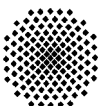
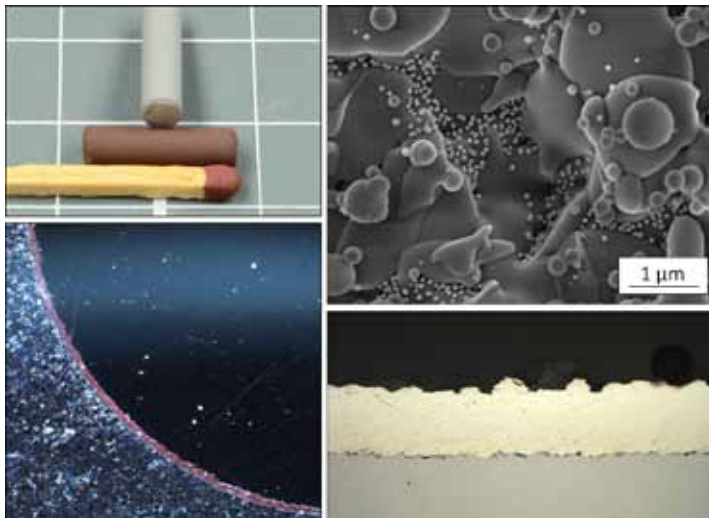


Peter Krieg

***Hochgeschwindigkeits-
suspensionsflammspritzen von
Metallen und metallocdotierten
Biokeramiken***



Hochgeschwindigkeitssuspensionsflammspritzen von Metallen und metalldotierten Biokeramiken

Von der Fakultät Konstruktions-, Produktions- und Fahrzeugtechnik der Universität Stuttgart zur
Erlangung der Würde eines Doktor-Ingenieurs (Dr.-Ing.) genehmigte Abhandlung

Vorgelegt von

Peter Valentin Krieg

aus Stuttgart

Hauptberichter: o. Prof. Dr. rer. nat. Dr. h.c. mult. Rainer Gadow

Mitberichter: Prof. Dr. rer. nat. Anke Bernstein

Tag der mündlichen Prüfung: 24.04.2018

Institut für Fertigungstechnologie keramischer Bauteile

2018

Forschungsberichte des Instituts für
Fertigungstechnologie keramischer Bauteile (IFKB)

Peter Valentin Krieg

**Hochgeschwindigkeitssuspensionsflammspritzen
von Metallen und metallocdotierten Biokeramiken**

D 93 (Diss. Universität Stuttgart)

Shaker Verlag
Aachen 2018

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.: Stuttgart, Univ., Diss., 2018

Copyright Shaker Verlag 2018

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

Printed in Germany.

ISBN 978-3-8440-6091-1

ISSN 1610-4803

Shaker Verlag GmbH • Postfach 101818 • 52018 Aachen

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

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

Vorwort und Danksagung

Die vorliegende Arbeit entstand während meiner Tätigkeit als wissenschaftlicher Mitarbeiter am Institut für Fertigungstechnologie keramischer Bauteile (IFKB) der Universität Stuttgart.

Mein besonderer Dank gilt Herrn o. Prof. Dr. rer. nat. Dr. h.c. mult. Rainer Gadow, ohne dessen fachliche Betreuung und ohne dessen Vertrauen die Durchführung dieser Arbeit nicht möglich gewesen wäre.

Bei Frau Prof. Dr. rer. nat. Anke Bernstein möchte ich mich herzlich für die interessante Zusammenarbeit, die zahlreichen fachlichen Anregungen sowie die Übernahme des Koreferats bedanken.

Bei den Mitarbeiterinnen und Mitarbeitern des IFKBs möchte ich mich für die interessante Zusammenarbeit und die angenehme Arbeitsatmosphäre bedanken. Insbesondere gilt mein Dank Herrn apl. Prof. Dr. Andreas Killinger für die konstruktive Zusammenarbeit. Herzlich bedanken möchte ich mich bei meinen Kollegen Frau M. Eng. Andrea Förg, Herrn Dipl.-Ing. Patrick Weichand, Herrn Dipl.-Ing. Matthias Blum und Herrn Dipl.-Ing. Ulrich Schmitt-Radloff, sowie allen aktuellen und ehemaligen Doktoranden des IFKBs für die zahlreichen Diskussionen und den freundschaftlichen Rückhalt.

Mein Dank gilt auch den Studentinnen und Studenten, die ich während meiner Zeit als wissenschaftlicher Mitarbeiter bei der Durchführung ihrer Bachelor-, Studien-, Master- und Diplomarbeiten betreut habe, für die interessante, lehrreiche und produktive Zusammenarbeit. Insbesondere gilt mein Dank Frau Viktoria Ölkrug, Herrn Holger Stäbler, Herrn Vincent Bylda und Herrn Alexander Pedain, die mit ihren Arbeiten zum Gelingen dieser Arbeit beigetragen haben.

Bei Herrn M.Sc. Max Winkelmann und Herrn Dr. Jan Luth möchte ich mich für die interessante Zusammenarbeit im Rahmen des gemeinsamen AiF-Projekts bedanken.

Für die Förderung der Projekte, in deren Rahmen diese Arbeit entstanden ist, möchte ich mich bei der Deutschen Forschungsgemeinschaft (GA 589/11-1) und der AiF (KF 2121015AG4) herzlich bedanken.

Bei Herrn Willi Schwan und Frau Jolanta Marek möchte ich mich für Anfertigung der metallographischen Schliffe bedanken, sowie bei Herrn Dipl.-Ing. Gerd Maier für die Unterstützung bei der XRD-Analyse.

Insbesondere möchte ich bei meiner Frau für ihren Rückhalt, ihre Geduld und die andauernde Ermutigung beim Anfertigen dieser Arbeit bedanken, sowie bei meinen Eltern und meinem Bruder für ihre unermüdliche Unterstützung.

Stuttgart im Dezember 2017

Inhaltsverzeichnis

Inhaltsverzeichnis	I
Extended Summary	IV
Abkürzungsverzeichnis	IX
Symbolverzeichnis	X
1 Einleitung	1
1.1 Motivation	1
1.2 Aufgabenstellung und Zielsetzung	2
2 Stand der Wissenschaft und Technik	5
2.1 Einführung in das thermische Spritzen	5
2.1.1 Grundlagen	5
2.1.2 Anwendungsgebiete	8
2.1.3 Verfahren des thermischen Spritzens	9
2.2 Thermisches Spritzen mit Suspensionen	13
2.2.1 Varianten beim thermischen Spritzen mit Suspensionen	14
2.2.2 Vorgänge beim Suspensionsspritzen	15
2.2.3 Förderkonzepte für Suspensionen	22
2.3 Spritzzusatzwerkstoffe	23
2.3.1 Metalle und Metallsalze	23
2.3.2 Biokeramiken	28
2.3.3 Suspensionen	32
2.4 Wechselwirkung Implantat-Gewebe	39
2.4.1 Biokompatibilität	39
2.4.2 Knochenbildung	41
2.4.3 Antibakterieller Effekt	42
3 Prozess- und Fertigungsmesstechnik	44
3.1 Suspensions- und Pulvercharakterisierung	44
3.1.1 Partikelgrößenbestimmung	44
3.1.2 Rheometrie an Suspensionen	44
3.1.3 Stabilität von Suspensionen	45
3.2 Schicht- und Schichtverbundcharakterisierung	46
3.2.1 Lichtmikroskopische Untersuchungen	46

3.2.2	Porosität	46
3.2.3	Mikrohärte und Eindringmodul	47
3.2.4	Rasterelektronenmikroskopie und Elementmapping	48
3.2.5	Rauheit	49
3.2.6	Haftzugfestigkeit	50
3.2.7	Eigenspannungen	51
3.2.8	Röntgendiffraktometrie	52
3.2.9	Raman-Spektroskopie	53
3.2.10	Elektrische Leitfähigkeit	54
3.2.11	Auftragswirkungsgrad	55
3.3	Prozessdiagnostik	55
3.3.1	Substrattemperatur	55
3.3.2	Particle Image Velocimetry	56
3.4	Untersuchung der Biokompatibilität	57
4	Eingesetzte Werkstoffe und Beschichtungstechnologien	58
4.1	Eingesetzte Werkstoffe	58
4.1.1	Verwendete Pulverwerkstoffe für metallische Schichten	58
4.1.2	Biokeramiken und metallische Dotierungen	60
4.2	Dispersionsmittel und Substratmaterialien	63
4.3	Suspensionsherstellung	64
4.4	Eingesetzte Beschichtungstechnologie	64
4.4.1	Brenner und Injektoren	64
4.4.2	Suspensionsförderung	65
5	Experimentelle Untersuchungen	67
5.1	Verarbeitung von Metallen mittels HVSFS	67
5.1.1	Suspensionsentwicklung	67
5.1.2	Hochgeschwindigkeitssuspensionsflammspritzen von Metallen	74
5.1.3	Silber	75
5.1.4	NiCr	96
5.1.5	Kupfer	105
5.2	Lösungsspritzen metallischer Silberschichten	111
5.2.1	Prozessadaption und Parameter	111

5.2.2	Ergebnisse der Beschichtungsversuche	112
5.3	Metalldotierte biokeramische Schichten.....	116
5.3.1	Suspensionsentwicklung	116
5.3.2	Entwicklung der metalldotierten biokeramischen Schichten	125
5.3.3	Schichtentwicklung auf Implantatgeometrien	163
6	Diskussion, Zusammenfassung und Ausblick.....	175
6.1	Metallische Schichten	176
6.2	Metalldotierte biokeramische Schichten.....	179
6.3	Ausblick.....	182
7	Literaturverzeichnis.....	183