



(10) **DE 10 2018 125 205 B4** 2021.09.23

(12) **Patentschrift**

(21) Aktenzeichen: **10 2018 125 205.6**
(22) Anmeldetag: **11.10.2018**
(43) Offenlegungstag: **16.04.2020**
(45) Veröffentlichungstag
der Patenterteilung: **23.09.2021**

(51) Int Cl.: **G01M 99/00** (2011.01)
B05B 1/00 (2006.01)
B05B 12/00 (2018.01)
B05B 15/50 (2018.01)

Innerhalb von neun Monaten nach Veröffentlichung der Patenterteilung kann nach § 59 Patentgesetz gegen das Patent Einspruch erhoben werden. Der Einspruch ist schriftlich zu erklären und zu begründen. Innerhalb der Einspruchsfrist ist eine Einspruchsgebühr in Höhe von 200 Euro zu entrichten (§ 6 Patentkostengesetz in Verbindung mit der Anlage zu § 2 Abs. 1 Patentkostengesetz).

(73) Patentinhaber:
**AOM Systems GmbH, 64347 Griesheim,
DE; Berufsakademie Sachsen - Staatliche
Studienakademie Dresden, 01307 Dresden, DE**

(74) Vertreter:
**Tergau & Walkenhorst Patentanwälte PartGmbH,
60439 Frankfurt, DE**

(72) Erfinder:
**Hänsel, Andreas, Prof. Dr., 01454 Radeberg, DE;
Rosenkranz, Simon, Dr., 64625 Bensheim, DE**

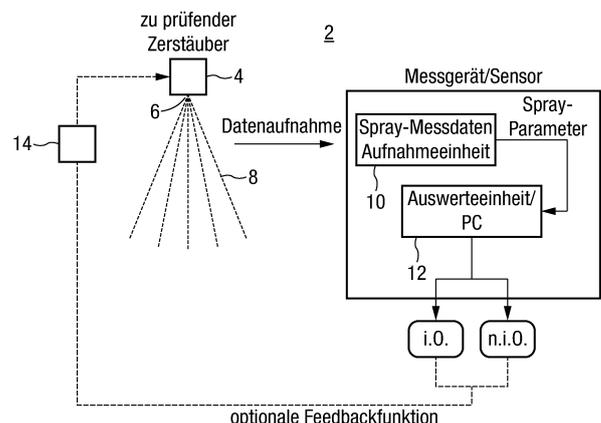
(56) Ermittelter Stand der Technik:

DE	197 46 045	C1
DE	198 47 258	B4
DE	103 07 719	A1
DE	10 2006 020 449	A1
DE	10 2014 211 514	A1
DE	10 2017 208 577	A1

(54) Bezeichnung: **Verfahren und Vorrichtung zur Ermittlung des Verschleißgrades einer Spritzdüse**

(57) Hauptanspruch: Verfahren zur Ermittlung des Verschleißgrades einer Spritzdüse (6) in einem Zerstäuber (4), bei dem

- in zumindest einem Messpunkt oder Messvolumen in dem von der Spritzdüse (6) ausgehenden Sprühstrahl (8) von Sprühmedium zumindest ein Sprühparameter, nämlich eine charakteristische Kenngröße von Tröpfchen im Sprühstrahl, aus der Gruppe umfassend Tropfengröße, Tropfenanzahl, Tropfenankunftszeit, Tropfenopazität und Tropfengeschwindigkeit messtechnisch erfasst wird, und
- der gemessene jeweilige Sprühparameter oder eine daraus abgeleitete Größe oder Verteilung mit zumindest einer zugehörigen Referenzgröße oder Referenzverteilung verglichen wird und daraus ein für den Verschleißgrad der Spritzdüse (6) charakteristischer Kennwert oder Prognosewert gebildet wird.



Beschreibung

[0001] Die Erfindung betrifft ein Verfahren zur Erkennung des Verschleißgrades einer Spritzdüse in einem Zerstäuber. Sie betrifft weiterhin eine zugehörige Vorrichtung.

[0002] Automatisierte Spritzprozesse zur Beschichtung eines Werkstückes mit einem fluiden Sprühmedium, etwa Lack, gewinnen in Industrie und Forschung zunehmend an Bedeutung. Mit größer werdender Betriebsdauer wird die Qualität des Materialauftrags bestimmende Spritzbild zunehmend durch mechanischen Verschleiß der Spritzdüse beeinträchtigt.

[0003] Zur Ermittlung des Verschleißgrades einer Spritzdüse in einem Zerstäuber ist aus der DE 10 2006 020 449 A1 ein Verfahren bekannt, bei dem ein Sprühparameter messtechnisch erfasst und für eine Diagnoseaussage zugrunde gelegt wird. Weitere Verfahren oder Vorrichtungen zur Zustandserfassung von Beschichtungsmitteln sind aus der DE 198 47 258 B4 oder der DE 103 07 719 A1 bekannt. Eine Einrichtung zur Kontrolle eines Sprühstrahls ist hingegen aus der DE 197 46 045 C1 bekannt.

[0004] Aufgabe der Erfindung ist eine frühzeitige, kostengünstige, zuverlässige und möglichst objektive Erkennung und Bewertung des Verschleißzustandes einer Spritzdüse, so dass erforderlichenfalls Gegenmaßnahmen getroffen werden können. Idealerweise soll diese Erkennung im laufenden Produktionsbetrieb eines Zerstäubers möglich sein, ohne diesen unterbrechen zu müssen.

[0005] In Bezug auf das Verfahren wird die Aufgabe gelöst durch ein Verfahren mit den Merkmalen des Anspruchs 1.

[0006] Erfindungsgemäß ist demnach ein Verfahren zur Ermittlung des Verschleißgrades einer Spritzdüse in einem Zerstäuber vorgesehen, bei dem

- in zumindest einem Messpunkt oder Messvolumen in dem von der Spritzdüse ausgehenden Sprühstrahl von Sprühmedium zumindest ein Sprühparameter, nämlich eine charakteristische Kenngröße von Tröpfchen im Sprühstrahl, aus der Gruppe umfassend Tropfengröße, Tropfenanzahl, Tropfenankunftszeit, Tropfenopazität und Tropfengeschwindigkeit messtechnisch erfasst wird, und
- der gemessene jeweilige Sprühparameter oder eine daraus abgeleitete Größe oder Verteilung mit zumindest einer zugehörigen Referenzgröße oder Referenzverteilung verglichen wird und daraus ein für den Verschleißgrad der Spritzdüse charakteristischer Kennwert oder Prognosewert gebildet wird.

[0007] Wie im Rahmen der vorliegenden Erfindung erkannt wurde, ist es mit einem derartigen Verfahren möglich, charakteristische Werte oder Kenngrößen (so genannte Sprühparameter) von Tröpfchen im Sprühstrahl messtechnisch zu erfassen und so zu verknüpfen, dass zwischen einer verschlissenen und einer noch nutzbaren Düse unterschieden werden kann. Die Unterscheidung ist quantifizierbar, reproduzierbar und objektiv. Sie kann automatisiert auf einer zugehörigen Auswertungseinheit ablaufen, insbesondere als computerimplementiertes Auswertungsprogramm.

[0008] Vorteilhafterweise werden zumindest zwei der genannten Sprühparameter, und gegebenenfalls noch weitere, bei der Auswertung berücksichtigt.

[0009] Die Referenzverteilung oder Referenzgröße wird vorteilhafterweise vorab durch Messung(en) an zumindest einer intakten und/oder verschlissenen Vergleichsdüse vom selben Typ wie bei der späteren Verschleißmessung ermittelt, vorteilhafterweise bei bekannten Betriebsparametern des Zerstäubers.

[0010] Da der Sprühstrahl häufig eine kegelförmige Ausdehnung hat, wird bisweilen auch von einem Sprühkegel gesprochen.

[0011] Eine aus den Messwerten abgeleitete bzw. berechnete Größe ist beispielsweise der Sauter-Durchmesser. Der Sauter-Durchmesser bezeichnet in diesem Zusammenhang gemäß der üblichen Konvention den Durchmesser einer Kugel, die das gleiche Volumen- zu Oberflächenverhältnis besitzt wie die Tropfen im Sprühstrahl im Mittel.

[0012] Vorteilhafterweise erfolgt die Messung der Sprühparameter durch eine optische Messvorrichtung, die bevorzugt auf dem Prinzip der Zeitverschiebungsmessung und/oder Flugzeitmessung von durch die sich bewegenden Tropfen im Sprühkegel gestreutem und/oder reflektiertem Licht beruht.

[0013] Bei dem Zeitverschiebungsverfahren wird eine Zeitverschiebungs-Messeinrichtung verwendet, die eine Lichtquelle zur Aussendung eines üblicherweise fokussierten Lichtstrahles, den die zu messenden Teilchen durchqueren, umfasst und eine Anzahl von Strahlungsdetektoren, üblicherweise zwei Strahlungsdetektoren, die unter vorgegebenen Streuwinkeln jeweils einen zeitaufgelösten Intensitätsverlauf von an den Teilchen gestreutem Licht der Lichtquelle messen. Ein Teilchen, das den Lichtstrahl durchquert, sendet dabei verschiedene Streuanteile aus bzw. reflektiert diese, die von den Strahlungsdetektoren empfangen werden und über die zeitaufgelöste Intensitätsverteilung dargestellt werden. Bei diesen unterschiedlichen Streuanteilen handelt es sich unter anderem um Reflektionen, Oberflächenwellen und Brechungen verschiedenster Ordnung und deren Moden, die zeitversetzt die Strahlungsdetektoren erreichen. Dabei ist die Zeit zwischen den detektierten Intensitätspeaks bzw. Streuanteilen proportional zu der Größe und der Geschwindigkeit des Teilchens.

[0014] Bei opaken Teilchen werden in einer zweckmäßigen Abwandlung der Methode üblicherweise zwei oder mehrere Strahlungsdetektoren verwendet, die jeweils unter einem bestimmten Winkel zum Lichtstrahl angeordnet sind. Mit ihnen lässt sich aus der Zeitverzögerung zwischen gleichen Streuanteilen des Intensitätsverlaufes mehrerer Strahlungsdetektoren die Größe eines Teilchens berechnen, sofern die Geschwindigkeit der Teilchen bekannt ist oder gemessen wurde.

[0015] Ein Verfahren zur Bestimmung der Geschwindigkeit der Teilchen ist die Flugzeit-Messmethode, bei der eine Mehrzahl von Lichtquellen derart angeordnet sind, dass die Mehrzahl der ausgesendeten Lichtstrahlen parallel und in Flugrichtung der Teilchen beabstandet zueinander ausgerichtet sind. Einer oder mehrere Strahlungsdetektoren messen dann die bereits oben genannten Streuanteile bei der Durchquerung der einzelnen Lichtstrahlen. Aus der Zeitdifferenz der gleichen Intensitätspeaks der verschiedenen Intensitätsverläufe und der Kenntnis des Abstandes der Lichtstrahlen, lässt sich die Fluggeschwindigkeit der Teilchen bestimmen.

[0016] Die genannten Messverfahren und Messvorrichtungen sind beispielsweise aus den Offenlegungsschriften DE 10 2014 106 598 A1 und DE 10 2014 211 514 A1 bekannt, deren Offenbarungsgehalt hiermit zum Bestandteil der vorliegenden Beschreibung erklärt wird. Sie ermöglichen eine effiziente, fast instantane, berührungslose und den Sprühstrahl im Hinblick auf die technische Anwendung praktisch nicht beeinflussende Messung der genannten Sprühparameter mit relativ geringem apparativem Aufwand. Insbesondere sind sie in der Lage, die Häufigkeitsverteilung oder Wahrscheinlichkeitsverteilung bzw. Wahrscheinlichkeitsdichte der Tropfengröße und Tropfengeschwindigkeit der Tropfen im Sprühstrahl zu erfassen. Man spricht auch vom sogenannten Tropfenspektrum.

[0017] In zweckmäßiger Ausgestaltung des Messverfahrens wird eine statistische Auswertung von messtechnisch erfassten Datensätzen mittels Varianzanalyse und/oder Kovarianzanalyse und/oder Diskriminanzanalyse vorgenommen. Das Prinzip der Varianzanalyse besteht in der Untersuchung einer normalverteilten Zufallsgröße, die von einem Faktor (Einflussgröße) mit n möglichen Werten beeinflusst wird. Für jeden Faktorwert wird eine Teilstrichprobe genommen und durch einen Vergleich der Streuungen zwischen und innerhalb der Gruppen entschieden, ob der Faktor einen signifikanten Einfluss ausübt. Bei der Diskriminanzanalyse sind n Individuen durch ein Gruppenmerkmal jeweils genau einer von m möglichen Gruppen zuordenbar. Die Gruppenzugehörigkeit wird durch Merkmalsvektoren beschrieben, wobei die Gruppenzugehörigkeit vorab bekannt ist (supervised learning).

[0018] Vorteilhafterweise erfolgt die Messung an mehreren, vorzugsweise in einer Ebene liegenden Messpunkten im Sprühstrahl, wobei die räumliche Variation der jeweiligen Wahrscheinlichkeitsverteilung im Sprühstrahl bei der Auswertung berücksichtigt wird.

[0019] In einer vorteilhaften Ausgestaltung des Verfahrens wird zusätzlich die räumliche Verteilung des Volumenstroms im Sprühkegel ermittelt und bei der Auswertung berücksichtigt.

[0020] Eine räumlich gerasterte Messung, insbesondere eine Flächenrasterung, kann beispielsweise dadurch verwirklicht werden, dass die Messvorrichtung beweglich um den Sprühstrahl herum angeordnet ist und während der Messung bewegt bzw. verfahren wird.

[0021] In einer vorteilhaften Variante des Verfahrens wird ein farbcodiertes Bild („Falschfarbenbild“) generiert, 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. Dieses Bild wird für eine manuelle Inspektion auf einem Display angezeigt.

[0022] 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 Sinne von Redundanz) zur beschriebenen statistischen Auswertung eine bildbasierte Erkennung und Bewertung des Düsenverschleißes erfolgen.

[0023] Des Weiteren ist es vorteilhaft, wenn ergänzend zu den bislang genannten Sprühparametern die Viskosität des Sprühmediums messtechnisch erfasst und bei der Auswertung berücksichtigt wird. Dies kann sowohl durch inline-Messungen (z. B. Messung des dynamischen Flüssigkeitsdrucks, Coriolis-Massedurchfluss-Messgeräte) erfolgen. Alternativ ist eine offline-Messung, z. B. Auslaufbecher, Rotationsviskosimeter o.a., möglich, wenn davon ausgegangen werden kann, dass sich die Viskosität nur langsam ändert.

[0024] Wie bereits erwähnt, ist der ausgegebene Kennwert oder Prognosewert vorzugsweise so gewählt, dass er angibt, ob das Spritzbild der Spritzdüse für einen vorgegebenen Anwendungsbereich akzeptabel ist oder nicht. Beispielsweise kann er als binärer Wert für die Aussage „in Ordnung (i.O.)“ oder „nicht in Ordnung (n.i.O.)“ stehen. Er kann aber auch beispielsweise als numerischer Wert den Verschleißgrad der Spritzdüse auf einer Skala, etwa 0 bis 10, angeben.

[0025] Das beschriebene Verfahren kann insbesondere „inline“ bei einem Produktionsprozess zur Anwendung kommen. Insofern betrifft die Erfindung auch ein Verfahren zur Beschichtung eines Werkstücks mit einem Sprühmedium, insbesondere Lack, mittels eines eine Spritzdüse aufweisenden Zerstäubers, wobei eine Ermittlung des Verschleißgrades der Spritzdüse in der oben beschriebenen Weise erfolgt.

[0026] Dabei ist es vorteilhaft, wenn anhand des Kennwerts oder Prognosewerts Betriebsparameter des Zerstäubers derart eingestellt werden, dass der Verschleiß der Spritzdüse zur Vergrößerung der Lebensdauer verringert wird und/oder hinsichtlich einer Beeinträchtigung des Spritzbildes zumindest teilweise kompensiert wird. Solche einstellbaren Betriebsparameter sind beispielsweise (je nach Art des Zerstäubers): Lack-Ausbringungsmenge (Volumenstrom), Hornluft, Zerstäuberluft, Lack-Anpressdruck, Rotationsgeschwindigkeit, etc.

[0027] Besonders bevorzugt ist dabei eine Rückkopplung (Feedback) des ermittelten Kennwerts oder Prognosewerts an eine Steuereinheit für den Zerstäuber, so dass ein geschlossener Regelkreis mit dem Ziel eines optimierten Spritzbildes und/oder einer möglichst langen Lebensdauer der Spritzdüse verwirklicht ist.

[0028] Weiterhin ist es von Vorteil, wenn eine Warnung ausgegeben wird und/oder vorzugsweise die Spritzdüse gewechselt wird, insbesondere durch einen von der Steuereinheit angesteuerten Düsenwechsler, wenn das Spritzbild trotz eventueller Korrekturmaßnahmen endgültig nicht mehr akzeptabel ist.

[0029] Schließlich betrifft die Erfindung auch eine Vorrichtung zur Beschichtung eines Werkstücks mit einem Sprühmedium, insbesondere Lack, mit

- einem eine Spritzdüse aufweisenden Zerstäuber,
- einer Messvorrichtung, die in zumindest einem Messpunkt oder Messvolumen in dem von der Spritzdüse ausgehenden Sprühstrahl von Sprühmedium zumindest einen Sprühparameter, nämlich eine charakteristische Kenngröße von Tröpfchen im Sprühstrahl, aus der Gruppe umfassend Tropfengröße, Tropfenanzahl, Tropfenankunftszeit, Tropfenopazität und Tropfengeschwindigkeit messtechnisch erfasst, und
- einer Auswertungsvorrichtung, die den gemessenen Sprühparameter oder eine daraus abgeleitete Größe oder Verteilung mit zumindest einer zugehörigen Referenzgröße oder Referenzverteilung vergleicht und daraus einen für den Verschleißgrad der Spitzdüse charakteristischen Kennwert oder Prognosewert bildet und ausgibt.

[0030] Die in Bezug auf das Verfahren erwähnten Ausgestaltungen und Vorteile sind unmittelbar auf die Vorrichtung übertragbar, so dass sich an dieser Stelle Wiederholungen erübrigen.

[0031] Ein Ausführungsbeispiel der Erfindung wird nachfolgend unter Bezugnahme auf die beigefügten Abbildungen erläutert. Dabei zeigen:

Fig. 1 oben: eine Fotografie, die den Zustand einer Spritzdüse am Ende der Standzeit zeigt, unten: den Zustand einer neuen Spritzdüse,

Fig. 2 links: eine grafische Darstellung der Verteilung der Sauter-Durchmesser von Tröpfchen im Sprühstrahl bei neuer (1) und verschlissener (2) Düse auf Basis einer Varianzanalyse; rechts: die Verteilung der Sauter-Durchmesser der Tröpfchen bei neuer (1) und verschlissener (2) Düse auf Basis einer Kovarianzanalyse,

Fig. 3 links: ein Falschfarbenbild, das die Homogenität des Spritzstrahls bei einer neuen Spritzdüse visualisiert, rechts: das entsprechende Bild bei einer verschlissenen Düse, und

Fig. 4 eine schematische Darstellung eines Zerstäubers mit einer Spritzdüse und mit zugehöriger Messvorrichtung zur Erkennung des Verschleißgrades der Spritzdüse sowie mit optionaler Feedbackfunktion.

[0032] Zunächst wird anhand der **Fig. 1** bis **Fig. 3** eine Versuchsreihe beschrieben, welche die Grundlage für die in **Fig. 4** dargestellte Vorrichtung darstellt.

[0033] Einleitung: 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 in der Spritzdüse größer als dessen innerer Zusammenhalt (Kohäsion) sein. In der Vergangenheit wurden zahlreiche Untersuchungen durchgeführt, um experimentell und mit verschiedenen physikalischen Modellansätzen bzw. numerischer Simulation diesen Prozess besser zu verstehen sowie weiterzuentwickeln. So zeigt die untenstehende Formel beispielhaft für eine pneumatische Zerstäubung die grundlegenden Zusammenhänge zwischen dem Sauter-Durchmesser und verschiedenen Einflussfaktoren nach LEFEBVRE (zitiert in: Tiedje, O.: Aktuelle Anwendungen von numerischen Simulationen in der Lackierung. Seminar SPA 063, Numerische Simulation von Lackierprozessen, Stuttgart, 20.3.2014):

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

[0034] Es bedeuten: D_{32} : Sauter-Durchmesser, u : Luftgeschwindigkeit, m : Massenstrom; C : experimentell bestimmte Konstante, d : Düsendurchmesser, σ : Oberflächenspannung, p : Dichte

[0035] Die quantitative Auswertung dieser 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. So sollten diese klein sein ($< 50 \mu\text{m}$), um gut zu verlaufen, aber eine bestimmte Größe nicht unterschreiten, um nicht vor dem Auftreffen auf das Bauteil durch Verdunsten des Lösemittels eine Viskosität erreicht zu haben, die einen guten Verlauf erschwert.

[0036] Die Qualität einer gespritzten Fläche ist damit von verschiedenen stofflichen, technischen und technologischen Einflussfaktoren abhängig.

[0037] Aktuell geht der Anteil manueller ausgeführter Spritzprozesse zurück und wird durch Durchlauf-Spritzautomaten bzw. Robotertechnik ersetzt. Damit gewinnt eine vorausschauende Bewertung der Prozessqualität, die u.a. vom Verschleiß der Düse bestimmt wird, an Bedeutung. Ziele können dabei der optimale Zeitpunkt des Austauschs verschlissener Spritzdüsen bzw. eine Anpassung technologischer Parameter zur Einhaltung akzeptabler Charakteristika des Spritzstrahls und damit der Beschichtungsqualität sein.

[0038] Die nachstehenden Ausführungen beschreiben den Versuch, anhand der Untersuchung des Spritzstrahls Kriterien zu finden, die die Standzeit einer Spritzdüse möglichst eindeutig beschreibt.

[0039] Versuchsbeschreibung: Den Einfluss des Verschleißes auf die Geometrie einer Spritzdüse zeigt exemplarisch **Fig. 1**. Oben zeigt eine Fotografie den Zustand einer Spritzdüse am Ende der Standzeit, unten den Zustand einer neuen Spritzdüse (Foto: M. Rößler).

[0040] Es ist deutlich zu erkennen, dass hinsichtlich der Gleichmäßigkeit der Ausgangsgeometrie Veränderungen eingetreten sind, die sich auf die Tröpfchengrößenverteilung sowie die Gleichmäßigkeit des Spritzstrahls auswirken. Die Abweichungen von Einstellgrößen in realen industriellen Prozessen sind in den experimentellen Möglichkeiten begründet. Die grundsätzliche Aussagekraft der Ergebnisse wird davon nicht beeinträchtigt. 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 Düsen in die Spritzpistole der Versuchsanlage eingesetzt. 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 eines Messgeräts der Firma AOM-Systems GmbH.

[0041] Messmethode: Die verwendete Messtechnologie 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 beinhaltet die zugrunde liegende Technologie ein direktes und zählendes Messverfahren.

[0042] 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 Falschfarbenergebnisse, sogenannte „digitale Spritzbilder“ (vgl. **Fig. 3**) erstellt. Basierend auf den räumlich aufgelösten Messdaten sind folgende Ergebnisse entstanden.

[0043] Ergebnisse: Für die statistische Auswertung der Versuche wurden die Varianz- und die Diskriminanzanalyse angewendet. 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.

[0044] Die gemessenen Werte wurden zunächst mit Hilfe eines kommerziellen Computerprogramms einer Varianzanalyse unterzogen. Die Datensätze erfüllten die Voraussetzung zur Anwendung des Verfahrens, d. h. 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

- der mittleren Tröpfchengröße,
- des Sauter-Durchmessers der Tröpfchen sowie
- der Tröpfchen-Geschwindigkeit

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

[0045] Um den Einfluss der während der Messung angestiegenen Viskosität des Lacks zu quantifizieren, wurde die Auswertung mit Hilfe einer Kovarianzanalyse, die die Viskosität als variable Einflussgröße zusätzlich zu den beiden Faktoren „nicht verschlissene“ / „verschlissene“ einführt, wiederholt. Dadurch konnte die Modellgüte weiter verbessert und der Einfluss der Viskosität auf die Ausbildung des Tropfenspektrums bestätigt werden. Das ermittelte Bestimmtheitsmaß lässt den Schluss zu, dass rund 92% der auftretenden Streuungen mit dem gefundenen Modell erklärt werden können (vgl. **Fig. 2** und Tabelle 1).

Tabelle 1: Übersicht der Ergebnisse der Kovarianzanalyse

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

Merkmal	xi	Ss	MS	p
	Modell	52,53	17,51	0,0009
	Rest	4,271	0,712
	Gesamt	56,80	6,311

[0046] Prinzipiell ist bei einer Beurteilung des Düsenverschleißes die Aussage interessant, ob das Spritzbild ausreichend gut (in Ordnung = i.O.) ist, oder ob dies nicht (mehr) der Fall ist (nicht in Ordnung = n.i.O.). Auf Basis dieser Fragestellung wurde eine quadratische Diskriminanzanalyse mit den Daten des ersten Versuchsdurchgangs durchgeführt. In einem zweiten Schritt sollten die Daten des zweiten Versuchsschritts entsprechende klassifiziert werden. Die Diskriminanzanalyse ist, wie bereits ausgeführt, ein dazu geeignetes multivariates Verfahren der Statistik. Sie wird angewandt, um Gruppen zu unterscheiden, die durch Variablen charakterisiert werden. Das Ergebnis zeigt Tabelle 2. Es ist zu erkennen, dass die Messwerte der Vergleichsprobe korrekt klassifiziert wurden.

[0047] Mit dem gegenüber der Varianzanalyse „robusteren“ Verfahren kann damit eine richtige Zuordnung bzw. Vorhersage des Verschleißgrades der Spritzdüse ohne die Einführung (und Messung) der Kovariablen Viskosität im untersuchten Fall erreicht werden.

Tabelle 2: Klassifikation von Testbeobachtungen auf Basis einer Diskriminanzanalyse

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

[0048] Weiterhin kann durch die Darstellung der Messergebnisse in Falschfarbenbildern die wachsende Inhomogenität des Spritzstrahls mit zunehmendem Verschleiß gezeigt werden (vgl. **Fig. 3**). Zum einen kann diese Inhomogenität leicht optisch (visuell) erkannt werden, zum anderen mittels Bildverarbeitungsalgorithmen.

[0049] Anwendung: Das Grundkonzept eines auf den beschriebenen Versuchen aufbauenden inline-Messsystems ist in **Fig. 4** dargestellt.

[0050] Das in **Fig. 4** dargestellte Sprühsystem **2** umfasst einen Zerstäuber **2** mit einer Sprühdüse bzw. Spritzdüse **6**. Im Betrieb emittiert die Spritzdüse **6** einen Sprühstrahl **8** von Sprühmedium, insbesondere Lack zur Beschichtung eines Werkstücks oder Bauteils.

[0051] Eine zugehörige optische Messvorrichtung **10**, die beispielsweise auf dem Messprinzip der Zeitverschiebung von Reflektions- und Refraktionssignalen unterschiedlicher Streuordnungen beruht, ermittelt grundlegende Eigenschaften des Tropfenspektrums im Sprühstrahl **8**, nämlich die beispielsweise Tropfengröße und die Tropfengeschwindigkeit oder daraus abgeleitete statistische Größen wie etwa den Sauter-Durchmesser der Tropfen. Diese Sprühparameter werden zunächst innerhalb eines Messpunktes oder Messvolumens aufgelöst erfasst, wobei auch beispielsweise ihre Wahrscheinlichkeits- bzw. Häufigkeitsverteilung ermittelt werden kann.

[0052] Für eine räumlich aufgelöste Messung ist der Messkopf der Messvorrichtung **10** relativ zum Sprühstrahl **8** verfahrbar, wobei das Verfahren vorzugsweise automatisiert durch eine integrierte Steuerung erfolgt. Dadurch können die räumliche Verteilung der genannten Sprühparameter im Sprühstrahl **8** und auch die Volumenstromverteilung messtechnisch erfasst werden.

[0053] Optional werden noch weitere physikalische Parameter des Sprühprozesses von der Messvorrichtung **10** erfasst, etwa die Viskosität des Sprühmediums, seine Temperatur etc.

[0054] Die so von der Messvorrichtung **10** aufgenommenen Daten hinsichtlich der Sprüh- und Prozessparameter werden einer Auswertungsvorrichtung bzw. Auswertungseinheit **12** zugeführt, die mittels statistischer Verfahren, insbesondere Varianzanalyse, Kovarianzanalyse und Diskriminanzanalyse unter Berücksichtigung von hinterlegten Referenzgrößen einen Kennwert bzw. Prognosewert für den Verschleißgrad der Spritzdüse **6** ermittelt. Im Ergebnis klassifiziert die Auswertungseinheit **12** den zu prüfenden Zerstäuber **4** bzw. die Spritzdüse **6** als „in Ordnung“ oder „nicht in Ordnung“.

[0055] Optional kann über eine durch den Benutzer auswählbare Einstellung der Auswertungseinheit **12** die Sensitivität der Klassifizierung gesteuert werden.

[0056] Hinsichtlich der Datenausgabe sind zwei Ausbaustufen möglich. Zum einen kann bei erreichtem Verschleiß ein Signal an den Bediener, Leitstand oder dergleichen ergehen, dass ein Düsenwechsel erforderlich ist. Dazu wird der Kennwert oder Prognosewert auf einer zugehörigen Anzeigeeinheit ausgegeben. Zum anderen können über einen Regelkreis die den Betrieb des Zerstäubers **4** beeinflussenden technologischen Parameter geändert werden, um die Nutzungszeit der Spritzdüse **6** zu verlängern und/oder das durch Verschleiß beeinträchtigte Spritzbild zu verbessern. Zu diesem Zweck empfängt die den Spritzprozess bzw. den Zerstäuber **4** steuernde Steuereinheit **14** die von der Auswertungseinheit **12** bereitgestellten Auswertungsdaten und berücksichtigt diese bei der Prozesssteuerung oder Regelung.

[0057] Mit anderen Worten: Durch die (automatisierte) Klassifizierung des Zerstäubers kann der Nutzer oder eine Maschine entscheiden, ob ein Zerstäuber für eine bestimmte Anwendung geeignet ist oder nicht (Feedback). Optional kann der Nutzer oder die Maschine mit dieser Information entweder den Zerstäuber tauschen oder die Zerstäuber-Parameter (automatisiert) anpassen, um ein gewünschtes Ergebnis zu erreichen.

[0058] Das charakterisierte Spritzbild bzw. Sprühbild kann im Sinne einer Prozessregelung alternativ in den akzeptablen Bereich durch Anpassung der Prozessparameter rückgeführt werden. Wenn dies nicht (oder nicht mehr) möglich ist, erfolgt die Klassifizierung als unakzeptabel wie oben erwähnt.

[0059] Die Auswertungseinheit **12** kann durch ein ausführbares Programm auf einem handelsüblichen Computer oder durch dedizierte Hardware verwirklicht sein.

[0060] Zusammengefasst ist es mit der beschriebenen Messtechnik möglich, charakteristische Werte von Tröpfchen im Sprühstrahl einer Spritzdüse so zu erfassen und zu verarbeiten, dass zwischen einer verschlissenen und noch nutzbaren Düse unterschieden werden kann. Dies eröffnet neue Möglichkeiten für eine inline-Prozesssteuerung und kann zur besseren Beherrschung von industriellen Spritzanwendungen beitragen.

Bezugszeichenliste

2	Sprühsystem
4	Zerstäuber
6	Spritzdüse
8	Sprühstrahl
10	Messvorrichtung
12	Auswertungseinheit
14	Steuereinheit

Patentansprüche

1. Verfahren zur Ermittlung des Verschleißgrades einer Spritzdüse (6) in einem Zerstäuber (4), bei dem
 - in zumindest einem Messpunkt oder Messvolumen in dem von der Spritzdüse (6) ausgehenden Sprühstrahl (8) von Sprühmedium zumindest ein Sprühparameter, nämlich eine charakteristische Kenngröße von Tröpfchen im Sprühstrahl, aus der Gruppe umfassend Tropfengröße, Tropfenanzahl, Tropfenankunftszeit, Tropfenopazität und Tropfengeschwindigkeit messtechnisch erfasst wird, und
 - der gemessene jeweilige Sprühparameter oder eine daraus abgeleitete Größe oder Verteilung mit zumindest einer zugehörigen Referenzgröße oder Referenzverteilung verglichen wird und daraus ein für den Verschleißgrad der Spritzdüse (6) charakteristischer Kennwert oder Prognosewert gebildet wird.

2. Verfahren nach Anspruch 1, wobei die Messung durch eine optische Messvorrichtung (10) erfolgt, die auf dem Prinzip der Messung von durch die sich bewegenden Tropfen im Sprühstrahl (8) gestreutem und/oder reflektiertem Licht beruht, vorzugsweise mittels Zeitverschiebungsmessung und/oder Flugzeitmessung.
3. Verfahren nach Anspruch 1 oder 2, wobei eine statistische Auswertung von messtechnisch erfassten Datensätzen mittels Varianzanalyse und/oder Kovarianzanalyse und/oder Diskriminanzanalyse vorgenommen wird.
4. Verfahren nach einem der Ansprüche 1 bis 3, wobei eine Messung an mindestens einem vorzugsweise aber mehreren, vorzugsweise in einer Ebene liegenden Messpunkten im Sprühstrahl (8) erfolgt und die räumliche Variation der jeweiligen Wahrscheinlichkeitsverteilung im Sprühstrahl (8) bei der Auswertung berücksichtigt wird.
5. Verfahren nach Anspruch 4, wobei zusätzlich die räumliche Verteilung des Volumenstroms im Sprühstrahl (8) ermittelt und bei der Auswertung berücksichtigt wird.
6. Verfahren nach Anspruch 4 oder 5, wobei ein farbcodiertes Bild generiert wird, das die räumliche Verteilung der Messwerte oder von aus den Messwerten abgeleiteten Größen in einem Querschnitt durch den Sprühstrahl (8) visualisiert.
7. Verfahren nach Anspruch 6, wobei das farbcodierte Bild mittels computerimplementierter Algorithmen auf Irregularitäten oder Änderungen untersucht wird, die für einen Verschleiß der Spritzdüse (6) charakteristisch sind.
8. Verfahren nach einem der Ansprüche 1 bis 7, wobei die Viskosität des Sprühmediums messtechnisch erfasst und bei der Auswertung berücksichtigt wird.
9. Verfahren nach einem der Ansprüche 1 bis 8, wobei der Kennwert oder Prognosewert angibt, ob das Spritzbild der Spritzdüse (6) für einen vorgegeben Anwendungsbereich akzeptabel ist oder nicht.
10. Verfahren zur Beschichtung eines Werkstücks mit einem Sprühmedium, insbesondere Lack, mittels eines Zerstäubers (4) mit einer Spritzdüse (6), wobei eine Ermittlung des Verschleißgrades der Spritzdüse (6) gemäß einem Verfahren nach einem der Ansprüche 1 bis 9 erfolgt.
11. Verfahren nach Anspruch 10, wobei anhand des Kennwerts oder Prognosewerts Betriebsparameter des Zerstäubers (4) derart eingestellt werden, dass der Verschleiß der Spritzdüse (6) zur Vergrößerung der Lebensdauer verringert wird und/oder hinsichtlich einer Beeinträchtigung des Spritzbildes zumindest teilweise kompensiert wird.
12. Verfahren nach Anspruch 11, wobei eine Regelung mit dem Ziel eines optimierten Spritzbildes und/oder einer möglichst langen Lebensdauer der Spritzdüse (6) erfolgt.
13. Verfahren nach Anspruch 11 oder 12, wobei eine Warnung ausgegeben wird und vorzugsweise die Spritzdüse (6) gewechselt wird, wenn das Spritzbild trotz eventueller Korrekturmaßnahmen nicht mehr akzeptabel ist.
14. Vorrichtung zur Beschichtung eines Werkstücks mit einem Sprühmedium, insbesondere Lack, gemäß dem Verfahren nach einem der Ansprüche 10 bis 13, mit
 - einem eine Spritzdüse (6) aufweisenden Zerstäuber (4),
 - einer Messvorrichtung (10), die in zumindest einem Messpunkt oder Messvolumen in dem von der Spritzdüse (6) ausgehenden Sprühstrahl (8) von Sprühmedium zumindest einen Sprühparameter, nämlich eine charakteristische Kenngröße von Tröpfchen im Sprühstrahl, aus der Gruppe umfassend Tropfengröße, Tropfenanzahl, Tropfenankunftszeit, Tropfenopazität und Tropfengeschwindigkeit messtechnisch erfasst, und
 - einer Auswertungsvorrichtung (12), die den gemessenen Sprühparameter oder eine daraus abgeleitete Größe oder Verteilung mit zumindest einer zugehörigen Referenzgröße oder Referenzverteilung vergleicht und daraus einen für den Verschleißgrad der Spitzdüse (6) charakteristischen Kennwert oder Prognosewert bildet und ausgibt.

Es folgen 4 Seiten Zeichnungen

Anhängende Zeichnungen

FIG. 1

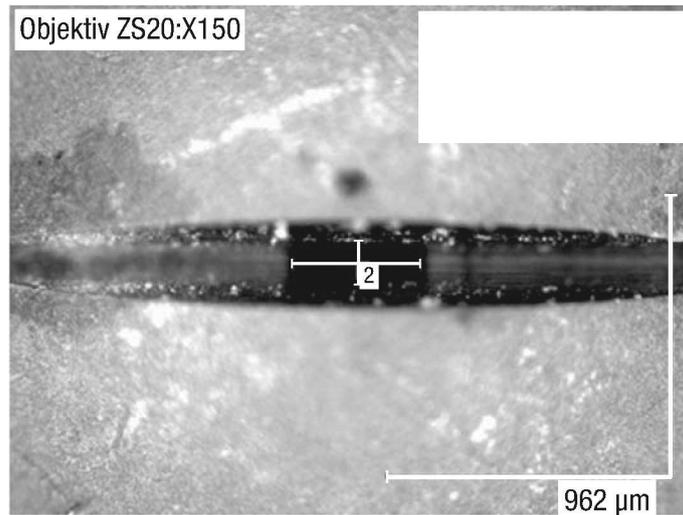
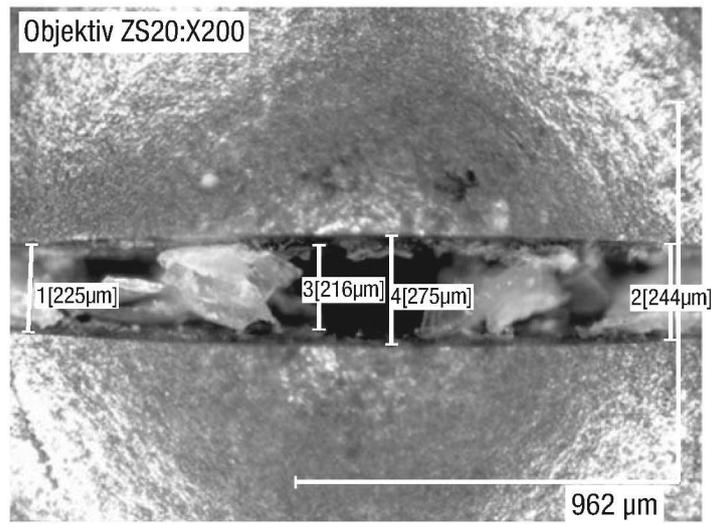


FIG. 2

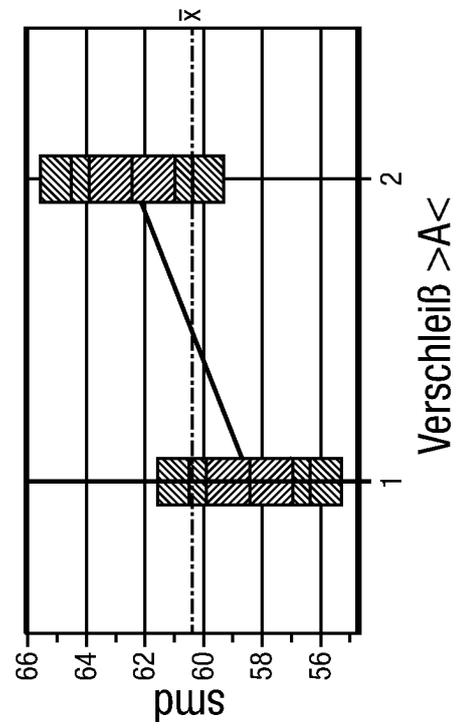
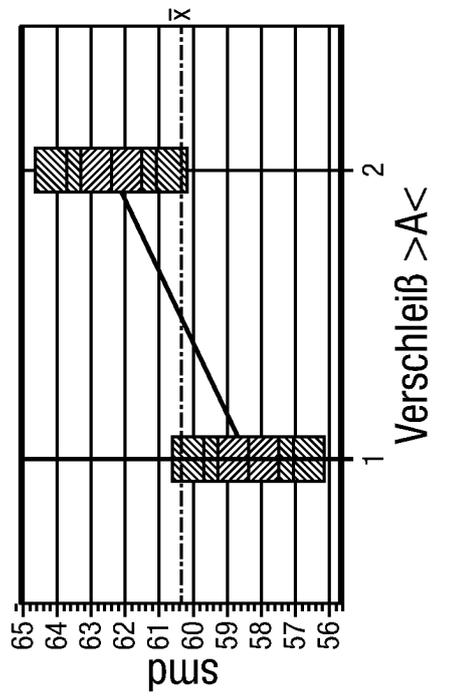


FIG. 3

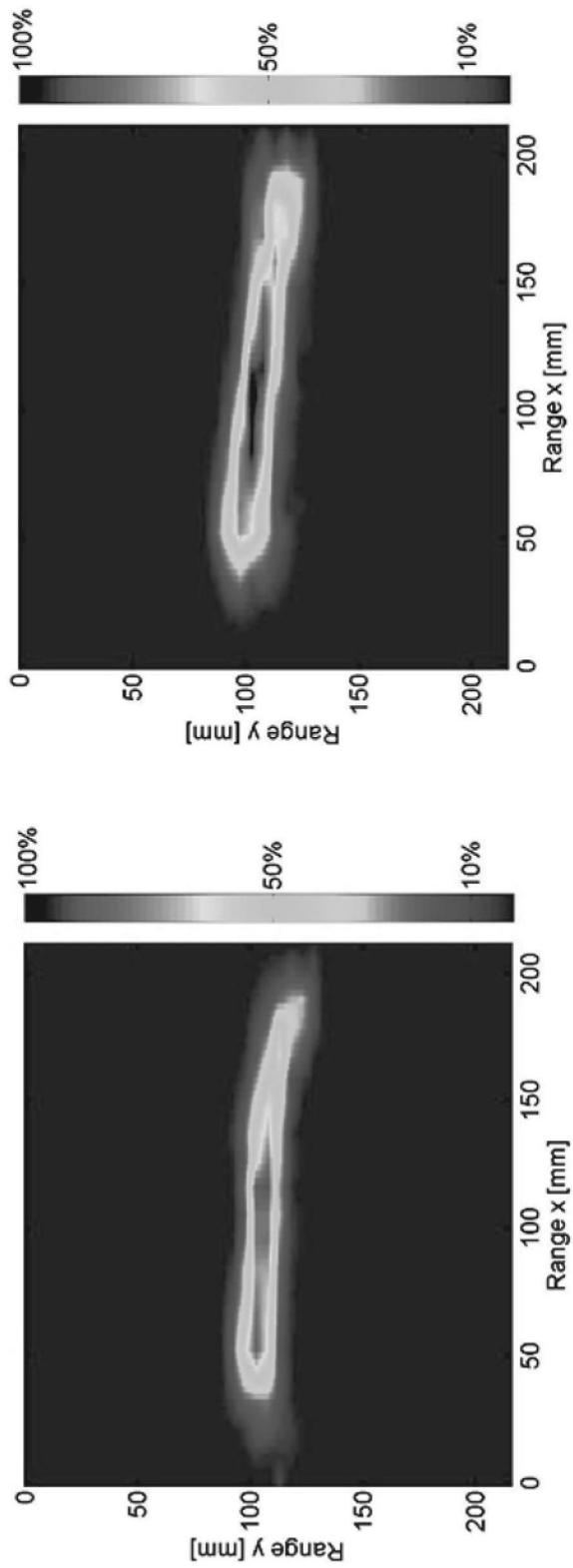


FIG. 4

