-174 (Kremlin Rexson)
Luftkappe	VX24 KHVLP (Kremlin Rexson)
Düsendurchmesser (mm)	0,9
Spritzdruck (Eingang) (Bar)	1,4 (Übersetzung 1:30)
Hornluft (Start) (Bar)	3
Hornluft (Ende) (Bar)	1,5
Material	Aqualux D 1800 Herlac

**Tabelle 1** > Die für die experimentellen Untersuchungen genutzten Parameter.

Merkmal	xi	Ss	MS	p
Verschleiß	Faktor	40,80	40,80	0,0003
Viskosität	Linear	8,015	8,015	0,0153
Viskosität	quadratisch	8,296	8,296	0,0142
	Modell	52,53	17,51	0,0009
	Rest	4,271	0,712	-
	Gesamt	56,80	6,311	-

**Tabelle 2** > Übersicht der Ergebnisse der Kovarianzanalyse

Beobachtung	Prognosegruppe	von Gruppe	Quadrierte	
			Distanz	Wahrscheinlichkeit
1	i.O.	i.O.	4,343	1,000
		n.i.O.	31,217	0,000
2	n.i.O.	i.O.	12,419	0,000
		n.i.O.	-3,316	1,000

**Tabelle 3** > Klassifikation von Testbeobachtungen auf Basis einer Diskriminanzanalyse.

mit Hilfe einer Kovariananalyse, die die Viskosität als variable Einflussgröße zusätzlich zu den beiden Faktoren „nicht verschlissen“/„verschlissen“ einführt, wiederholt. Dadurch konnte die Modellgüte weiter verbessert und der bekannte Einfluss der Viskosität auf die Ausbildung des Tropfenspektrums /3/ bestätigt werden. Das ermittelte Bestimmtheitsmaß lässt den Schluss zu, dass rund 92 Prozent der auftretenden Streuungen mit dem gefundenen Modell erklärt werden können (Bild 3, Tabelle 2). Prinzipiell ist bei einer Beurteilung des Düsenverschleißes die Aussage interessant, ob das Spritzbild ausreichend gut (i.O.) oder

ob dies nicht (mehr) der Fall ist (n.i.O.). Auf Basis dieser Fragestellung wurde eine Diskriminanzanalyse mit den Daten des ersten Versuchsdurchgangs durchgeführt. In einem zweiten Schritt sollten die Daten entsprechend klassifiziert werden. Die Diskriminanzanalyse wird angewandt, um Gruppen zu unterscheiden, die durch Variablen charakterisiert werden. Die Ergebnisse in Tabelle 3 lassen erkennen, dass die Messwerte der Vergleichsprobe korrekt klassifiziert wurden. Mit dem gegenüber der Varianzanalyse „robusteren“ Verfahren, kann eine richtige Zuordnung/Vorhersage des Verschleiß-

grades der Spritzdüse ohne die Einführung und Messung der Kovariablen Viskosität im untersuchten Fall erreicht werden.

### Bildbasierte Erkennung des Düsenverschleißes

Weiterhin ist es möglich, ein farbcodiertes Bild („Falschfarbenbild“) zu erzeugen, das die räumliche Verteilung der Messwerte, etwa Tropfengröße oder Tropfengeschwindigkeit, oder von aus den Messwerten abgeleiteten Größen, etwa Volumenfluss oder räumliche Verteilung der Messwerte vom Rand zum Zentrum des Sprühstrahls, in einem Querschnitt durch den Sprühstrahl visualisiert (Bild 4). Besonders vorteilhaft ist es, wenn das farbcodierte Bild mittels computerimplementierter Algorithmen auf Irregularitäten und/oder Veränderungen untersucht wird, die für einen Verschleiß der Spritzdüse charakteristisch sind. Hierbei kann ein Vergleich mit vorab an intakten und/oder verschlissenen Vergleichsdüsen ermittelten Referenzbildern erfolgen. Auf diese Weise kann alternativ oder ergänzend (im Sinne einer Verfeinerung oder im

  
**Leutenegger + Frei AG**

**Beschichtungsanlagen**

- Komplett Pulverbeschichtungsanlagen und Nasslackieranlagen
- Umbauten/Erweiterungen
- Takt- oder Durchlaufanlagen
- Schlüsselfertig inkl. Montage, Steuerung und Installation

**Vorbehandlungsanlagen**

- Zum Reinigen und Vorbehandeln von Objekten
- Sprühanlagen oder Tauchbadanlagen
- Takt- oder Durchlaufanlagen

**Nasslackierkabinen**

- Zum Beschichten der Objekte
- Nasslackierkabinen oder Lackier-Sprühstände

**Öfen und Trockner**

- Haftwassertrockner, Einbrennöfen, Nasslacktrockner
- Spezialöfen
- Hochtemperaturöfen bis 500 °C
- Energieträger: Gas, Öl, Elektro, Hackschnitzel

**Transportsysteme**

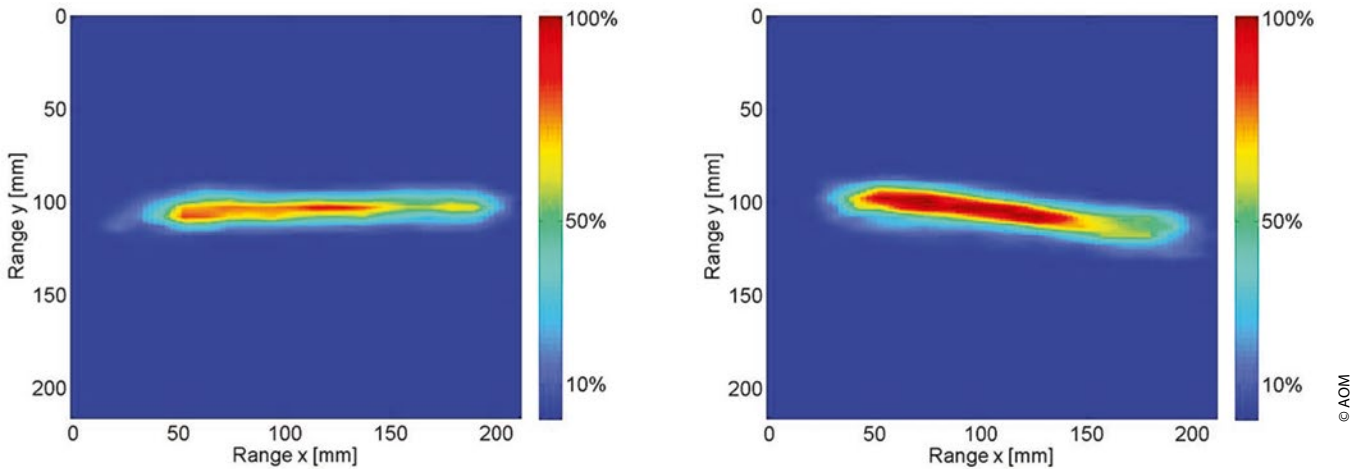
- Zum Transportieren der Objekte durch die gesamte Anlage
- Power+Free-Systeme, Handschiebebahnen, Kreisförderanlagen
- Senkstationen, Gehänge-Lifte (Vertikal-Lifte)
- Integration von Roboter- und Handlings-Anlagen

 [www.leutenegger.com](http://www.leutenegger.com)



Gesamtlösungen  
Oberflächentechnik.

L+F lohnt sich.



**Bild 4** > Falschfarbenbild der Homogenität des Spritzstrahls bei neuer Düse (links) und verschlissener Düse (rechts).

Sinne von Redundanz) zur beschriebenen statistischen Auswertung eine bildbasierte Erkennung und Bewertung des Düsenverschleißes erfolgen.

Dazu sind in weiteren Arbeiten geeignete Auswertungsmethoden heranzuziehen, um den Inhalt dieser Datensätze zu quantifizieren und hinsichtlich der Nutzung zur Klassifikation von Spritzdüsen in automatisierten Prozessen zu verwenden.

**Ausblick und Fazit**

Weitere Untersuchungen sind insbesondere notwendig, um die statistische Signifikanz der gefundenen Ergebnisse für un-

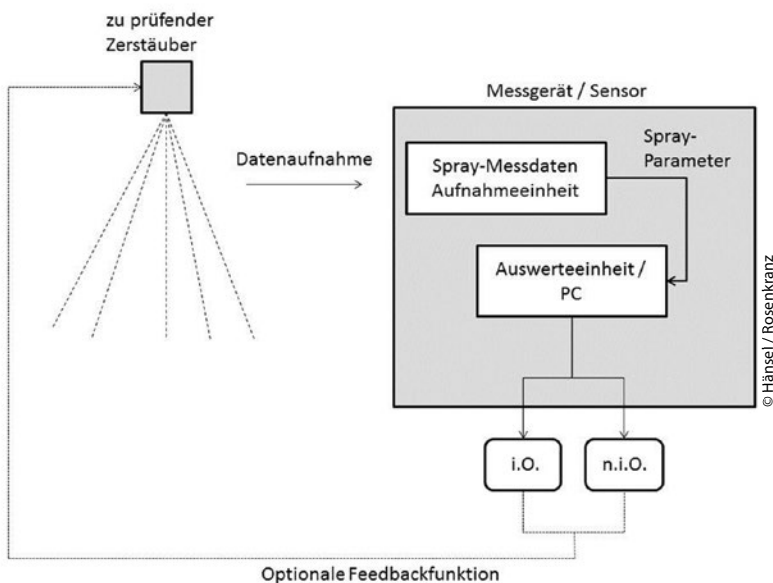
terschiedliche Düsen und Spritzverfahren nachzuweisen. Bislang erfolgte nur eine Unterscheidung zwischen fabrikneu beziehungsweise sehr geringe Nutzungsdauer und komplett verschlissener Düse. Hier sind weitere Arbeiten erforderlich, um für dynamische Prozesse ein Entscheidungskriterium zu definieren.

Das Grundkonzept eines künftigen Inline-Messsystems ist in *Bild 5* dargestellt. Es zeigt zwei mögliche Ausbaustufen. Zum einen kann bei erreichtem Verschleiß ein Signal an den Bediener oder Leitstand gehen, dass ein Düsenwechsel erforderlich ist. Zum anderen können über einen Regelkreis die technologischen Parameter

geändert werden, um die Nutzungszeit der Düse gegebenenfalls zu verlängern.

Mit der beschriebenen Messtechnik ist es möglich, charakteristische Werte von Tröpfchen im Sprühstrahl so zu beschreiben, dass zwischen einer verschlissenen, auszuwechselnden und einer nutzbaren Düse unterschieden werden kann. Dies eröffnet neue Möglichkeiten für eine Inline-Prozesssteuerung und kann zur besseren Beherrschung von industriellen Spritzanwendungen beitragen.

Zur Beschreibung der Veränderung verschiedener Kennwerte des Spritzstrahls und seine Modellierung bietet sich die Nutzung der Möglichkeiten des maschinellen Lernens an. Dabei bedeutet das Lernen der Anlage, dass diese in der Lage ist, in einer vergleichbaren Situation das beste Verhalten aus einer Reihe von Möglichkeiten abzuleiten. Hierzu sind weitere Arbeiten erforderlich. //



**Bild 5** > Das Grundkonzept eines künftigen Inline-Messsystems zeigt zwei mögliche Ausbaustufen. Zum einen kann bei erreichtem Verschleiß ein Signal an den Bediener ergehen, dass ein Düsenwechsel erforderlich ist. Zum anderen können über einen Regelkreis die technologischen Parameter geändert werden, um die Nutzungszeit der Düse gegebenenfalls zu verlängern.

**Die Autoren**

**Prof. Dr.-Ing. habil. Andreas Hänsel**  
 Präsident der Berufsakademie Sachsen  
 Direktor der Staatlichen Studienakademie  
 Dresden  
 Tel. 0351 44722-200  
 andreas.haensel@ba-dresden.de

**Dr. Meiko Hecker**  
 Tel. 06252 98090-75  
 mh@aom-systems.com  
 AOM-Systems GmbH, Heppenheim  
 www.aom-systems.com

# MFN-JOT-Lackier-Workshop

**MFN JOT**  
Veranstaltung

- Zielgruppen:** Betreiber von Lackieranlagen im allgemeinen Maschinenbau; Maschinenbauer, die lackieren lassen; Lohnlackierer
- Inhalte:** Grundlagen und praxisrelevante Informationen für die Bereiche:
- Anlagen- und Applikationstechnik
  - Lackmisch- und -fördertechnik
  - Lacke
  - Qualitätssicherung

**Ort | Datum:** Markdorf | 26. – 27. März 2019

**Die Trainer:**



Patrick Freche

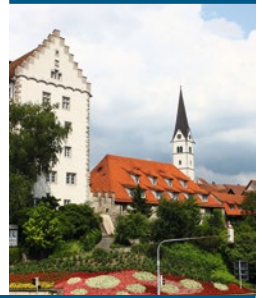


Frank Berger



Matthias Knapp

Weitere Informationen: [www.mfn.li/workshop](http://www.mfn.li/workshop)



## Literaturverzeichnis

- / 1 / Tiedje, O.: Aktuelle Anwendungen von numerischen Simulationen in der Lackierung. Seminar SPA 063, Numerische Simulation von Lackierprozessen, Stuttgart, 20.3.2014
- / 2 / Walzel, P.: Zerstäuben von Flüssigkeiten. In: Chemie Ingenieur Technik 62 (1990) 12, S. 983 – 994.
- / 3 / Thomer, K. W.: Maßnahmen zum Verbessern der pneumatischen Lackzerstäubung – Teilchengrößenbestimmung im Spritzstrahl, Springer Verlag Berlin/Heidelberg 1982.
- / 4 / Lefebvre, A. H.: Atomization and sprays, Hemisphere Pub. Corp., New York 1989
- / 5 / Hänsel, A., Prieto, J.: Industrielle Beschichtung von Oberflächen im Möbelbau, Hanser, München, 2018
- / 6 / DIN SPEC 91325: 2015-06 Charakterisierung von Sprays und Sprühprozessen durch die Messung der Größe und Geschwindigkeit nicht-transparenter Tropfen, 2015
- / 7 / Schäfer, W. u.a.: Analysis of a Pneumatic Atomizer Spray Profile, Elsevier B.V., Particology, 2016
- / 8 / Schäfer, W., Tropea, C.: The time-shift technique for measurement size of non-transparent spherical particles, Proc. SPIE 9232, International Conference on Optical Particle Characterization (OPC 2014), 92320H, 2014
- / 9 / Schäfer, W., Tropea, C.: The time-shift technique for simultaneous measurement of size, velocity, and relative refractive index of transparent droplets, or particles in a flow, Applied Optics, 53(4), 588, 2014

## BRANCHEN- VERBUNDEN

Der neue Newsletter „Kleb- und Dichttechnik“ von **adhäsion**

Jetzt registrieren:

[www.springerprofessional.de/mynewsletters](http://www.springerprofessional.de/mynewsletters)



Alle Top-News und Branchen-Highlights aus der Welt der Kleb- und Dichttechnik, regelmäßig in Ihrem Postfach: Bestellen Sie jetzt unseren kostenlosen Newsletter.

**adhäsion** KLEBEN+  
DICHTEN