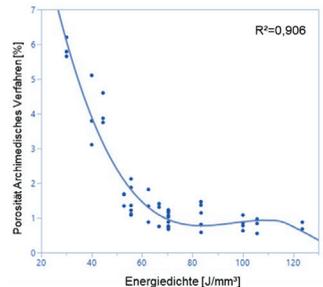
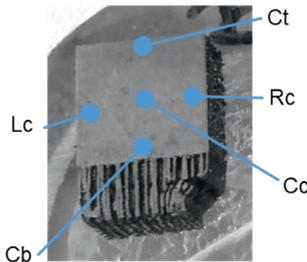
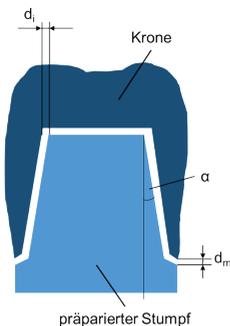


Beitrag zur Qualitätssicherung in der additiven Fertigung individueller Produkte aus CoCr-Legierungen

Andrea Huxol

Band
2020/42



Beitrag zur Qualitätssicherung in der additiven Fertigung individueller Produkte aus CoCr-
Legierungen

zur Erlangung des akademischen Grades DOKTOR DER
INGENIEURWISSENSCHAFTEN (Dr.-Ing.)
der Fakultät für Maschinenbau
der Universität Paderborn

genehmigte
DISSERTATION

von
Andrea Huxol
aus Lemgo

Tag des Kolloquiums: 14.02.2020

Referent: Prof. Dr. rer. nat. Thomas Tröster

1. Korreferent: Prof. Dr.-Ing. Mirko Schaper

2. Korreferent: Prof. Dr.-Ing. Franz-Josef Villmer

Schriftenreihe Institut für Leichtbau mit Hybridsystemen

Band 42/2020

Andrea Huxol

**Beitrag zur Qualitätssicherung in der additiven
Fertigung individueller Produkte
aus CoCr-Legierungen**

D 466 (Diss. Universität Paderborn)

Shaker Verlag
Düren 2020

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.: Paderborn, Univ., Diss., 2020

Copyright Shaker Verlag 2020

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

Printed in Germany.

ISBN 978-3-8440-7358-4

ISSN 2196-2200

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

Vorwort

Die vorliegende Arbeit entstand während meiner Tätigkeit als wissenschaftliche Mitarbeiterin an der Technischen Hochschule Ostwestfalen-Lippe in Zusammenarbeit mit dem Institut Leichtbau mit Hybridsystemen der Universität Paderborn und der Hochschule Ostwestfalen-Lippe.

Mein besonderer Dank gilt Herrn Prof. Dr. Thomas Tröster, Lehrstuhl Leichtbau im Automobil der Universität Paderborn, für die Ermöglichung der Promotion sowie seine Unterstützung und Beratung.

Ebenso großer Dank gebührt Herrn Prof. Dr.-Ing Franz-Josef Villmer, Labor Entwicklung und Konstruktion an der Technischen Hochschule Ostwestfalen-Lippe, für die Übernahme des Korreferats, für seine langjährige fachliche und persönliche Unterstützung sowie für zahlreiche Diskussionen und Impulse.

Bei Herrn Prof. Dr.-Ing. Mirko Schaper, Lehrstuhl für Werkstoffkunde der Universität Paderborn, bedanke ich mich für die Übernahme des Korreferats meiner Dissertation.

Weiterhin möchte ich den wissenschaftlichen Mitarbeiterinnen und Mitarbeitern der Technischen Hochschule Ostwestfalen-Lippe, besonders Dr. Andrea Davis, Heike Balzer und Filippo Simoni, für die Unterstützung und die hilfreichen Ratschläge danken.

Die vorliegende Arbeit wurde von der Hochschulgesellschaft OWL e.V. gefördert. Ich bedanke mich für die finanzielle Unterstützung, die die Durchführung der Versuche mit ermöglicht hat.

Abschließend möchte ich meiner Familie für ihren Rückhalt während der Erstellung dieser Arbeit danken.

Andrea Huxol

Paderborn, im März 2020

Zusammenfassung

Die additive Fertigung gewinnt zunehmend Bedeutung für die Herstellung finaler Bauteile. Ein Anwendungsgebiet liegt dabei in der Herstellung dentaler Restaurationen, bei denen die Metallgerüste für Kronen und Brücken mittels Laser-Strahlschmelzen hergestellt werden. Aufgrund des schichtweisen Aufbaus und der direkten digitalen Fertigung eignet sich die additive Fertigung in besonderem Maße für die Herstellung dieser Bauteile mit individueller Geometrie. Allerdings fehlt der Nachweis, dass die geforderte Teilequalität reproduzierbar erreicht wird. Im Rahmen der vorliegenden Arbeit wird ein Konzept zur Qualitätssicherung erarbeitet, das ein standardisiertes Prüfverfahren zum Nachweis der Maschinenqualifikation für den beschriebenen Anwendungsfall beinhaltet. Dazu werden Qualitätsanforderungen ermittelt und mit dem Stand der Technik abgeglichen. Basierend darauf erfolgen Untersuchungen zur Korrelation zwischen mechanischen und physikalischen Materialkennwerten, wofür durch Variation der Fertigungsparameter gezielt Bauteile mit unterschiedlicher Porosität erzeugt werden. In der Folge wird die Porosität als Prüfgröße festgelegt. Ausgehend von den definierten Qualitätsanforderungen und den Versuchsergebnissen wird ein Verfahren zum Nachweis der Maschinenqualifikation basierend auf der Berechnung des potenziellen Maschinenleistungsindex erarbeitet und exemplarisch für das verwendete Fertigungssystem angewendet. Abschließend werden Ansätze zur Weiterentwicklung des Verfahrens sowie für weiterführende Forschungsthemen dargestellt.

Abstract

Additive manufacturing is becoming increasingly important for the production of final components. One field of application is the production of dental restorations in which the metal structures for crowns and bridges are produced by laser-beam melting. Due to the layered structure and the direct digital production, additive manufacturing is particularly suitable for the production of these components with individual geometry. Nevertheless, it is not proven that the required part quality is reproducibly achieved. In the present work, a concept for quality assurance is being developed which includes a standardized test method for proving the machine qualification for the described application. For this purpose, quality requirements are determined and then compared with the state of technology. Based on this, the correlation between mechanical and physical material properties is experimentally evaluated, for which purpose components with different porosity are specifically produced by varying the production parameters. The porosity is then determined as a test variable. Based on the defined quality requirements and the test results, a method for validating the machine qualification is developed based on the calculation of the potential machine performance index and exemplary for the used in the production system. Finally, approaches are presented for the further development of the process as well as for future research topics.

Liste der Vorveröffentlichungen

A. Huxol und F.-J. Villmer, Additive Manufacturing Processes Quality Management, In: F.-J. Villmer, E. Padoano (Hrsg.): Proceeding of the International Conference Production Engineering and Management, S. 167-177, Lemgo, 2014.

A. Huxol und F.-J. Villmer, Special Requirements for Additive Manufacturing of Dental Frameworks, In: F.J. Villmer, E. Padoano (Hrsg.): Proceeding of the 6th International Conference Production Engineering and Management, S. 15-26, Lemgo, 2016.

A. Huxol und F.-J. Villmer, QM in der additiven Fertigung - Betrachtungen zur Prozessfähigkeit am Beispiel der additiven Herstellung von Zahnersatz, Vortrag: 21. Fachtagung Rapid Prototyping, Lemgo, 04.11.2016.

A. Huxol, E.M. Scheideler und F.-J. Villmer, Influencing Factors on Part Quality in Selective Laser Melting, In: E. Padoano, F.-J. Villmer (Hrsg.): Proceedings 7th International Conference Production Engineering and Management, S. 13-24, Lemgo, 2017.

A. Huxol, A. Davis, F.-J. Villmer und E.M. Scheideler, Deployment of Process Capability Analysis for Single-Part Production, In: E. Padoano, F.-J. Villmer (Hrsg.): Proceedings 7th International Conference Production Engineering and Management, S. 63-74, Lemgo, 2017.

A. Huxol, E.M. Scheideler und F.-J. Villmer, *Process Capability Analysis in Metal Additive Manufacturing*, Vortrag: Inside 3D Printing Conference & Expo, Düsseldorf, 22.02.2018

A. Huxol, E.M. Scheideler und F.-J. Villmer, Process Capability Analysis in Metal Additive Manufacturing, In: B. Müller (Hrsg.): Fraunhofer Direct Digital Manufacturing Conference 2018, Fraunhofer Verlag, Chemnitz, 2018.

A. Huxol, F.-J. Villmer, E.M. Scheideler und F. Simoni, Identification of Control Parameters for Porosity Detection in Selective Laser Melting, in: MS&T18 (Hrsg.): Contributed papers from MS&T18, Columbus OH, 2018.

A. Huxol und F.-J. Villmer, Process Control for Selective Laser Melting – Opportunities and Limitations, In: F.-J. Villmer, E. Padoano (Hrsg.): Proceeding 8th International Conference Production Engineering and Management, S. 17-28, Lemgo, 2018.

A. Huxol und F.-J. Villmer, DoE Methods for Parameter Evaluation in Selective Laser Melting, In: A. Barari (Hrsg.): 13th Workshop on Intelligent Manufacturing Systems, Oshawa, Kanada, S. 276-281, 2019.

A. Huxol, E.M. Scheideler und F.-J. Villmer, Image Processing for Process Monitoring in Additive Manufacturing, In: E. Padoano, F.-J. Villmer (Hrsg.): *Proceedings 9th International Conference Production Engineering and Management*, S. 241-252, Lemgo, 2019.

Inhalt

Inhalt	1
Tabellenverzeichnis	3
Abbildungsverzeichnis	4
1 Einleitung.....	7
1.1 Zielsetzung.....	8
1.2 Vorgehen.....	9
2 Ausgangslage.....	10
2.1 Stand der Technik	10
2.1.1 Additive Fertigung	10
2.1.2 Laser-Strahlschmelzen	16
2.1.3 Möglichkeiten und Grenzen	19
2.1.4 Prozessparameter beim Laser-Strahlschmelzen	22
2.1.5 Einfluss auf die Bauteileigenschaften	27
2.1.6 Qualitätsmanagement in der additiven Fertigung.....	31
2.2 Dentaltechnik.....	41
2.2.1 Digitalisierung der Prozessketten	41
2.2.2 Additive Fertigung in der Dentaltechnik	44
2.2.3 Laser-Strahlschmelzen in der Herstellung dentaler Restaurationen.....	45
2.3 Qualitätsanforderungen an Dentalgerüste	48
2.3.1 Produkthanforderungen.....	48
2.3.2 Handlungsbedarf	54
3 Konzeptentwicklung.....	55
3.1 Grobkonzept.....	55
3.2 Vorversuche	56
3.2.1 Werkzeugstahl 1.2709.....	56
3.2.2 Kobalt-Chrom-Legierung	65
3.2.3 Parameteroptimierung	74
3.3 Weiterentwicklung des Konzepts	77
3.3.1 Definition von Teilefamilien.....	78
3.3.2 Beurteilung der Prozessfähigkeit	79
3.3.3 Prozessüberwachung	79
4 Experimentelle Validierung	80
4.1 Vorgehen.....	80
4.2 Identifizieren relevanter Einflussgrößen auf die Bauteilporosität	80
4.2.1 Versuchsbeschreibung	80
4.2.2 Ergebnisse und Auswertung.....	82
4.3 Korrelationsanalyse zwischen Porosität und mechanischen Eigenschaften.....	92
4.3.1 Versuchsbeschreibung	94
4.3.2 Ergebnisse und Auswertung.....	97
4.4 Bewertung der Wiederholbarkeit	104
4.4.1 Versuchsbeschreibung.....	104
4.4.2 Ergebnisse und Auswertung.....	105
5 Analyse.....	115

6	Methode zum Qualitätsmanagement in der additiven Fertigung von Dentalgerüsten...	121
6.1	Definition von Teilefamilien	122
6.2	Prozessqualifikation und Prozessverbesserung	123
6.3	Prozessüberwachung	124
7	Ausblick.....	125
8	Zusammenfassung.....	127
	Literatur.....	128
	Anhang	137

Tabellenverzeichnis

Tabelle 2-1: Prozesskategorien additiver Fertigungsverfahren nach DIN EN ISO 17296-2 [10].....	12
Tabelle 2-2: Einflussgrößen beim Laser-Strahlschmelzen nach Prozessstufen [13]	23
Tabelle 2-3: Systeme verschiedener Maschinenhersteller zur Prozessüberwachung nach [53].....	36
Tabelle 2-4: Anwendung der verschiedenen Fähigkeits- und Leistungsindizes nach [73, 76].....	40
Tabelle 2-5: Normative Anforderungen an Dentalgerüste, nach [108–110].....	50
Tabelle 2-6: Anforderungen an Dentalgerüste	53
Tabelle 3-1: Parameter und Einstellungen für das definitive Screening-Design Werkstoff 1.2709.....	59
Tabelle 3-2: Legierungszusammensetzung Starbond CoS Powder 55 [121].....	65
Tabelle 3-3: Mittelwerte der Untersuchungen an laser-strahlgeschmolzenen und gegossenen Proben [122]	66
Tabelle 3-4: Variierte Parameter und Werte für das definitive Screening-Design Werkstoff CoCr, Versuchsreihe C1	67
Tabelle 3-5: Parameter und Werte für die Wiederholbarkeitsuntersuchung Werkstoff CoCr, Versuchsreihe C2	68
Tabelle 3-6: Optimierter Parametersatz für Verarbeitung von CoCr auf der SLM 125	77
Tabelle 4-1: Parameter und Werte für das definitive Screening-Design zur Versuchsreihe V1	81
Tabelle 4-2: Verwendete Parameterkombinationen in der Versuchsreihe V2 [125].....	96
Tabelle 5-1: Potenzielle Maschinenleistungsindizes für obere Grenzwerte der Porosität von 5% und 1,4%	117

Abbildungsverzeichnis

Abbildung 2-1: Einteilung der Fertigungsverfahren nach DIN 8580 [9]	11
Abbildung 2-2: Umwandlung eines Volumenmodells in eine STL-Datei.....	14
Abbildung 2-3: Prozessablauf in der additiven Fertigung nach [13]	15
Abbildung 2-4: Schematischer Aufbau einer Anlage zum Laser-Strahlschmelzen	17
Abbildung 2-5: Schmelzvorgang beim Laser-Strahlschmelzen nach [14]	18
Abbildung 2-6: Realizer SLM 125.....	18
Abbildung 2-7: Ausprägung des Treppenstufeneffekts in Abhängigkeit von der Schichtstärke	20
Abbildung 2-8: Belichtungselemente beim Laser-Strahlschmelzen	24
Abbildung 2-9: Darstellung der Hatch-Richtung: a) X-Hatch, b) Y-Hatch	25
Abbildung 2-10: Zusammenhänge zwischen Prozessparametern, Prozesskenngrößen und Produkteigenschaften nach [51]	33
Abbildung 2-11: Zusammenhang zwischen Prozessfähigkeit, -streuung und -lage nach [7], modifiziert	38
Abbildung 2-12: Konventionelle Prozesskette zur Herstellung von Zahnersatz nach [80]	42
Abbildung 2-13: Digitale Prozesskette zur Herstellung von Zahnersatz nach [80]	43
Abbildung 2-14: Darstellung der marginalen und internen Passung einer Krone	51
Abbildung 3-1: Probenanordnung für Vorversuche	57
Abbildung 3-2: Schnittebene und Messpunkte an den Proben	58
Abbildung 3-3: Pareto-Diagramm der Porosität für die Wiederholgenauigkeitsanalyse ...	60
Abbildung 3-4: Darstellung Porosität nach Bauzyklus, Mittelwerte und Standardabweichung	61
Abbildung 3-5: Mikroskopische Aufnahmen von Hohlräumen in laser-strahlgeschmolzenen Proben, 200x. a) elliptische Poren, b) unregelmäßige Hohlräume	61
Abbildung 3-6: Paretodiagramm der Porosität für Versuchsreihe 1 des definitiven Screenings	62
Abbildung 3-7: Bauplattform mit Zugproben für Vorversuch S3 [116]	63
Abbildung 3-8: Korrelationsanalyse zwischen Porosität (Archimedisches Verfahren) und Zugfestigkeit.....	64
Abbildung 3-9: Auswertung der Einflussfaktoren a) auf die Porosität, b) auf die Zugfestigkeit [53].....	65
Abbildung 3-10: Probenanordnung für Versuchsreihe C2 [116], modifiziert.....	68
Abbildung 3-11: Mangelhafte Anbindung der Stützstruktur an die Bauplattform [116]	69
Abbildung 3-12: Histogramm der Porositätsverteilung zur Versuchsreihe C1	69
Abbildung 3-13: Schlibbilder der vier Proben mit der niedrigsten Porosität aus Versuchsreihe C1, 50x [116].....	71

Abbildung 3-14: Schliffbilder der vier Proben mit der höchsten Porosität aus Versuchsreihe C1, 50x [116]	72
Abbildung 3-15: Histogramm der Porositätsverteilung zur Versuchsreihe C2	73
Abbildung 3-16: Porosität in Abhängigkeit von Probentyp und Bauzyklus für Versuchsreihe C2.....	73
Abbildung 3-17: Porosität in Abhängigkeit von der Position auf der Bauplattform für Versuchsreihe C2	74
Abbildung 4-1: Abhängigkeit zwischen Porosität nach Archimedischem Verfahren und nach metallographischer Untersuchung, Versuchsreihe V1.....	83
Abbildung 4-2: Halb-Normalwahrscheinlichkeitsdiagramm zur Auswertung des definitiven Screenings in Versuchsreihe V1	84
Abbildung 4-3: Kubische Korrelation zwischen Porosität und Energiedichte, V1	85
Abbildung 4-4: Messwerte und Varianz der Porosität in Abhängigkeit von Versuchsparametern der Versuchsreihe V1 a) Punktabstand, b) Belichtungszeit	86
Abbildung 4-5: Porosität in Abhängigkeit vom Bauzyklus für die Versuchsreihe V1	87
Abbildung 4-6: Porosität in Abhängigkeit von X- und Y-Position der Proben im Bauraum für Versuchsreihe V1	88
Abbildung 4-7: Mikroskopie-Aufnahme der Probe 02, Versuchsreihe V1, 100x.....	89
Abbildung 4-8: Mikroskopie-Aufnahme der Probe 16, Versuchsreihe V1, 100x.....	89
Abbildung 4-9: Mikroskopie-Aufnahme der Proben 11 (a) und 28 (b), Versuchsreihe V1, 100x	90
Abbildung 4-10: Mikroskopie-Aufnahme der Probe 53, Versuchsreihe V1, 100x.....	91
Abbildung 4-11: Längsschliff der Probe 08, Versuchsreihe V1, geätzt, 200x	91
Abbildung 4-12: Längsschliff der Probe 11, Versuchsreihe V1, geätzt, 200x	92
Abbildung 4-13: Längsschliff der Probe 10, Versuchsreihe V1, geätzt, 200x	93
Abbildung 4-14: Längsschliff der Probe 09, Versuchsreihe V1, geätzt, 200x	93
Abbildung 4-15: Zugprobe nach DIN 50125, Form D mit Anpassungen [125].....	94
Abbildung 4-16: Spannzeug für Zugversuch, links: Aufbau, rechts: Einbausituation in der Universalprüfmaschine [125].....	95
Abbildung 4-17: Anordnung der Zugproben auf der Bauplattform	96
Abbildung 4-18: Auftretende Effekte während des Bauprozesses und deren Ausprägung an den Zugproben	97
Abbildung 4-19: Spannungs-Dehnungs-Diagramm Probe A5, Versuchsreihe V2	98
Abbildung 4-20: Spannungs-Dehnungs-Diagramm Probe C2, Versuchsreihe V2	99
Abbildung 4-21: Bruchflächen der Proben A5 (a) und C2 (b), Versuchsreihe V2, 7x.....	100
Abbildung 4-22: Kubische Korrelation zwischen Porosität und Energiedichte V2.....	100
Abbildung 4-23: Elastizitätsmodul in Abhängigkeit von der Porosität, Versuchsreihe V2	101

Abbildung 4-24: Quadratische Korrelation zwischen Zugfestigkeit und Porosität, Versuchsreihe V2.....	102
Abbildung 4-25: Kubische Korrelation zwischen 0,2%-Dehngrenze und Porosität, Versuchsreihe V2.....	102
Abbildung 4-26: Bruchdehnung in Abhängigkeit von der Porosität, Versuchsreihe V2 ..	103
Abbildung 4-27: Probenanordnung für Versuchsreihe V3.....	104
Abbildung 4-28: Häufigkeitsverteilung der Porosität in Versuchsreihe V3, Histogramm und Diagramm der Normal-Quantile.....	106
Abbildung 4-29: Test auf Normalverteilung der Porositätswerte aus Versuchsreihe V3.....	106
Abbildung 4-30: Mikroskopie-Aufnahme Probe 2019-02-11_1, Versuchsreihe V3, 50x.....	107
Abbildung 4-31: Mikroskopie-Aufnahme Probe 2019-02-21_9, Versuchsreihe V3, 50x.....	107
Abbildung 4-32: Porosität in Abhängigkeit vom Bauzyklus, Versuchsreihe V3	108
Abbildung 4-33: Temperatur und Luftfeuchte je Bauzyklus, Versuchsreihe V3.....	109
Abbildung 4-34: Sauerstoffgehalt und Gasdruck im Bauraum je Bauzyklus in Versuchsreihe V3	110
Abbildung 4-35: Porosität in Abhängigkeit der Probennummer, Versuchsreihe V3.....	111
Abbildung 4-36: Porosität in Abhängigkeit von X- und Y-Position im Bauraum, Versuchsreihe V3	112
Abbildung 4-37: Längsschliff der Probe 2019-02-21_8, Versuchsreihe V3, geätzt, 200x.....	113
Abbildung 4-38: Längsschliff der Probe 2019-02-18_3, Versuchsreihe V3, geätzt, 200x.....	113
Abbildung 4-39: Rasterelektronenmikroskopische Aufnahme des Pulvers nach Versuchsreihe V3.....	114