

Additive Fertigung von keramikbasierten Multimaterialbauteilen mittels CerAM MMJ

Steven Weingarten¹, Uwe Scheithauer¹, Lutz Gollmer¹, Philipp Horn¹, Justin Ziener¹, Lars Rebenklau², Henry Barth²

Kurzfassung: Die additive Fertigung von Multimaterialbauteilen stellt eine Erweiterung des Freiraumes bei der Gestaltung von Bauteilen dar, bei der sich durch die Kombination unterschiedlicher Werkstoffe in einem Element verschiedene Eigenschaften und Funktionalitäten vereinen lassen. Dazu wurde am Fraunhofer IKTS seit 2014 die CerAM MMJ-Technologie entwickelt, mit der ein nahezu unbegrenztes Werkstoffportfolio durch ein direktes AM-Verfahren mittels hochgefüllter thermoplastischer Bindersysteme verarbeitet werden kann. Die CerAM MMJ-Technologie befindet sich aktuell in der Kommerzialisierungsphase, bis 2023 soll die Ausgründung aus dem Fraunhofer IKTS erfolgen.

Abstract: The additive manufacturing of multi-material components represents an extension of the freedom in the design of parts, in which different properties and functionalities can be combined in one part by adding different materials. For this purpose, the CerAM MMJ technology has been developed at Fraunhofer IKTS since 2014, with which an almost unlimited material portfolio can be processed by a direct AM process using highly filled thermoplastic binder systems. The CerAM MMJ technology is currently in the commercialization phase, and the spin-off from Fraunhofer IKTS is planned for 2023.

Keywords: Multimaterialbauteile, Multi-Material Jetting, CerAM MMJ, Additive Fertigung, direktes AM-Verfahren

1. Einführung

Additive Fertigungsverfahren sind die „Game-Changer“ beim Einsatz von Werkstoffklassen wie Keramiken, Hartmetallen und Gläsern, die aufgrund der typischen Härte und geringen Duktilität nur unter

hohem Aufwand mechanisch bearbeitet werden können. Die AM-Formgebungsmethoden zeichnen sich durch signifikant erweiterte geometrische Freiheitsgrade aus und ermöglichen die Realisierung komplexer und endkonturnaher Bauteilgeometrien.

Mit der Möglichkeit zur Integration von zusätzlichen Funktionalitäten in einem Prozessschritt (z. B. eingebettete Kühlkanäle) oder auch der Miniaturisierung von Bauteilen, ergeben sich zukünftig ganz neue Produktideen, vor allem für Anwendungen in harschen Umgebungen.

Inzwischen erfolgt für nahezu alle bekannten AM-Verfahren, die zunächst für die Verarbeitung von Polymeren entwickelt wurden, auch deren Adaption für Metalle und Keramiken im Forschungsumfeld. Einen Überblick über die Arbeiten zu keramischen Werkstoffen geben verschiedene Forschungsbeiträge [1][2][3] dabei werden die AM-Verfahren nahezu ausschließlich für die Formgebung genutzt. Der dabei generierte Grünkörper muss anschließend noch

Das Wichtigste im Überblick

- ▶ Es wird die CerAM MMJ-Technologie vorgestellt, ein direktes AM-Verfahren, das auf der Verarbeitung hochgefüllter thermoplastischer Bindersysteme (Feedstocks) basiert und mit dem sich ein nahezu unbegrenztes Werkstoffportfolio verarbeiten lässt.
- ▶ Die Entwicklung verschiedener Anlagenkonzepte für die CerAM MMJ-Technologie wird erläutert sowie die Möglichkeiten einer thermischen Co-Prozessierung von Bauteilen beschrieben, die sich beispielsweise in Form von keramischen Zündquellen bei Triebwerken für Satelliten einsetzen lassen.

Autor



STEVEN WEINGARTEN
(steven.weingarten@ikts.fraunhofer.de) ist Wissenschaftlicher Mitarbeiter am Fraunhofer-Institut für Keramische Technologien und Systeme IKTS in Dresden und dort in den Bereichen Formgebung und additive Fertigung tätig.

entbindert und gesintert werden, um die typischen keramischen Eigenschaften zu generieren. Daher wird in diesem Beitrag das Präfix „CerAM“ verwendet (CerAMfacturing – additive Fertigung von keramischen Bauteilen), um die hier beschriebenen Verfahren von Prozessen für polymere und metallische Bauteile abzugrenzen.

Im industriellen Umfeld sind bisher nur Verfahren im Einsatz, die auf dem Prinzip der Stereolithografie basieren. Vorreiter und Marktführer ist dabei die Firma Lithoz aus Österreich, die inzwischen seit zehn Jahren Anlagen und Materialien für die additive Fertigung von keramischen Bauteilen mit herausragenden Eigenschaften hinsichtlich Dichte, Auflösung, Fertigungstoleranzen und Oberflächeneigenschaften anbietet [4].

Eine zusätzliche Erweiterung des Freiraumes bei der Gestaltung der Bauteile stellt die additive Fertigung von Multimaterialbauteilen dar. Durch die Kombination unterschiedlicher Werkstoffe in einem Bauteil können verschiedene Eigenschaften und Funktionalitäten kombiniert werden, die sich bisher nicht in einem Bauteil vereinen ließen. Dies ebnet den Weg für die weitere Funktionalisierung und Miniaturisierung. Beispielhaft zu nennen sind die Integration von elektrischen Leiterpfaden oder eine dreidimensionale Gradierung der Porosität oder Farbe in keramischen Bauteilen.

Das Fraunhofer IKTS in Dresden entwickelt unterschiedliche Fertigungsstrategien,

um geometrisch hochkomplexe, keramikbasierte Multimaterialbauteile mittels sequenzieller oder simultaner Fertigung zu realisieren [5]. Sequenziell bedeutet, dass zunächst ein keramisches Substrat gefertigt und gesintert wird, das anschließend durch die Aufbringung weiterer Materialien und deren thermischer Prozessierung funktionalisiert wird. Bild 1 zeigt beispielhaft ein μ PCR-Modul, mit dem eine schnelle thermische Zyklisierung möglich ist, wie für die Vervielfältigung von Vireninformation und deren Nachweis notwendig. Die im Al_2O_3 -Grundkörper integrierten Kühlkanäle ermöglichen ein schnelles Abkühlen des Gesamtsystems und die äußerlich über Rund-Siebdruck aufgebrachten Leiterbahnen ein sehr schnelles Aufheizen [6]. Vorteilhaft bei dieser Fertigungsstrategie sind die unterschiedlichen thermischen Prozesse, die genau auf die verschiedenen Materialien angepasst werden können und die daraus resultierende Vielzahl an realisierbaren Werkstoffkombinationen. Allerdings können die funktionellen Materialien nur an Oberflächen appliziert werden, die frei zugänglich sind.

Bei der simultanen Fertigung werden die verschiedenen Materialien direkt während der Formgebung parallel verarbeitet und anschließend thermisch co-prozessiert. Dadurch ist der geometrische Freiheitsgrad bei der Anordnung der Materialien im Bauteil signifikant erhöht, aber Materialkombinationen sind immer von deren Co-Sinte-

rungseigenschaften abhängig. Die am Fraunhofer IKTS entwickelte Multi-Material Jetting (CerAM MMJ) -Technologie ermöglicht diese simultane Verarbeitung verschiedener Materialien während der Formgebung und wird im Folgenden näher beschrieben.

2. Multi-Material Jetting (CerAM MMJ)

Bei der Entwicklung der CerAM MMJ-Technologie, die ab 2014 zunächst unter der Bezeichnung „Thermoplastic 3D Printing“ (T3DP) erfolgte [7], standen zwei wesentliche Anforderungen an das Verfahren im Vordergrund. Zum einen sollte das Verfahren in der Lage sein, ein nahezu unbegrenztes Werkstoffportfolio zu verarbeiten, zum anderen stand die Eignung für die additive Fertigung von Multimaterialbauteilen im Vordergrund.

Bei licht- oder laserbasierten Verfahren spielt die Interaktion zwischen Werkstoff und Energiequelle eine wesentliche Rolle bei der Konsolidierung des Bauteils. Anders ist dies, wenn thermoplastische Bindersysteme genutzt werden, in denen die pulverförmigen Werkstoffe dispergiert werden, da diese durch Abkühlung sowie den Wegfall von Scherkräften erstarren. Dadurch spielen die Pulvereigenschaften zwar eine Rolle hinsichtlich der Interaktion mit dem Bindersystem, nicht aber für die Verfestigung der Masse an sich.



Bild 1 Hochdynamisches, sequenziell gefertigtes keramisches μ PCR-Modul. (© Fraunhofer IKTS)

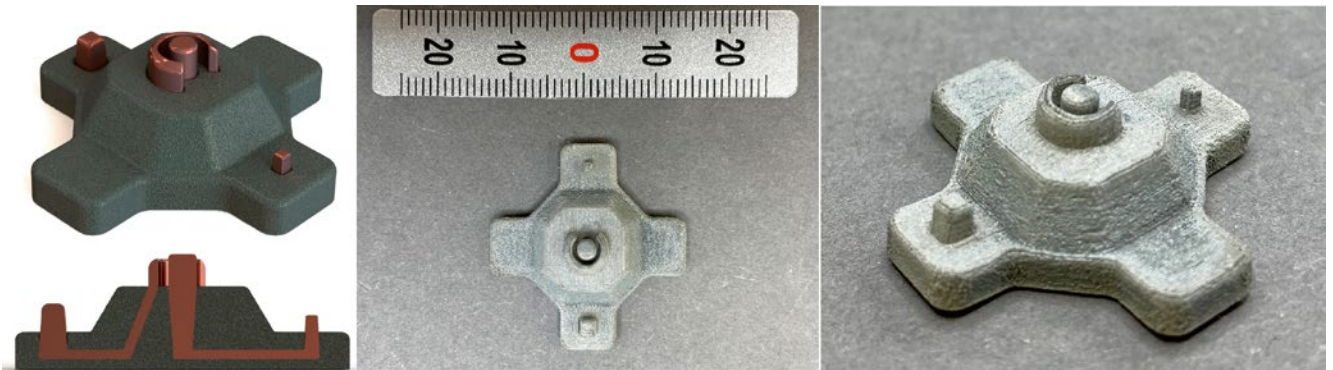


Bild 2 Keramische Zündquelle (links: CAD; Mitte und rechts: co-gesintertes Bauteil). (© Fraunhofer IKTS)

Zocca et al. [2] haben die Unterteilung der AM-Verfahren in direkte und indirekte Verfahren eingeführt. Bei indirekten Verfahren wird das Ausgangsmaterial flächig aufgetragen und selektiv beispielsweise durch Energie- (typische Vertreter: Stereolithografie (SLA, DLP, VPP); selektives Laserschmelzen/-sintern (SLM, SLS)) oder Bindereintrag (Binder Jetting (BJT)) verfestigt. Direkte AM-Verfahren zeichnen sich durch eine selektive Ablage des Ausgangsmaterials aus. Der bekannteste Vertreter ist dabei das Fused Filament Fabrication-Verfahren (FFF, FDM). Dabei bleibt neben dem abgelegten Material ein Freiraum, der für die Ablage eines weiteren Materials genutzt werden kann [8], während bei indirekten Verfahren zunächst das erste Ausgangsmaterial entfernt werden muss.

Auf Basis dieser Ausgangslage wurde die CerAM MMJ-Technologie als direktes AM-Verfahren konzipiert, das auf der Verarbeitung hochgefüllter thermoplastischer Bindersysteme (Feedstocks) basiert. Um eine möglichst hohe Auflösung zu erreichen, werden die aufgeschmolzenen Feedstocks als Einzeltropfen appliziert, die während der

Ablage zunächst miteinander zu linien- sowie flächenartigen und letztendlich zu dreidimensionalen Strukturen verschmelzen. Die verwendeten Feedstocks ähneln Heißgießmassen (Niederdruckspritzguss) und basieren ebenfalls auf natürlichen und technischen Wachsen und Paraffinen.

Die Breite des verarbeitbaren Werkstoffportfolios ist nahezu unbegrenzt. Dies konnte bereits erfolgreich für verschiedene Oxidkeramiken [9][10][11] artmetalle [12] und Gläser [13] demonstriert und veröffentlicht sowie in den IKTS-Laboren für Nitrid-[14] und Karbidkeramiken umgesetzt werden. Der Fokus lag dabei in den meisten Fällen auf der Realisierung von Eigenschaftsgradienten wie beispielsweise dicht-porös [10][11], elektrisch leitfähig und isolierend [14] sowie von Farbunterschieden [9].

3. Anlagentechnik am Fraunhofer IKTS

Gegenwärtig sind am Fraunhofer IKTS drei verschiedene Anlagen im Einsatz, bei denen die CerAM MMJ-Technologie umgesetzt wird. Eine vierte Anlage wird aktuell

gemeinsam mit Projektpartnern in einem öffentlich geförderten Projekt realisiert.

Die ersten Entwicklungen zu der Technologie erfolgten auf einer am IKTS konzipierten Laboranlage. Diese kann bis zu vier verschiedene Dosiersysteme parallel betreiben oder alternativ einen Linienscanner zur Abstandsmessung anstelle eines Dosiersystems aufnehmen. Bei dieser Anlage werden die Dosierköpfe über einem feststehenden Baufeld bewegt.

Aufgrund der begrenzten Präzision und Wiederholgenauigkeit wurden in den letzten Jahren zwei weitere Anlagen realisiert. Zum einen erfolgte im Rahmen des „Agent-3D: MultiBeAM“-Projektes (Förderung durch BMBF, Projektträger PTJ, Förderkennzeichen: 03ZZ0209B) gemeinsam mit den Unternehmen Xenon Automatisierungstechnik (Dresden) und S.K.M. Informatik (Schwerin) die Überführung der Technologie auf den aktuellen Standard im Anlagenbau, wodurch eine signifikante Verbesserung hinsichtlich der Reproduzierbarkeit sowie Produktivität erreicht werden konnte. Diese Anlage kann bis zu drei verschiedene Dosiersysteme sowie einen Linienscanner parallel betreiben und verfügt über ein in

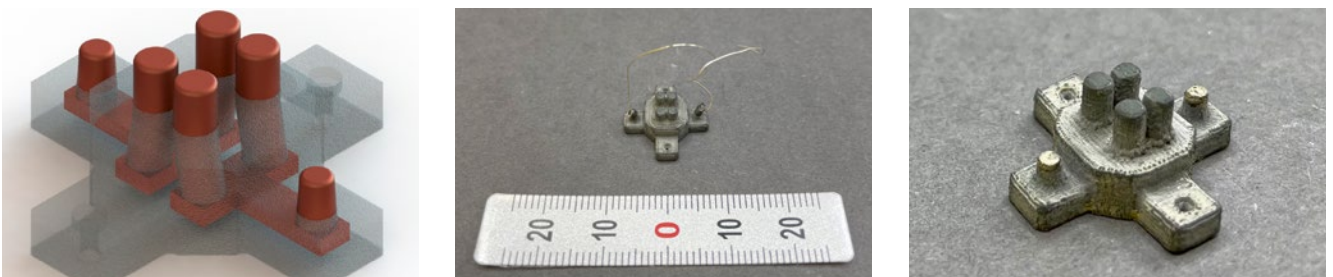


Bild 3 Keramische Zündquelle – weiteres Design (links: CAD; Mitte und rechts: co-gesintertes Bauteil). (© Fraunhofer IKTS)

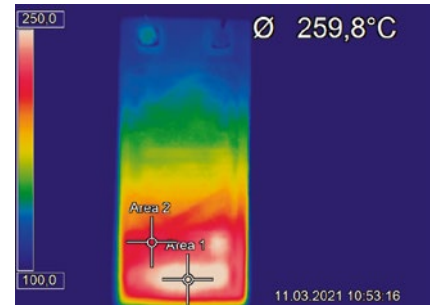
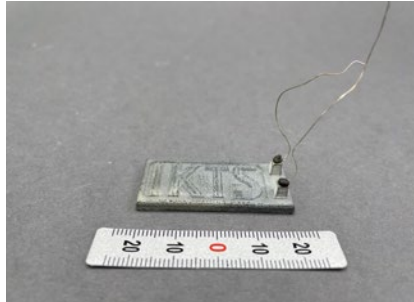
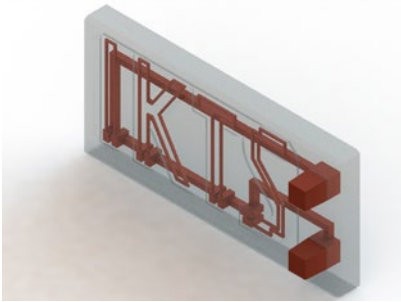


Bild 4 Keramische Heizerstruktur (links: CAD; Mitte: co-gesintertes und kontaktiertes Bauteil; rechts: thermografische Aufnahme während eines Laborversuches).
© Fraunhofer IKTS)

z-Richtung verfahrbares Baufeld sowie ein in x- und y-Richtung bewegte Dosiersystem.

Ein weiteres Anlagenkonzept wurde erfolgreich in den letzten Jahren intern am IKTS entwickelt. Hier lag der Fokus auf der vollständigen Kontrolle und Zugänglichkeit aller Systemkomponenten. Das Konzept ermöglicht zukünftig weitere, auch andersartige Dosiersysteme oder alternative Überwachungstechnik zur In-Line-Prozesskontrolle zu integrieren. Auch diese Anlage nutzt bis zu drei Dosiersysteme sowie einen Linienscanner, die alle fest über einem dreidimensional beweglichen Baufeld installiert sind.

Aktuell erfolgt die Finalisierung einer vierten Anlage im Rahmen des „AddiLine“-Projektes (Förderung durch BMBF, Projektträger VDI, Förderkennzeichen: FVP-OS 24) gemeinsam mit dem Unternehmen Hoyer Montagetchnik (Schwarzhausen). Bei dieser Entwicklung steht die Integration der Laser-Speckle-Technologie als zusätzliche In-Line-Prozesskontrollmethodik im Vordergrund [15].

4. Aktuelle Arbeiten und Demonstratoren

Die Verarbeitung von Oxidkeramiken und die Realisierung von Farb- und Porositätsgradienten mittels CerAM MMJ wurde schon in mehreren Veröffentlichungen beschrieben. Ein wesentliches Werkstoffsystem, mit dem sich das IKTS aktuell beschäftigt, sind Mischungen aus Si_3N_4 - MoSi_2 - SiC . Die Besonderheit dieses Werkstoffsystems ist es, dass durch unterschiedliche Mischungsverhältnisse elektrisch leitfähige Pfade in einem sonst elektrisch isolierenden kerami-

schen Bauteil gedruckt werden können. Damit ist eine thermische Co-Prozessierung aufgrund der vergleichbaren thermischen Ausdehnung sowie Schwindungsverhalten möglich. Dieses System ist schon lange bekannt, wurde bereits im 2K-Spritzguss verwendet [16] und konnte nun auch für AM qualifiziert werden [14].

Bild 2 bis Bild 4 zeigen aktuelle Demonstratoren. In Bild 2 und Bild 3 sind verschiedene Ausführungen einer keramischen Zündquelle dargestellt, die zur Funkengenerierung genutzt werden können. Eine potenzielle Anwendung sind dabei Triebwerke für Satelliten, die immer wieder gezündet werden müssen und an denen

das IKTS gemeinsam mit Kollegen vom Institut für Luft- und Raumfahrttechnik (ILR, Prof. Tajmar, Team Dr. Bach) forscht.

Bild 4 zeigt eine keramische Heizerstruktur, die mittels CerAM MMJ realisiert wurde. Zukünftig wird es damit möglich sein, sowohl die äußere Kontur des Heizers als auch die Anordnung der Heizleiterstrukturen im Inneren anwendungs- und kundenspezifisch auszugestalten. Ein weiterer Fokus liegt aktuell auf der Verarbeitung von WC-Co-Hartmetall-Mischungen (besonders interessant für die Werkzeugindustrie), SiC-Mischungen, LTCC-Materialien sowie kundenspezifischen Werkstoffen.



Bild 5 Projektträgere treffen im Fraunhofer IKTS im Rahmen des „EXIST: CerAM MMJ“-Projektes; von rechts nach links: Herr Deutschmann und Herr Hoffmann vom PTJ; 3. von links: Herr Löbelt-Friedrich von Dresden | exists; CerAM MMJ-Team. © Fraunhofer IKTS)

5. Kommerzialisierung

Die CerAM MMJ-Technologie befindet sich aktuell in der Kommerzialisierungsphase. Auftakt bildet im Rahmen des Programmes EXIST Forschungstransfer das Projekt „EXIST: CerAM MMJ“ (Förderung durch BMWi, Projektträger PTJ, Förderkennzeichen: 03EFQSN180). Dieses unterstützt herausragende forschungsbasierte Gründungsvorhaben, die mit aufwändigen und risikoreichen Entwicklungsarbeiten verbunden sind. Noch innerhalb der Projektlaufzeit (03/2021 bis 02/2023) soll die Ausgründung aus dem Fraunhofer IKTS erfolgen. Schwerpunkte des Projektes sind die Produktentwicklung und das Erbringen des Proof of Concept der neuen additiven Fertigungstechnologie. Darüber hinaus erfolgt die Erstellung des zukünftigen Geschäftsmodells und des Businessplans als Verhandlungsgrundlage für potentielle Geldgeber und gegenüber der Fraunhofer Gesellschaft. Auch die Überarbeitung des Anlagenkonzeptes ist Teil des Programms. Dabei fließen die verschiedenen Erfahrungen ein, die aktuell mit den unterschiedlichen Anlagenkonzepten gemacht werden.

Gemäß den aktuellen Planungen erfolgt direkt nach der für Q1/2022 geplanten Firmengründung die weitere Intensivierung der bereits begonnenen Gespräche mit Kapitalgebern und Investoren. Nach deren Abschluss soll das überarbeitete Anlagenkonzept in einer Pilotanlage umgesetzt werden. Ab 2023 findet eine Validierung von Vorseriengeräten mit ausgewählten Pilotkunden statt, sodass ab 2024 der Vertrieb der industriellen 3D-Drucker in Serie startet.

6. Zusammenfassung

Die CerAM MMJ-Technologie weist gegenüber anderen AM-Technologien für keramische Werkstoffe wesentliche Vorteile hinsichtlich des verarbeitbaren Werkstoffportfolios sowie der Realisierung von Multimaterialbauteilen auf. Basierend auf dieser Technologie und den dafür qualifizierten Materialien können zukünftig geometrisch hochkomplexe Bauteile mit zusätzlich integrierten Funktionalitäten sowie Eigenschaftsgradienten gefertigt werden, die bisher nicht realisierbar sind. ◀

Literaturhinweise

- [1] N. Travitzky et al.: Additive Manufacturing of ceramic-based material. *Advanced Engineering Materials*, 16 (2014) 729-754
- [2] A. Zocca et al.: Additive Manufacturing of Ceramics: Issues, Potentialities, and Opportunities. *JACerS*, 98 (7) (2015) 1983-2001
- [3] Z. Chen et al.: 3D printing of ceramics: A review. *JE-CerS*, 39(4) (2019) 661-687
- [4] J. Homa: Rapid Prototyping of high-performance ceramics opens new opportunities for the CIM industry. *PIM International*, 6(3) (2012) 65-68
- [5] A. Michaelis et al.: Advanced Manufacturing for Advanced Ceramics. *Procedia CIRP* 95 (2020) 18-22
- [6] U. Scheithauer et al.: Prozesszeiten- und Energieeinsparung in medizinischen und technischen Prozessen durch additiv gefertigte und funktionalisierte keramische Bauteile, *RapidTech Proceedings* (2021) 297-306
- [7] U. Scheithauer et al.: Thermoplastic 3D Printing—An Additive Manufacturing Method for Producing Dense Ceramics, *JACT*, 12(1) (2015) 26-31
- [8] J. Abel et al.: Fused Filament Fabrication (FFF) of Metal-Ceramic Components. *JoVE* 143 (2019) e57693
- [9] S. Weingarten et al.: Multi-material Ceramic-Based Components - Additive Manufacturing of Black-and-white Zirconia Components by Thermoplastic 3D-Printing (CerAM - T3DP). *JoVE* 143 (2019) e57538
- [10] U. Scheithauer et al.: Alternative Process Routes to Manufacture Porous Ceramics—Opportunities and Challenges. *Materials* 12 (2019) 663
- [11] U. Scheithauer et al.: Ceramic-Based 4D Components: Additive Manufacturing (AM) of Ceramic-Based Functionally Graded Materials (FGM) by Thermoplastic 3D Printing (T3DP), *Materials* 10(12) (2017) 1368
- [12] U. Scheithauer et al.: Droplet-based additive manufacturing of hard metal components by thermoplastic 3D printing (T3DP). *JCT* 8 (2017) 155-160
- [13] T. Moritz et al.: Ceramic Additive Manufacturing Methods Applied to Sintered Glass Components with Novel Properties, *Ceramics in Modern Technologies* (2019)
- [14] U. Scheithauer et al.: CerAMufacturing of Si3N4 components. *Ceramic Applications* (2020)
- [15] D. Dang et al.: Laser Speckle Photometry investigation of the thermal conductivity of 3d printed ceramic green bodies using Multi Material Jetting. *Open Ceramics* (2021) akzeptiert für Publikation
- [16] E. Zschippang et al.: Charakterisierung und Verarbeitung von Si₃N₄-SiC-MoSi₂-Kompositen für Heizleiteranwendungen. *Keramische Zeitschrift* (2013)

- 1 Fraunhofer-Institut für Keramische Technologien und Systeme IKTS, Formgebung und additive Fertigung, Winterbergstraße 28, 01277 Dresden, www.ikts.fraunhofer.de
- 2 Fraunhofer-Institut für Keramische Technologien und Systeme IKTS, Systemintegration und AVT, Winterbergstraße 28, 01277 Dresden, www.ikts.fraunhofer.de

VEREDELN SIE IHR WISSEN

MIT DER NUMMER 1 DER OBERFLÄCHENTECHNIK*



Sie wollen wissen, was unter der Oberfläche steckt. JOT ist das Magazin, mit dem Sie Ihr Wissen im Bereich Oberflächentechnik veredeln können. Praxisnah und anwenderorientiert. Lesen Sie 12 Ausgaben plus mind. fünf Specials zum Vorzugspreis. Inklusive E-Magazin, freiem Zugriff auf das Online-Fachartikel-Archiv, Newsletter und Webportal: www.jot-oberflaeche.de



* Nr. 1 bezogen auf die verkaufte Auflage; laut IVW vom 30.06.2016: 1.469 Exemplare

Testen Sie jetzt JOT.
Die ganze Vielfalt unter:
www.meinfachwissen.de/jot