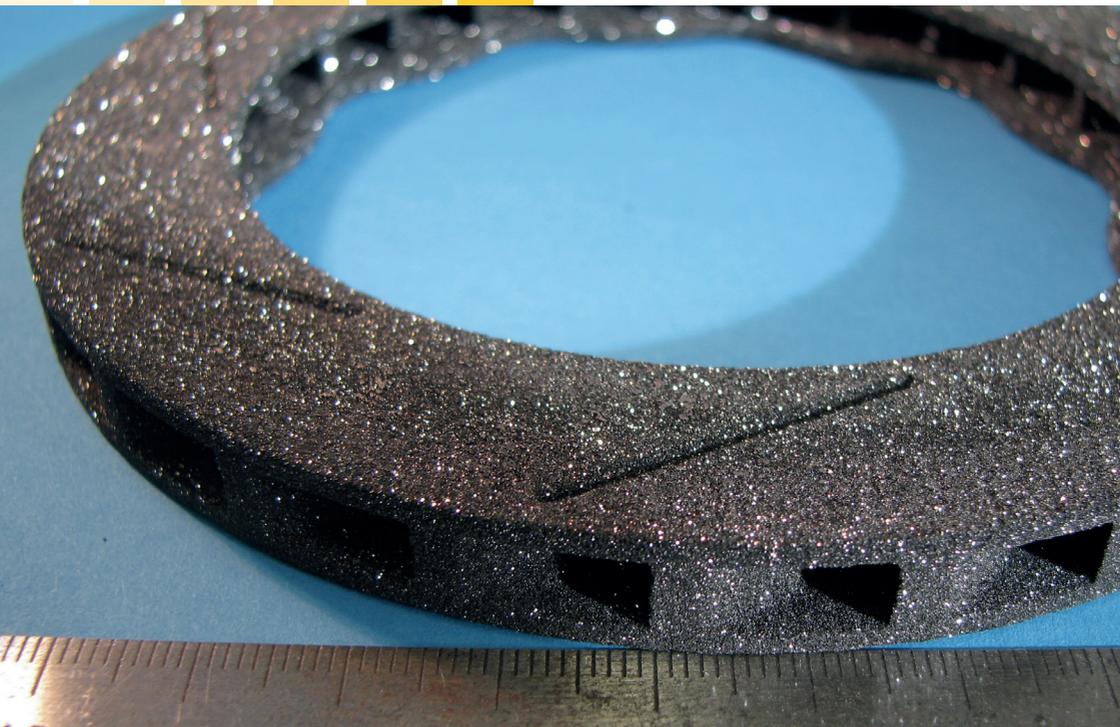


Etablierung neuer Materialsysteme in einem Pulver-Binder-3D-Druckprozess

Christian Polzin



Etablierung neuer Materialsysteme in einem Pulver- Binder-3D-Druckprozess

Dissertation

zur Erlangung des akademischen Grades

Doktor-Ingenieur (Dr.-Ing.)

der Fakultät für Maschinenbau und Schiffstechnik

der Universität Rostock

vorgelegt von:

Christian Polzin,

geb. am 21.03.1980 in Perleberg

Wedel, 22.06.2018

Gutachter:

1. Gutachter: Prof. Dr.-Ing. Hermann Seitz
Lehrstuhl für Mikrofluidik
Universität Rostock
2. Gutachter: Prof. Dr.-Ing. habil. Knut-Michael Henkel
Lehrstuhl für Fügetechnik
Universität Rostock

Datum der Einreichung: 04.07.2018

Datum der Verteidigung: 23.11.2018

Berichte aus dem Maschinenbau

Christian Polzin

**Etablierung neuer Materialsysteme
in einem Pulver-Binder-3D-Druckprozess**

Shaker Verlag
Aachen 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.: Rostock, Univ., Diss., 2018

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 978-3-8440-6509-1

ISSN 0945-0874

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

„Die Besten Dinge im Leben sind nicht die,
die man für Geld bekommt.“

Albert Einstein
(1879-1955)

Meinen Kindern Pauline und Hans

Danksagung

Die vorliegende Arbeit entstand im Rahmen meiner wissenschaftlichen Tätigkeit am Lehrstuhl für Fluidtechnik und Mikrofluidtechnik (ab 01.09.2018: Lehrstuhl für Mikrofluidik) der Universität Rostock.

Zunächst einmal gilt mein allergrößter Dank meinen Eltern, die mich über all die Jahre hinweg in allen Lebenssituationen so bedingungslos unterstützt haben. Ich danke euch von ganzem Herzen dafür. Meinen Schwestern Sandra und Karina und meinem Schwager Tobias danke ich dafür, dass sie mir wirklich immer mit Rat und Tat zur Seite stehen und mir während der Promotionszeit immer mal wieder den kleinen Motivationsschub gaben, um weiter zu machen. Ich möchte auch Nicole G. und Christian O. für den regen Austausch und die guten Tipps danken.

Weiterhin danke ich dem Leiter des Lehrstuhls für Mikrofluidik, Herrn Professor Dr.-Ing. Hermann Seitz, für die Betreuung dieser Arbeit und vor allem für seine Geduld in der Korrekturphase bedanken. Weiterhin gilt mein Dank auch den Mitarbeitern des Lehrstuhls, allen voran dem Sekretariat, die für mich immer eine offenes Ohr hatten. Herrn Professor Dr.-Ing. habil. Knut-Michael Henkel, dem Leiter des Lehrstuhls für Fügetechnik der Universität Rostock, danke ich für die Übernahme des Korreferates und das der Arbeit entgegengebrachte Interesse. Mein Dank gilt auch Herrn Professor Dr.-Ing. Jens Falkenstein für die Übernahme des Vorsitzes im Promotionsausschuss.

Wedel, Januar 2019

Christian Polzin

Inhaltsverzeichnis

1	Einleitung	1
1.1	Motivation	1
1.2	Zielsetzung.....	2
2	Stand der Technik	3
2.1	Grundlagen und Datenaufbereitung.....	3
2.1.1	Systematik der Fertigungsverfahren.....	3
2.1.2	Datenaufbereitung	6
2.2	Derzeitige Prozesse und Materialien.....	9
2.2.1	Stereolithographie (SL).....	9
2.2.2	Digital Light Processing (DLP).....	10
2.2.3	Poly-Jet Modeling (PJM)	11
2.2.4	Selektive Laser Sintering (SLS).....	12
2.2.5	Selektive Laser Melting (SLM) und Elektron Beam Melting (EBM)	13
2.2.6	Fused Deposition Modeling (FDM).....	14
2.2.7	Direct Inkjet Printing.....	15
2.3	Pulver-Binder-3D-Druck (3DP)	16
2.3.1	Tropfenerzeuger	20
2.3.2	Beschichtungsmechanismen (Recoatingprinzipien)	22
	Schichtauftrag mit Rakel.....	22
	Schichtauftrag mit Walze	22
	Schichtauftrag durch Pulverschicht mit Schwingklinge.....	23
2.3.3	Pulvermaterialien	24
	Pulverherstellung Metalle	24
	Pulverherstellung Keramiken.....	26

Pulverherstellung Kunststoffe.....	28
2.3.4 Binderflüssigkeiten.....	28
Chemisch reagierende Klebstoffe.....	29
Physikalisch abbundene Klebstoffe.....	36
2.3.5 Nachbehandlungsprozeduren – Post Processing.....	38
Infiltration.....	38
Lackieren.....	38
Sinterung.....	38
3 Stand der Prozessentwicklung im 3DP.....	42
4 Eigener Ansatz zur Prozessentwicklung.....	45
4.1 Zieldefinition und Materialauswahl.....	47
4.1.1 Materialauswahl.....	48
4.1.2 Binderauswahl.....	50
Druckmodulspezifische Randbedingungen.....	50
4.2 Materialcharakterisierung und Vorversuche.....	51
4.2.1 Charakterisierung des Pulvers.....	54
Fließverhalten.....	55
4.2.2 Charakterisierung der Binderflüssigkeit.....	60
Bestimmung der Viskosität.....	60
Bestimmung der Oberflächenspannung.....	62
4.2.3 Reaktivitätsuntersuchung/ Reaktionskinetik.....	64
4.2.4 3D-Druck-Vorversuch.....	66
Aufbau.....	68
Vorbereiten des Prüfstands.....	73
Herstellung von Druckprüfzylindern.....	74
4.3 Maschinenparameterfindung und 3D-Druckversuche.....	76

4.3.1	Recoatingversuch	76
4.3.2	Flüssigbinderdosierung	78
4.3.3	3DP mit neuem Materialsystem	79
	Prüfkörper und Beurteilungsaspekte	79
	Grünteilfestigkeit und Nachbehandlungsprozeduren	81
4.3.4	Applikationsuntersuchungen	82
5	Experimentelle Studie	83
5.1	Zieldefinition und Materialauswahl.....	85
5.1.1	Auswahl des Materials	86
5.1.2	Auswahl des Binders.....	87
5.2	Materialcharakterisierung und Vorversuche	89
5.2.1	Charakterisierung der Pulvermischung	91
5.2.2	Charakterisierung der Binderflüssigkeit.....	93
5.2.3	Reaktionskinetikversuch	94
5.2.4	3DP-Vorversuch.....	95
5.3	Maschinenparameterfindung/ 3DP-Versuche	96
5.3.1	Recoatingversuche	96
5.3.2	Flüssigbinderdosierung	99
5.3.3	3DP mit neuem Materialsystem	100
5.3.4	Applikationsuntersuchungen.....	103
6	Diskussion.....	108
6.1	Beurteilung des Prozessschemas	108
6.2	Beurteilung der experimentellen Studie	110
6.3	Beurteilung der neu entwickelten Versuche	111
6.3.1	Reaktionskinetikversuch	112

6.3.2	3D-Druckvorversuch.....	112
6.3.3	Recoatingversuch	113
7	Zusammenfassung und Ausblick	114
8	Literaturverzeichnis	115
9	Abbildungsverzeichnis	126

Publikationen

- Breddermann, K.; Drescher, P.; **Polzin**, C.; Seitz, H.; Paschen, M.: Printed pressure housings for underwater applications. *Journal of Ocean Engineering*, 113 (2016), 57-63
- **Polzin**, C.; Drescher, P.; Seitz, H.: Additive Fertigung neuer metallischer Werkstoffe und technischer Keramiken. Deutscher Luft- und Raumfahrtkongress, Rostock, 22.-24. September (2015), 1-4
- **Polzin**, C.; Seitz, H.: Individuelle Medizinprodukte aus dem 3D-Drucker, *Galvanotechnik*, 3 (2015), 634-637
- **Polzin**, C.; Günther, D.; Ederer, I.; Seitz, H.: 3D-Drucken von Aluminiumoxid- und Siliziumkarbidkeramiken. *RTjournal - Forum für Rapid Technologie*, 11 (2014)
- **Polzin**, C.; Günther, D.; Seitz, H.: 3D printing of porous Al₂O₃ and SiC ceramics. *Journal of Ceramic Science and Technology*, 2 (2015), 141-146
- **Polzin**, C.; Spath, S.; Seitz, H.: Characterization and evaluation of a PMMA-based 3D printing process. *Rapid Prototyping Journal*, (2013), 37-43
- Alt, K.W.; Knopper, C.; Held, P.; Nicklisch, N.; Fecher, M.; Roth, C.; Enzmann, F.; Tuckermann, J.; Seitz, H.; **Polzin**, C.; Klopsch, V.; Brauns, M.; Horton, M.; Pike, A.W.G.: Königin Editha – Ein Indizienbeweis zur Identifikation einer historischen Persönlichkeit aus dem Magdeburger Dom., (2012), 105-156
- **Polzin**, C.; Seitz, H.: 3D-Druck von Kunststoff-Medizinprodukten. *RTjournal - Forum für Rapid Technologie*, 9 (2012)

Auszeichnungen

- 1. Platz beim Ideenwettbewerb Venture Cup 2010 in der Kategorie Forscherteam mit dem Projekt „Patientenindividuelle Knochenersatzimplantate“, Gründerteam: Sebastian Spath, Christian Polzin, Matthias Cornelsen, Hermann Seitz

- 3. Platz beim INNO AWARD 2016 mit dem Projekt „Metall-3D-Druckverfahren“, Gründerteam: Clemens Lieberwirth, Christian Polzin, Hermann Seitz

Abkürzungsverzeichnis:

AM - Additive Manufacturing, Additive Fertigungsverfahren

CT - Computer Tomographie

MRT - Magnet Resonanz Tomographie

CAD - Computer Aided Design

STL - Standard Tessellation Language

UV - Ultraviolettes Licht

QS - Qualitätssicherung

D50 - Angabe zur Partikelgrößenverteilung (50% sind kleiner als der angegebene Wert)

DOD - Drop on Demand

SL - Stereolithographie

DLP - Digital Light Processing

PJM - Poly-Jet Modeling

SLS - Selektive Laser Sintering

SLM - Selektive Laser Melting

EBM - Electron Beam Melting

FDM - Fused Deposition Modeling

Al₂O₃ - Aluminiumoxid

PMMA - Polymethylmethacrylat

D90 - Angabe zur Partikelgrößenverteilung (90% sind kleiner als der angegebene Wert)

HT-PP - Hochtemperatur-Polypropylen

PMMA - Polymethylmethacrylat

PEMA - Polyethylmethacrylat