

Plasmaspritzen mit einem kaskadierten Einzellichtbogen

Hendrik Heinemann

März 2024

Schriftenreihe Oberflächentechnik, Band 78

Hrsg.: Prof. Dr.-Ing. K. Bobzin

Partner im
LABORATORIUM
FÜGETECHNIK
BERFLÄCHENTECHNIK



Plasmaspritzen mit einem kaskadierten Einzellichtbogen

Cascaded Single-Arc Plasma Spraying

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

vorgelegt von

Hendrik Heinemann

Berichter/in: Univ.-Prof. Dr.-Ing. Kirsten Bobzin
Univ.-Prof. Dr.-Ing. Dipl.-Wirt. Ing. Wolfgang Tillmann

Tag der mündlichen Prüfung: 05.09.2023

Diese Dissertation ist auf den Internetseiten der Universitätsbibliothek online verfügbar.

Schriftenreihe Oberflächentechnik

Band 78

Hendrik Heinemann

**Plasmaspritzen mit einem kaskadierten
Einzellichtbogen**

Shaker Verlag
Düren 2024

Bibliografische Information der Deutschen Nationalbibliothek

Die Deutsche Nationalbibliothek verzeichnet diese Publikation in der Deutschen Nationalbibliografie; detaillierte bibliografische Daten sind im Internet über <http://dnb.d-nb.de> abrufbar.

Zugl.: D 82 (Diss. RWTH Aachen University, 2023)

Copyright Shaker Verlag 2024

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

Printed in Germany.

ISBN 978-3-8440-9417-6

ISSN 1864-0796

Shaker Verlag GmbH • Am Langen Graben 15a • 52353 Düren

Telefon: 02421 / 99 0 11 - 0 • Telefax: 02421 / 99 0 11 - 9

Internet: www.shaker.de • E-Mail: info@shaker.de

Danksagung

Die Ergebnisse dieser Arbeit entstanden im Rahmen von zwei Projekten, die von der Deutschen Forschungsgemeinschaft e. V. (DFG) gefördert und am Institut für Oberflächentechnik der RWTH Aachen University durchgeführt wurden. Dazu gehört das Projekt „Beeinflussung des Lichtbogenverhaltens im kaskadierten DC-Ein-Kathoden-Ein-Anoden-Plasma-Generator (DC-EKEAPG) zur Verbesserung der Prozessstabilität und der Schichteigenschaften“ mit der Projektnummer 336061514 und das Teilprojekt A10 im SFB1120-236616214 „Bauteilpräzision durch Beherrschung von Schmelze und Erstarrung in Produktionsprozessen“. Für die Förderung und Unterstützung sei an dieser Stelle gedankt. Für die Erstellung der Simulationsmodelle wurde von der Firma Oerlikon Metco, Wohlen, Schweiz die Geometrie des SinplexPro™-90 zur Verfügung gestellt. Ebenso hat A. B. Murphy von der Commonwealth Scientific and Industrial Research Organisation freundlicherweise die Eigenschaften des Plasmagases zur Verfügung gestellt. Für diese Unterstützung sei an dieser Stelle herzlich gedankt.

An erster Stelle gilt mein besonderer Dank Prof. Kirsten Bobzin für die fachliche Betreuung dieser Arbeit, aber auch für die vertrauensvolle Zusammenarbeit, insbesondere während meiner Zeit als Oberingenieur am IOT. Für die Übernahme des Zweitgutachtens möchte ich mich herzlich bei Prof. Wolfgang Tillmann bedanken sowie bei Prof. Christian Hopmann für die Übernahme des Vorsitzes der Prüfungskommission.

Darüber hinaus möchte ich mich bei allen aktuellen sowie ehemaligen wissenschaftlichen, technischen sowie in der Verwaltung tätigen Kollegen und Kolleginnen am IOT bedanken, die mich während meiner Promotion nicht nur fachlich, technisch sowie administrativ unterstützt, sondern mich vor allem als Team begleitet haben. Mein außerordentlicher Dank gilt meinen ehemaligen Vorgesetzten Dr. Mehmet Öte, Dr. Wolfgang Wietheger sowie Dr. Martin Knoch, ebenso wie meiner Gruppenleiterin Elisa Olesch, meinem Gruppenleiter Marvin Erck und meinem ehemaligen Gruppenleiter Dr. Julian Hebing. Daneben möchte ich mich für die Unterstützung durch Anke Lück im Sekretariat, sowie bei meinen ehemaligen wissenschaftlichen Hilfskräften Augustinus Conrad Schütz und Andreas O'Brien für die Zusammenarbeit bedanken. Für den regen - fachlichen aber vor allem auch freundschaftlichen - Austausch danke ich Dennis Hoffmann und Marco Carlet. Neben den Kollegen am IOT

möchte ich mich auch herzlich bei meinem Projektpartner Dr. Stephan Zimmermann für die sehr herzliche Zusammenarbeit aber auch die Unterstützung durch sein Wissen zu Plasma-
generatoren und der Diagnostik im Thermischen Spritzen bedanken.

Abschließend möchte ich meiner Familie und meinen Freunden herzlich danken:
Insbesondere meinen Eltern und Geschwistern danke ich für ihre Unterstützung und das mir
entgegengebrachte Verständnis. Zuletzt danke ich von ganzem Herzen meiner Frau Vanessa
für ihre immerwährende Unterstützung, stetige Ermutigung und unverzichtbare Hilfe
während dieser Zeit.

Das Atmosphärische Plasmaspritzen ist eine vielseitig einsetzbare Beschichtungstechnologie zur Applikation einer breiten Palette an Schichtwerkstoffen. Innerhalb des atmosphärischen Plasmaspritzens ist das kaskadierte Plasmaspritzen mit Einzellichtbogen eine industriell noch recht junge Verfahrensvariante. Die dabei genutzten Generatoren vereinen den Vorteil des vergleichsweise einfachen Aufbaus eines Einzellichtbogengenerators mit den erzeugten hohen Leistungen eines kaskadierten Generators. Allerdings sind die im kaskadierten Plasmaspritzen genutzten Generatoren noch recht unerforscht; insbesondere hinsichtlich der Bewegung des Lichtbogens und dem daraus resultierenden Stabilitätsverhaltens des Plasmafreistrahls.

In dieser Arbeit wird daher anhand von Messungen der elektrischen Kenngrößen in Kombination mit Hochgeschwindigkeitsaufnahmen das Stabilitätsverhalten dieses Generators untersucht. Dazu wird eine neue Methodik entwickelt, die es ermöglicht, die Aufnahmen quantitativ zu analysieren und hinsichtlich ihres Einflusses auf die Partikel zu bewerten. Die Ergebnisse zeigen, dass die kaskadierten Einzellichtbogengeneratoren eine vergleichbare Prozessstabilität zu kaskadierten Mehrlichtbogensystemen aufweisen. Diese Untersuchungen werden durch Simulationen des Plasmagenerators und des partikelbeladenen Freistrahls zur Vorhersage der Partikelgeschwindigkeiten und -temperaturen ergänzt. Die Simulationen sind in der Lage, die am Plasmagenerator entstehenden Nettoleistungen und elektrischen Leistungen gut vorherzusagen. Darauf basierend können die Simulationen die Partikelgeschwindigkeiten mit hoher Genauigkeit abbilden, auch wenn die Partikeltemperaturen derzeit noch leicht überschätzt werden. Im dritten Teil der Arbeit werden die Anbindungspositionen des Lichtbogens im Plasmagenerator durch Simulationen und experimentelle Untersuchungen analysiert und durch externe Magnetfelder manipuliert. Dabei wird die grundsätzliche Möglichkeit der Manipulation unter Beweis gestellt und gezeigt, dass diese potenziell einen Einfluss auf den Auftragswirkungsgrad haben kann.

Die auf den Hochgeschwindigkeitsaufnahmen basierende Stabilitätsanalyse ist eine neuartige Methode, welche im Rahmen dieser Arbeit erstmalig eingesetzt wurde. Gleiches gilt für die Vorhersage von Partikeleigenschaften eines kaskadierten Plasmagenerators. Die Methodik zur Beurteilung der Stabilität kann zukünftig zur Bewertung und Weiterentwicklung von Plasmageneratoren genutzt werden. Die Simulation der Partikeleigenschaften ermöglicht zudem eine schnellere Parameterentwicklung für neue Schichtsysteme.

Atmospheric plasma spraying is a versatile coating technology for the deposition of a wide range of coating materials. Cascaded plasma spraying with a single arc is a relatively new industrial process variant of atmospheric plasma spraying. The generators used in this process combine the advantages of incorporating the rather simple design of single-arc generator and of generating high power, characteristic for cascaded generators. However, the generators are still quite unknown, especially with regard to the movement of the arc and the resulting stability of the plasma jet.

In this work, the stability of generators used in cascaded plasma spraying are investigated by means of measurements of the electrical parameters in combination with high-speed recordings. For this purpose, a new methodology is developed which allows a quantitative analysis of the recordings and an evaluation of their influence on the particles. The results show that the cascaded single arc generators have a comparable process stability to cascaded multiple arc systems. These investigations are accompanied by simulations of the plasma generator and the particle-loaded free jet to predict the particle velocities and temperatures. The simulations are able to predict the net power and electrical power. Based on this, the simulations can model the particle velocities with good accuracy, even though the particle temperatures are currently slightly overestimated. In the third part of this thesis, the anode attachment positions of the arc in the plasma generator are analysed by simulations and experimental investigations and manipulated with external magnetic fields. The feasibility of the manipulation is demonstrated, and it is shown that it can have an influence on the deposition efficiency.

The stability analysis based on the high-speed images is a novel approach, which was used for the first time in this work. This also applies to the prediction of particle temperatures for a cascaded plasma generator, which has not been carried out before. The stability assessment methodology can be used in the future for the evaluation and further development of plasma generators. Further, the simulations of the particle properties of the CSA enable a faster development of parameters for new coating systems.

Inhaltsverzeichnis

1	Einleitung	1
2	Stand der Technik	4
2.1	Nicht-kaskadierte Plasmageneratoren	4
2.2	Kaskadierte Plasmageneratoren	5
2.3	Stabilität des Plasmaspritzens	7
2.4	Potentieller Einfluss der Instabilitäten	9
2.5	Simulationen des Plasmaspritzens	11
2.5.1	Simulationen des NCSA	12
2.5.2	Simulationen des CSA	13
2.5.3	Simulationen des CMA und historische Entwicklung dieser am IOT	13
3	Zielsetzung und Lösungsansatz	15
4	Untersuchung der Stabilität des Plasmaspritzens	18
4.1	Stand der Technik zu Untersuchung des Plasmaspritzens anhand von Hochgeschwindigkeitsaufnahmen	19
4.2	Messaufbau zur Beurteilung des Stabilitätsverhaltens	20
4.3	Auswertung der Hochgeschwindigkeitsaufnahmen	22
4.4	Vergleich der Plasmageneratoren	30
4.5	Zwischenfazit	39
5	Simulation des Plasmaspritzens	41
5.1	Modellierung des Plasmagenerators	41
5.1.1	Modellaufbau	41
5.1.2	Eigenschaften des Plasmagases	43
5.1.3	Randbedingungen	45
5.1.4	Konvergenzkriterien und Netzunabhängigkeitsstudie	47
5.1.5	Berechnete Temperatur- und Geschwindigkeitsfelder	48
5.1.6	Vergleich mit ermittelten Leistungen	50
5.1.7	Zwischenfazit	51
5.2	Partikelinjektion	52
5.2.1	Simulation der Partikelinjektion	55
5.2.2	Messungen der Partikelgeschwindigkeit am Injektor	58
5.2.3	Vergleich der simulierten und gemessenen Geschwindigkeiten am Injektor	62

5.2.4	Zwischenfazit	68
5.3	Modellierung des Plasmafreistrahls	69
5.3.1	Spritzzusatzwerkstoff	70
5.3.2	Interaktionen des Fluids und der Partikel mit dem Injektor und Schlauchwand	74
5.3.3	Wärme- und Stofftransport der Partikel im Plasmafreistrahls	80
5.3.4	Partikeltemperaturen und -geschwindigkeiten	86
5.3.5	Zwischenfazit	90
6	Position des Lichtbogens und die Auswirkungen	93
6.1	Modellierung des Lichtbogens	95
6.2	Experimentelle Manipulation der Lichtbogenposition und Untersuchung der Auswirkungen	105
6.2.1	Beobachtung der Lichtbogenposition	106
6.2.2	Auswirkung der Manipulation der Lichtbogenposition	109
6.3	Zwischenfazit	115
7	Zusammenfassung	116
8	Ausblick	118
9	Literaturverzeichnis	I
10	Anhang	XV
10.1	Matlab Code zur Auswertung des Plasmafreistrahls	XV
10.2	Python Codes zur Auswertung des Plasmafreistrahls	XVI
10.2.1	FlameLength	XVI
10.2.2	FlameIntensity	XVI
10.3	Frequenzspektren der Plasmaintensitäten für Parameter A und C	XVIII
10.4	Moody Diagramm	XX