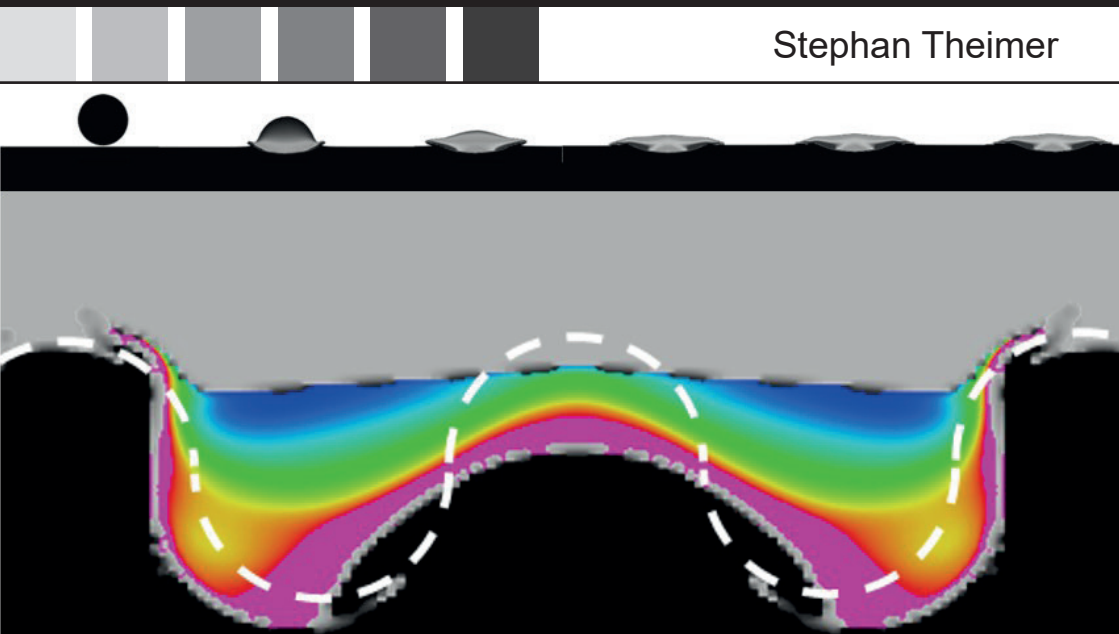


Schicht- und Adhäsionsoptimierung beim Kaltgasspritzen von Buntmetalllegierungen

Stephan Theimer



Schicht- und Adhäsionsoptimierung beim Kaltgasspritzen von Buntmetalllegierungen

Von der Fakultät für Maschinenbau
der Helmut-Schmidt-Universität / Universität der Bundeswehr Hamburg
zur Erlangung des akademischen Grades eines Doktor-Ingenieurs
genehmigte

DISSERTATION

vorgelegt von

Stephan Theimer

aus Berlin

Hamburg 2019

:

Vorsitzender des Prüfungsausschusses:
Prof. Dr.-Ing. Jens Wulfsberg

Gutachter:
Prof. Dr.-Ing. Thomas Klassen
Prof. Dr.-Ing. Hamid Assadi

Tag der Disputation: 03. September 2019

Institut für Werkstofftechnik
Helmut-Schmidt-Universität / Universität der Bundeswehr Hamburg

Berichte aus der Werkstofftechnik

Stephan Theimer

**Schicht- und Adhäsionsoptimierung beim
Kaltgasspritzen von Buntmetalllegierungen**

Shaker Verlag
Düren 2019

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.: Hamburg, Helmut-Schmidt-Univ., Diss., 2019

Copyright Shaker Verlag 2019

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

Printed in Germany.

ISBN 978-3-8440-6989-1

ISSN 0945-1056

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

Bereits während meines Studiums an der Helmut-Schmidt-Universität wurden mir durch das Institut für Werkstofftechnik Auslandsaufenthalte zur Anfertigung meiner Studienarbeit bei Sulzer Metco (Westbury, New York, USA) und meiner Diplomarbeit an der Université du Québec à Trois-Rivières (Trois-Rivières, Québec, Kanada) ermöglicht. Sowohl die gesammelten Auslandserfahrungen als auch die durchweg erfrischende und positive Stimmung haben mich nachhaltig begeistert, sodass ich nach Abschluss meines Wirtschaftsingenieurstudiums als freier wissenschaftlicher Mitarbeiter dem Institut gewogen blieb. Neben meiner Verwendung bei der Bundeswehr, hatte ich die Möglichkeit das Aufprallverhalten von Einzelpartikeln zu simulieren und bereits erste Erfahrungen im wissenschaftlichen Arbeiten zu sammeln. Nach Ende meiner Dienstzeit wechselte ich nahtlos als ziviler wissenschaftlicher Mitarbeiter an das Institut für Werkstofftechnik.

Mein Dank gilt Prof. Dr.-Ing. Thomas Klassen, sowohl für Möglichkeit meine Promotion in seinem Institut anzufertigen, als auch für das in mich und meine Arbeit gesetzte Vertrauen. Besonders möchte ich mich für die offene und konstruktive Atmosphäre bedanken.

Mein besonderer Dank gilt meinem "Doktor-Stiefvater" Dr. rer. nat. Frank Gärtner, der mich insbesondere beim Abfassen wissenschaftlicher Arbeiten durch seine immense Erfahrung und unendliche, themenübergreifende Expertise, sowie zahlreichen Diskussionen unterstützt hat. Sein ungebremster Wille und das "gute Herz" sind essentiell für das so erfolgreiche Standing des Instituts über die nationalen Grenzen hinaus. Er trägt einen sehr großen Teil, der zum erfolgreichen Abschluss dieser Arbeit geführt hat.

Mein herzlicher Dank gebührt Dr. Ing. Alexander List für seine Bereitschaft die "frischen Schreib- und Korrekturerfahrungen" zu teilen, sein kritisches und konstruktives Auge beim Lesen unzähliger Passagen dieser Arbeit, und vor allem den abwechslungsreichen Stunden bei den zerstörungsfreien Werkstoffprüfungen an Materialien beginnend mit der Werkstoffnummer 0 und 1 und den Beratungen zum Velo.

Ich bedanke mich außerordentlich bei Dr. Ing. Maria Villa Vidaller sowohl für die Unterstützung bei den vielen wissenschaftlichen Beiträgen, den Betrachtungen aus einem anderen Blickwinkel und vor allem für die Aufmunterungen und die Durchhalteappelle im letzten Drittel meiner Zeit.

Mein ganz besonderer Dank gilt Camilla und Matthias Schulze, die für mich das letzte Jahr meiner Tätigkeit in Hamburg zur Gastfamilie wurden, wobei ich mich immer doch etwas heimisch gefühlt habe. Neben den kleinen und vor allem großen Annehmlichkeiten haben beide in unzählige Stunden meine Launen ertragen müssen und mich stetig zum Weitermachen motiviert. Beiden verdanke ich das Abschließen der Arbeit in Summe und in so kurzer Zeit.

Darüber hinaus möchte ich auch allen ehemaligen und aktuellen Mitarbeitern, Technikern und Ingenieuren des Instituts für Werkstofftechnik und Kollegen über die In-

stituts Grenzen hinaus, sowie allen Forschern mit denen ich zusammenarbeiten durfte, danken. Dies sind namentlich Holger Benecke, Dr. Kurt Binder, Thomas Breckwoldt, Bahman Daneshian, Siegfried Dietrich, Andreas Elsenberg, Dr. Henning Gutzmann, Caroline Hahn, Dr. Julian Jepsen, Martin Klinck-Ahrens, Marion Kollmeier, Dr. Sebastian Krebs, Prof. Heinrich Kreye, Stefan Meyer, Norbert Németh, Koichiro Onizawa, Kristin Przybilla, Ragle Raudsepp, Max Schneider, Sabine Stein, Carmen Tenholt, Uwe Wagener, Charline Wolpert und Stephan Zimmermann.

Ich danke dem Bundesministerium für Bildung und Forschung für die finanzielle Unterstützung zum Forschungsprojekt "Kaltgasspritzen industrieller Gleitschichten", sowie den Projektpartnern Kerstin-Raffaella Ernst, Patrick Hoppe, Raphael Neuhaus und Wilfredo Garcia Vargas.

Neben der Übernahme des Koreferats möchte ich mich bei Prof. Dr.-Ing. Assadi außerdem für die zu Beginn meiner Tätigkeit sehr fruchtbaren, offenen und respektvollen Diskussionen und zielführenden Hinweise, sowie die stets konstruktive und erhellende Atmosphäre vor, während und nach meines Aufenthaltes in London recht herzlich bedanken.

Der größte Dank gebührt meiner lieben Ehefrau Maren, die mir während der ersten zwei Drittel meiner Zeit in Hamburg den Rücken frei- und meine Launen ausgehalten hat, mit mir den Hausbau geplant und überwacht sowie danach folgend in Berlin ein "Alleinerziehenden-Darsein" mit meinen beiden Söhnen unglaublich und mit Bravour gestemmt hat - diese Leistung ist einzigartig! Meinen Söhne danke ich für das aufgebrachte Verständnis, wenn Papa wieder in Hamburg ist/ bleibt. Es kehrt nun wieder Ruhr ein - versprochen!

Einen ganz lieben Dank gilt meinem Vater Frank Theimer, der immer mit guter Laune und flotten Sprüchen meine Stimmung aufzuhellen wusste, darüber hinaus so einige Nebenkriegsschauplätze bereinigte und als herzlicher Opa meine beiden Söhne zu begeistern und abzulenken wusste. Danke für alles!

Einen herzlichen Dank an meine Mutter Claudia Prestel und meine Stiefmutter Petra Schmidt, die in so vielen Situationen "mal eben schnell" geräuschlos die Kinder übernahmen, um uns eine Atempause von Dissertationsschreiben, Hausbau, Dienstplanänderungen und Kinderbetreuung zu gewähren. Ich danke außerdem meiner Familie, die uns insbesondere im letzte Jahr das Pendeln "zwischen den Welten" ermöglichte.

Hamburg, 2019

Stephan Theimer

Veröffentlichungen

Teile der vorliegenden Arbeit wurden bereits in wissenschaftlichen Fachpublikationen, Vorträgen sowie in Posterpräsentationen veröffentlicht:

Wissenschaftliche Fachbeiträge

1. Theimer, S; Bretack P.; Gärtner, F.; Klassen, T.: *Cold Gas Spraying of lead-free bearing bronzes* In: Proceedings of the International Thermal Spray Conference 2017; S.208-213, DVS Media GmbH, Düsseldorf, 2017
2. Theimer, S; Graunitz M.; Gärtner, F.; Klassen, T.: *Adhesion of Cold Sprayed Brass Coatings for Lead-Free Bearings* In: Proceedings of the International Thermal Spray Conference 2018; S.568-573, ASM International, 2018
3. Theimer, S; Graunitz M.; Schulze M.; Gärtner, F.; Klassen, T.: *Optimization Adhesion in Cold Spraying onto Hard Substrates: A Case Study for Brass Coatings* In: Journal Thermal Spray Technology, 28 (5-6), 2019

Wissenschaftliche Vorträge

1. "Cold Gas Spraying of lead-free bearing bronzes", International Thermal Spray Conference, Düsseldorf, 2017
2. "Adhesion of Cold Sprayed Brass Coatings for Lead-Free Bearings", International Thermal Spray Conference, Orlando, USA, 2018

Wissenschaftliche Posterpräsentationen

1. "Kaltgasspritzen bleifreier Kupferlegierungen für Gleitlager", GTS e.V. Meeting, Höhr-Grenzhausen, 2017

Kurzzusammenfassung

Durch das Schwermetall Blei werden jährlich weltweit neun Millionen Lebensjahre zerstört, trotzdem ist es in der Gleitlagerindustrie aufgrund seiner Notlaufeigenschaften und fehlender Substitutionen weiterhin im Einsatz. Zudem werden die Funktionsflächen dieser Gleitlager durch Auflöten oder Aufschmelzen kosten-, zeit- und energieintensiv aufgebracht. Ziel dieser Arbeit war es mittels Kaltgasspritzen Buntmetallagerlegierungen ressourcenschonend aufzutragen und Blei zu substituieren. Über den anwendungsspezifischen Aspekt hinaus sollte die Schichtadhäsion materialungleicher Werkstoffe untersucht werden.

In den ersten Schritten dieser Arbeit wurden Buntmetallagerlegierungen hinsichtlich ihrer Eignung zum Kaltgasspritzen untersucht und Prozessparameter vorab kalkuliert, um massivmaterialähnliche Eigenschaften von kaltgasgespritzten Schichten zu erreichen. Bei der Pulveruntersuchungen konnte ein sehr starker Anstieg der Festigkeit der zugelieferten Pulver im Vergleich zu Ausgangsmaterial bestimmt werden. Dies machte die Anpassung der Kaltgasspritzparameter erforderlich. Schließlich wurden für alle vier Buntmetallpulver kaltgasgespritzte Schichten erstellt und untersucht. Nach den Ergebnissen dieser Arbeit lassen sich zwei Buntmetallpulver prozesssicher, mit einer hohen Schichtqualität und mit einem hohen Auftragswirkungsgrad auftragen. Dabei bietet die Legierung CuZn37Mn3Al2Si die beste Dauerfestigkeit und höchsten Härten, jedoch eine ausbaufähige Schichtadhäsion. In einem nächsten Schritt konnte die Haftfestigkeit durch gezielte Substratvorbehandlung entscheidend gesteigert werden.

Neben den experimentellen Untersuchungen wurden die Einflüsse der Substrattopographie anhand von Einzelpartikelaufrallsimulationen untersucht. Hierbei stellen Kupfer als Pulvermaterial und Stahl als Substratmaterial exemplarisch den Aufprall von weichen Beschichtungswerkstoffen auf harten Substratmaterial dar. Es konnte gezeigt werden, dass eine raue, dem Kaltgasspritzprozess abgestimmte und vom verwendeten Spritzpulver abhängige Substratoberflächentopographie die Partikeladhäsion entscheidend verbessern kann.

Aufgrund der Erkenntnisse dieser Arbeit können in der Gleitlagerindustrie bleifreie Funktionsflächen kosten-, zeit- und energieeffizient aufgetragen werden. Zusätzlich ermöglichen die Ergebnisse eine grundlegende Verbesserung der Schichtadhäsion beim Kaltgasspritzen von weichen Pulvern auf harte Substrate. Zukünftige Forschungsarbeiten können das Verständnis zur Optimierung der Schichtadhäsion für weitere Werkstoffkombinationsklassen weiterentwickeln.

Vorwort

In der vorliegenden Arbeit wurden unter anderem Ergebnisse von Vertiefungslaboren, Studien-, Bachelor- sowie Masterarbeiten zusammengefasst. All diese Arbeiten wurden von mir persönlich, während meiner Zeit als wissenschaftlicher Mitarbeiter an der Helmut Schmidt Universität/ Universität der Bundeswehr Hamburg, betreut. Namentlich und alphabetisch sortiert, wurden diese Arbeiten angefertigt von Jan Niklas Barth, Patrick Brethack, Martin Graunitz, Lena Maren Grote, Jonas Löffler und Adrian Skupin. Die Titel der Arbeiten lauten dabei wie folgt:

Jan-Niklas Barth

"Aufbau und Etablierung eines tribologischen Systems - Referenzmessungen, Herausforderungen und Handhabungshinweise"

und

"Substratvorbehandlung zum Einsatz beim Kaltgasspritzen"

sowie

"Einfluss der Substratvorbehandlung auf die Adhäsion beim Kaltgasspritzen von Kupfer"

Patrick Brethack

"Untersuchung von bleifreien Bronzwerkstoffen und Pulvern für die Anwendung in Industrieleitlagern"

sowie

"Materialwissenschaftliche Untersuchung von kaltgasgespritzten Bronzeschichten für die Anwendung in Industrieleitlagern"

Martin Graunitz

"Einfluss verschiedener Strahlparameter auf die Schichtadhäsion kaltgasgespritzter Mehrstoff - Kupferlegierungen"

sowie

"Optimierung der Schichtadhäsion kaltgasgespritzter Mehrstoffkupferlegierungen durch Anpassung der Substratrauheit"

Lena Maren Grote

"Herstellung kaltgasgespritzter bleifreier Messinglegierungen für Gleitbauteile im Maschinen- und Anlagenbau"

Jonas Löffler

"Optimierung der Schichtadhäsion von kaltgasgespritzten Kupfermehrstoff-legierungen durch Wärmebehandlung der Pulver"

Adrian Skupin

"Eigenschaftsuntersuchungen von kaltgasgespritzten Zinn- und Messingbronzen"

Inhaltsverzeichnis

1	Einleitung	1
2	Experimentelle Methoden und Material	5
2.1	Kaltgasspritzen	5
2.1.1	Experimente	5
2.1.2	Parameterauswahl	6
2.2	Substratvorbereitung	6
2.3	Material	8
2.3.1	Substratmaterial	8
2.3.2	Pulvermaterial	8
2.4	Charakterisierungsmethoden	9
2.4.1	Partikelgrößenverteilung	9
2.4.2	Pulverdichte	9
2.4.3	Elektrische Leitfähigkeit	9
2.4.4	Rasterelektronenmikroskopie (REM)	9
2.4.5	Röntgenfeinstrukturanalysen (XRD)	10
2.4.6	Lichtmikroskopie und Porositätsbestimmung	10
2.4.7	Konfokalmikroskopie	10
2.4.8	Pulverfestigkeit	10
2.4.9	Kavitationsuntersuchungen	11
2.4.10	Mikroflachzugtest (MFT)	12
2.4.11	Schichtfestigkeit/ (TCT) Test	12
2.4.12	Haftzugfestigkeit	12
2.4.13	Härteuntersuchungen	13
3	Simulationsmethoden	15
3.1	Modelldefinition	15
3.2	Modellaufbau	16
3.3	Einheitensystem und Materialmodell	17
3.4	Auswertung hochverformter Bereiche	19
4	Materialeigenschaften von Substrat- und Spritzwerkstoffen	21
4.1	Substrateigenschaften	21
4.2	Spritzwerkstoffeigenschaften	21

5	Kaltgasspritzten von Buntmetalllegierungen	25
5.1	Wissenbasierter Ansatz zur Vorauswahl der Kaltgasspritzparameter . . .	25
5.1.1	Partikelgrößenverteilung	25
5.1.2	Einfluss von Prozessgasparametern auf die Aufprallbedingungen	28
5.1.3	Einfluss der Düsenkontur auf die Aufprallbedingungen	28
5.1.4	Materialspezifische Einflüsse auf die kritische Geschwindigkeit	30
5.2	Pulvereigenschaften	31
5.2.1	Pulverzusammensetzung	35
5.3	Schichtqualitäten	39
5.3.1	Eingestellte Auftragswirkungsgrade	39
5.3.2	Schichtmikrostrukturen	41
5.3.3	Schichtporositäten	43
5.3.4	Schichthärten	45
5.3.5	Kristallographische Schichtstrukturen	46
5.3.6	Elektrische Leitfähigkeiten	47
5.3.7	Schichtzugfestigkeiten	48
5.3.8	Kavitationsbeständigkeit	50
5.3.9	Schichtadhäsion	51
5.3.10	Kurzzusammenfassung	54
5.3.11	Optimierung der Schichtadhäsion	55
5.3.12	Diskussion der experimentellen Ergebnisse	61
6	Simulationsergebnisse	67
6.1	Ergebnisse zur Systemdefinition	67
6.1.1	Definition kritischer Bereiche für Grenzflächenbindung	68
6.1.2	Aufprallverhalten auf glattem Substrat	71
6.1.3	Anpassung der Substrattopographie	73
6.1.4	Aufprallverhalten für unterschiedliche Aufprallszenarien	77
6.1.5	Aufprallverhalten auf halbkugelförmige Wellenkonturen	79
6.1.6	Aufprallverhalten auf abflachungsverhältnisspezifische Halb- wellenkonturen	83
6.1.7	Diskussion Einzelpartikelaufrallsimulationen	89
7	Gesamtdiskussion	93
8	Zusammenfassung und Ausblick	97
8.1	Zusammenfassung	97
8.2	Ausblick	98
	Literaturverzeichnis	101
	Abbildungsverzeichnis	107
	Tabellenverzeichnis	119