

Additive Fertigung keramischer Bauteile

Wolfgang Kollenberg, Dieter Nikolay

Die Additive Fertigung hat sich in den letzten Jahren rasant entwickelt und kommt mittlerweile in vielen Branchen zum Einsatz. Im Juni letzten Jahres wurde von der WZR ceramic solutions eine Tagung zu den Einsatzmöglichkeiten dieser Technologie speziell in der Keramikindustrie ausgerichtet. Hochkarätige Referenten sorgten für ein vollbesetztes Auditorium. Die Veranstaltung befasste sich nicht nur mit den Additiven Verfahren, sondern auch mit den vor- und nachgeschalteten Prozessen sowie mit juristischen Fragen und Aspekten des Arbeitsschutzes.

Pulverbettbasierter 3D-Druck

Dr. Dieter Nikolay, WZR ceramic solutions GmbH, Rheinbach, erläuterte das Verfahren des pulverbettbasierten 3D-Drucks und umriss die Entwicklungen seit den grundlegenden Arbeiten in den 1990er Jahren am MIT bis heute. Da die Keramiken stets porös waren, lag der Schwerpunkt der Arbeiten über viele Jahre auf der Erhöhung der Dichte. Es wurden im Laufe der Jahre unterschiedliche Infiltrationstechniken (mit Glas, Kupfer oder Silizium) von verschiedenen Arbeitsgruppen entwickelt. Zusätzlich wurde die das Glasieren insbesondere bei Designobjekten realisiert. Mit dem Ansatz Partikel gefüllte Tinten zu verdrucken, eröffnete WZR in den letzten Jahren ein neues Feld, nicht nur um dichte Keramiken zu drucken, sondern auch um lokale Gefügeverstärkungen oder um Funktionalisierungen, wie elektrische Leiterbahnen, zu entwickeln. Der Stand der Entwicklungen von Pulverbett und Tinten sowie relevante Prüfverfahren wurden vorgestellt (Bild 1 und Bild 2).

Die für den pulverbettbasierten 3D-Druck notwendigen Maschinen wurden von Dr. Ingo Ederer, voxeljet AG, Friedberg, vorgestellt. Diese Geräte werden heute vorwiegend zur Herstellung von Sandformen und Kernen für den Metallguss eingesetzt. Die Baustoffe werden schichtweise auf eine Baufläche aufgebracht und selektiv mit einer Binderflüssigkeit bedruckt. Diese beiden Schritte werden solange wiederholt, bis die gewünschte Bauhöhe erreicht ist. Nach dem Entfernen des unbedruckten Formstoffes können die gewünschten Geometrien entnommen werden. Diese Maschinenteknik wurde in letzter Zeit auch für keramische Pulver eingesetzt.

Darüber hinaus wurden auch die Randbedingungen für eine wirtschaftliche Serienfertigung mittels 3D-Druck behandelt.

Direkter 3D-Druck

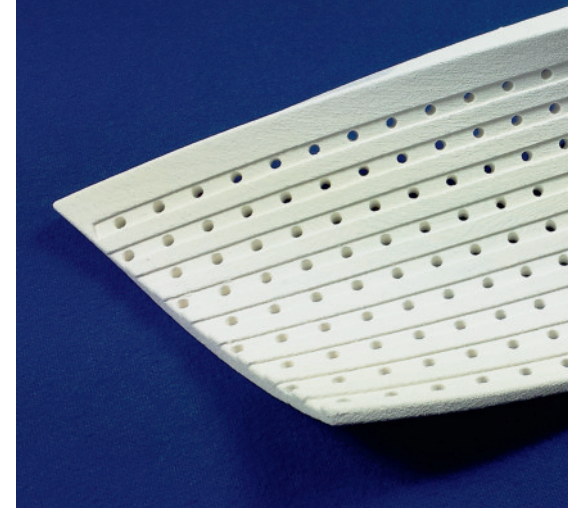
Prof. Dr. Rainer Telle, RWTH Aachen, widmete sich in seinem Vortrag dem Potenzial des „Direkten 3D-Drucks“ (Direct Inkjet Printing). Dieses Verfahren eröffnet aufgrund seiner besonderen Eignung zum Multimaterialdruck völlig neue Optionen der Bauteilgenerierung. Die Methode basiert auf den klassischen 2D-Verfahren. Eine Suspension, die feinste Partikel enthält (>25 Vol.-%), wird tropfenförmig (ca. 40 µm) verdruckt. Neben vielen anderen Hürden war eine wesentliche Herausforderung der Tintenentwicklung die Partikelgröße in den Bereich 200–700 nm zu bringen. Durch Verschiebung der Druckköpfe in der z-Achse entstehen durch wiederholtes Drucken von Tropfen Lagen mit etwa 5 µm Dicke. Nach dem Sintern werden keramische Körper erhalten, deren Eigenschaften denen von kalisostatisch gepresstem Material entsprechen. Das Verfahren erlaubt Gradientendruck, Graustufendruck und überlappenden Mehrphasendruck analog zum überlappenden Absetzen von Farbtropfen.

Laser-Stereolithographie

Richard Gaignon, 3DCeram, Limoges (Frankreich), befasste sich mit dem Einsatz der Laser-Stereolithographie in der Keramik. Für diese Technologie muss eine Paste, die Fotopolymere und keramische Partikel enthält, bereitgestellt werden. Die lokale Ver-

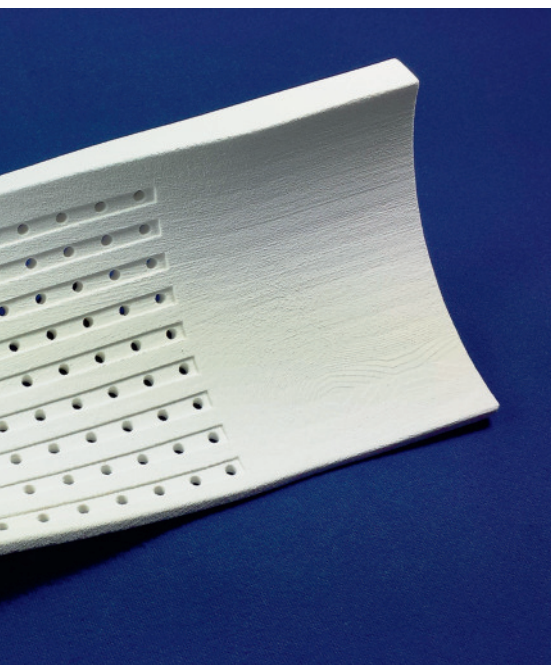
festigung erfolgt über die Vernetzung der Fotopolymere durch Belichtung mittels Laser mit einer Auflösung von 30 µm. Die Lagendicke kann zwischen 10 und 150 µm variiert werden. Durch den Aufbau von unten nach oben – analog zum 3D-Druck – ist es möglich, die notwendigen Supportstrukturen ohne Anbindung zu fertigen. Aufgrund des hohen Polymergehaltes ist vor dem Sintern ein gesonderter Entbinderungsprozess notwendig. 3DCeram bietet schlüsselfertige Fertigungslinien an, die – mit entsprechenden Schulungen – einen raschen Einstieg in die Additive Fertigung bieten. Neben gebrauchsfertigen Mischungen, können auch kundenspezifische Pasten entwi-

Bild 1 Gesinterter keramischer Kern mit Maßen 230 mm × 95 mm – hergestellt von WZR mittels pulverbettbasiertem 3D-Druck/Binder-Jetting (© WZR)



ckelt werden. Die gefertigten Bauteile entsprechen mit ihren Eigenschaften konventionell gefertigten Keramiken. Für die Zukunft wird neben den Aspekten der Multifunktionalität im Design auch das Thema „Multimaterial“ als wesentliche Herausforderung gesehen.

Eine weitere Variante der Stereolithographie wurde mit der von der Firma Lithoz entwickelten Maschine realisiert: Die Belichtung der Fotopolymere erfolgt mit LED-Licht und Masken durch den Boden der Vorratswanne. Über die Erfahrungen in der industriellen Fertigung keramischer Bauteile mit diesem Verfahren berichtete Axel Hilgenberg, Steinbach AG, Detmold. Da das Unternehmen auch im Keramik-Spritzguss aktiv ist, bietet sich nun die Möglichkeit, Bauteile vorab in kleiner Stückzahl zur Bemusterung bereitzustellen und somit die Kosten der Werkzeugentwicklung zu reduzieren. Darüber hinaus zeigt die bisherige Erfahrung aber auch, dass die Additive Fertigung den Zugang zu neuen Märkten erleichtert. Als Beispiel wurden die Branchen Medizin- und Analysetechnik genannt, die typischerweise kleine Losgrößen benötigen. Durch ein hausintern verbessertes Post-Processing können auch kleine und mittlere Serien kosteneffektiv gefertigt werden.



Arbeitsschutz

Für den industriellen Einsatz Additiver Fertigungsverfahren gilt es, Regeln für den Arbeitsschutz vorzuhalten. Renate Beisser, Institut für Arbeitsschutz der Deutschen Gesetzlichen Unfallversicherung, Sankt Augustin, fasst in ihrem Vortrag den Stand der entsprechenden Überlegungen und Initiativen zusammen. Neben den mechanischen, elektrischen und thermischen Gefährdungen steht die chemische Gefährdung durch Partikel, Lösungsmittel und organische Additive im Fokus. Sehr feine Partikel bieten darüber hinaus auch noch die Gefährdung durch Brand- und Explosionsgefahren. Derzeit gibt es jedoch noch keine valide Studie zur Emission bei Additiven Fertigungsverfahren am Arbeitsplatz. Aus diesem Grund ist es mit Blick auf Sicherheit und Gesundheit erforderlich, die Entwicklung seitens der Unfallversicherungsträger zu begleiten und auch entsprechende Messungen an Arbeitsplätzen durchzuführen. Daher lud die Vortragende zur Teilnahme an ihrer Studie ein, um den Aspekt des Arbeitsschutzes von Additiven Verfahren auch auf den Bereich der Keramik auszudehnen.

Vertragliche Regelungen

Dr. Andreas Leupold, Leupold Legal, München, erläuterte in seinem Vortrag, wie die Integration des 3D-Drucks in die Supply Chain durch vertragliche Regelungen abgesichert werden muss und was bei der Auslagerung der Additiven Fertigung auf externe Dienstleister zu beachten ist, damit das geistige Eigentum an Konstruktionsdetails und Designs nicht verloren geht. Darüber hinaus zeigte er, warum auch Unternehmen, die selbst additiv fertigen und mit anderen Standorten, externen Mitarbeitern oder Zulieferern 3D-Modelle, Druckvorlagen und Druckdaten austauschen, nicht nur technische, sondern auch rechtliche Maßnahmen zum Schutz ihrer Geschäftsgeheimnisse treffen müssen. Da der Gewährleistung und Produkthaftung in der Additiven Fertigung wachsende Bedeutung zukommt, wurde zudem erklärt, warum die Einhaltung technischer Normen allein nicht genügt, um eine Haftung für additiv gefertigte, mangelhafte oder fehlerhafte Produkte zu vermeiden.

Richtlinien

Jean Haeffs, VDI-Gesellschaft Produktion und Logistik, Düsseldorf, stellte die Arbeit des VDI, insbesondere zur Erstellung der Richtlinienreihe VDI 3405 Additive Fertigungsverfahren, vor. In sieben VDI-Fachausschüssen mit insgesamt rund 175 ehrenamtlichen Mitarbeitern befasst man sich mit unterschiedlichen Aspekten der Additiven Fertigung. Dabei werden Themen von technologischen Detailfragen (Pulverqualifizierung) bis hin zum gesellschaftlichen Umfeld (Arbeitssicherheit und Recht) behandelt. Die bisher erschienen Blätter der Richtlinie befassen sich mit Grundlagen, Begriffen und Verfahrensbeschreibungen sowie speziellen Themen, wie dem Stahlschmelzen metallischer Bauteile, dem Lasersintern von Kunststoffbauteilen, Konstruktionsempfehlungen für die Bauteilfertigung mit Laser-Sintern und Laser-Strahlschmelzen. Aus Sicht der Branche ist die Zeit reif, auch für die keramischen Verfahren technische Regeln zum anerkannten Stand der Technik zu entwerfen. Die Teilnehmer der Tagung und alle Interessierten wurden eingeladen, an diesem Prozess mitzuarbeiten.

Dentale Anwendungen

Die Digitalisierung der Zahnmedizin und Zahntechnik ist in vollem Gange. Josef Schweiger, LMU München, skizzierte das Potenzial der Additiven Fertigung für dentale Anwendungen. Da jeder Patient eine individuelle Versorgung benötigt, ist die Losgröße in der Regel immer 1. Zudem sind viele zahntechnische Anwendungen durchaus komplex, sodass auch hier Additive Verfahren Vorteile bieten. Konkret werden derzeit in der Regel Hilfsstrukturen, wie beispielsweise Implantatbohrschablonen oder individuelle Abformlöffel, additiv gefertigt. Gerade bei der navigierten Implantation haben die gedruckten Bohrschablonen mittlerweile einen nicht zu unterschätzenden Marktanteil gewonnen. Für die Versorgung mit definitivem Zahnersatz fehlen derzeit noch die Materialien, die die Voraussetzungen des Medizinproduktegesetzes zum permanenten Verweilen im Mund erfüllen. Auf der CAD-Seite gibt es aber eine Reihe interessanter Ansätze, die die Additive Fertigung von mehrschichtigem, naturidentischem Zahnersatz ermöglichen. Zahnstrukturdaten-

banken, welche die verschiedenen Strukturen natürlicher Zähne (Schmelz, Dentin, Pulpa) abbilden, sind die Grundlage dieser Technologie. Die ersten Ergebnisse sind erstaunlich und lassen die zukünftigen Potenziale dieser Technik erahnen.

Multimaterial-Bauteile

Die Herstellung von Bauteilen mit örtlich-variablen mechanischen oder optischen Eigenschaften, die mit lediglich einem Material nicht herstellbar sind, wird über Multimaterial-3D-Druck ermöglicht. Hierfür werden unterschiedliche Druckmaterialien in hoher Auflösung nebeneinander platziert, wobei bekannt sein muss, welche Auswirkungen eine bestimmte Anordnung dieser Druckmaterialien auf die Werkstoffeigenschaften des Bauteils hat (Druckprozessmodell). Dr. Philipp Urban, Fraunhofer IGD, Darmstadt, präsentierte den am IGD entwickelten universellen 3D-Druckertreiber „Cuttlefish“ zur Herstellung von Multimaterial-Bauteilen mit definierten Eigenschaften. Cuttlefish zerlegt Bauteile digital in Voxel und stellt die Eigenschaften des Bauteils durch Füllen der Voxel mit den verfügbaren Druckmaterialien, basierend auf einem vorher definierten Druckprozessmodell, ein. Durch seine Streaming-Architektur muss lediglich eine kleine und konstante Anzahl von Voxelschichten zu jedem Zeitpunkt des Druckprozesses im Speicher gehalten werden. Dadurch wird ermöglicht, auch große Objekte mit hunderten Milliarden Voxeln zu drucken und den Druckprozess schnell zu starten – ohne das gesamte Objekt vorher zu berechnen.

Hybridbauteile

Alexander Schulz, TU Ilmenau, stellte ein aktuelles Projekt vor, das gemeinsam mit der WZR ceramic solutions GmbH durchgeführt wird: „3D-gedruckte Hybridbauteilen aus Keramik und Metall analog zu konventionellen LTCC-Bauteilen“. Die Sinterung des 3D-gedruckten Grünlings muss technologiebedingt unter 900 °C erfolgen, um die Materialpaarung – in diesem Fall mit Silber – zu ermöglichen. Die Entwicklung dieser Technologie nebst dazugehöriger Materialentwicklung unter stetiger Optimierung ist

Gegenstand der laufenden Arbeiten. Hierbei eröffnet sich die Möglichkeit der Schaffung neuartiger Strukturen, die derzeit mittels konventioneller LTCC-Technologie nicht herstellbar sind. Die erforderliche mechanische und elektrische Charakterisierung der gedruckten Hybridkörper ist Gegenstand der Untersuchungen. Analog zur LTCC-Technologie wurde auf die Möglichkeit von nachträglichen Aufbau- und Verbindungstechnologien (Chips kleben und bonden, SMD-Lötmontage) eingegangen. Projektziel ist die Herstellung eines 3D-druckbaren elektrischen Schaltungsdemonstrators – bestehend aus einer Glaskeramik mit innenliegender Metallstruktur.

Alternative zum Spritzguss

Dr. Philipp Schlaumann, 3d-figo GmbH, Salzkotten, erläuterte das Fused-Feedstocks-Deposition (FDD)-Verfahren, das sich als Alternative zur Schmelzschicht-Technologie anbietet. Der grundlegende Ansatz ist die Nutzung von Mischungen keramischer oder metallischer Pulver mit Thermoplasten, wie sie als Feedstock für Keramik- bzw. Metall-Spritzguss kommerziell verfügbar sind. Hierfür wurde ein geeigneter Druckkopf entwickelt, mit dem der Feedstock aufgeschmolzen, entlüftet und durch eine Düse gepresst wird. Somit lassen sich dreidimensionale Strukturen aus einzelnen Strängen und Schichten aufbauen. Die so erzeugten Grünlinge entsprechen im Wesentlichen den Grünlingen aus dem Spritzgussverfahren. Allerdings ermöglicht das FFD-Verfahren eine wesentlich größere gestalterische Freiheit, da beispielsweise nicht auf Entformbarkeit oder Hinterschnitte geachtet werden muss. Zudem sind geschlossene Hohlstrukturen und horizontale Bohrungen möglich. Neben den gestalterischen Vorteilen sprechen der geringe Materialeinsatz und die geringen Maschinenkosten für das Verfahren, sodass insbesondere für Einzelstücke, Kleinserien, Muster und Prototypen eine interessante Fertigungstechnologie zur Verfügung steht.

Materialdesign und Gestaltung

Prof. Dr. Markus Holzbach, Hochschule für Gestaltung, Offenbach, gab in seinem Vortrag

einen Einblick in die Arbeiten des Instituts für Materialdesign IMD, dessen Fokus auf dem materialbasierten Entwerfen liegt. Mit einem hohen Maß an Freiheit werden am IMD die unterschiedlichen Beschaffenheiten, Möglichkeiten und auch Unmöglichkeiten von Materialien ausgelotet. Der besondere Reiz liegt neben den analogen und digitalen Prozessen oft in disziplin- und werkstoffübergreifenden Kombinationen und im experimentellen Transfer von gewohnten in ungewohnte Zusammenhänge. Mit einem sehr offenen und experimentellen methodischen Verständnis werden am IMD Gestaltung und Materialisierung sowie Lehre und Forschung miteinander verknüpft. Gestaltung als Querschnittsdisziplin gewinnt derzeit zunehmend an Bedeutung für Industrie- und Fachbereiche, wie die Natur-, Material- oder Ingenieurwissenschaften. Anhand unterschiedlicher Beispiele wurde das Design-Potenzial der Additiven Fertigung mit keramischen Materialien aufgezeigt.

Bild 2 Elektrisch leitfähige Metallstruktur innerhalb einer elektrisch isolierenden Glaskeramik – hergestellt von WZR mittels pulverbettbasiertem 3D-Druck/Binder-Jetting unter Einsatz von 2 unterschiedlichen partikelgefüllten Tinten (© WZR)



Leichtbau

Die geometrische Freiheit Additiver Verfahren erlaubt es auch, komplexe Leichtbaustrukturen herzustellen. Thomas Reiher, Universität Paderborn, widmete sich den Grundlagen der Topologieoptimierung und der Anwendung bionischer Konzepte. In der Vergangenheit wurde bereits umfangreiche Grundlagenforschung zur Konstruktion von hochkomplexen last- und spannungsoptimierten Strukturbauteilen durchgeführt, zum Beispiel für Satelliten. Hierbei konnte eine einfach zu nutzende Methodik für einen effizienten Prozess zur Topologieoptimierung und Geometrierückführung sowie Vorbereitung für die Additive Fertigung entwickelt werden. Dieser Prozess wurde anhand von Beispielen aus der Raumfahrt, Automobiltechnik und dem Maschinenbau diskutiert. Die Möglichkeiten der Umsetzung von bionisch – beziehungsweise organisch – optimierten Strukturen konnten durch die Additive Fertigung erheblich erweitert werden.

Qualitätssicherung und Charakterisierung

Gerd Schwaderer, Volume Graphics GmbH, Heidelberg, stellte die Möglichkeiten zur Qualitätssicherung und Charakterisierung von Bauteilen mittels 3D-Scan sowie 3D-Computertomographie vor. Bei einem Soll-/Ist-Vergleich werden die Scan-Daten in einem Programm entweder mit vorhandenen CAD-Daten oder mit den Daten eines weiteren eingescannten Objektes verglichen. Dieser Vergleich kann dann z. B. mittels einer Farbspektrumsanalyse dargestellt werden. Je nach Programm können aber auch Maß-Differenzen direkt am Objekt angezeigt werden. Ebenfalls gut erkennbar ist hierbei auch ein eventueller Verzug der gefertigten Geometrie zum Original. Einen Blick in das Innere eines Bauteils erlaubt die Computertomographie. Dadurch können Poren, Lagen und Partikelstrukturen analysiert und bewertet werden.

Ankündigung

Die nächste Tagung Keramik+ findet vom 13.–14. Juni 2018 im City Hotel Bonn/Meckenheim statt. Anmeldungen können ab sofort unter <https://wzr.cc/keramik+> vorgenommen werden.

Resümee

Abschließend fasste Prof. Dr. Wolfgang Kollenberg, WZR ceramic solutions GmbH, Rheinbach, die Vorträge und Diskussionen der Tagung zusammen und gab einen Ausblick in die Zukunft. Mit fortschreitender Entwicklung stellen sich die Verfahren der Additiven Keramikfertigung als eine wirtschaftliche Ergänzung für die industrielle Produktion dar. Für eine zunehmend steigende Zahl von Produkten zeigt sich der Trend, dass die Fertigung von uniformen Großserien zurückgeht – Individualisierungen werden zunehmend wichtiger. Dies führt dazu, dass Großserienprozesse zur Herstellung eines gleichartigen Bauteils nicht mehr lange laufen werden, sondern in immer kürzeren Intervallen Rüstzeiten anfallen. Hierdurch verteuern sich die Serienprozesse. Um das Potenzial der Additiven Fertigung zu nutzen, ist es notwendig, automatisierte Prozesse zu entwickeln bzw. aus anderen Bereichen zu adaptieren. Gleichzeitig wird die Schulung und Qualifizierung von Mitarbeitern – beginnend im Bereich der Konstruktion und der Auswahl des geeigneten Verfahrens über die Orientierung eines Bauteils im Bauraum bis hin zur Bewertung der Bauteileigenschaften – eine zentrale Aufgabe der nächsten Jahre.

Teilnehmer, Referenten und Veranstalter waren sich einig, dass diese Veranstaltung gelungen war und neue Perspektiven eröffnete. Neben den Fachvorträgen gab es genügend Raum und Gelegenheiten zu Gesprächen, um die Themen zu vertiefen. ◀

Kontakt: Prof. Wolfgang Kollenberg
(w.kollenberg@wzr.cc), Dr. Dieter Nikolay
(d.nikolay@wzr.cc), WZR ceramic solutions GmbH,
Lise-Meitner Str. 1, 53359 Rheinbach

