

Tobias Friedel

Herstellung von keramischen Verbundwerkstoffen mittels Rapid Prototyping (SLS)

Diplomarbeit

BEI GRIN MACHT SICH IHR WISSEN BEZAHLT



- Wir veröffentlichen Ihre Hausarbeit, Bachelor- und Masterarbeit
- Ihr eigenes eBook und Buch - weltweit in allen wichtigen Shops
- Verdienen Sie an jedem Verkauf

Jetzt bei www.GRIN.com hochladen
und kostenlos publizieren



Bibliografische Information der Deutschen Nationalbibliothek:

Die Deutsche Bibliothek verzeichnet diese Publikation in der Deutschen Nationalbibliografie; detaillierte bibliografische Daten sind im Internet über <http://dnb.d-nb.de/> abrufbar.

Dieses Werk sowie alle darin enthaltenen einzelnen Beiträge und Abbildungen sind urheberrechtlich geschützt. Jede Verwertung, die nicht ausdrücklich vom Urheberrechtsschutz zugelassen ist, bedarf der vorherigen Zustimmung des Verlanges. Das gilt insbesondere für Vervielfältigungen, Bearbeitungen, Übersetzungen, Mikroverfilmungen, Auswertungen durch Datenbanken und für die Einspeicherung und Verarbeitung in elektronische Systeme. Alle Rechte, auch die des auszugsweisen Nachdrucks, der fotomechanischen Wiedergabe (einschließlich Mikrokopie) sowie der Auswertung durch Datenbanken oder ähnliche Einrichtungen, vorbehalten.

Impressum:

Copyright © 2004 GRIN Verlag
ISBN: 9783638324250

Dieses Buch bei GRIN:

<https://www.grin.com/document/31400>

Tobias Friedel

Herstellung von keramischen Verbundwerkstoffen mittels Rapid Prototyping (SLS)

GRIN - Your knowledge has value

Der GRIN Verlag publiziert seit 1998 wissenschaftliche Arbeiten von Studenten, Hochschullehrern und anderen Akademikern als eBook und gedrucktes Buch. Die Verlagswebsite www.grin.com ist die ideale Plattform zur Veröffentlichung von Hausarbeiten, Abschlussarbeiten, wissenschaftlichen Aufsätzen, Dissertationen und Fachbüchern.

Besuchen Sie uns im Internet:

<http://www.grin.com/>

<http://www.facebook.com/grincom>

http://www.twitter.com/grin_com

Friedrich-Alexander-Universität Erlangen-Nürnberg

Institut für Werkstoffwissenschaften

Lehrstuhl III, Glas und Keramik



Diplomarbeit

**Herstellung von keramischen Verbundwerkstoffen
mit Hilfe der selektiven Laserstrahl-Vernetzung
von präkeramischen Polymeren**

Tobias Friedel

Juni 2003 – März 2004

Danksagung

An erster Stelle danke ich ganz herzlich meinem Betreuer Herrn Dr. Nahum Travitzky für seine umfassende Unterstützung und Beratung während meiner Diplomarbeit. Er verstand es mich im richtigen Maße sowohl zu fördern als auch zu fordern. Ohne seinen Erfahrungs- und Wissensreichtum wären viele Fragen unbeantwortet und Probleme ungelöst geblieben. Neben seiner wissenschaftlichen Betreuung war er mir aber auch in vielen anderen Bereichen eine große Hilfe bei der Anfertigung dieser Arbeit. Mein Dank gebührt außerdem Herrn Prof. Dr. Peter Greil, dessen Vorlesungen der Grundstein für eine gute universitäre Ausbildung waren und letztendlich die Bewältigung der mir gestellten Aufgaben erst ermöglichten.

Mein Betreuer am Lehrstuhl für Fertigungstechnologie, Herr Dipl.-Ing. Frank Niebling, trug ebenfalls einen Großteil zum Entstehen dieser Arbeit bei. Er unterwies mich in der Bedienung der Lasersinter-Anlage und war durch seine außerordentlichen Kenntnisse im Bereich des selektiven Lasersinterns an der erfolgreichen Proben- und Bauteilherstellung maßgeblich beteiligt.

Natürlich möchte ich an dieser Stelle die zahlreichen Mitarbeiter der Lehrstühle WW3 und LFT nicht vergessen, die durch Probenpräparation, Messungen und wertvolle Ratschläge zum Gelingen meiner Diplomarbeit wesentlich beitrugen. Ohne ihre Hilfe wäre ich nicht in der Lage gewesen, die erforderlichen Experimente durchzuführen. Außerdem bin ich den anderen Diplomanden sehr verbunden, mit denen ich eine angenehme und abwechslungsreiche Zeit verbringen durfte.

Schließlich gebührt mein Dank sowohl meinen Eltern, die mir eine sorgenfreie Ausbildung ermöglichten als auch meiner Freundin Sabine, die mir durch ihre Nachsicht und Hilfsbereitschaft in den letzten Monaten den Rücken frei gehalten hat.

Erlangen, im März 2004

Inhaltsverzeichnis

1 Einleitung	6
2 Grundlagen	8
2.1 Wirtschaftliche Bedeutung des Rapid Prototyping	8
2.2 Datenaufbereitung für RP-Systeme	10
2.3 Übersicht der wichtigsten RP-Verfahren	11
2.3.1 Stereolithographie (SL)	11
2.3.2 3D-Printing (3DP)	12
2.3.3 Fused Deposition Modelling (FDM)	12
2.3.4 Laminated Object Manufacturing (LOM)	13
2.3.5 Selektives Lasersintern (SLS)	13
2.4 Rapid Prototyping von Keramiken	14
2.4.1 Stereolithographie (SL)	15
2.4.2 3D-Printing (3DP)	16
2.4.3 Fused Deposition of Ceramics (FDC)	17
2.4.4 Laminated Object Manufacturing (LOM)	17
2.4.5 Selektives Lasersintern (SLS)	18
2.5 Verfahrensablauf der Bauteilherstellung mittels selektiver Laserstrahl-Vernetzung (SLV)	20
2.5.1 Formgebung des Ausgangspulvers in der Lasersinteranlage	21
2.5.2 Funktionsprinzip der SLV	22
2.5.3 Energieeintrag in das Pulver	23
2.5.4 Technologie der SLV	24
2.5.5 Eigenspannungen bei der SLV	25
2.6 Eigenschaften des präkeramischen Polymers Polymethylsiloxan	27
2.7 Aufgabenstellung und Zielsetzung	32

3 Experimentelle Durchführung	33
3.1 Ausgangsstoffe	33
3.1.1 Polymethylsiloxan	33
3.1.2 Keramische Füllstoffe	34
3.2 Herstellung der Proben	34
3.3 Untersuchungsmethoden	37
3.3.1 Benetzungsversuche	37
3.3.2 FTIR-Spektroskopie	37
3.3.3 Thermogravimetrische Messungen	37
3.3.4 Temperaturmessungen	37
3.3.5 Gefügeuntersuchungen	38
3.3.5 a) Röntgenographische Phasenanalyse	38
3.3.5 b) Dichte und Porosität	38
3.3.5 c) Mikroskopie	39
3.3.6 Mechanische Festigkeit	39
4 Ergebnisse	40
4.1 Rieselfähigkeit der Ausgangsmischung	40
4.2 Benetzbarkeit der keramischen Partikel mit dem PMS	40
4.3 Grundlagenversuche zur Wechselwirkung Laserstrahl – Ausgangspulver	41
4.3.1 Optische Eigenschaften des Ausgangspulvers	41
4.3.2 Temperaturmessungen während der Laser-Vernetzung	42
4.3.3 Entstehung von Linien und Schichten während der Laser-Vernetzung	43
4.3.3 a) Optische Erscheinung der vernetzten Schichten	43
4.3.3 b) Linienbreite und Sintertiefe	46
4.4 Maßabweichung vernetzter Biegeprobestäbchen	48
4.5 Eigenspannungen – Krümmung von Biegeprobestäbchen	50
4.5.1 Krümmung bei vernetzten Biegeprobestäbchen	50

4.5.2 Durchbiegung bei pyrolysierten Biegeprobestäbchen	52
4.6 Formstabilität während der Pyrolyse – Aufschmelzverhalten der Proben	54
4.7 Keramische Ausbeute	57
4.8 Lineare Schwindung	62
4.9 Gefügeuntersuchungen an vernetzten und pyrolysierten Proben	63
4.9.1 Röntgenographische Phasenanalyse	63
4.9.2 Dichte und Porosität	65
4.9.2 a) Dichte vernetzter und pyrolysierter Biegeprobestäbchen	65
4.9.2 b) Porosität vernetzter und pyrolysierter Biegeprobestäbchen	70
4.9.3 Gefüge der vernetzten und pyrolysierten Proben	75
4.9.3 a) Einfluss des Füllstofftyps: Al ₂ O ₃ oder SiC	75
4.9.3 b) Einfluss des Füllstoffanteils	78
4.9.3 c) Einfluss der Laserparameter	79
4.10 Postinfiltration mit Silizium	81
4.11 Mechanische Festigkeit	83
4.12 Near-Net-Shape Fertigung des Musterbauteils ‚Turbinenrad‘	84
5 Diskussion	87
5.1 Einfluss des Füllstoffs auf die SLV	87
5.2 Einfluss des Füllstoffanteils auf die SLV	91
5.3 Einfluss der Laserparameter auf die SLV	94
5.4 Eignung der verwendeten Pulvermischungen	97
6 Schlussfolgerungen	100
7 Zusammenfassung	101
8 Literaturverzeichnis	103
9 Anhang	107

1 Einleitung

„Wem es gelingt, mit einem besseren Produkt weit vor der Konkurrenz am Markt zu sein, sichert sich einen klaren Wettbewerbsvorteil.“¹ Diese Aussage unterstreicht die besondere Bedeutung des Faktors Zeit im Zieldreieck von schneller Produktentwicklung, kostengünstiger Herstellung und hoher Qualität. Die Forderung nach kürzeren Entwicklungszyklen, um eine schnellere Marktpräsenz zu ermöglichen, übt auf die Konstruktions- und Prototypenabteilungen der Unternehmen einen starken Zeitdruck aus. Zusätzlich müssen durch sinkende Produktlebenszeiten die Kosten der Entwicklungsphase reduziert werden, damit ein Erzeugnis früher gewinnbringend für ein Unternehmen wird.²

Ein entscheidender Zeit- und Kostenfaktor für das Erreichen der Marktreife eines Produktes ist die Erstellung von Prototypen. Diese dienen als Design-, Funktions- und Fertigungsstudien und werden schon früh in die Planungsphase einbezogen. Die hohen Kosten resultieren aus dem erheblichen manuellen Aufwand, der bei der Erzeugung von Prototypen nötig ist. Dank neuer, automatisierter Fertigungsverfahren lässt sich der Zeit- und Kostenaufwand aber wesentlich reduzieren. Diese generativen Fertigungsverfahren, die unter dem Sammelbegriff „Rapid Prototyping“ zusammengefasst werden, erlauben die Herstellung von Werkstücken ohne Umwege aus CAD-Daten. Dabei wird ein Körper schichtweise aus Material aufgebaut – ein entgegengesetzter Weg zum Zerspanen. Mittlerweile kann der Anwender aus ca. 20 verschiedenen kommerziellen Verfahren wählen.³ Eines davon ist das selektive Lasersintern – 1986 an der University of Texas in Austin entwickelt, bei dem ein schichtweise aufgetragenes Pulver mit Hilfe eines Lasers lokal erhitzt und gesintert wird.⁴ Im Vergleich zu allen anderen Rapid Prototyping-Verfahren besitzt das selektive Lasersintern den Vorteil des großen Umfangs an verarbeitbaren Werkstoffen, denn prinzipiell ist jedes pulverförmige, schmelzbare Material verwendbar.

Daher eignet sich dieser Prozess auch für die Herstellung von Körpern aus keramischen Füllstoffen und präkeramischen Polymeren, wie in ersten Vorversuchen am Lehrstuhl für Glas und Keramik der FAU Erlangen demonstriert wurde.⁵ Im Unterschied zum selektiven Lasersintern schmilzt der Laserstrahl das Polymer nicht nur auf, sondern vernetzt es auch teilweise, weshalb man diesen Prozess als selektive Laser-Vernetzung bezeichnet. Bei der anschließenden thermischen Nachbehandlung des Bauteils wird das präkeramische Polymer in eine amorphe keramische Phase umgesetzt. Die dabei auftretende Volumen-

schwindung wird durch die keramischen Füllstoffe in der Polymer-Matrix gemindert. Die in dieser Arbeit verwendeten Al_2O_3 - und SiC-Füllerpartikel verhalten sich bei der Laser-Bestrahlung aufgrund der niedrigen Strahlleistungen inert und reagieren auch bei der thermischen Nachbehandlung nicht mit der Polymermatrix.⁶

In dieser Arbeit wurden die Prozesseingangsgrößen Pulverzusammensetzung und Laser-Bestrahlung variiert und deren Einfluss auf die Werkstoff- und Bauteileigenschaften analysiert. Als Hauptpunkte sind zu nennen:

- Grundlagenversuche zur Wechselwirkung Laserstrahl – Ausgangspulver
- Maßhaltigkeit bei der Laser-Vernetzung und Krümmung der Proben
- Schwindung während der Pyrolyse
- Keramische Ausbeute des präkeramischen Polymers
- Gefügeuntersuchungen, Dichte und Porosität
- Mechanische Festigkeit
- Herstellung eines Musterbauteils

Da über die Erzeugung von Körpern mittels selektiver Laser-Vernetzung von präkeramischen Polymeren kaum Forschungsergebnisse vorliegen, sollen im Rahmen dieser Diplomarbeit grundlegende Aspekte erörtert werden, um das Potenzial dieses neuen und innovativen Prozesses aufzuzeigen.

Trotz einer bestehenden Nachfrage haben bisher keine Rapid Prototyping-Verfahren für die Herstellung keramischer Bauteile Marktreife erlangt. Daher könnte dieses Verfahren auch von großem wirtschaftlichen Interesse sein, denn die Vision ist es, einen kostengünstigen und stabilen Prozess zu realisieren, mit dem Werkstücke hoher Maßhaltigkeit und guter mechanischer Eigenschaften hergestellt werden können. Die Anwendung ist in Fällen relevant, bei denen voll einsatzfähige, aber nur in kleiner Stückzahl benötigte Bauteile gefragt sind. Außerdem kann durch die generative Formgebung, im Vergleich zur Produktion mit Hilfe von Werkzeugformen, besser und schneller auf spezielle Kundenbedürfnisse eingegangen werden.