

# ENTBINDERN UND SINTERN VON FFF-METALLPULVER BAUTEILEN

M. Kitzmantel<sup>1,2</sup>, T. Wilfinger<sup>1</sup>, M. Kaltenbrunner<sup>3</sup>, M. Doppler<sup>3</sup>

**Abstrakt** – Generative Herstellung (vulgo 3D-Druck) von Metallen ist meist ein sehr kostspieliges Unterfangen. Ein erfolgversprechender Ansatz zur Reduktion der Herstellkosten findet sich in der Kombination von Fused Filament Fabrication (FFF) mit pulvergefüllten Filamenten und der Technologie des Metall-/Keramikspritzgusses. In dieser Technologie wird über das generative Verfahren ein Grünteil (Verbund aus Metall-/Keramikpulver und Kunststoffbinder) hergestellt und anschließend entbindert und zum finalen Bauteil gesintert. Die beiden letzten Verfahrensschritte stellen neben dem eigentlichen Druckprozess des Grünkörpers wesentliche Einflüsse auf die Werkstoff- und Bauteileigenschaften dar. Das vorliegende Paper skizziert eine Übersicht über die unterschiedlichen Verfahren und diskutiert die Möglichkeiten und Stellschrauben der unterschiedlichen Verfahrensteile.

**Copyright** © 2017 RHP-Technology GmbH & Evo-Tech GmbH – Alle Rechte vorbehalten.

**Stichworte:** FMP, Additive Fertigung, FFF, Entbindermechanismen, Sintermechanismen

## I. Einführung

Generative Fertigung (Additive Manufacturing - AM), auch bekannt als 3D-Druck [1], bietet die Möglichkeit einer generierenden Herstellung von dreidimensionalen Bauteilen sehr komplexer Geometrien, die mit anderen Formgebungstechniken oft nicht oder nur schwer erreicht werden können [2]. Die Technologien beziehen sich großteils auf den Prozess des Verbindens von Materialien, um Teile aus digitalen 3D-Modelldaten als reale Bauteile herzustellen, üblicherweise über Schicht-für-Schicht Abscheidung.

In der Polymerindustrie werden AM-Verfahren bereits weitgehend kommerzialisiert und es können mehrere preisgünstige 3D-Drucker, die vorgefertigte Filamente verwenden, für den Heimgebrauch erworben werden [3]. Zu den am schnellsten wachsenden AM-Methoden gehören Technologiebezeichnungen wie Extrusionsabscheidungsprozess (Filament Deposition Modeling - FDM), Schmelzfilamentherstellung (Fused Filament Fabrication - FFF) und Schmelzextrusionsherstellung (Melt-Extrusion-Modeling - MEM) [4-5]. In diesem für Kunststofffilamente typischen Prozess (die drei vorgenannten Bezeichnungen weisen auf dieselbe oder sehr verwandte Technologien hin) werden Teile durch Schmelzextrusion eines Filament- / Ausgangsmaterials hergestellt, das sich nach der Extrusion am entstehenden Bauteil sofort verfestigt, und dort den Aufbau aus Schmelzschichten bildet [6]. Das Ausgangsmaterial wird in einem beheizten Drucker / Extrusionskopf geschmolzen, während der feste Teil des Filaments als ein Kolben wirkt, um die Schmelze durch eine Druckdüse zu drücken. Typischerweise werden dafür Reibräder angetrieben durch Schrittmotoren verwendet. Dieselbe Technik bewegt auch meist das Portalsystem um den

Extrusionskopf in der horizontalen x-y-Ebene, in der vertikalen z-Richtung bewegt sich die Plattform. Auf diese Weise können komplexe 3D-Objekte als gedrucktes Teil erzeugt werden. Abhängig von Position und Geometrie des Teils wird je nach Bedarf eine Unterstützungsstruktur (Support) erstellt.

Das Grundprinzip wurde von S. Scott Crump Ende der 1980er Jahre entwickelt und 1990 auf den Markt gebracht [7]. Seitdem ist die Technologie gewachsen und es sind unzählige neue Anwendungen entstanden.

Die meisten mit FFF hergestellten Teile wurden als Prototypen oder Präsentationsmodelle verwendet, wobei das wachsende Interesse an der Herstellung von Funktionskomponenten, die ein strenges funktionales Design, Maßtoleranzen und mechanische Eigenschaften erfüllen müssen, die Weiterentwicklung der Prozess- und Materialdatenbanken vorantreibt.

Der Gesamtmarkt für AM-Produkte und Dienstleistungen soll laut Prognosen bis 2020 auf über 5 Milliarden US-Dollar wachsen [8].

Die am häufigsten verwendeten Materialien für diese Art von Verfahren sind amorphe Thermoplaste, wobei Acrylnitril-Butadien-Styrol (ABS) am gebräuchlichsten ist. Für andere Materialien wie Metalle und Keramiken wird für die nächsten Jahre ein neuer Hype in der Technologieentwicklung und den folgenden Märkten erwartet [9], allerdings erfordern generative Technologien mittels FFF für keramische oder metallische Teile eine nachfolgende thermische und mechanische Behandlung. Die hergestellten Teile werden beispielsweise durch Glühen, Schmieden, Sintern oder ähnliches nachbehandelt und fertiggestellt. Darüber hinaus erfordern diese Materialgruppen auch vom Anwender sehr viel spezielles Know-how und ein weitreichenderes technisches Wissen als der reine Kunststoffdruck. Aus diesem Grund ist FFF von Metallen und Keramiken noch sehr weit von

Heimanwendungen entfernt [9], aber beide Gruppen von Werkstoffen sind für Konsumgüter unverzichtbar wie zum Beispiel für elektronische oder medizinische Geräte.

Darüber hinaus eröffnet AM mittels FFF neue Horizonte für neuartige Komponenten in einer bisher "unmöglichen" Geometrie aus Keramik und Metallen [9-10]. In den letzten Jahren wurden viele AM-Methoden erfunden, die auf beide Materialklassen angewendet werden können. Solche Methoden zur Erstellung komplexer Geometrien sind oft entweder durch die Komplexität des Produktionsprozesses oder durch große Mengen an Rohmaterialien charakterisiert. Besonders die Ausgangswerkstoffe können nicht bei allen Verfahren in ausreichend hohem Nutzungsgrad verwendet werden [1-2].

Das Verhältnis Buy-to-Fly ist bei kritischer Betrachtung oft deutlich geringer, als gerne kommuniziert. FFF für Metalle und auch Keramiken spielt neben dem generellen Kosten-Joker hier seinen zweiten großen Trumpf aus. Material kann mit diesem Verfahren tatsächlich nur dort abgelegt werden, wo später auch das Bauteil Material benötigt.

Der Begriff „Generative Fertigung“ umfasst viele unterschiedliche Prozesse und Materialien, die getestet wurden, um metallische und keramische Komponenten für ein breites Anwendungsspektrum herzustellen. Einige dieser Prozesse sind im Folgenden aufgelistet: [5, 11]

- FFF oder Materialextrusion: In diesem Verfahren wird Material durch eine Düse extrudiert und selektiv auf einer Bauplattform bzw. dem Bauteil abgelegt.
- Material-Jetting: Prozess, bei dem Tröpfchen mit oder aus Baumaterial selektiv abgelagert werden, ähnlich wie ein Tintenstrahldrucker Dokumente druckt. Dieser Auftrag kann für Metalle oder Keramiken mit nachfolgendem Entbindern und Sintern kombiniert werden.
- Binder-Jetting: Prozess, bei dem flüssiges Bindemittel selektiv abgeschieden wird, um Pulvermaterialien (meistens im Pulverbett vorbereitet) zu verbinden. Es erfolgt oft ein Entbinderungs- bzw. Sinterschritt.
- Laminierung: Prozess, bei dem Materialbahnen laminiert, zu einem Teil verbunden, werden.
- Direkter Energieeintrag / Pulverbett-Schmelzverfahren: Verfahren, bei dem thermische Energie (z.B. ein Laser) verwendet wird, um Materialien aufzuschmelzen, während sie abgeschieden werden, oder selektiv zu schmelzen, während sie sich im Pulverbett befinden.

Unter all den oben erwähnten Verfahren ist FFF für die Materialherstellung ein sehr flexibler Prozess, da dieser nicht nur auf eine Art oder bestimmte Materialien beschränkt ist, sondern weithin für geschmolzene Thermoplaste, viskose Flüssigkeiten oder Aufschlämmungen verwendet werden kann und sich leicht auf Keramiken, Verbundwerkstoffe, Metalle und

Beton übertragen lässt [3, 12]. Theoretisch erscheint die Abscheidung kolloidaler Pasten oder Aufschlämmungen metallischer / keramischer Pulver in flüchtigen Lösungsmitteln (Wasser oder organische Lösungsmittel) vorteilhafter, wenn diese im Vergleich zu dem Aufwand für die Herstellung des thermoplastischen metallisch / keramischen Einsatzmaterials dargestellt wird, wobei letzteres noch vor Verwendung in der FFF Maschine in Form von aufgespulten Filamenten vorliegen muss.

Jedoch ist das erstere Verfahren durch die Dispersität des metallischen oder keramischen Pulvers eingeschränkt und oft weniger flexibel und meist weniger umweltfreundlich, da es häufig die Verwendung von regulierten toxischen organischen Lösungsmitteln erfordert. FFF hat keine derartigen Einschränkungen hinsichtlich des aufgebracht Pulvermaterials, da die Verdichtung bei der Filamentherstellung auftritt, solange das Material in dem geschmolzenen Ausgangsmaterial dispergiert werden kann.

Verschiedene Arbeiten belegen die Eignung von FFF für die Umformung nicht nur von Keramiken wie Aluminiumoxid [13-14] und Zirkondioxid [15], sondern auch von Metallpulvern [12, 16]. Thermoplastisches 3D-Drucken bietet die Möglichkeit, metallische / keramische Bauteile mit hoher geometrischer Komplexität herzustellen und zusätzlich die Option zur Ausformung dreidimensional eingestellter Materialeigenschaften oder die Verfolgung von Multi-Material-Ansätzen [5].

## II. Feedstocks und deren Charakteristika

Feedstocks sind Ausgangsmaterialien, mit metallischen oder keramischen Pulvern hochgefüllte Polymere, und stellen daher eine wesentliche Herausforderung an die Schmelzverarbeitung und die Herstellung von Filamenten. Daher ist eine gründliche Entwicklung erforderlich, um den gesamten Prozess zu entwerfen, zu konstruieren und zu optimieren, der die Herstellung der Filamente ermöglicht, die später in einer FFF-Maschine extrudiert werden können [8, 14].

Die wichtigsten Herausforderungen umfassen folgende Punkte:

- Die Eigenschaften des Ausgangsmaterials spielen eine entscheidende Rolle in AM-Techniken und bestimmen das erreichbare Ergebnis der finalen physikalischen Bauteileigenschaften. Entscheidend ist die Auswahl, Morphologie und Charakterisierung der metallischen und keramischen Pulver, die für die Filamentherstellung und den anschließenden Druck geeignet sein müssen.
- Das aufgrund des hohen Gehalts an metallischem oder keramischem Füllstoff geänderte Verhalten eines Standardpolymers (als Filamentbasis) erfordert meist einen geeignet angepassten Zuführungsmechanismus zur Extrusionsdüse, der eine konstante Mischung mit verarbeitungsfähiger

Viskosität und Stabilität gegenüber der Sedimentation der Füllstoffteilchen und einen adäquaten Durchsatz bieten muss, um ein Filament mit konstantem Durchmesser herzustellen.

- Die Oxidation des Füllstoffs und die höhere Wärmeleitfähigkeit von metallischen Füllstoffen könnten ein Problem in der Extrusion darstellen, das für ein stabiles Prozessfenster der Verarbeitungsschritte gelöst werden muss.

Sobald eine geeignete Formulierung entwickelt ist und Filamente hergestellt sind, besteht der nächste Schritt darin, sie unter Verwendung eines 3D-Druckers zu extrudieren. Während der Teilproduktion wird das FFF-Ausgangsmaterial geschmolzen und fließt durch die Düse, um auf der vorhergehenden Schicht abgeschieden zu werden. Die dichteren Pulver von Metallen und Keramiken könnten sich anders verteilen, als das thermoplastische Bindemittel allein und sich somit ungleichmäßig am Teil anlagern. Dies könnte zu Dichtegradienten in der Komponente führen. Nach dem Ausdrucken der Teile kann eine solche Trennung von Pulver und Bindemittel während der Entbindungs- und Sinterstufen eine weitere Schwachstelle darstellen, da eine inhomogene Extraktion des Bindemittels zu einem Bruch des gedruckten Teils oder zu einer ungleichmäßigen Schrumpfung während des Sinterns führen kann, siehe Abbildung 1.



Abbildung 1: Über eine FFF Variante für Metallteile hergestelltes Bauteil nach erfolglosem Entbindern durch inhomogene Extraktion des Bindematerials.

### III. Entbinderung

Im Falle von Metallspritzguss (MIM – Metal Injection Moulding) oder dem FFF-Metall/Keramik Prozess sind die Nachbehandlungs-Operationen (Post-Shaping) von entscheidender Bedeutung. Wenn der 3D-Aufbau abgeschlossen ist, muss die Polymerkomponente aus dem gedruckten Bauteil entfernt werden, um eine rein metallische oder keramische Struktur zu erhalten. Dies ist ein kritischer Schritt, der in einem einstufigen oder einem

mehrstufigen Verfahren – in Abhängigkeit von der Bindemittelformulierung – erreicht werden kann.

Die am häufigsten verwendeten Entbinderungssysteme sind wie folgt [19]:

- Lösungsmittelentbinderung in Wasser oder organischen Lösungsmitteln (z. B. Aceton, Toluol und Hexan). Eine oder mehrere Bindemittelkomponenten sind in dem verwendeten Lösungsmittel löslich und können durch Aussetzen gegenüber dem Lösungsmittel für eine bestimmte Verarbeitungszeit bei Raumtemperatur oder bei leicht erhöhten Temperaturen unter dem Siedepunkt des Lösungsmittels entfernt werden.
- Thermisches Entbindern. Erwärmen der Teile erzeugt einen Polymerabbau und seine anschließende Eliminierung. Dieses Verfahren sollte sehr genau gesteuert werden, um die Entwicklung von Defekten in den Teilen zu vermeiden, und die chemische Zusammensetzung des Bindemittels sollte sehr gut bekannt sein, um das Schmelz- und Verdampfungsverfahren jeder Komponente bei der erforderlichen Temperatur durchzuführen.
- Katalytische Entbinderung. In diesem Verfahren erzeugt ein Gaskatalysator die Hydrolyse des Bindemittels, üblicherweise Polyacetal. Normalerweise wird für die katalytische Entbinderung eines Ausgangsmaterials auf Polyacetalbasis gasförmige Salpetersäure verwendet, die kürzere Entbinderungszeiten ergibt, als diejenigen des thermischen Prozesses. Es müssen spezielle Reaktoren verwendet werden, in denen gasförmige Säureflüsse sehr genau kontrolliert werden können und die Zersetzungsgase in geeigneter Weise behandelt werden, um ihre Toxizität zu verringern.

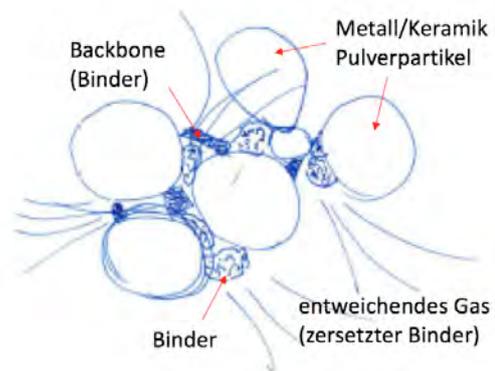


Abbildung 2: Schematische Darstellung des Entbinderungsprozesses mit zumindest 2-komponentigem Binder (Hauptbinder+Backbone).

Eine sorgfältige Optimierung der Entbinderungsstufe ist wichtig, um das Vorhandensein von Rückständen des Bindemittels zu vermeiden, die den Sinterprozess und

somit die endgültigen Eigenschaften des Werkstücks (meist nachteilig) beeinflussen könnten. Bei der Betrachtung von metallischen oder keramischen Komponenten würde eine unvollständige Eliminierung des Bindemittels zu nicht-funktionalen Bauteilen führen. Abbildung 2 zeigt eine schematische Darstellung der Entbinderung bei einem 2-komponentigem Bindersystem z.B. katalytischem Entbindern.

#### IV. Sintermechanismen

Das Sintern ist eine Wärmebehandlung, die auf einen Pulverpressling angewendet wird, um diesem Festigkeit und Integrität zu verleihen. Ziel des Sinterprozesses ist es, die Dichte zu erhöhen, wobei die mechanische Sinterung unterhalb des Schmelzpunktes des Hauptbestandteils des pulvermetallurgischen bzw. keramischen Materials liegt.

Es werden primär drei Gruppen von Sintermechanismen unterschieden [19]:

- Festkörpersintern
- Transientes Flüssigphasensintern
- Permanentes Flüssigphasensintern

Das Sintern erfolgt durch Diffusion von Atomen durch die Mikrostruktur. Diese Diffusion wird durch einen Gradienten des chemischen Potentials verursacht - Atome bewegen sich von einem Bereich mit höherem chemischen Potential in einen Bereich mit geringerem chemischen Potential. Die verschiedenen Wege, die die Atome nehmen, um von einem Punkt zum anderen zu gelangen, sind die Sintermechanismen.

Die sechs häufigsten Mechanismen sind [19]:

1. Oberflächendiffusion: Diffusion von Atomen entlang der Oberfläche eines Teilchens.
2. Dampftransport: Verdampfung von Atomen, die auf einer anderen Oberfläche kondensieren.
3. Gitterdiffusion von der Oberfläche: Atome von der Oberfläche diffundieren durch das Gitter.
4. Gitterdiffusion aus den Korngrenzen: Atome aus der Korngrenze diffundieren durch das Gitter.
5. Korngrenzendiffusion: Atome diffundieren entlang der Korngrenze.
6. Plastische Deformation: Dislokationsbewegung verursacht einen Stoffstrom.

Auch muss man zwischen verdichtenden und nichtverdichteten Mechanismen unterscheiden. Die Mechanismen 1-3 sind nicht verdichtend, sie nehmen Atome von der Oberfläche und ordnen sie auf eine andere Oberfläche oder einen Teil derselben Oberfläche um. Diese Mechanismen ordnen die Materie einfach innerhalb der Porosität an und verursachen keine Schrumpfung der Poren.

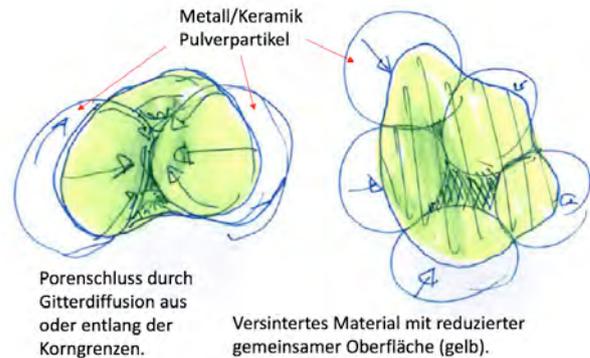


Abbildung 3: Schematische Darstellung des Schrumpfungsprozesses beim Festkörper-Sintern durch Füllen der noch vorhandenen Poren mit Material und Verringerung der Gesamtoberfläche und damit der Gesamtenergie. Die Mechanismen 4-6 führen zur Verdichtung, wobei die Mechanismen 1-3 nicht-verdichtend sind.

Die Mechanismen 4-6 sind Verdichtungsmechanismen, Atome werden von der Masse zur Oberfläche der Poren bewegt, wodurch die Porosität eliminiert und die Dichte der Probe erhöht wird.

#### Anfangsstadium des Sinterns:

- a) Lokale Kontaktstellenbildung oder "Fusion", ohne Schrumpfung des Sinterkörpers. Dies wird von einer Glättung der freien Oberfläche der Partikel begleitet.
- b) Sinterhalsbildung am Kontaktpunkt, mit resultierender konkaver Krümmung  $n$  am Hals, im Gegensatz zur konvexen Krümmung auf der Partikeloberfläche mit dem Radius  $r$ , wobei  $r \gg r_n$  ist. Die beiden Radien der Halskrümmung stellen eine experimentelle Begründung für das Zweikugelmodell des Sinterns dar.

Die Prozesse a) und b) führen zu einer Verdichtung der Sinterkomponente um etwa 10%. Das heißt, wenn die relative Gründichte nach dem Formen des Teilchenpresslings 57% betrug, würde die Dichte nach der Anfangsstufe etwa 67% der theoretischen Dichte (TD) betragen. Die 10%-ige Verdichtung im Anfangsstadium wird jedoch wegen der großen Oberfläche und der hohen Antriebskraft zum Sintern sehr schnell erreicht, nachdem das Pulver einer hohen Temperatur ausgesetzt wurde.

#### Zwischenstufe des Sinterns:

- c) Sinterhalswachstum.
- d) Poren bilden ein Netzwerk aus miteinander verbundenen zylindrischen Kanälen (offene Porosität).
- e) sich einander annähernde Partikelzentren resultierenden in einer Schrumpfung des Bauteils

Die Schrumpfung in der Zwischenstufe kann zu einer zusätzlichen Verdichtung um bis zu 25% oder insgesamt zu etwa 95% der theoretischen Dichte führen. Die Schrumpfung muss jedoch nicht notwendigerweise während der Zwischenstufe des Sinterns stattfinden. Zum Beispiel würde Schrumpfung nicht auftreten, wenn Materie von der Partikeloberfläche transportiert und entweder als Gas, Feststoff entweichen oder entlang der Grenzfläche als Oberflächendiffusion wandern würde.

### Endstadium des Sinterns:

- f) Isolierung von Poren, falls z.B. die relative Dichte ~ 93% übersteigt (geschlossene Porosität)
- g) Eliminierung von Porosität
- h) Kornwachstum

Die endgültige Sinterstufe beginnt bei etwa 93-95% der theoretischen Dichte, wenn die Porosität bereits isoliert ist. Idealerweise wird am Ende dieser Stufe die gesamte Porosität beseitigt. Die vollständige Beseitigung der Porosität in der Endstufe des Sinterns kann nur stattfinden, wenn alle Poren mit schnellen, kurzen Diffusionswegen entlang der Korngrenzen verbunden sind.

## V. Referenzen

- [1] Gibson, I.; Rosen, D. W.; Stucker, B., Additive manufacturing technologies. Springer: 2010; Vol. 238.
- [2] Vaezi, M.; Seitz, H.; Yang, S., A review on 3D micro-additive manufacturing technologies. The International Journal of Advanced Manufacturing Technology 2013, 67 (5), 1721-1754.
- [3] Gao, W.; Zhang, Y.; Ramanujan, D.; Ramani, K.; Chen, Y.; Williams, C. B.; Wang, C. C. L.; Shin, Y. C.; Zhang, S.; Zavattieri, P. D., The status, challenges, and future of additive manufacturing in engineering. Computer-Aided Design 2015, 69, 65-89.
- [4] Herderick, E. D., Additive Manufacturing in the Minerals, Metals, and Materials Community: Past, Present, and Exciting Future. JOM 2016, 68 (3), 721-723.
- [5] Huang, S. H.; Liu, P.; Mokasdar, A.; Hou, L., Additive manufacturing and its societal impact: a literature review. The International Journal of Advanced Manufacturing Technology 2013, 67 (5), 1191-1203.
- [6] Bechtold, S., 3D Printing, Intellectual Property and Innovation Policy. IIC - International Review of Intellectual Property and Competition Law 2016, 47 (5), 517-536.
- [7] Masood, S. H.; Song, W. Q., Development of new metal/polymer materials for rapid tooling using Fused deposition modelling. Materials & Design 2004, 25 (7), 587-594.
- [8] Vashishtha, V. K.; Makade, R.; Mehla, N., Advancement of rapid prototyping in aerospace industry-a review. International Journal of Engineering Science and Technology (IJEST) 2011, 3 (3), 2486-2493.
- [9] Chua, C. K.; Leong, K. F., 3D Printing and Additive Manufacturing: Principles and Applications. World Scientific: 2014.
- [10] Turner, B. N.; Gold, S. A., A review of melt extrusion additive manufacturing processes: II. Materials, dimensional accuracy, and surface roughness. Rapid Prototyping Journal 2015, 21 (3), 250-261.
- [11] Cardona, C.; Curdes, A. H.; Isaacs, A. J., Effects of Filament Diameter Tolerances in Fused Filament Fabrication. The Indiana University Journal of Undergraduate Research 2016, 2 (1), 44-47.
- [12] Wohlers, T. T.; Caffrey, T., Wohlers Report 2015: 3D Printing and Additive Manufacturing State of the Industry Annual Worldwide Progress Report. Wohlers Associates: 2015.
- [13] Bogue, R., 3D printing: the dawn of a new era in manufacturing? Assembly Automation 2013, 33 (4), 307-311.
- [14] Bose, S.; Darsell, J.; Hosick, H. L.; Yang, L.; Sarkar, D. K.; Bandyopadhyay, A., Processing and characterization of porous alumina scaffolds. Journal of Materials Science: Materials in Medicine 2002, 13 (1), 23-28.
- [15] Fan, N. C.; Wei, W. C. J.; Liu, B. H.; Wang, A. B.; Luo, R. C. In Ceramic feedstocks for additive manufacturing, 2016 IEEE International Conference on Industrial Technology (ICIT), 14-17 March 2016; 2016; pp 1147-1151.
- [16] Abdullah, A. M.; Tuan Rahim, T. N. A.; Mohamad, D.; Akil, H. M.; Rajion, Z. A., Mechanical and physical properties of highly ZrO<sub>2</sub> /β-TCP filled polyamide 12 prepared via fused deposition modelling (FDM) 3D printer for potential craniofacial reconstruction application. Mater. Lett. 2017, 189, 307-309.
- [17] Mireles, J.; Kim, H.-C.; Lee, I. H.; Espalin, D.; Medina, F.; MacDonald, E.; Wicker, R., Development of a fused deposition modeling system for low melting temperature metal alloys. Journal of Electronic Packaging 2013, 135 (1), 011008.
- [18] Ye, H.; Liu, X. Y.; Hong, H., Fabrication of metal matrix composites by metal injection molding—a review. J. Mater. Process. Technol. 2008, 200 (1), 12-24.
- [19] Kalpakjian, S.; Schmid, S. R.; Sekar, K. V., Manufacturing engineering and technology. Prentice Hall: 2014.

[20] Lah, N.; Pembuatan, U. Debinding and Sintering Optimization of Micro Part Produced Through Metal Injection Moulding (MIM) in a Polystyrene-based Binder System. Universiti Tun Hussein Onn Malaysia: 2014.

## Information zu den Autoren

**Michael Kitzmantel**<sup>1,2</sup> studierte Technische Physik an der Technischen Universität Wien in Österreich mit dem Thema seiner Diplomarbeit zu nano-verstärkten Wärmemanagement Werkstoffen (2007). Sein aktuelles Forschungsinteresse fokussiert sich auf Pulvertechnologie von Hochleistungswerkstoffen, Mikrospritzguss von Metallen und Keramiken sowie neuartige generative Herstelltechnologien wie FFF für Metall und Keramik sowie XXL 3D Druck. Michael Kitzmantel initiiert und arbeitet in mehreren nationalen und internationalen Forschungsprojekten mit.



**Kontakt: michael.kitzmantel@rhp-technology.com**

<sup>1</sup>RHP-Technology GmbH, Seibersdorf, Österreich

<sup>2</sup>Technische Universität Wien, Österreich

**Thomas Wilfinger**<sup>1</sup> studierte Kunststofftechnik an der Montanuniversität Leoben. In der ersten Phase seiner Berufstätigkeit beschäftigte er sich mit technischen Kunststoffteilen in der Automobil-Industrie und danach mit der Entwicklung neuer Batterietechnologien bis zur serienfertigen Herstellung. Seit 2008 fokussiert sich sein Tätigkeitsfeld auf den Pulverspritzguss von Metallen und Keramiken, im speziellen im Bereich des Mikrospritzgusses. Im Bereich FFF für Metalle und Keramiken arbeitet er in nationalen Forschungsprojekten mit.



**Kontakt: thomas.wilfinger@rhp-technology.com**

<sup>1</sup>RHP-Technology GmbH, Seibersdorf, Österreich

**Markus Kaltenbrunner**<sup>3</sup> ist ausgebildeter Softwareentwickler. Sein Interesse gilt der generativen Fertigung und er hat 2013 das Unternehmen Evo-Tech gegründet. Er wurde als erster Preisträger Innovation & Wirtschaft in Oberösterreich ausgezeichnet und sein Team ist Vizeeuropameister bei der Roboterfußballweltmeisterschaft 2010. Markus Kaltenbrunner arbeitet an zukunftsweisenden Innovationen und Weiterentwicklungen im industriellen 3D Druck moderner Werkstoffe.



**Kontakt: markus.kaltenbrunner@evo-tech.eu**

<sup>3</sup>Evo-Tech GmbH, Schörfing, Österreich

**Michael Doppler**<sup>3</sup> hat seine berufliche Laufbahn als Steuerungstechniker, Hard- und Softwareentwickler für Biomassezentralheizkessel gestartet und jahrelang Erfahrung in der Technischen Bewertung von Anlagen, der Produktionsbetreuung und Projektmanager gesammelt. Seit 2013 ist Michael Doppler Gründer und CTO von Evo-Tech, zuständig für die Weiterentwicklung und Qualitätssicherung der Produktfertigung sowie der Integration innovativer Features.



**Kontakt: michael.doppler@evo-tech.eu**

<sup>3</sup>Evo-Tech GmbH, Schörfing, Österreich

## FREQUENTLY ASKED QUESTIONS zu FMP - Filament Metal Printing von 316L (katalytisches Entbindern)

Welche Güte muss das Vakuum haben? (Wie viel mbar Restdruck darf bestehen?)

Das Vakuum beim Entbindern des Backbone ist nicht hilfreich, weil durch die stationären Verhältnisse die Crackprodukte des Backbone nur schlecht vom Bauteil abgezogen werden. Sauerstoffkonzentration sh. unten.

Muss die Wasserstoff-Atmosphäre unter Über- oder Unterdruck gewährleistet werden?

Während des Entbindern des Backbone im Sinterzyklus ist Unterdruck (bei gleichzeitigem Spülen mit Gas) empfehlenswert (bei Überdruck in dieser Phase kann der Kunststoff schlecht vom Bauteil abgezogen werden und der Kohlenstoff kann das Material verändern)

Ist damit zu rechnen, dass nach dem Entbindern des Werkstücks noch Teile des Binderpolymers übrig sind, die beim anschließenden Sintern bei hohen Temperaturen den Ofen beschädigen könnten?

Nach dem katalytischen Entbindern ist noch der „Backbone“ im Bauteil; wird während des Sinterzyklus bis 600°C entfernt (kann sich einem ungeeigneten Ofen ablageren)

Eine Beschädigung des Ofens ist nicht zwingend zu erwarten aber die Polymerreste gehen bei der nächsten Sinterfahrt wieder in die Atmosphäre und beeinflussen das Sintermaterial

Welches Binderverfahren würden Sie empfehlen? Wo liegen die Vor- und Nachteile?

**Thermisch:** keine Säure, kein Lösungsmittel – langsam (-> 2 Sinteröfen empfehlenswert)

**Katalytisch:** Ofen mit >98° Salpetersäure nötig – lineare Entbinderungszeit über Wandstärke

**Lösungsmittel:** geht auch mit einfachem Aufbau (speziell bei Wasser) – Entbinderungszeit wächst exponentiell mit Wandstärke

Welche Parameter empfehlen Sie zum Entbindern bzw. zum Sintern des 316L FMP Filaments?

**Entbindern (Katalytisch):** HNO<sub>3</sub>-Entbinderung nach dem BASF-Verfahren bei 110°C mit HNO<sub>3</sub> > 98%.

**Ein typischer Sinterzyklus ist:** Raumtemperatur – 5 K/min – 600°C, 1h Halten 600°C – 5 K/min – 1380°C, 3h Halten Ofenabkühlung; Atmosphäre aus 100% H<sub>2</sub> empfohlen.