



Am 5.–6. Juli 2017 fand im City-Hotel Bonn/Meckenheim die von der WZR ceramic solutions GmbH organisierte Tagung **Keramik+** statt. Hochkarätige Referenten sorgten dafür, dass das Auditorium bis auf den letzten Platz besetzt war. Die Vorträge befassten sich nicht nur mit dem Stand der Technik unterschiedlicher Additiver Verfahren in der Keramik, sondern beleuchteten auch die vor- und nachgeschalteten Prozesse, sowie das Umfeld aus juristischer Sicht und Aspekte des Arbeitsschutzes. Auch bei der Abendveranstaltung bot sich für die Teilnehmer die Gelegenheit zum Netzwerken und Erfahrungsaustausch.

Dr. Dieter Nikolay, WZR ceramic solutions GmbH, Rheinbach, stellte das Verfahren des Pulverbett basierten 3D-Drucks vor 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 Silicium) 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.

Die für den pulverbettbasierten 3D-Druck notwendigen Maschinen hat **Dr. Ingo Ederer, voxeljet AG, Friedberg**, vorgestellt. Diese Maschinen 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 werden die gewünschten Geometrien entnommen. 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.

Das Potenzial des Direkten 3D-Drucks (Direct Inkjet Printing) stellte **Prof. Dr. Rainer Telle (RWTH Aachen)** vor. 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 entstehen keramische Körper, deren Eigenschaften denen von kaltisostatisch gepresstem Material entsprechen. Das Verfahren erlaubt Gradientendruck, Graustufendruck und überlappenden Mehrphasendruck analog zum überlappenden Absetzen von Farbtropfen.

Den Einsatz der Laser-Stereolithographie in der Keramik stellte **Richard Gaignon, 3DCeram, Limoges (Frankreich)** vor. Für dieses Verfahren muss eine Paste, die Fotopolymere und keramische Partikel enthält, bereitgestellt werden. Die lokale Verfestigung 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 entwickelt 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 in der von 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 Bauteil mit diesem Verfahren berichtete **Axel Hilgenberg, Steinbach AG, Detmold**. Da Steinbach auch im Keramik-Spritzguss aktiv ist, bietet sich nun die Möglichkeit Bauteile vorab in kleiner Stückzahl zur Bemusterung bereitzustellen und dadurch 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 Postprocessing

können auch kleine und mittlere Serien kosteneffektiv gefertigt werden.

Für die industrielle Anwendung gilt es auch Regeln für den Arbeitsschutz vorzuhalten. **Renate Beisser, Institut für Arbeitsschutz der Deutschen Gesetzlichen Unfallversicherung**, Sankt Augustin, fasst in ihrem Vortrag den derzeitigen Stand der Arbeiten 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 noch keine valide Studie, die Aussagen hinsichtlich der Emission bei Additiven Fertigungsverfahren am Arbeitsplatz trifft. Aus diesem Grund ist es mit Blick auf Sicherheit und Gesundheit erforderlich, die Entwicklung von Seiten der Unfallversicherungsträger zu begleiten und auch entsprechende Messungen an Arbeitsplätzen durchzuführen. Sie lud zur Teilnahme an ihrer Studie ein, um den Aspekt des Arbeitsschutzes von Additiven Verfahren auch auf den Bereich der Keramik auszudehnen.

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.

Jean Haeffs, VDI-Gesellschaft Produktion und Logistik, Düsseldorf, stellte die Arbeit des VDI, insbesondere die Erstellung der Richtlinienreihe VDI 3405 Additive Fertigungsverfahren, vor. In 7 VDI-Fachausschüssen mit insgesamt rund 175 ehrenamtlichen Mitarbeitern befasst man sich mit unterschiedlichen Aspekten von AM. Dabei werden Themen von technologischen Detailfragen (Pulverqualifizierung) bis hin zum gesellschaftlichen Umfeld (Arbeitssicherheit und Recht) behandelt. Die bisher erschienenen 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 in einem Gremium des VDI, auch für die keramischen Verfahren technische Regeln zum anerkannten Stand der Technik zu entwerfen. Die Teilnehmer der Tagung und alle Interessierten sind eingeladen an diesem Prozess mitzuarbeiten.

Die Digitalisierung der Zahnmedizin und Zahntechnik ist in

vollem Gange. **Josef Schweiger, LMU München**, stellte in seinem Vortrag das Potenzial der Additiven Fertigung für dentale Anwendungen vor. 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 Bohrshablonen 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. Zahnstrukturdatenbanken, 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-3D-Druck ermöglicht die Herstellung von Bauteilen mit örtlich-variablen mechanischen oder optischen Eigenschaften, die mit lediglich einem Material nicht herstellbar sind. Hierfür müssen unterschiedliche Druckmaterialien in hoher Auflösung nebeneinander platziert werden und es muss bekannt sein, welche Auswirkungen eine bestimmte Anordnung dieser Druckmaterialien auf die Werkstoffeigenschaften des Bauteils hat (Druckprozessmodell). **Dr. Philipp Urban, Fraunhofer IGD**, Darmstadt, stellte in seinem Vortrag den am Fraunhofer IGD entwickelten universellen 3D-Druckertreiber „Cuttlefish“ zur Herstellung von Multimaterial-Bauteilen mit definierten Eigenschaften vor. 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 Streamingarchitektur müssen lediglich eine kleine und konstante Anzahl von Voxelschichten zu jedem Zeitpunkt des Druckprozesses im Speicher gehalten werden, was es ermöglicht, auch große Objekte mit hunderten Milliarden Voxeln zu drucken und den Druckprozess schnell starten zu können, ohne das gesamte Objekt vorberechnen zu müssen.

Alexander Schulz, TU Ilmenau, stellte in seinem Vortrag laufende Arbeiten aus einem gemeinsamen Projekt mit der WZR ceramic solutions GmbH vor: 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 mit Silber zu ermöglichen. Die Entwicklung dieser Technologie nebst dazugehöriger Materialentwicklung unter stetiger Optimierung ist Gegenstand laufender Arbeiten, die vorgestellt wurden. Hierbei eröffnet sich die Möglichkeit der Schaffung neuartiger, derzeit mittels konventioneller LTCC-Technologie nicht herstellbarer Strukturen. Die erforderliche mechanische und elektrische Charakterisierung der gedruckten Hybridkörper ist Gegenstand

laufender Untersuchungen, deren Ergebnisse präsentiert wurden. 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 Schaltdemonstrators bestehend aus einer Glaskeramik mit innenliegender Metallstruktur.

Als alternatives „Schmelzschicht-Verfahren“ stellte **Dr. Philipp Schlautmann, 3d-figo GmbH**, Salzkotten, das Fused-Feedstocks-Deposition-Verfahren vor. 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. Dazu wurde ein geeigneter Druckkopf entwickelt, mit dem der Feedstock aufgeschmolzen, entlüftet und durch eine Düse gepresst wird. So 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 nicht auf Entformbarkeit, Hinterschnitte und dergleichen geachtet werden muss. Auch sind geschlossene Hohlstrukturen und horizontale Bohrungen möglich. Neben den gestalterischen Vorteilen sprechen der geringe Materialeinsatz und die geringen Maschinenkosten für das Verfahren, so dass insbesondere für Einzelstücke, Kleinserien, Muster und Prototypen ein interessantes Fertigungsverfahren zur Verfügung steht.

Prof. Dr. Markus Holzbach, Hochschule für Gestaltung Offenbach, gab in seinem Vortrag einen Einblick in die Arbeiten des Instituts für Materialdesign IMD, das den Fokus auf das materialbasierte Entwerfen legt. 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. In einem sehr offenen und experimentellen methodischen Verständnis, werden am IMD Gestaltung und Materialisierung sowie Lehre und Forschung miteinander verknüpft. Gestaltung als Querschnittsdisziplin schließt heute unmittelbar an Bereiche wie Natur-, Material- oder Ingenieurwissenschaften an. An Hand unterschiedlicher Beispiele wurde auch das Potenzial der Additiven Fertigung mit Keramik im Design präsentiert.

Die geometrische Freiheit Additiver Verfahren erlaubt es auch komplexe Leichtbaustrukturen herzustellen. **Thomas Reiher, Universität Paderborn**, stellte in seinem Vortrag Grundlagen der Topologieoptimierung und die Anwendung bionischer Konzepte vor. 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 an Beispielen aus den Branchen Raumfahrt, Automobiltechnik und Maschinenbau diskutiert. Die Möglichkeiten der Umsetzung von „bionisch“, beziehungsweise organisch optimierten Strukturen konnten durch die Additive Fertigung erheblich erweitert werden.

Die Möglichkeiten zur Qualitätssicherung und Charakterisierung von Bauteilen mittels 3D-Scannen und 3D-Computertomographie stellte **Gerd Schwaderer, Volume Graphics GmbH**, Heidelberg, 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 Farbspektrums-Analyse 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.

Mit seinem abschließenden Vortrag 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, sondern in immer kürzeren Intervallen Rüstzeiten anfallen. Hierdurch verteuern sich diese Serienprozesse. Im Rahmen einer industriellen Fertigung rücken die vor- und nachgeschalteten Prozesse zunehmend in den Fokus, ebenso die prozessbegleitende Qualitätssicherung. Um das Potenzial der Additiven Fertigung zu nutzen, ist es notwendig automatisierte Prozesse zu entwickeln, bzw. aus anderen Bereichen zu adaptieren. Daneben wird die Schulung von Mitarbeitern – beginnend bei der Konstruktion, 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 es eine gelungene Tagung war. Neben den unterschiedlichsten Fachvorträgen blieb genügend Raum um mit den Referenten die Themen zu vertiefen und untereinander das Gespräch zu finden. Hierzu trug auch die Abendveranstaltung bei, die von nahezu allen Teilnehmern und Referenten gerne angenommen wurde.

Der Termin für die nächste Tagung **Keramik+** steht mittlerweile fest: WZR wird die Tagung wiederum im City Hotel Bonn/Meckenheim organisieren, als Termin können sich Interessierte bereits den 13.–14. Juni 2018 vormerken.