



(12) **EUROPÄISCHE PATENTANMELDUNG**

(43) Veröffentlichungstag:  
**24.10.2007 Patentblatt 2007/43**

(51) Int Cl.:  
**C23C 4/12 (2006.01)**

(21) Anmeldenummer: **07102707.2**

(22) Anmeldetag: **20.02.2007**

(84) Benannte Vertragsstaaten:  
**AT BE BG CH CY CZ DE DK EE ES FI FR GB GR HU IE IS IT LI LT LU LV MC NL PL PT RO SE SI SK TR**  
 Benannte Erstreckungsstaaten:  
**AL BA HR MK YU**

(72) Erfinder:  
 • **Wintergerste, Dr., Torsten**  
**8606 Greifensee (CH)**  
 • **Heggemann, Dr., Marc**  
**8408 Winterthur (CH)**

(30) Priorität: **19.04.2006 EP 06405169**

(74) Vertreter: **Sulzer Management AG**  
**Patentabteilung / 0067**  
**Zürcherstrasse 14**  
**8401 Winterthur (CH)**

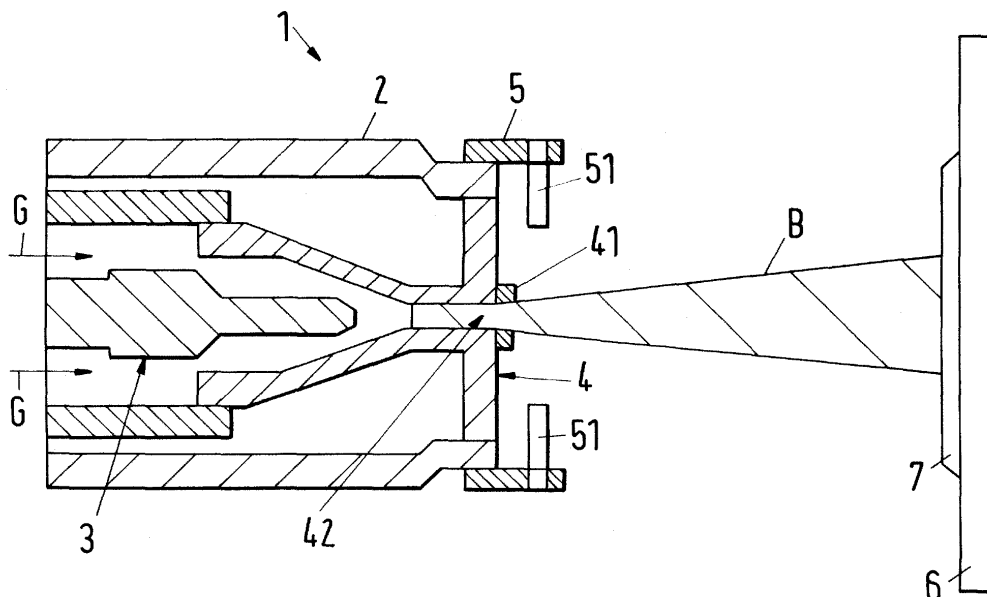
(71) Anmelder: **Sulzer Metco AG (Switzerland)**  
**5610 Wohlen (CH)**

(54) **Verfahren zur Bestimmung von Prozessparametern in einem thermischen Spritzprozess**

(57) Es wird ein Verfahren vorgeschlagen zur Bestimmung von Prozessparametern in einem thermischen Spritzprozess, bei welchem mittels einer thermischen Spritzvorrichtung (1) Partikel aufgeschmolzen oder plastisch gemacht oder verdampft werden und von einem Fluidstrom (G) zu einem Substrat (6) transportiert werden, bei welchem Verfahren für den thermischen Spritzprozess oder für die thermische Spritzvorrichtung ein Be-

triebsmodell errichtet wird, mit dem eine Simulation des thermischen Spritzprozesses durchführbar ist, und welches ein strömungsmechanisches Modell sowie ein elektromagnetisches Modell umfasst, wobei das strömungsmechanische Modell und das elektromagnetische Modell miteinander gekoppelt werden und mittels des Betriebsmodells mindestens ein Prozessparameter bestimmt wird.

**Fig.1**



## Beschreibung

**[0001]** Die Erfindung betrifft ein Verfahren zur Bestimmung von Prozessparametern in einem thermischen Spritzprozess.

**[0002]** Thermische Spritzprozesse wie beispielsweise das Plasmaspritzen werden heute für eine grosse Vielfalt von Beschichtungen auf ganz unterschiedlichen Substraten eingesetzt. Dazu wird in einer Plasmaspritzvorrichtung, wie einem Plasmabrenner, ein Lichtbogen zwischen einer Anode und einer Kathode erzeugt. Ein Gas wird zwischen den Elektroden ionisiert, sodass ein Plasma entsteht. Der für die zu erzeugende Beschichtung benötigte Werkstoff wird üblicherweise in Pulverform in das heisse Plasma eingeblasen, dort aufgeschmolzen oder zumindest plastisch gemacht und durch den Gasstrom mit hoher Geschwindigkeit auf das zu beschichtende Substrat aufgebracht.

**[0003]** Da die zu erzeugenden Beschichtungen oft ganz unterschiedlicher Natur sind, muss der thermische Spritzprozess üblicherweise an den jeweiligen Anwendungsfall angepasst werden. Oft ist dabei das zu erzielende Ergebnis vorgegeben, wie beispielsweise die Ablagerungsrate, die Schichtdicke, die Schichtstruktur oder andere Schichteigenschaften wie die Porösität, die Adhäsion, die Oberflächenrauigkeit, die elektrische Leitfähigkeit, die thermische Leitfähigkeit, die Viskosität, die Verschleissfestigkeit, der Anteil der ungeschmolzenen Partikel oder chemische Eigenschaften wie der Oxidationsgrad der Schicht.

**[0004]** Daneben ist es insbesondere auch für industrielle Anwendungen sehr wichtig, dass der Spritzprozess an sich eine hohe Stabilität aufweist, also reproduzierbare Ergebnisse liefert, und dass er eine hohe Prozess- und Ablagerungseffizienz beinhaltet.

**[0005]** Um die thermischen Spritzvorrichtungen unter diesen beispielhaft erwähnten Aspekten an die jeweilige Anwendung anzupassen, ist es wünschenswert wenn nicht sogar notwendig, Informationen über die Prozessparameter wie beispielsweise Gasgeschwindigkeit und -temperatur, Partikelgeschwindigkeit und Temperatur zu haben. Derartige Grössen sind zwar prinzipiell messtechnisch erfassbar, beispielsweise mit Hilfe von Hochgeschwindigkeitskameras, aber solche Messungen sind sehr aufwändig.

**[0006]** Auch im Hinblick auf die Weiter- oder Neuentwicklung von thermischen Spritzvorrichtungen, die heute meist empirisch erfolgt, ist es wünschenswert, mehr Informationen über die Prozessparameter zu haben bzw. solche Informationen möglichst einfach zu erhalten.

**[0007]** Es ist daher eine Aufgabe der Erfindung, ein Verfahren vorzuschlagen, mit welchem eine möglichst einfache und doch zuverlässige Bestimmung von Prozessparametern unter verschiedenen Betriebsbedingungen in einem thermischen Spritzprozess ermöglicht wird.

**[0008]** Das diese Aufgabe lösende Verfahren ist durch die Merkmale des unabhängigen Anspruchs 1 gekenn-

zeichnet.

**[0009]** Erfindungsgemäss wird also ein Verfahren vorgeschlagen zur Bestimmung von Prozessparametern in einem thermischen Spritzprozess, bei welchem mittels einer thermischen Spritzvorrichtung Partikel aufgeschmolzen oder plastisch gemacht oder verdampft werden und von einem Fluidstrom zu einem Substrat transportiert werden, bei welchem Verfahren für den thermischen Spritzprozess oder für die thermische Spritzvorrichtung ein Betriebsmodell errichtet wird, mit dem eine Simulation des thermischen Spritzprozesses durchführbar ist, und welches ein strömungsmechanisches Modell sowie ein elektromagnetisches Modell umfasst, wobei das strömungsmechanische Modell und das elektromagnetische Modell miteinander gekoppelt werden und mittels des Betriebsmodells mindestens ein Prozessparameter bestimmt wird.

**[0010]** Dadurch, dass die thermische Spritzvorrichtung bzw. der thermische Spritzprozess durch ein Betriebsmodell beschrieben wird, können die Prozessparameter bestimmt werden, ohne dass dafür eine messtechnische Erfassung des jeweiligen Betriebsparameters notwendig ist. Da das Betriebsmodell die Kopplung eines strömungsmechanischen Modells mit einem elektromagnetischen Modell umfasst, also die mechanische Wechselwirkungen z.B. zwischen dem Fluidstrom und dem Lichtbogen berücksichtigt, wird eine zuverlässige Bestimmung der Prozessparameter ermöglicht.

**[0011]** Dieses Betriebsmodell erlaubt es auch, Aussagen über die Prozessparameter in thermischen Spritzvorrichtungen zu machen, wenn diese unter extremen Betriebsbedingungen arbeiten. Somit können beispielsweise Belastbarkeitsgrenzen für thermische Spritzvorrichtungen untersucht werden.

**[0012]** Desweiteren ist das erfindungsgemässe Verfahren insbesondere für Weiter- und Neuentwicklungen von thermischen Spritzvorrichtungen besonders vorteilhaft einsetzbar. Durch die erfindungsgemässe Bestimmung der Prozessparameter kann nämlich der gesamte Spritzprozess bzw. die Spritzvorrichtung simuliert werden. Dies ermöglicht eine deutlich einfachere und schnellere Optimierung des Designs der Spritzvorrichtung oder Teilen davon, z. B. der Düse.

**[0013]** Vorzugsweise umfasst das Betriebsmodell die Wechselwirkung zwischen den Partikeln und dem Fluidstrom. Durch die Berücksichtigung der in den Fluidstrom eingebrachten Partikel im Betriebsmodell können die Prozessparameter noch genauer bestimmt werden. Zudem werden hierdurch Aussagen wie beispielsweise über die Flugbahn der Partikel oder ihre Geschwindigkeit möglich.

**[0014]** Die Partikel werden bei der Modellierung als ausgedehnte Körper betrachtet. Bei einem Ausführungsbeispiel des Verfahrens werden die Prozessparameter, welche ein Partikel betreffen, z. B. die Temperatur des Partikels als konstant über die Ausdehnung bzw. das gesamte Volumen des jeweiligen Partikels angenommen.

Das heisst beispielsweise es wird angenommen, dass das Partikel eine homogene bzw. einheitliche Temperatur hat, die sich natürlich mit seiner Position im Gasstrom ändert. Bei einem anderen Ausführungsbeispiel werden bei der Modellierung Variationen der Prozessparameter über die Ausdehnung eines Partikels zugelassen, das heisst beispielsweise, die Temperatur wird nicht mehr als konstant über die Ausdehnung des Partikels angenommen.

**[0015]** Vorzugsweise wird zumindest einer der folgenden Prozessparameter bestimmt: Geschwindigkeit der Partikel, Temperatur der Partikel an der Oberfläche der Partikel, Temperatur im Innern der Partikel, Aggregatzustand der Partikel, Spur der Partikel, Auftreffpunkt der Partikel. Eine weitere vorteilhafte Massnahme ist es, ein Temperaturprofil für die Partikel zu erstellen.

**[0016]** Durch die Kenntnis der Temperatur im Innern der Partikel bzw. des Temperaturprofils ist es beispielsweise möglich zu erkennen, ob die Partikel auch im Innern aufgeschmolzen bzw. plastisch sind. Solche Informationen sind nützlich, um die Eigenschaften der zu erzeugenden Beschichtung zu kontrollieren.

**[0017]** Aus den gleichen Gründen ist es vorteilhaft, ein Geschwindigkeitsprofil oder ein Temperaturprofil für den Fluidstrom zu erstellen.

**[0018]** Das erfindungsgemässe Verfahren eignet sich in vorteilhafter Weise auch für die Optimierung von Spritzprozessen und -vorrichtungen. So kann für mindestens einen Prozessparameter ein Sollwert vorgegeben werden und die thermische Spritzvorrichtung oder der thermische Spritzprozess mittels des Betriebsmodells optimiert werden, bis der Sollwert innerhalb vorgegebener Grenzen erreicht wird. Dies ermöglicht eine deutlich schnellere Optimierung als eine rein auf empirischer Vorgehensweise basierte.

**[0019]** In einer bevorzugten Anwendung, nämlich falls die thermische Spritzvorrichtung eine Düse umfasst, durch welche der Fluidstrom austritt, wird das Betriebsmodell zur Optimierung der Düse herangezogen.

**[0020]** Das erfindungsgemässe Verfahren eignet sich insbesondere, wenn die thermische Spritzvorrichtung eine Plasmaspritzvorrichtung ist, bei der ein Lichtbogen zwischen einer Anode und einer Kathode erzeugt wird. Speziell eignet sich das erfindungsgemässe Verfahren auch für Mehrkathoden-Plasmabrenner.

**[0021]** Eine vorteilhafte Massnahme besteht darin, mittels des Betriebsmodells die Form und/oder die Kontaktpunkte des Lichtbogens zu bestimmen. Dadurch lässt sich beispielsweise die Lebensdauer der Spritzvorrichtung verlängern. Ausserdem kann die Stabilität des Lichtbogens unter unterschiedlichen Betriebsbedingungen untersucht werden.

**[0022]** Durch die Erfindung wird ferner eine thermische Spritzvorrichtung, insbesondere eine Plasmaspritzvorrichtung vorgeschlagen, welche mit Hilfe eines erfindungsgemässen Verfahrens betrieben wird.

**[0023]** In einer besonders bevorzugten Ausgestaltung ist das strömungsmechanische Modell ein CFD Modell

und das elektromagnetische Modell ein auf den Maxwell'schen Gleichungen basierendes Modell, welches geeignet ist, die wechselwirkenden elektrischen und magnetischen Effekte quantitativ zu beschreiben.

**[0024]** Auch wird durch die Erfindung ein Computerprogrammprodukt zur Implementierung eines erfindungsgemässen Verfahrens in eine Datenverarbeitungsanlage vorgeschlagen.

**[0025]** Weitere vorteilhafte Massnahmen und bevorzugte Ausgestaltungen der Erfindung ergeben sich aus den abhängigen Ansprüchen.

**[0026]** Im Folgenden wird die Erfindung anhand von Ausführungsbeispielen und anhand der Zeichnung näher erläutert. In der schematischen Zeichnung zeigen:

**Fig. 1:** eine schematische Darstellung eines Ausführungsbeispiels einer thermischen Spritzvorrichtung, die als Plasmaspritzvorrichtung ausgestaltet ist.

**[0027]** Durch die Erfindung wird ein Verfahren zur Bestimmung von Prozessparametern in einem thermischen Spritzprozess vorgeschlagen, bei welchem mittels einer thermischen Spritzvorrichtung Partikel aufgeschmolzen oder plastisch gemacht und von einem Fluidstrom, beispielsweise einem Gasstrom zu einem Substrat transportiert werden. Mit dem Begriff "Prozessparameter" sind dabei alle Grössen gemeint, die in irgendeiner Form der Charakterisierung des Betriebszustands einer thermischen Spritzvorrichtung oder der Charakterisierung des thermischen Spritzprozesses dienen. Solche Prozessparameter sind beispielsweise: Geschwindigkeit oder Geschwindigkeitsfeld des Fluids bzw. des Gases, Temperatur bzw. Temperaturprofil des Fluids bzw. des Gases, Geschwindigkeit der Partikel (an verschiedenen Orten), Temperatur der Partikel an der Oberfläche oder im Innern der Partikel, Aggregatzustand der Partikel, Position bzw. Spur der Partikel, Desintegration oder Aufbrechen von Partikeln, Erosion, Kontaktpunkte zwischen einem Lichtbogen und den Elektroden, Form und Verlauf des Lichtbogens, charakteristische Eigenschaften des Fluids bzw. des Gases wie spezifische Wärmekapazität, Ionisationsgrad. Diese Aufzählung ist nicht abschliessend.

**[0028]** Im Folgenden wird auf den für die Praxis besonders wichtigen Anwendungsfall Bezug genommen, dass der thermische Spritzprozess ein Plasmaspritzprozess ist und die Spritzvorrichtung eine Plasmaspritzvorrichtung. Natürlich ist die Erfindung nicht auf solche Anwendungen beschränkt, sondern eignet sich auch für andere thermische Spritzverfahren wie beispielsweise Radio-Frequency (RF)-Plasmaspritzen oder Lichtbogen-drahtspritzen.

**[0029]** Fig. 1 zeigt in einer stark schematischen Darstellung ein Ausführungsbeispiel einer Plasmaspritzvorrichtung, die gesamthaft mit dem Bezugszeichen 1 bezeichnet ist. Die Plasmaspritzvorrichtung 1 umfasst ein Gehäuse 2, in welchem eine Kathodenanordnung 3 und

eine dagegen elektrisch isolierte Anode 4 vorgesehen ist. Die Anode 4 ist hier als Ringanode ausgestaltet, die in ihrem Zentrum eine Auslassöffnung 42 aufweist, die mit einer Düse 41 versehen ist. Während des Betriebs wird in axialer Richtung ein Gas durch die Plasmaspritzvorrichtung 1 geblasen wie dies durch die beiden mit dem Bezugszeichen G bezeichneten Pfeile angedeutet ist. In Strömungsrichtung gesehen hinter der ringförmigen Anode 4 ist eine Pulverzuführung 5 vorgesehen, die einen oder mehrere Zuführkanäle 51 aufweist, die sich im wesentlichen in radialer Richtung erstrecken. Natürlich ist es auch möglich, dass sich die Zuführkanäle 51 für das Pulver bzw. die Partikel in axialer Richtung oder schräg - also zwischen axialer und radialer Richtungen erstrecken.

**[0030]** Auf die Darstellung weiterer an sich bekannter Komponenten der Plasmaspritzvorrichtung 1 wie beispielsweise, Kühlung, Energieversorgung und Kontrolleinrichtungen wurde aus Gründen der besseren Übersicht verzichtet.

**[0031]** Die Plasmaspritzvorrichtung 1 kann insbesondere auch ein Mehrkathodenbrenner sein, wie beispielsweise der Brenner, der von der Anmelderin unter dem Handelsnamen TriplexPro vertrieben wird. Bei diesem Brenner umfasst die Kathodenanordnung 3 insgesamt drei Kathoden. Im Betriebszustand entstehen dann drei Lichtbögen.

**[0032]** Während des Betriebs wird das in axialer Richtung durch die Plasmaspritzvorrichtung 1 strömende Gas G ionisiert und es wird zwischen der Kathodenanordnung 3 und der Anode 4 mindestens ein Lichtbogen erzeugt. Das durch das Plasma erhitzte Gas G tritt mit hoher Geschwindigkeit und hoher Temperatur durch die Düse 41 aus der Anode aus. Direkt hinter der Anode 4 (in Strömungsrichtung des Gases gesehen) werden durch die Zuführkanäle 51 der Pulverzuführung 5 Partikel in Form eines Pulvers in den heißen Gasstrom eingeblasen. Die Partikel werden in dem Gasstrom aufgeschmolzen oder zumindest plastisch gemacht, von dem Gasstrom beschleunigt und auf ein Substrat 6 geschleudert, wo sie eine Beschichtung 7 bilden. Der mit den Partikeln beladene Gasstrom ist in Fig.1 schematisch als Beschichtungsstrahl B dargestellt.

**[0033]** Häufig ist es im Anwendungsfall so, dass das zu erzielende Ergebnis - also die Beschichtung 7 auf dem Substrat 6 bzw. deren Eigenschaften vorgegeben sind und der thermische Spritzprozess so einzustellen ist, dass das gewünschte Ergebnis möglichst gut, effizient, kostengünstig und reproduzierbar realisiert wird. Hierfür ist es wichtig, Prozessparameter zu kennen.

**[0034]** Durch die Erfindung wird nun ein Verfahren zur Bestimmung von Prozessparametern vorgeschlagen, bei dem ein Betriebsmodell errichtet wird, welches ein strömungsmechanisches Modell sowie ein damit gekoppeltes elektromagnetisches Modell umfasst und mittels dieses Betriebsmodells einer oder mehrere Prozessparameter bestimmt werden.

**[0035]** Es hat sich gezeigt, dass durch die Berücksichtigung sowohl der strömungsmechanischen Effekte als

auch der elektromagnetischen bzw. elektrodynamischen Effekte eine zuverlässige Bestimmung der Prozessparameter ermöglicht wird.

**[0036]** Da somit eine messtechnische Erfassung der Prozessparameter nicht mehr notwendig ist, sondern der Spritzprozess simuliert werden kann, ist das Verhalten der thermischen Spritzvorrichtung nun auch in solchen Betriebszuständen analysierbar, die bisher noch nicht untersucht worden sind. Zudem ist es möglich, Prozessparameter zu bestimmen, die bisher messtechnisch nur sehr schwierig oder gar nicht ermittelt werden konnten, beispielsweise die von Partikeln (speziell in ihrem Inneren).

**[0037]** Im folgenden wird nun ein Ausführungsbeispiel des erfindungsgemässen Verfahrens erläutert.

**[0038]** Die strömungsmechanische Modellierung erfolgt vorzugsweise mittels numerischer Strömungssimulation (CFD - Computational Fluid Dynamics). Die CFD-Methode hat sich in den letzten Jahren zu einem sehr effizienten Werkzeug zur Untersuchung von Strömungen entwickelt. Die CFD und ihre Grundlagen an sich sind dem Fachmann bekannt und brauchen daher hier nicht näher erläutert zu werden.

**[0039]** Für jede Strömung gelten die drei fundamentalen Prinzipien der Erhaltung von Masse, Impuls und Energie. Die hieraus resultierenden physikalischen Zusammenhänge und Gleichungen (die Navier-Stokes-Gleichungen) sind jedoch in ihrer allgemeinen Form nicht mehr analytisch lösbar. Es ist der Gegenstand der CFD, numerische Lösungen für solche Gleichungen zu bestimmen, um so ein Strömungsfeld möglichst realistisch zu beschreiben. Die Navier-Stokes-Gleichungen enthalten die die Strömung beschreibenden Variablen wie Geschwindigkeit, Druck, Dichte, Viskosität und Temperatur als Funktion von Ort und Zeit.

**[0040]** Im Rahmen dieser Anmeldung wird CFD als die Methode der Berechnung von sowohl reibungslosen als auch reibungsbehafteten Strömungen ein- oder mehrphasiger Fluide (kontinuierliche Phase) gegebenenfalls unter gleichzeitiger Berücksichtigung der Bewegung von flüssigen Tropfen oder festen Partikeln (disperse Phase) verstanden. Die Fluide können kompressibel oder inkompressibel sein. Die Interaktion oder Wechselwirkung der kontinuierlichen Phase mit der dispersen Phase kann sowohl mit den Lagrange-Euler- als auch mit den Euler-Euler-Modellen beschrieben werden. Der Austausch von Masse, Impuls und Energie kann entweder in eine Richtung (von der kontinuierlichen zur diskreten Phase bzw. one-way-coupling oder umgekehrt) oder in beiden Richtungen (vollständige Kopplung bzw. two-way-coupling) betrachtet werden.

**[0041]** Es sind also sowohl solche CFD-Methoden gemeint, bei denen die disperse Phase in das Modell einbezogen wird als auch CFD-Methoden, bei denen die disperse Phase nicht in das Modell einbezogen wird. Das heisst, die Partikel müssen nicht zwangsläufig im Modell berücksichtigt werden. Vorzugsweise umfasst das Betriebsmodell jedoch auch die Partikel und die Wechsel-

wirkung zwischen den Partikeln und dem Gasstrom.

**[0042]** Sowohl die kontinuierliche Phase als auch die diskrete Phase können jeweils mehrere Komponenten enthalten (multi-component phase). Beispielsweise kann beim Plasmaspritzen ein Gemisch aus Argon und Helium verwendet werden, dann umfasst die kontinuierliche Gasphase die beiden Komponenten Argon und Helium. Auch die diskrete Phase kann mehrere Komponenten enthalten, wenn beispielsweise eine Pulvermischung verschiedener Substanzen als Partikel beim Plasmaspritzen verwendet wird, oder wenn bereits aufgeschmolzene und noch feste Partikel zwei Komponenten der diskreten Phase bilden.

**[0043]** Es gibt zahlreiche an sich bekannte und kommerziell erhältliche Computerprogrammprodukte und Algorithmen für CFD, die dem Fachmann hinreichend bekannt sind, sodass hierauf nicht weiter eingegangen wird.

**[0044]** Bei der strömungsmechanischen Modellierung wird zunächst der zu berechnende Strömungsraum als dreidimensionaler Volumenkörper definiert, beispielsweise mittels eines CAD-Modells der Spritzvorrichtung. Dann werden kleine finite Sub-Volumina definiert, in die der Volumenkörper eingeteilt wird. Diese Sub-Volumina bilden das numerische Rechengitter. Die Randbedingungen werden festgelegt, welche die physikalischen Betriebsbedingungen definieren, beispielsweise Massenströme oder Flussrate beim Eintritt, Temperatur des Gases beim Eintritt, Temperatur an den Wänden, Stromstärke oder ähnliches. Nun werden mit an sich bekannten numerischen Prozeduren die Strömungsgrößen wie Druck, Geschwindigkeit oder Temperatur in jedem Sub-Volumen bestimmt. Die Ergebnisse führen zu einem dreidimensionalen Strömungsfeld, welches dann quantitativ und qualitativ ausgewertet wird.

**[0045]** Aufgrund der extrem hohen Temperaturen beim Plasmaspritzen - das Plasma kann beispielsweise Temperaturen von bis zu 19000 Kelvin erreichen - wird die Temperaturabhängigkeit und/oder die Druckabhängigkeit der Materialeigenschaften berücksichtigt. Hinsichtlich der kontinuierlichen Phase, hier also der Gasphase, kann die Temperatur- und/oder Druckabhängigkeit insbesondere der folgenden Größen berücksichtigt werden: elektrische Leitfähigkeit, thermische Leitfähigkeit, Viskosität, spezifische Wärmekapazität, Elektrodendichte, molare Masse, Ionenkonzentration für die verschiedenen Ionisationsstufen, Schallgeschwindigkeit. Diese Abhängigkeiten sind bekannt oder können in an sich bekannter Weise ermittelt werden.

**[0046]** Für manche Prozessgrößen oder qualitative Aussagen oder erste Näherungen beispielsweise in Optimierungsprozessen kann es ausreichend sein, wenn man die beim Plasmaspritzen in den Gasstrom eingeblasenen Partikel bei der strömungsmechanischen Modellierung nicht berücksichtigt. Vorzugsweise werden die Partikel als disperse Phase jedoch in dem Betriebsmodell berücksichtigt.

**[0047]** Das strömungsmechanische Modell wird erfindungsgemäss mit einem elektromagnetischen Modell

gekoppelt. Der mindestens eine zwischen der Kathodenanordnung 3 und der Anode 4 erzeugte Lichtbogen in der Plasmaspritzvorrichtung 1 erhitzt und beschleunigt das Gas G. Die Kopplung zwischen dem strömungsmechanischen und elektromagnetischen Modell erlaubt die Beschreibung des Lichtbogens bzw. der Lichtbögen. Der Lichtbogen bzw. das Plasma verursachen wiederum elektromagnetische Effekte wie elektrische Potentiale, magnetische Felder usw., deren Einfluss durch das elektromagnetische Modell bzw. seine Kopplung an das strömungsmechanische Modell berücksichtigt werden.

**[0048]** Auch für die elektromagnetischen Eigenschaften werden Randbedingungen festgelegt, insbesondere für das elektrische Potential und für das magnetische Vektorpotential. Für das elektrische Potential kann beispielsweise angenommen werden, dass die Kathodenanordnung 3 auf Erdpotential, das heisst null Volt, liegt und das Potential der Anode so kontrolliert wird, dass der vorgegebene Strom fliesst.

**[0049]** Das elektromagnetische Modell basiert auf den Maxwell-Gleichungen sowie den Materialeigenschaften für die Polarisierung (Dielektrizitätskonstante), die Magnetisierung (Permeabilität) und die Leitfähigkeit.

**[0050]** Die Kopplung zwischen dem strömungsmechanischen Modell und dem elektromagnetischen Modell erfolgt über das Ohmsche Gesetz, über die Lorentzkraft (Kraft auf bewegte Ladungsträger im Magnetfeld) und die Widerstandserwärmung. Dabei koppelt die Lorentzkraft die elektromagnetischen Effekte mit der Fluiddynamik während die Widerstandserwärmung die elektromagnetischen Effekte mit den thermodynamischen Energiegleichungen koppelt.

**[0051]** Die Lösung der resultierenden Gleichungen erfolgt üblicherweise numerisch. Dem Fachmann ist hinreichend bekannt wie solche elektromagnetischen Modelle an sich erstellt und gerechnet werden. Auch hierfür sind Computerprogrammprodukte bekannt, sodass diesbezüglich keine weiteren Erläuterungen notwendig sind.

**[0052]** Programmiertechnisch kann die Berücksichtigung des elektromagnetischen Modells in Form eines Programm-Moduls (Plug-in) erfolgen, das in das CFD-Programm für die strömungstechnische Modellierung eingeschoben bzw. integriert wird.

**[0053]** Mit Hilfe des Betriebsmodells ist eine vollständige Simulation des thermischen Spritzprozesses möglich. Das heisst insbesondere, dass jeder Prozessparameter mittels des Betriebsmodells bestimmt werden kann.

**[0054]** Im Folgenden sollen nun noch einige Anwendungsbeispiele erläutert werden.

**[0055]** Dadurch, dass durch das Betriebsmodell der gesamte thermische Spritzprozess simuliert werden kann, wird es möglich, die thermische Spritzvorrichtung wesentlich schneller und effizienter an den jeweiligen Anwendungsfall anzupassen bzw. für den jeweiligen Anwendungsfall zu optimieren. Dies ist insbesondere im Hinblick auf die Neu- und Weiterentwicklung von thermischen Spritzvorrichtungen ein wichtiger Vorteil. Es sind

nämlich für die Anpassung und Optimierung keine zeit- und kostenintensiven Versuchsreihen mehr notwendig, in welchen empirisch motivierte Modifikationen getestet werden, sondern der Einfluss von Änderungen auf die Prozessparameter kann anhand des Betriebsmodells ohne experimentellen Aufwand untersucht werden.

**[0056]** Für industrielle Anwendungen des thermischen Spritzens ist insbesondere die Stabilität des Prozesses von grosser Bedeutung, das heisst, über einen längeren Zeitraum soll immer wieder die gleiche Beschichtung mit den gleichen Eigenschaften erzeugt werden. Hier kann das erfindungsgemässe Verfahren dazu genutzt werden, die für die Prozessstabilität wesentlichen Prozessgrössen zu identifizieren und den Einfluss ihrer betriebsbedingten Schwankungen zu analysieren.

**[0057]** Da die Effizienz der Spritzvorrichtung unter wirtschaftlichen Aspekten eine wesentliche Rolle spielt, besteht das Bestreben, solche Spritzvorrichtungen an der Grenze ihrer Belastbarkeit zu betreiben. Hier eignet sich das erfindungsgemässe Verfahren, diese Grenzen genauer zu bestimmen.

**[0058]** Weitere wesentliche Aspekte insbesondere für die industrielle Anwendung sind eine hohe Auftragsrate (Wie schnell kann die Beschichtung erzeugt werden?), eine hohe Auftragseffizienz (Wieviel Energie wird benötigt, um eine bestimmte Masse von Beschichtungsmaterial aufzutragen?) und eine hohe Lebensdauer der Vorrichtung und ihrer Komponenten. Auch hier eignet sich das erfindungsgemässe Verfahren, um das Betriebsverhalten der Spritzvorrichtung in effizienter Weise deutlich zu verbessern.

**[0059]** Auch im Hinblick auf Neu- und Weiterentwicklungen von Spritzvorrichtungen bildet das erfindungsgemässe Verfahren ein sehr nützliches Werkzeug zur Optimierung des Designs.

**[0060]** Häufig ist es so, dass die zu erzeugende Beschichtung beispielsweise von einem Kunden vorgegeben wird und die Spritzvorrichtung bzw. das Spritzverfahren an diese Vorgaben angepasst werden muss.

**[0061]** Solche Vorgaben können zum Beispiel die Art und Stärke der Anhaftung oder Adhäsion der Beschichtung an dem Substrat sein, oder andere Eigenschaften der Beschichtung wie z.B. die Struktur, die Kristallinität, die Textur, die Dicke, die Porösität, die Rauigkeit, die elektrische oder thermische Leitfähigkeit, die Viskosität, die Verschleissfestigkeit oder der Oxidationsgrad, um nur einige Eigenschaften zu kennen. Um solche Eigenschaften der Beschichtung bewusst gezielt und kontrolliert einzustellen, müssen geeignete Prozessparameter bekannt sein.

**[0062]** Dies soll an einem Beispiel veranschaulicht werden: Um eine vorgegebene Beschichtung zu erzeugen ist es beispielsweise notwendig, dass die Partikel gegebener Grösse mit einer Solltemperatur und einer Sollgeschwindigkeit auf das Substrat 6 auftreffen. Nun kann mit Hilfe des Betriebsmodells eine Optimierung durchgeführt werden, bei welcher die einstellbaren Prozessparameter, beispielsweise Stromstärke oder Gas-

flussrate solange variiert werden bis der gewünschte Sollwert für die Temperatur und die Geschwindigkeit der Partikel beim Auftreffen auf das Substrat 6 innerhalb vorgegebener Grenzen erreicht ist.

**[0063]** Alternativ ist es auch möglich, zunächst zu bestimmen, welches Geschwindigkeits- und Temperaturprofil der Gasstrom haben muss, damit die Partikel auf die Solltemperatur aufgeheizt und auf die Sollgeschwindigkeit beschleunigt werden. Anschliessend werden dann die beeinflussbaren Parameter solange variiert, bis diese Profile für den Gasstrom resultieren. Hierbei ist es insbesondere bei Neu- und Weiterentwicklungen von Spritzvorrichtungen auch möglich, die Geometrie der Spritzvorrichtung als Parameter zu variieren und zu optimieren.

**[0064]** Falls die Optimierung über die Bestimmung der Profile des Gasstroms erfolgt, kann es aus Gründen der Effizienz vorteilhaft sein, wenn man zunächst einige mögliche optimale Varianten beispielsweise für die Geometrie der Spritzvorrichtung bestimmt, indem man im Betriebsmodell die Partikel nicht berücksichtigt. Wenn dann einige mögliche Designs oder Parameterkombinationen ermittelt sind, erfolgt die Verfeinerung und schliesslich die Optimierung mittels eines Betriebsmodells, in welchem die Partikel und gegebenenfalls auch das Substrat berücksichtigt sind.

**[0065]** Weitere Prozessparameter, die mit dem erfindungsgemässen Verfahren bestimmbar sind und deren Kenntnis vorteilhaft ist, sind der Aggregatzustand der Partikel, die Spur, das heisst die Flugbahn der Partikel, der Auftreffpunkt der Partikel auf dem Substrat.

**[0066]** Auch ist es vorteilhaft, das Geschwindigkeitsfeld bzw. das Geschwindigkeitsprofil des Gasstroms zu bestimmen. Anhand dessen kann eine Optimierung der Strömungsverhältnisse in der Spritzvorrichtung erreicht werden.

**[0067]** Ferner ist es vorteilhaft, das Temperaturprofil des Gasstroms zu kennen. So lassen sich beispielsweise Ungleichmässigkeiten in der Temperaturverteilung, sogenannte heisse Punkte (hot spots), lokalisieren.

**[0068]** So ist es beispielsweise möglich, ein thermisches bzw. ein thermodynamisches Abbild der Spritzvorrichtung zu erzeugen. Mit diesem kann dann der Verlauf der Kühlkanäle optimiert werden, so, dass gerade so viel Wärme abgeführt wird, dass die Temperatur der inneren Oberflächen innerhalb vorgegebener Grenzen bleibt, um Erosion und andere unerwünschte Effekte zu vermeiden.

**[0069]** Die Spur oder die Flugbahn der Partikel zu kennen, erlaubt beispielsweise die Qualität der Beschichtung (Porösität, Anhaftung usw.) gezielt zu beeinflussen, denn es ist bekannt, dass diese Eigenschaften der Beschichtung davon abhängen, unter welchem Winkel die Partikel auf das Substrat treffen.

**[0070]** Auch die Form und der Verlauf des Lichtbogens bzw. der Lichtbögen und die zugehörigen Ansatzpunkte an den Elektroden 3,4 sind mit dem erfindungsgemässen Verfahren bestimmbar. Über diese Kenntnis kann die Stabilität des Lichtbogens bzw. der Lichtbögen optimiert

werden, so dass beispielsweise eine gleichmässige und voraussagbare Erhitzung des Gasstroms resultiert.

**[0071]** Wenn man die Partikel nicht nur als ausgedehnte Gebilde mit einem bestimmten Durchmesser bzw. einer bestimmten Ausdehnung sondern als ausgedehnte Körper mit variierenden Prozessgrössen im Betriebsmodell berücksichtigt, kann mit dem erfindungsgemässen Verfahren sowohl die Temperatur an der Oberfläche als auch die Temperatur im Innern der Partikel ermittelt werden. Es lässt sich auch ein Temperaturprofil für die Partikel erstellen. Gerade die Temperatur im Innern der Partikel stellt eine Grösse dar, deren Kenntnis von grossem Interesse ist, die aber heute messtechnisch noch nicht erfassbar ist. Die messtechnische Bestimmung ist auf die Temperatur an der Oberfläche der Partikel beschränkt. Um die Beschichtung gezielt zu beeinflussen, ist es aber vorteilhaft, die Temperatur im Innern der Partikel zu kennen, denn es kommt durchaus vor, dass die Partikel zwar an ihrer Oberfläche aufgeschmolzen sind, aber in ihrem Innern noch fest und "kalt" sind. Dies führt zu einem hohen Anteil ungeschmolzener Bereiche in der Beschichtung, die üblicherweise unerwünscht sind.

**[0072]** Ferner ist es möglich, mittels des erfindungsgemässen Verfahrens die Temperatur an der Oberfläche des Substrat 6 zu bestimmen. Dies ist vorteilhaft, weil bei manchen Anwendungen das Substrat nicht zu stark aufgeheizt werden darf, oder weil ein bestimmter Temperaturbereich an der Substratoberfläche notwendig ist, um die vorgegebenen Eigenschaften der Beschichtung zu erzielen.

**[0073]** Insbesondere eignet sich das erfindungsgemässe Verfahren auch dazu, um in einer thermischen Spritzvorrichtung 1, insbesondere in einer Plasmaspritzvorrichtung die Düse 41 und insbesondere ihre Geometrie zu optimieren. Die Düse 41 ist ein Austauschteil, das heisst je nach Anwendung kommen unterschiedliche Düsen 41 mit unterschiedlichen Geometrien und dementsprechend unterschiedlichen Strömungseigenschaften zum Einsatz. Wird beispielsweise eine Düse 41 mit grosser Öffnung eingesetzt, so ist das Plasma sehr heiss und die Geschwindigkeit des austretenden Gasstroms niedriger. Bei kleinerer Düsenöffnung ist der Gasstrom etwas kühler, hat aber eine höhere Geschwindigkeit. Zur Erzeugung kälterer Hochgeschwindigkeitsströme werden beispielsweise konvergent-divergente Düsen verwendet, die ähnlich einer Lavaldüse ausgestaltet sind. Das erfindungsgemässe Verfahren erlaubt es nun, das Design der Düse 41 so zu optimieren, dass es möglichst gut die vorgegebenen Prozessparameter für den austretenden Fluid- bzw. Gasstrom realisiert.

**[0074]** Das erfindungsgemässe Verfahren eignet sich auch, um eine thermische Spritzvorrichtung insbesondere eine Plasmaspritzvorrichtung 1 zu betreiben. Dabei kann das Betriebsmodell dazu dienen, vorgegebene Prozessparameter, die beispielsweise nicht direkt messbar sind, während des Betriebs aufzuzeichnen und zu speichern, oder das Betriebsmodell kann in die Steuerung bzw. Regelung der Spritzvorrichtung integriert werden,

um beispielsweise einen oder mehrere Prozessparameter auf einen Sollwert zu regeln.

**[0075]** Das erfindungsgemässe Verfahren eignet sich ferner für die Entwicklung und/oder die Durchführung von Hybridprozessen, bei denen thermisches Spritzen mit anderen Prozessen kombiniert wird, beispielsweise für einen Hybridprozess Kaltgasspritzen/Plasmaspritzen.

**[0076]** Das erfindungsgemässe Verfahren ist vorzugsweise in Form eines Computerprogrammprodukts in einer Datenverarbeitungsanlage implementiert.

**[0077]** Erfindungsgemäss wird also ein Verfahren vorgeschlagen zur Bestimmung von Prozessparametern in einem thermischen Spritzprozess, bei welchem mittels einer thermischen Spritzvorrichtung (1) Partikel aufgeschmolzen oder plastisch gemacht werden und von einem Fluidstrom (G) zu einem Substrat (6) transportiert werden, bei welchem Verfahren für den thermischen Spritzprozess oder für die thermische Spritzvorrichtung ein Betriebsmodell errichtet wird, welches ein strömungsmechanisches Modell sowie ein elektromagnetisches Modell umfasst, wobei das strömungsmechanische Modell und das elektromagnetische Modell miteinander gekoppelt werden und mittels des Betriebsmodells mindestens ein Prozessparameter bestimmt wird.

#### Patentansprüche

1. Verfahren zur Bestimmung von Prozessparametern in einem thermischen Spritzprozess, bei welchem mittels einer thermischen Spritzvorrichtung (1) Partikel aufgeschmolzen oder plastisch gemacht oder verdampft werden und von einem Fluidstrom (G) zu einem Substrat (6) transportiert werden, bei welchem Verfahren für den thermischen Spritzprozess oder für die thermische Spritzvorrichtung ein Betriebsmodell errichtet wird, mit dem eine Simulation des thermischen Spritzprozesses durchführbar ist, und welches ein strömungsmechanisches Modell sowie ein elektromagnetisches Modell umfasst, wobei das strömungsmechanische Modell und das elektromagnetische Modell miteinander gekoppelt werden und mittels des Betriebsmodells mindestens ein Prozessparameter bestimmt wird.
2. Verfahren nach Anspruch 1 bei welchem das Betriebsmodell die Wechselwirkung zwischen den Partikeln und dem Fluidstrom (G) umfasst.
3. Verfahren nach einem der vorangehenden Ansprüche, bei welchem zumindest einer der folgenden Prozessparameter bestimmt wird: Geschwindigkeit der Partikel, Temperatur der Partikel an der Oberfläche der Partikel, Temperatur im Innern der Partikel, Aggregatzustand der Partikel, Spur der Partikel, Auftreffpunkt der Partikel.
4. Verfahren nach einem der vorangehenden Ansprüche

che, bei welchem ein Temperaturprofil für die Partikel erstellt wird.

5. Verfahren nach einem der vorangehenden Ansprüche, bei welchem ein Geschwindigkeitsprofil oder ein Temperaturprofil für den Fluidstrom erstellt wird. 5
6. Verfahren nach einem der vorangehenden Ansprüche, bei welchem für mindestens einen Prozessparameter ein Sollwert vorgegeben wird und die thermische Spritzvorrichtung oder der thermische Spritzprozess mittels des Betriebsmodells optimiert wird, bis der Sollwert innerhalb vorgegebbarer Grenzen erreicht wird. 10
7. Verfahren nach einem der vorangehenden Ansprüche, bei welchem die thermische Spritzvorrichtung eine Düse (41) umfasst, durch welche der Fluidstrom austritt, wobei das Betriebsmodell zur Optimierung der Düse herangezogen wird. 15
8. Verfahren nach einem der vorangehenden Ansprüche, bei welchem die thermische Spritzvorrichtung eine Plasmaspritzvorrichtung ist, bei der mindestens ein Lichtbogen zwischen einer Anode (4) und einer Kathodenanordnung (3) erzeugt wird. 20
9. Verfahren nach Anspruch 8, bei welchem mittels des Betriebsmodells die Form und/oder die Kontaktpunkte des Lichtbogens bestimmt werden. 25
10. Thermische Spritzvorrichtung, insbesondere Plasmaspritzvorrichtung, welche mit Hilfe eines Verfahrens gemäss einem der vorangehenden Ansprüche betrieben wird. 30
11. Computerprogrammprodukt zur Implementierung eines Verfahrens gemäss einem der Ansprüche 1-9 in eine Datenverarbeitungsanlage. 35

40

45

50

55



Fig.1

