Entwicklung eines Keramik-Polymer-Kompositgranulates
für das Selektive Maskensinterverfahren

Von der Fakultät für Georessourcen und Materialtechnik
der Rheinisch-Westfälischen Technischen Hochschule Aachen

zur Erlangung des akademischen Grades eines

Doktors der Ingenieurwissenschaften

genehmigte Dissertation

vorgelegt von **Dipl.-Wirt. Ing.**

Philipp Gingter

aus Mönchengladbach

Berichter: Univ.-Prof. Dr. rer. nat. Rainer Telle

Univ.-Prof. Dr. rer. nat. J. Günster

Tag der mündlichen Prüfung: 20. Dezember 2016

Berichte aus der Werkstofftechnik

Philipp Gingter

Entwicklung eines Keramik-Polymer-Kompositgranulates für das Selektive Maskensinterverfahren

Shaker Verlag
Aachen 2017

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, 2016)

Copyright Shaker Verlag 2017
Alle Rechte, auch das des auszugsweisen Nachdruckes, der auszugsweisen oder vollständigen Wiedergabe, der Speicherung in Datenverarbeitungsanlagen und der Übersetzung, vorbehalten.

Printed in Germany.

ISBN 978-3-8440-5052-3
ISSN 0945-1056

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

Danksagung

Die vorliegende Arbeit entstand während meiner Zeit als wissenschaftlicher Mitarbeiter am Lehrstuhl für Keramik und Feuerfeste Werkstoffe des Instituts für Gesteinshüttenkunde (GHI) der RWTH Aachen.

Ich danke Herrn Univ.-Prof. Dr. rer nat. Rainer Telle für die Gelegenheit, ein innovatives, spannendes Themengebiet im Rahmen meiner Dissertation wissenschaftlich bearbeiten zu können. Ein großer Dank gilt Herrn Univ.-Prof. Dr. rer. nat. Jens Günster für das Interesse an meiner Arbeit und die Übernahme des Korreferates sowie Herrn Prof. Dr. Olivier Guillon für die Übernahme des Vorsitzes der Prüfungskommission.

Darüber hinaus danke ich den Kolleginnen und Kollegen des Instituts für Gesteinshüttenkunde für die unkomplizierte Zusammenarbeit und stets angenehme Arbeitsatmosphäre. Insbesondere danke ich Herrn Alexander Kremer, Herrn Simon Etzold, Herrn Marcel Bröker sowie Herrn Thomas Mai für die hervorragende Mitarbeit bei den vielfältigen Versuchen der vorliegenden Arbeit.

Mein besonderer Dank gilt Tim Krokowski, für das Lektorat des Manuskripts sowie Dawid Mosz für die fachlichen Diskussionen und Anregungen, die diese Arbeit inhaltlich bereichert haben.

Inhaltsverzeichnis

1 Abstract, Zusammenfassung ... **1**
1.1 Abstract ... 1
1.2 Zusammenfassung ... 2
2 Einleitung und Motivation ... **3**
3 Stand der Wissenschaft und Technik ... **5**
3.1 Additive Fertigungsverfahren ... 5
3.2 Pulverbettbasierte additive Fertigungsverfahren ... 8
3.2.1 Dreidimensionales Drucken (3DP) ... 9
3.2.2 Verfahren der Kategorie „powder bed fusion“ ... 9
3.2.2.1 Allgemeine Prozessmerkmale ... 10
3.2.2.2 Selektives Lasersintern ... 13
3.2.2.3 Selektives Maskensintern ... 18
3.3 Materialsysteme für das Selektive Maskensintern ... 21
3.3.1 Materialsystemkomponenten ... 21
3.3.1.1 Keramische Werkstoffe ... 22
3.3.1.2 Thermoplaste ... 22
3.3.2 Verarbeitungseigenschaften pulverförmiger Ausgangsstoffe ... 25
3.3.2.1 Auftragsverhalten und Dichte ... 25
3.3.2.2 Anteil und Verteilung der Einzelkomponenten ... 28
3.3.2.3 Primärpartikelgröße ... 29
3.3.3 Verfahren zur Materialsystemherstellung ... 30
3.3.3.1 Mechanische Misch- und Mahlverfahren ... 31
3.3.3.2 Sprühtrocknungsverfahren ... 32
3.4 Infiltration poröser keramischer Körper ... 38
4 Material und Methoden ... **41**
4.1 Identifikation geeigneter Materialsystemkomponenten ... 41
4.1.1 Erstellung eines Anforderungsprofils ... 41
4.1.2 Verwendete Materialien ... 44
4.1.3 Dispersionsherstellung und -charakterisierung ... 46
4.1.4 Sprühtrocknung ... 49
4.1.5 Charakterisierung der Granulateigenschaften ... 51
4.1.6 Einzelschichterstellung und -charakterisierung ... 55

4.2 Optimierung und Verarbeitung des Keramik-Polymer-Materialsystems 58
4.2.1 Anteile und Verteilung der Komponenten 59
4.2.2 Herstellung dreidimensionaler Bauteile 60
4.2.3 Thermische Nachbehandlung 61
4.2.4 Bestimmung der Grün- und Sinterdichte 62
4.2.5 Infiltration 63
4.2.6 Bestimmung der Biegefestigkeit 64
5 Ergebnisse 67
5.1 Dispersionseigenschaften und Sprühtrocknungsverfahren 67
5.1.1 Eigenschaften der Dispersionen 67
5.1.2 Sprühtrocknungsverfahren 73
5.2 Granulateigenschaften 75
5.2.1 Granulatgrößenverteilung, -morphologie und -zusammensetzung 75
5.2.2 Dichte, Fließfähigkeit und Auftragsverhalten 87
5.3 Eigenschaften der Einzelschichten und Grünkörpern 91
5.3.1 Qualität und Stabilität der Einzelschichten 91
5.3.2 Merkmale des Maskensinterverfahrens 97
5.3.3 Grünkörpereigenschaften 103
5.4 Eigenschaften der gesinterten Bauteile 108
5.4.1 Dichte, Porosität und Schwindung 109
5.4.2 Biegefestigkeit und Gefüge 110
5.5 Eigenschaften der infiltrierten Bauteile 116
5.5.1 Dichte und Porosität 116
5.5.2 Biegefestigkeit und Gefüge 116
6 Diskussion 121
6.1 Materialsystemkomponenten und Dispersionseigenschaften 121
6.2 Sprühtrocknungsverfahren und Einzelgranalieneigenschaften 125
6.3 Verarbeitungseigenschaften der Granulathaufwerke 131
6.4 Eigenschaften der Grünkörper und Bauteile 137
7 Schlussfolgerung und Ausblick 147
8 Literaturverzeichnis 151