

W. Kollenberg*

Keramik und Multi-Material 3D-Druck

DER AUTOR



Prof. Dr. Wolfgang Kollenberg studierte von 1974–1979 an der RWTH Aachen Mineralogie. 1984 promovierte er an der RWTH Aachen zum Dr. rer. nat. und habilitierte 1992 an der TU Berlin. Von 1979–1987 arbeitete er an der RWTH Aachen und von 1987–1990 beim Projektträger im Forschungszentrum Jülich. Von 1990–1996 war er in Leitungsfunktionen beim Deutschen Institut für Feuerfest und Keramik GmbH tätig. 1996 schloss sich die Gründung der WZR ceramic solutions GmbH an, die er als Geschäftsführender Gesellschafter leitet. 2005 wurde Wolfgang Kollenberg zum Honorarprofessor an der Hochschule Bonn-Rhein-Sieg ernannt. Seit 2013 leitet er den FA Additive Fertigung der DGM. **E-Mail: w.kollenberg@wzr.cc**

STICHWÖRTER

Additive Fertigung, Keramik, Materialeffizienz, 3D-Druck, Multi-Material 3D-Druck
Keram. Z. 66 (2014) [4]

KURZFASSUNG

Additive Fertigungsverfahren erwecken zurzeit ein großes Interesse. Das Lasersintern von Metallen steht unmittelbar vor der industriellen Serienfertigung. Stereolithografie kann heute bereits für die Herstellung von keramischen Bauteilen genutzt werden und bietet sich als Vorstufe zum Spritzguss an. 3D-Druck wird beispielsweise für die Fertigung angepasster Brennunterlagen, für Knochenersatz oder Designobjekte eingesetzt. Zu den Vorzügen der Additiven Verfahren zählt die Materialeffizienz: beim 3D-Druck können die nicht mit der Tinte bedruckten und verfestigten Pulveranteile ohne Verlust wiederverwendet werden. Mittels FDM oder 3D-Extrusion können endkonturnahe Keramik-Halbzeuge für die CNC-Bearbeitung gefertigt werden. Der Multi-Material 3D-Druck eröffnet völlig neue Anwendungsgebiete, da die Eigenschaften oder auch die Farbe eines Bauteils lokal verändert werden können. Durch den Einsatz Partikel gefüllter Tinten gelingt es dichte Gefüge zu erzeugen. Werden zusätzlich mehrere mit unterschiedlichen Partikeln gefüllte Tinten verdruckt, können Gefügeverstärkungen und Funktionalisierungen realisiert werden. Um den Anwendern auch eine langfristige Perspektive zu bieten, arbeitet WZR intensiv mit Kooperationspartnern daran, den 3D-Druck als industrielles Serienfertigungsverfahren für keramische Bauteile zu etablieren.

ABSTRACT

Ceramics and Multi-Material 3D Printing

Additive Manufacturing has become very popular during the last years. Laser Sintering of metals is close to industrial serial production. Ceramic components can be produced by Stereolithography on a small scale, with properties comparable to injection molding. 3D printing is used to produce customized kiln furniture, bone structures or design objects. By using particle filled inks a lot of new options are possible: dense microstructure, locally reinforced microstructures, and combination of different properties or colors. This technique is called multi-material 3D printing. FDM and 3D extrusion can be used to manufacture near-net-shape semi-finished ceramic products.

1 Einleitung

Additive Verfahren zur Herstellung von Bauteilen oder Objekten haben in den letzten Jahren außerordentlich an Popularität gewonnen. Dabei steht ein Verfahren besonders im Blickpunkt der Öffentlichkeit, das „Fused Deposition Modeling“ – kurz FDM genannt. Bei diesem Verfahren werden Kunststoff-Filamente in einer beheizten Düse zur Schmelze gebracht und lagenweise abgelegt. Die dazu notwendigen Geräte sind heute preisgünstig – sogar als Bausatz – verfügbar. Damit ist die Additive Fertigung auch in den Hobbybereich vorgedrungen, woraus die starke Resonanz in den Medien rührt. In Presse und Fernsehen findet man den Begriff „3D-Druck“ als Oberbegriff für alle Additiven Verfahren, insbesondere wird er auch für das FDM Verfahren verwendet. In diesem Beitrag werden die Additiven Ver-

fahren entsprechend der VDI Richtlinie 3404 bzw. der ISO/DIN 17296 benannt und nachfolgend in ihrer Bedeutung für die Herstellung keramischer Komponenten diskutiert. Die Additiven Verfahren lassen sich in zwei Gruppen unterteilen [1]:

- Bei den **Bindevverfahren** wird zunächst eine komplette Schicht eines Materials (flüssig, pulvrig, fest) ausgelegt und entsprechend den Konturen des Objektes in geeigneter Weise verfestigt. Zu diesen Verfahren zählen die Stereolithographie, das Selektive Lasersintern, der 3D-Druck und das LOM-Verfahren (Laminated Object Manufacturing) – ein Verfahren, bei dem das Objekt durch Übereinanderlegen von Papierschichten aufgebaut wird.
- Bei den **Abscheidungsprozessen** wird über eine Düse oder einen Druckkopf Material kontinuierlich oder tropfenförmig abgegeben und als Punkt- oder Liniennmuster Schicht für Schicht abgelegt. Zu diesen Prozessen rechnet man das FDM-Verfahren (Fused Deposition

Modeling), der direkte 3D-Druck, die Extrusion von Pasten und das Polyjet-Verfahren, bei dem Fotopolymere tropfenförmig über einen Druckkopf abgesetzt werden.

Allen Additiven Verfahren ist eine grundlegende Prozesskette gemeinsam: das zu fertigende Bauteil wird als CAD-Modell konstruiert und anschließend in übereinander liegende Schichten getrennt (Slicen). Die Konturen und die von ihnen eingeschlossenen Flächen werden in einem additiven Verfahren schichtweise generiert, wodurch das Bauteil Schicht für Schicht aufgebaut wird. Diese Schichten sind im späteren Bauteil immer sichtbar. Selbst bei sehr hoher Auflösung, also minimaler Schichtdicke und höchster Präzision der Umrisse, bleiben sie erkennbar und verleihen den Bauteilen eine raue Oberfläche, die ggf. nachbearbeitet werden kann. Nachfolgend werden relevante Verfahren zur additiven Herstellung von Keramik näher beschrieben.

* WZR ceramic solutions GmbH, Lise-Meitner-Str. 1, D-53359 Rheinbach

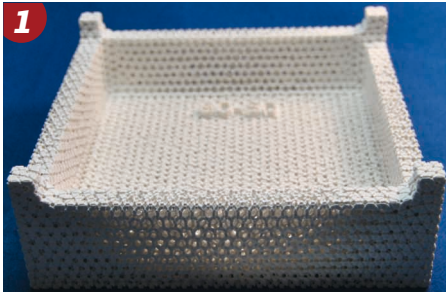


Bild 1 • Sinterschale mit Porendesign zur Reduzierung der Masse

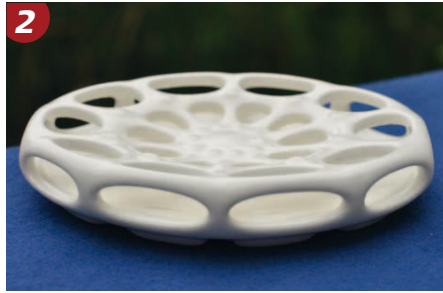


Bild 2 • Glasierte Seifenschale, hergestellt mittels 3D-Druck

2 Verfahren zur additiven Herstellung von Keramik

2.1 Stereolithografie

Bei der Stereolithografie (SLA) erfolgt eine langsame Verfestigung von fotosensitiven Polymeren mittels Licht. Dieses Verfahren ist für die Herstellung von Kunststoff-Bauteilen verbreitet, es hat seit einiger Zeit aber auch eine starke Relevanz für keramische Bauteile. Basierend auf Entwicklungsarbeiten des Instituts für Werkstoffwissenschaft und Werkstofftechnologie der TU Wien wurde von der Lithoz GmbH in Wien das „Lithography based Ceramic Manufacturing (LCM)-Verfahren“ zur Marktreife geführt. Hierbei kommen LED als Lichtquelle und nicht, wie bei der Stereolithografie üblich, Laser zum Einsatz. Während des Herstellungsprozesses bilden Fotopolymere das Grundgerüst des Bauteils. Sie dienen dabei als Binder zwischen den keramischen Partikeln und ermöglichen die Formgebung sowie eine hohe Gründichte. Dadurch wird in weiterer Folge eine extrem hohe Sinterdichte erreicht.

Mit dem LCM-Verfahren können keramische Bauteile in einer Qualität gefertigt werden, die mit der von Spritzguss-Bauteilen vergleichbar ist. Daher ist dieses Verfahren für die Kleinstserienfertigung und für die Produktentwicklung von kleinen und filigranen Bauteilen sehr gut geeignet. Als nachteilig ist die geringe Größe des Bauraums, die langsame Baurate und die sehr lange Entbinderungszeit anzusehen. Ferner ist die Auswahl der angebotenen Werkstoffe auf Al_2O_3 , ZrO_2 (violett-angefärbt) und Tricalciumphosphat begrenzt.

2.2 3D-Druck

Die technologischen Grundlagen des 3D-Druckens gehen auf Entwicklungen am MIT, Boston, zurück; die ersten Patente stammen aus dem Jahre 1993. Beim 3D-Druck wird ein organischer Binder punktuell mittels Druckkopf auf ein Pulverbett aufgebracht. Der Binder verklebt lokal einzelne Pulverpartikel miteinander. Die bedruckte Pulverebene wird um einen definierten Betrag, beispielsweise 100 μm , abgesenkt und mit

einer neuen Lage Pulver bedeckt. Der aufgedruckte Binder sorgt auch dafür, dass die Lagen untereinander verbunden sind. Auf diese Weise entsteht Schicht für Schicht der dreidimensionale Körper, der nach dem Aushärten des Binders von losem Pulver befreit werden kann.

Die WZR ceramic solutions GmbH beschäftigt sich seit einigen Jahren mit dem 3D-Druck als additivem Formgebungsverfahren zur Herstellung keramischer Bauteile, wobei der so hergestellte Grünling nachfolgend gesintert wird. Zu den Vorteilen des Verfahrens zählt, dass die durch den aufgedruckten Binder verfestigten Bereiche von losem Pulver umgeben sind und dadurch keine Stützstrukturen, beispielsweise bei Überhängen, notwendig sind. Nicht zuletzt dadurch gibt es nahezu keine Einschränkung in der geometrischen Freiheit der Gestaltung.

Die Dichte der Partikel im Pulverbett entspricht in etwa der Schüttdichte des Pulvers. Daher liegt die Dichte der Grünlinge deutlich $< 50\%$, woraus eine hohe Porosität auch nach dem Sintern der keramischen Teile resultiert. Diese kann positiv genutzt werden, wenn es um die Herstellung von Brennhilfsmitteln geht. Selbst hochreine Al_2O_3 Teile zeigen eine hervorragende Temperaturwechselbeständigkeit. Bei Gläsern und Glaskeramiken gelingt es dagegen durch den Sinterprozess ein dichtes Gefüge – bei vergleichsweise hoher Schwindung – zu erzeugen.

Aufgrund der geometrischen Freiheiten beim 3D-Drucken lässt sich eine makroskopische Porosität auch als konstruktives Element nutzen. So kann in einem Bauteil Masse in den Bereichen reduziert werden, in denen keine oder nur eine geringe Belastung vorliegt. Dazu wird ein bionischer Ansatz zugrunde gelegt, wie man es beispielsweise von Knochenstrukturen kennt. Dieses Prinzip wurde bei der Auslegung von Sinterschalen umgesetzt (Bild 1). Es konnte gezeigt werden, dass bei gleicher Standzeit die Masse um 50 % reduziert werden kann. Beim Einsatz derartiger Sinterschalen ergeben sich – aufgrund der reduzierten Masse – deutliche Energieeinsparungen.

Um eine nachträgliche Verdichtung von Bauteilen zu erzielen, bieten sich zwei Wege an: die Infiltration der gebrannten Keramik mit einem artgleichen Schlicker oder das Glasieren. Für technische Anwendungen kommt überwiegend das Infiltrieren in Betracht. Nach einem zweiten Brand ist die Oberfläche in diesem Fall in einem Horizont von 0,5–1 mm dicht. Das Glasieren kommt vorrangig bei Gebrauchs- oder Designgegenständen zum Einsatz. Dazu wurden spezielle Glasuren entwickelt die der Porosität des Scherbens und der thermischen Dehnung angepasst sind (Bild 2).

2.3 Multi-Material 3D-Druck

Seit einigen Jahren wird bei WZR eine Route zur Erhöhung der Gründichte verfolgt, die das vollständige Volumen der Struktur betrifft: neben dem Binder werden auch Partikel über den Druckkopf in das Pulverbett gebracht. Nach der einleitend aufgeführten Gliederung der Additiven Verfahren in 2 Gruppen, wird somit eine Kombination eines Bindeverfahrens – hier der 3D-Druck – mit einem Abscheidungsprozess – hier dem Suspensionsdruck – realisiert. Der Suspensionsdruck wird auch als „Direkter 3D-Druck“ [2] bezeichnet.

Durch den Einsatz Partikel gefüllter Tinten beim 3D-Druck gelingt es, das Gefüge auch im Inneren des Bauteils zu verdichten. Um Partikel gefüllte Tinten verarbeiten zu können, müssen entsprechende Druckköpfe eingesetzt werden. Restriktiv ist die maximale Korngröße, die unmittelbar vom Durchmesser der Druckkopfdüsen abhängt. Als Anhaltspunkt kann man für Partikel in einer Tinte eine maximale Partikelgröße (d_{100}) $\leq 1 \mu\text{m}$ annehmen. Als Herausforderung bei der Tintenentwicklung ist zusätzlich die Einstellung eines hohen Füllgrades, die Stabilisierung gegen Sedimentation, die Anpassung der Oberflächenspannung und die Reduzierung der Viskosität zu nennen.

Der Einsatz Partikel gefüllter Tinten eröffnet für den 3D-Druck ganz neue Möglichkeiten. Dieses Verfahren wird als Multi-Material 3D-Druck bezeichnet [3]. Wählt man für die Tinte ein anderes Material aus, als das im Pulverbett befindliche, so kann man beispielsweise eine Gefügeverstärkung erreichen, wie sie von ZTA Keramiken bekannt ist. Diese Verstärkung kann darüber hinaus lokal ins Bauteil „eingedruckt“ werden. Verfolgt man diesen Gedanken weiter, so erlaubt der Einsatz mehrerer Tinten in einem Drucker ein dem Belastungsprofil des Bauteils angepasstes, ortsabhängig variierendes Gefüge zu erzeugen. Somit kann eine FEM-Simulation genutzt werden, um Bereiche mit erhöhten Spannungen aus einem

TECHNOLOGIE-FORUM

verstärkten Werkstoff herzustellen. Während bei der konventionellen Formgebung der Werkstoff so ausgewählt wird, dass seine Festigkeit für das gesamte Bauteil ausreichend ist, können im 3D-Druck die Werkstoff-Eigenschaften innerhalb des Bauteils variieren. Es konnte nachgewiesen werden, dass eine lokale, dem Bereich der maximalen Belastung entsprechende, Gefügeverstärkung (beispielsweise ZrO_2 in Al_2O_3) zu einer vergleichbaren Belastbarkeit führt, wie die Gefügeverstärkung im gesamten Bauteil. Arbeitet man mit mehreren Druckköpfen, können unterschiedliche Pulver über die Tinte in ein Pulverbett eingebracht werden [4]. Dadurch entstehen völlig neue Möglichkeiten Bauteile mit lokal angepassten Eigenschaften zu konstruieren und zu fertigen. Durch eine lokale Gefüge Modifizierung kann auch die Temperaturwechselbeständigkeit (TWB) keramischer Bauteile verbessert werden [5]. Dies kann nicht nur über eine variable Porosität sondern auch durch unterschiedliche Phasen, wie Mullit oder Tialit, erreicht werden. Diese können reaktiv beim Sintern gebildet werden, wenn in ein Al_2O_3 -Pulverbett SiO_2 bzw. TiO_2 eingebracht wird.

Erweitert man den Ansatz zur Nutzung partikelgefüllter Tinten auf die Verwendung von Metallen, so bieten sich noch weitergehende Möglichkeiten: hierdurch können nicht nur mechanische und/oder thermische Eigenschaften im Gefüge variiert werden, sondern auch funktionale Eigenschaften – wie elektrische Leitfähigkeit, elektrischer Widerstand, magnetische Eigenschaften usw. – integriert werden (Bild 3). Hier können Erfahrungen aus der LTCC-Technik genutzt werden, wo bereits Werkstoffkombinationen bekannt sind, die gemeinsam gesintert werden können. Verfolgt man diesen Gedanken weiter, so ist die Herstellung elektronischer Komponenten mittels Multi-Material 3D-Druck eine zukünftige Option [6]. Hierbei werden dann elektrisch leitfähige Strukturen innerhalb einer elektrisch isolierenden Matrix in einem einzigen Herstellungsprozess erzeugt. Wichtig dabei ist natürlich die Abstimmung der Temperaturbeständigkeit des verwendeten Metalls und der notwendigen Sintertemperatur der verwendeten Keramik, bzw. Glas oder Glaskeramik. Gleiches gilt für die thermische Dehnung der eingesetzten Materialien, auch diese muss aufeinander abgestimmt sein.

Eine weitere Variante des Multi-Material 3D-Drucks besteht darin in die Tinte nicht Partikel, sondern metall-organische Verbindungen zu geben, die während des Sinterprozesses Metalloxide bilden und dann feingeteilt im Gefüge vorliegen [7]. Vorteile

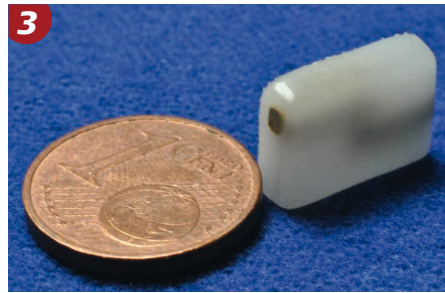


Bild 3 • Elektrische Leiterbahn (Silber) in Glaskeramik

sind, dass die Viskosität der hier eingesetzten Tinten deutlich niedriger ist, als die Partikel gefüllter Tinten und dass Druckköpfe mit sehr feinen Düsen eingesetzt werden können.

2.4 Keramik mittels FDM

Das FDM-Verfahren ist das in der Öffentlichkeit bekannteste Additive Fertigungsverfahren. Bei diesem Verfahren werden üblicherweise Kunststoff Filamente in einer beheizten Düse zur Schmelze gebracht und als „Schmelzfaden“ kontinuierlich abgelegt. Durch entsprechende Achsenbewegungen werden 3-dimensionale Objekte aufgebaut. Eine Anlage der Firma MTplus wurde bei WZR so erweitert, dass der Düse ein Granulat zugeführt werden kann, das aus Keramik-Pulver und Thermoplast besteht. Die Zuführung ist so abgestimmt, dass durch die beheizte Düse ein kontinuierlicher viskoser Faden abgelegt wird. Durch Abstimmung der Parameter gelingt es, einen Grünling zu erzeugen, bei dem die einzelnen Lagen eine gute Haftung zeigen. Nach dem Sintern ist zwischen den einzelnen Lagen keine Trennung im Gefüge zu erkennen, es entsteht ein dichtes, homogenes Gefüge. Von der konvexen äußeren Lagenausprägung geht kein Riss aus (Bild 4). Das makroskopische Erscheinungsbild der erzeugten Grünlinge ist geprägt durch die deutlich erkennbaren konvexen Lagen.

Das FDM Verfahren zur Herstellung von Grünlingen wird bei WZR nicht mit der Zielsetzung verfolgt, unmittelbar Bauteile herzustellen – dazu sind die Oberflächen zu uneben. Vielmehr bietet das Verfahren die Möglichkeit endkonturnahe Halbzeuge zur anschließenden Grün- oder Weißbearbeitung herzustellen. Als Vorteile sind das dichte Gefüge und die damit verbundenen guten mechanischen Eigenschaften sowie eine sehr günstige Bearbeitbarkeit zu nennen.

2.5 3D-Extrusion

Einen neuen Weg keramische Werkstoffe additiv zu verarbeiten hat erstmals das De-

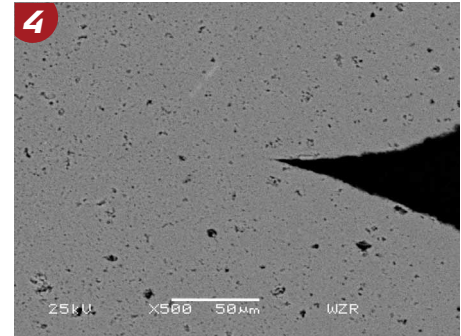


Bild 4 • Gefüge einer mittels FDM hergestellten Al_2O_3 -Keramik

sign Studio UNFOLD in Antwerpen gezeigt: Eine Porzellan-Masse wird in eine große Injektionsspritze gefüllt, diese wird über x-, y- und z-Achsen verfahren während der Kolben die Masse aus der Düse des Spritzes fördert. Die notwendige Hard- und Software basiert auf dem open source Projekt RepRap und entspricht den für FDM eingesetzten Anlagen. Diese Technik wurde auch vom Digitalen Produktionszentrum (dpz) der Hochschule der Bildenden Künste Saar realisiert.

Dieses Verfahren, hier im Folgenden als 3D-Extrusion bezeichnet, ist dem FDM Verfahren sehr ähnlich, nur dass hier kein „Schmelzfaden“ sondern eine kalte plastische Masse über eine Düse extrudiert und abgelegt wird. Als Vorteil ist die Nutzbarkeit von plastischen keramischen Massen, bzw. der deutlich geringere Binderanteil bei unplastischen Massen wie z.B. Al_2O_3 oder ZrO_2 zu sehen, wodurch eine zusätzliche Entbinderung vor dem Sintern hier nicht notwendig ist.

Um die Vor- und Nachteile dieser beiden Verfahren besser beurteilen zu können, wurde eine Anlage zur 3D-Extrusion durch WZR konzipiert und aufgebaut. Aktuell befindet sich das Verfahren in der Erprobung. Für die ersten Versuche wurde eine Porzellan-Masse eingesetzt. Die einbaute Injektionsspritze wurde mit unterschiedlichen Düsenöffnungen im Bereich von 0,5–2 mm getestet. Mit angepassten Bewegungsgeschwindigkeiten und -abständen gelingt es eine gute Haftung der übereinander liegenden Extrudate zu erzeugen. Nach dem Sintern sind weder Risse noch Lagenbildungen zu erkennen, vielmehr hat sich ein dichtes, homogenes Gefüge ausgebildet. Bild 5 zeigt die konvexe Ausprägung der einzelnen Lagen im Außenbereich. Im Inneren ist keine Lagenbildung zu erkennen. Somit kann auch dieses Additive Verfahren grundsätzlich zur Herstellung dichter keramischer Bauteile eingesetzt werden. Es gilt jedoch die gleiche Einschränkung in der Geometrie wie bei FDM: die Seitenwände sind durch die

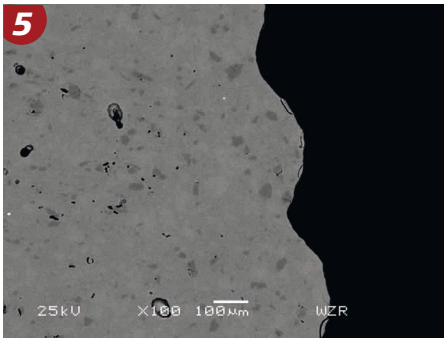


Bild 5 • Porzellan mittels 3D-Extrusion hergestellt

übereinander liegenden konvexe Bahnen geprägt. Ist dieser Effekt für das fertige Bauteil nicht erwünscht, bietet sich auch dieses Verfahren in erster Linie für die Herstellung von endkonturnahen Halbzeugen an. Welches der beiden Verfahren vorzuziehen ist, sollen weitere Studien zeigen.

3 Additive Fertigung bei WZR

Additive Fertigungsverfahren erwecken zurzeit ein enormes öffentliches Interesse. In der technischen Anwendung steht das Lasersintern von Metallen unmittelbar vor der industriellen Serienfertigung. Stereolithografie kann heute bereits für die Herstellung von keramischen Bauteilen genutzt werden und bietet sich als Vorstufe zum Spritzguss an. 3D-Druck wird beispielsweise für die

Fertigung angepasster Brennunterlagen, für Knochenersatz oder Designobjekte eingesetzt.

Zu den Vorzügen der Additiven Verfahren zählt die Materialeffizienz. Unter diesem Aspekt ist für keramische Werkstoffe gerade der 3D-Druck zu nennen. Die nicht mit der Tinte bedruckten und verfestigten Pulveranteile können ohne Verlust wiederverwendet werden. Der Anteil organischer Binder ist gering, so dass neben dem Sinterbrand keine zusätzliche Entbinderung notwendig ist. Darüber hinaus bietet das Verfahren aufgrund der geometrischen Freiheiten die Möglichkeit, Bauteile nach bionischen Ansätzen zu realisieren, indem Masse in wenig belasteten Bereichen durch Bildung einer Makro- und Mikroporen-Struktur signifikant reduziert wird. Das Thema „Material-effizienz“ steht beim Ansatz endkonturnahe Halbzeuge für die CNC-Bearbeitung mittels FDM oder 3D-Extrusion herzustellen ebenfalls im Fokus.

Neben dem „konventionellen“ 3D-Druck führt WZR zahlreiche kundenspezifische Weiterentwicklungen des Multi-Material 3D-Druckes durch, der völlig neue Anwendungsgebiete eröffnet, da die Eigenschaften oder auch die Farbe eines Bauteils lokal verändert werden können. Durch den Einsatz Partikel gefüllter Tinten gelingt es die Dichte des Grünlings soweit zu erhöhen, dass

nach dem Sintern ein dichtes Gefüge resultiert. Werden zusätzlich mehrere mit unterschiedlichen Partikeln gefüllte Tinten verdichtet, können Gefügeverstärkungen und Funktionalisierungen realisiert werden. Die sich dadurch bietenden Möglichkeiten, stoßen zurzeit auf ein sehr großes Interesse. Um den Anwendern auch eine langfristige Perspektive zu bieten, arbeitet WZR intensiv mit Kooperationspartnern daran, den 3D-Druck als industrielles Serienfertigungs-verfahren für keramische Bauteile zu etablieren.

Literatur

- [1] Warnier, C., Verbruggen, D., Ehmann, S., Klanten, R. (Hrsg.): Dinge Drucken - Wie 3D-Drucken das Design verändert. Gestalten Verlag, Berlin (2014)
- [2] Ebert, J., Ozkol, E., Zeichner, A., Uibel, K., Weiss, O., Koops, U., Telle, R., Fischer, H.: Direct inkjet printing of dental prostheses made of zirconia. J. Dent. Res. **88** (2009) 88 [7] 673-676
- [3] Kollenberg, W.: DE 102008028742 B4
- [4] Kollenberg, W., Polsakiewicz, D.: Ceramic Microstructure Design by Functionalized 3D-Printing. DDMC, Berlin (2012)
- [5] Polsakiewicz, D., Kollenberg, W.: Improvement of thermo shock resistance by three dimensional graded structures, 54th Internat. Colloquium of Refractories, Aachen (2011)
- [6] Polsakiewicz, D., Kollenberg, W.: LTCC-Based Packaging by Functionalized 3D-Printing. DDMC, Berlin (2014)
- [7] Kollenberg, W.: DE 102012219989 A1

Eingegangen: 04.08.2014

INSERENTENVERZEICHNIS

ECRef European Centre for Refractories GmbH	D-Höhr-Grenzhausen	210
Maschinenfabrik Gustav Eirich GmbH & Co KG	D-Hardheim	U1
ESK-SIC GmbH	D-Frechen	205
Expert Fachmedien GmbH	D-Düsseldorf	U2
Goerg & Schneider GmbH & Co. KG	D-Siershahn	211
Adolf Gottfried Tonwerke GmbH Gottfried Feldspat GmbH	D-Großheirath	215
Fr. Jacob Söhne GmbH & Co. KG	D-Porta Westfalica	207
LAEIS GmbH	D-Wecker	201
Linn High Therm GmbH	D-Eschenfelden	213
LUM GmbH	D-Berlin	203
MUT Advanced Heating GmbH	D-Jena	U4
NETZSCH-Gerätebau GmbH	D-Selb	199
Nürnberg Messe GmbH	D-Nürnberg	225
Reed Exhibitions Deutschland GmbH	D-Düsseldorf	231
Rimini Fiera S.p.A.	I-Rimini	U3
Sachverständigenbüro Gernandt · Osterkamp · Stengert	D-Porta Westfalica	204
Stephan Schmidt KG	D-Dornburg-Langendernbach	209
Unifair Exhibition Service Co. Ltd.	CN-Guangzhou	214
ZZ Wancor AG	CH-Regensdorf	217
Waters GmbH UB TA Instruments	D-Eschborn	219