

# **Untersuchungen von Partikeleigenschaften beim Plasma- und HVOF-Spritzen**

Von der  
Fakultät für Maschinenwesen  
der Rheinisch-Westfälischen Technischen Hochschule Aachen zur  
Erlangung des akademischen Grades eines

**DOKTORS DER INGENIEURWISSENSCHAFTEN**

genehmigte Dissertation  
vorgelegt von  
**Dipl.-Ing. Christian Herbst-Dederichs, geb. Herbst**

aus  
Kempten/Allgäu

Berichter: Univ. - Prof. Dr. techn. Prof. h.c. (RC) E. Lugscheider

Berichter: Univ. - Prof. Dr.-Ing. F.-W. Bach

Tag der mündlichen Prüfung: 23. März 2000

Werkstoffwissenschaftliche Schriftenreihe

Band 43

**Christian Herbst-Dederichs**

**Untersuchungen von Partikeleigenschaften  
beim Plasma- und HVOF-Spritzen**

D 82 (Diss. RWTH Aachen)

Shaker Verlag  
Aachen 2000

Die Deutsche Bibliothek - CIP-Einheitsaufnahme

*Herbst-Dederichs, Christian:*

Untersuchungen von Partikeleigenschaften beim  
Plasma- und HVOF-Spritzen/Christian Herbst-Dederichs.

Aachen : Shaker, 2000

(Werkstoffwissenschaftliche Schriftenreihe ; Bd. 43)

Zugl.: Aachen, Techn. Hochsch., Diss., 2000

ISBN 3-8265-8233-0

Copyright Shaker Verlag 2000

Alle Rechte, auch das des auszugsweisen Nachdruckes, der auszugsweisen  
oder vollständigen Wiedergabe, der Speicherung in Datenverarbeitungs-  
anlagen und der Übersetzung, vorbehalten.

Printed in Germany.

ISBN 3-8265-8233-0

ISSN 1437-8450

Shaker Verlag GmbH • Postfach 1290 • 52013 Aachen

Telefon: 02407 / 95 96 - 0 • Telefax: 02407 / 95 96 - 9

Internet: [www.shaker.de](http://www.shaker.de) • eMail: [info@shaker.de](mailto:info@shaker.de)

*Kein Mangel an Erklärungen für die Geheimnisse des Lebens.  
Erklärungen sind heute billig zu haben.  
Die Wahrheit dagegen ist weit schwerer zu finden.*

Salman Rushdie, „Der Boden unter Ihren Füßen“:

## **Vorwort**

Die vorliegende Arbeit entstand während meiner Tätigkeit als wissenschaftlicher Mitarbeiter und Leiter der Gruppe Thermisches Spritzen am Lehr- und Forschungsgebiet Werkstoffwissenschaften der RWTH Aachen.

Allen voran möchte ich Herrn Univ.-Prof. Dr. techn. E. Lugscheider für die Anregung zu diesem Thema sowie seine vorzügliche fachliche und persönliche Betreuung danken. Des weiteren möchte mich ganz herzlich bei Herrn Univ.-Prof. Dr.-Ing. F.-W. Bach vom Lehrstuhl für Werkstofftechnologie der Universität Dortmund für sein besonderes Interesse an meiner Arbeit sowie die Übernahme der Position des Berichters bedanken. Für die spontane Zusage zur Übernahme des Prüfungsvorsitzes und das angenehme Prüfungsklima möchte ich mich ganz herzlich bei Herrn Univ.-Prof. Dr.- Ing. L. Singheiser bedanken.

Darüber hinaus gilt all jenen mein bester Dank, die mich – bewußt oder unbewußt – den Weg zum Ziel hilfreich begleitet haben. Es sind zu viele, um sie alle an dieser Stelle namentlich zu nennen. Dennoch möchte ich für Ihre besondere Unterstützung meinen Kollegen Dr.-Ing. Lidong Zhao, Dipl.-Ing. Arne Fischer sowie Uwe Werner besonders danken. Lidongs unerschütterliche Fachkenntnis auf der eigenen Seite zu wissen war stets beruhigend. Arnes jederzeitige Einsatzbereitschaft und unendliches Diskussionsvermögen leistete stets einen wertvollen Beitrag zur Reflexion der eigenen Gedanken. Und Uwes rastloser Kampf gegen die Tücken der Technik konnte immer wieder Verzweiflungstaten verhindern.

Nicht zu vergessen sind auch die stetige Einsatzbereitschaft und das besondere „Mitdenken“ meiner beiden studentischen Kräfte Richard Eberle und Felix Ernst. Ihnen gebührt ebenso mein bester Dank wie meinen Kollegen Dr.-Ing. G. Langer und Dr.-Ing. R. Sicking, die im Kreise der Institutsaufgaben eine vorzügliche Arbeitsatmosphäre geschaffen haben.

## **Kurzfassung**

Das Thermische Spritzen ist seit Jahrzehnten ein angewandter industrieller Prozeß zum Aufbringen von Beschichtungen auf Bauteilen. Seit seiner Einführung erfolgt die Optimierung und Kontrolle der Schichtmorphologie über die Einstellung und Kontrolle der maschinenseitigen Parameter. Einer neuer Ansatz ist, anstatt dieser indirekten Einflußnahme auf die Schichtmorphologie direkt die Partikelparameter vor dem Aufprall einzustellen und zu kontrollieren und auf diese Weise definierte Schichtstrukturen zu erreichen. Die maßgeblichen Partikeleigenschaften sind dabei die Partikelgeschwindigkeit, die Partikeltemperatur und der Schmelzgrad der Partikel. Diese Arbeit hat daher zum Ziel, beispielhaft anhand des Plasmaspritzens von Keramiken und dem HVOF Spritzen von Metallen die Korrelation zwischen den sekundären Maschinenparametern und den primären Partikelparametern im Aufprallbereich zu erarbeiten. Als Ergebnis konnten die einflußgebenden maschinenseitigen Parameter mit Hilfe einer geeigneten Partikeldiagnostik identifiziert werden. Beim Plasmaspritzen von Keramiken wurde insbesondere gezeigt, daß vor allem die parameterabhängige Plasmaviskosität eine wesentliche Rolle auf die Partikelinjektion und in der Folge auf die Partikelparameter vor dem Aufprall hat. Beim HVOF Spritzen von Metallen spielt dagegen der Ablauf der Gasverbrennung eine entscheidende Rolle auf die Partikelfragmentierung im Flug, die maßgeblich ursächlich für die Oxidbildung ist.

## **Abstract**

Thermal spraying has been industrially used for decades to apply coatings onto components. Since its introduction the optimisation and control of the coatings' structure has been done through the variation and control of the machine parameters. A new way seems to be to directly measure and adjust the primary particle parameters shortly prior to their impact rather than going the indirect way of controlling the secondary machine parameters. The decisive particle parameters, thereby, are meant to be the particle velocity, particle temperature and the particle melt degree. The objective of this work, therefore, is to work out the correlation between the primary particle parameters within their impact distance and the secondary machine parameters. This shall be done by both plasma spraying of ceramics and HVOF spraying of metals. As a result of this work, the machine parameters exerting a significant influence onto the particle parameters could be identified using a suitable particle diagnostic technique. During plasma spraying of ceramics it could be shown that the plasma viscosity controlled by the power parameters plays a major role for the particle injection and therefore for the particle parameters. In contrast, with HVOF spraying it is the sequence of the gas combustion which exerts a superior influence on the particle in-flight fragmentation and by this the particle in-flight oxidation.

---

## **Inhaltsverzeichnis**

<b>1.</b>	<b>Einleitung</b>	<b>1</b>
<b>2.</b>	<b>Aufgabenstellung und Ziel</b>	<b>6</b>
<b>3.</b>	<b>Die Grundlagen des Thermischen Spritzens</b>	<b>8</b>
3.1	Der Spritzvorgang	8
3.2	Der Schichtaufbau	8
3.3	Die Haftmechanismen thermisch gespritzter Schichten	8
<b>4.</b>	<b>Die Verfahren Plasma- und HVOF-Spritzen</b>	<b>12</b>
4.1	Das Plasmaspritzen	12
4.2	Das Hochgeschwindigkeits-Flammspritzen	16
<b>5.</b>	<b>Die Verfahren der on-line Partikelsensoren für thermische Spritzprozesse</b>	<b>21</b>
5.1	Spatial Filtering	21
5.2	Laser-Zwei-Fokus Messung	22
5.3	Laser-Doppler Anemometrie	24
5.4	Laserinterferometrie	27
5.5	Phasen-Doppler Anemometrie	28
5.6	Konzepte auf Basis von Video- und CCD-Kamera Technologien	30
5.7	Konzepte auf Basis der Pyrometrie	31
5.7.1	Grundlagen der Wärmestrahlung	
5.7.2	Anwendungsbeispiele der Pyrometrie zur Bestimmung von Partikeleigenschaften beim thermischen Spritzen	35
5.8	Thermographie	38
5.9	Abschließende Bemerkung zur Eignung der on-line Sensoren für die Aufgabenstellung	38
<b>6.</b>	<b>Stand der Forschung zur Korrelation zwischen Prozeß- und Partikelparametern</b>	<b>40</b>
6.1	Plasmaspritzen	40
6.1.1	Kenntnisstand zum Plasmastrahl	41
6.1.2	Kenntnisstand zum Partikelstrahl	43

---

6.2	Hochgeschwindigkeits-Flammspritzen	47
6.2.1	Kenntnisstand zu gasbetriebenen HVOF-Pistolen	49
6.2.2	Kenntnisstand zu kerosinbetriebenen HVOF-Pistolen	53
6.3	Zusammenfassung und kritische Betrachtung der bisherigen Arbeiten mit Bezug auf die Aufgabenstellung	56
<b>7.</b>	<b>Untersuchungsmethoden</b>	<b>59</b>
7.1	Thermische Spritzanlage	59
7.2	Partikelpyrometer DPV2000	60
7.4	Analyseverfahren	66
7.5	Spritzpulver	67
<b>8.</b>	<b>Darlegung der Untersuchungsergebnisse</b>	<b>71</b>
8.1	Meßsicherheit der on-line Diagnostik DPV2000	71
8.1.1	Meßsicherheit bei der Geschwindigkeitsbestimmung	71
8.1.2	Meßsicherheit bei der Temperaturbestimmung	71
8.1.3	Meßsicherheit bei der Durchmesserbestimmung	73
8.2	Partikeleigenschaften beim Plasmaspritzen	76
8.2.1	Die Partikeleigenschaften in der Auftreffebene bei stationären Bedingungen	76
8.2.2	Die Partikeleigenschaften in der Auftreffebene bei Änderung der Injektionsparameter	83
8.2.3	Die Partikeleigenschaften in der Auftreffebene bei Änderung des Spritzabstandes	88
8.2.4	Die Partikeleigenschaften in der Auftreffebene bei Änderung der Plasmamparameter	92
8.2.5	Die Partikeleigenschaften in der Auftreffebene bei zeitlich bedingter Veränderung des Brennerzustands	100
8.2.6	Die Partikeleigenschaften in der Auftreffebene als Folge der Kornfraktion und der Pulvermorphologie	102
8.2.7	Die Korrelation der Partikeleigenschaften in der Auftreffebene mit dem Aufschmelzgrad	108
8.3	Partikeleigenschaften beim Hochgeschwindigkeits-Flammspritzen	111
8.3.1	Einfluß der Sauerstoff/Brennstoff Zusammensetzung	111
8.3.2	Einfluß des Spritzabstandes	119
8.3.3	Einfluß des Gesamtgasmassenflusses	122

---

8.3.4	Einfluß der Partikelgröße	123
8.3.5	Der Partikeloxidationsgrad am Beispiel 316L	127
8.3.6	Das Partikelauflöschmelz- und Oxidationsverhalten am Beispiel 316L	130
<b>9.</b>	<b>Diskussion und Schlußfolgerungen</b>	<b>138</b>
9.1	Ergebnisse der Untersuchungen am Plasma-Verfahren	138
9.2	Ergebnisse der Untersuchungen am HVOF-Verfahren	146
<b>10.</b>	<b>Zusammenfassung und Ausblick</b>	<b>153</b>
<b>11.</b>	<b>Literaturverzeichnis</b>	<b>156</b>