

ADDITIVE FERTIGUNG VON KERAMIK

Dr. Tassilo Moritz, Dr. Uwe Partsch, Dr. Steffen Ziesche, Dipl.-Ing. Uwe Scheithauer, M. Sc. Matthias Ahlhelm, Dipl.-Ing. Eric Schwarzer, Dr. Hans-Jürgen Richter

Die additive Fertigung ist für Kunststoffe und Metalle ein etablierter Prozess und wird vielfältig industriell umgesetzt. Auch für Keramiken gewinnen additive Fertigungsverfahren, das heißt, Fertigungsverfahren, bei denen das Werkstück element- oder schichtweise aufgebaut wird, immer mehr an Bedeutung, insbesondere auch unter dem Aspekt der Ressourcenschonung. Sie stehen gleichwohl erst am Anfang der technischen Umsetzung. Das derzeitige Design von keramischen Bauteilen wird bislang in erster Linie durch die Möglichkeiten der konventionellen Formgebung bestimmt. Additive Fertigungsverfahren gestatten Bauteilgeometrien herzustellen, die mit herkömmlichen keramischen Formgebungsverfahren nicht realisierbar sind, wie z. B. Komponenten mit komplexen inneren Kanälen. Ein wesentlicher Vorteil additiver Fertigungsverfahren besteht weiterhin darin, dass es sich um werkzeugfreie Formgebungsmethoden handelt, womit auch individualisierte Einzelstücke oder Kleinserien ohne hohe Werkzeugkosten effizient gefertigt werden können. Neben der geometrischen Vielfalt bieten additive Verfahren auch die prinzipielle Möglichkeit, Bauteile mit orts aufgelöstem Eigenschaftsprofil herzustellen, indem die Werkstoffzusammensetzung an jedem beliebigen Punkt des Bauteils variiert wird. Damit werden neue, geometrisch und funktional komplexe Keramikkomponenten als Individualteil oder Kleinserie, für technische und medizinische Anwendungen verfügbar sein.

Suspensionsbasierte additive Verfahren

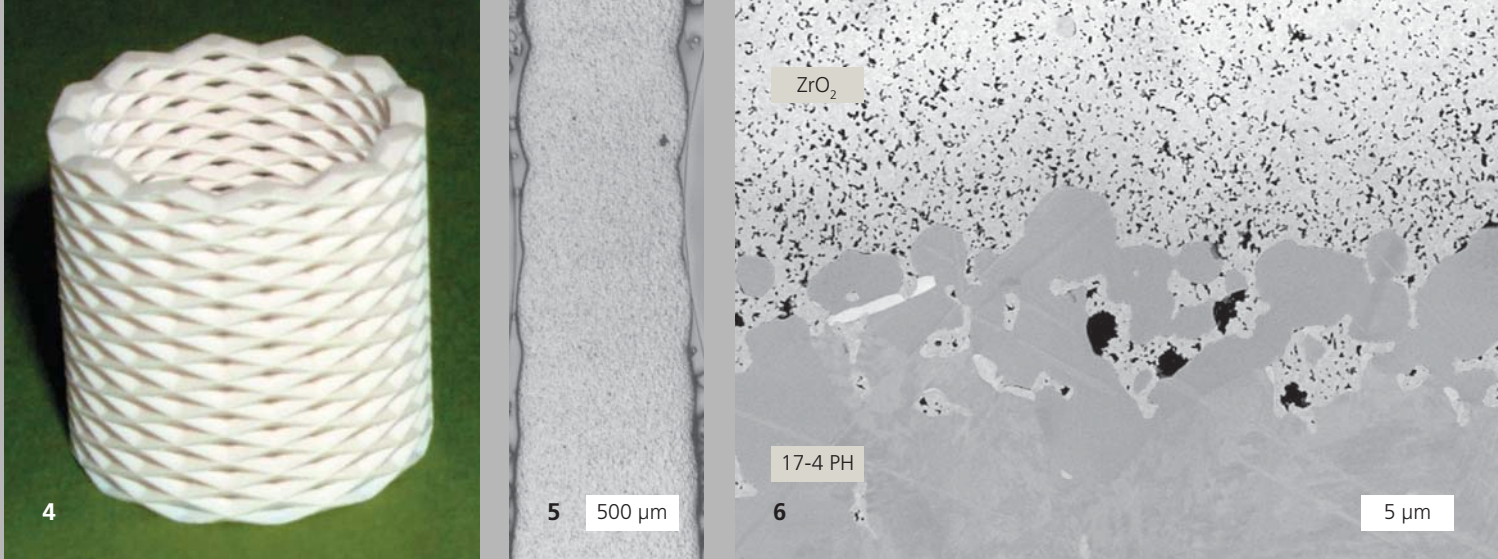
Um dichte Werkstoffgefüge mit hohem Eigenschaftsniveau zu erhalten, müssen additive Fertigungsverfahren genutzt werden, die Suspensionen oder Pasten verarbeiten, damit das Keramikpulver homogen dispergiert und mit möglichst hohem Volumenanteil vorliegt. Für die Herstellung dichter Keramikbauteile mit vergleichbaren Werkstoffeigenschaften wie der konventionell gefertigter Bauteile ist das DLP-Verfahren (direct light processing) sehr erfolgversprechend. Das Keramikpulver wird in einem photopolymerisierbaren, organischen Bindersystem ho-

mogen dispergiert. Durch selektive Maskenbelichtung (mittels Mikrospiegel) dieser Suspension entsteht der Keramik-Grünkörper entsprechend eines CAD-Datenmodells.

Lithography-based Ceramic Manufacturing (LCM)

Das DLP-Prinzip wird durch die Anlage CerFab7500 (Lithoz GmbH, Wien), die am IKTS genutzt wird, umgesetzt. Für dieses speziell für die additive Fertigung von Keramik entwickelte Verfahren hat sich der Name Lithography-based Ceramic Manufacturing (LCM) etabliert. In der genannten Anlage kann die Schichthöhe zwischen 25 µm und 100 µm variiert werden, die laterale Auflösung beträgt 40 µm. Analog zur Stereolithografie erfolgt mit Licht einer definierten Wellenlänge eine radikalische Polymerisation des Bindersystems, wodurch die Suspension verfestigt wird. Die Initiierung der Polymerisation erfolgt selektiv mittels Bestrahlung mit blauem Licht über das DLP-Modul, wodurch alle zu vernetzenden Bereiche einer Ebene gleichzeitig belichtet werden. Das erhöht die Produktivität gegenüber einer punktförmigen Bestrahlung mit UV-Laserstrahl, wie es beispielweise bei der Stereolithografie erfolgt.

Die verwendeten Suspensionen weisen hohe Feststoffvolumenanteile auf, womit Gründichten bis 55 % erreichbar sind. Da die Bauteile über Kopf gefertigt werden, die aktuell gefertigte Schicht also immer die unterste im Vorratsbehälter ist, kann mit sehr wenig Suspensionsvolumen gearbeitet werden, was wiederum für sehr kostenintensive Materialien von großer Bedeutung ist. Nach der Aushärtung der untersten Schicht am Wannenboden wird das Bauteil um einen der Schichtdicke entsprechenden Betrag angehoben, neue Suspension aufgetragen und die nächste Schicht belichtet. Momentan können Suspensionen für drei verschiedene Keramikwerkstoffe (Al_2O_3 , ZrO_2 und Tricalciumphosphat) auf der LCM-Anlage verarbeitet werden. Die erreichbaren Dichten nach konventionell-thermischem Processing (Entbindern / Sintern) der additiv hergestellten Grünkörper betragen für Al_2O_3 mind. 99,4 % der theoretischen



WERKSTOFFE UND VERFAHREN

Dichte und für ZrO_2 mind. 99,0 %. Suspensionen für andere Keramikwerkstoffe können auf Kundenwunsch entwickelt werden. Bei der Anwendung photopolymerisierbarer Bindersysteme dürfen die Keramikpartikel in der Suspension die für die Photopolymerisation genutzte Strahlung nicht oder nur wenig absorbieren, weil sonst die Initiierung der Polymerisation verhindert wird. Deshalb sind dunkle Pulver mit dem LCM-Verfahren nicht oder nur eingeschränkt (je nach Absorptionseigenschaften) verarbeitbar.

3D-Thermoplastdruck (T3DP)

Mit dem 3D-Thermoplastdruck wird am IKTS ein neuartiger Ansatz verfolgt, der z. B. die oben genannten Einschränkungen zur Verarbeitbarkeit bestimmter Pulver nicht hat. Der Verfahrensansatz beruht auf der Verwendung von partikelgefüllten thermoplastischen Massen mit niedriger Schmelztemperatur (80–100 °C). Die Viskosität der Masse ist dabei relativ niedrig verglichen mit reinen Thermoplast-Materialien, die für das herkömmliche Fused Deposition Modeling (FDM) Anwendung finden, wie die Viskositätskurven von ZrO_2 -Massen zeigen. Bei diesem Verfahren erfolgt der Auftrag des Materials nicht vollflächig, sondern nur an den Stellen, an denen es benötigt wird. Eine heizbare Dispenseinheit, die in allen drei Raumrichtungen angesteuert wird, bewegt sich über eine fest stehende Plattform, auf der eine Metall- oder Glasplatte als Träger für das Keramikmaterial fixiert ist. Die thermoplastische Masse wird zur

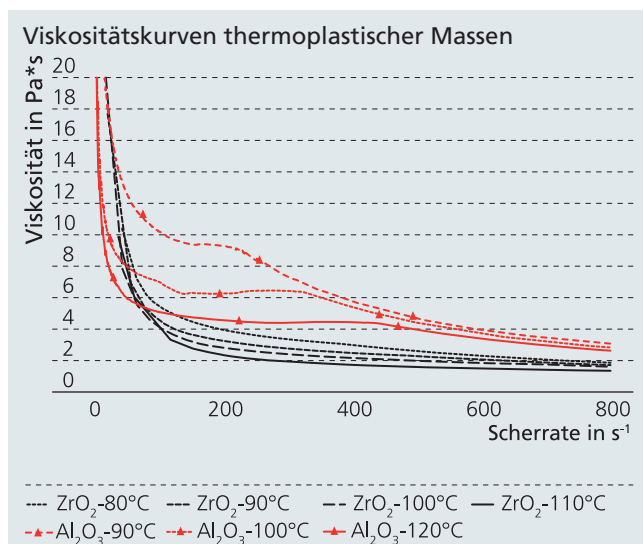
Verarbeitung durch Wärmezufuhr in einen fließfähigen Zustand überführt und erstarrt sofort wieder bei Abkühlung. Dadurch erfolgt die Verfestigung der Masse nahezu unabhängig von den physikalischen Eigenschaften der verwendeten Pulver. Es erfolgt eine sehr gute Anbindung der einzelnen Lagen untereinander (Bild 5). Für diese Methode entwickelte thermoplastische Al_2O_3 -Massen, haben einen Pulveranteil ($d_{50} = 1,5 \mu m$) von 67 Vol.-%, bei ZrO_2 -Massen liegt der Pulveranteil ($d_{50} = 0,3 \mu m$) bei 45 Vol.-%. Für beide Werkstoffe sind mittels T3DP additiv Proben hergestellt, entbindert und gesintert worden, wobei für Al_2O_3 97,3 % und für ZrO_2 98 % der theoretischen Dichte erreicht worden sind. Es können mehrere Vorratsbehälter und Dispenseinheiten verwendet werden und somit unterschiedlichen Materialien in einem Bauteil abgeschieden werden. Damit sind mehrkomponentige und/oder gradierte Bauteile herstellbar. Die Anpassung des Schwindungsverhaltens der verschiedenen Komponenten erfolgt durch Einstellung des Pulvervolumenanteils in der Masse sowie durch Anpassung der Partikelgrößenverteilungen und gegebenenfalls Modifizierung der Partikelform. Für einen Werkstoffverbund ZrO_2 /Stahl sind erste Proben hergestellt worden, die die prinzipielle Anwendung des 3D-Thermoplastdruck zur Herstellung von mehrkomponentigen Bauteilen zeigen.

Pulverbasierte additive Verfahren

Bei diesen Verfahren wird eine Pulverschicht mit definierter Höhe durch eine Rakel aufgebracht und selektiv verfestigt.

3D-Pulverdruck

Das bekannteste Verfahren ist der 3D-Pulverdruck. Über einen Druckkopf wird eine Flüssigkeit auf das Pulverbett dosiert und



- 1 LCM-Verfahren: Herstellung eines Demonstratorteils.
- 2 LCM-Verfahren: Al_2O_3 -Wabenstruktur.
- 3 CT-Rekonstruktion (Detailbild) der Mischerstruktur aus Bild 2.
- 4 LCM-Verfahren: Offenzellige Struktur aus Al_2O_3 .
- 5 3D-Thermoplastdruck: Al_2O_3 -Schichten.
- 6 3D-Thermoplastdruck: Grenzfläche ZrO_2 -Stahl.



WERKSTOFFE UND VERFAHREN

durch die Wechselwirkung zwischen Flüssigkeit, Pulver und Binder, der entweder in der Flüssigkeit oder im Pulver enthalten ist, die Pulverschicht punktuell verfestigt. Die Dichte der gedruckten Grünkörper ist verfahrensbedingt relativ gering. Somit sind über 3D-Pulverdruck keine Bauteile mit dichtem Sintergefüge herstellbar. Das Verfahren wird z. B. für die Herstellung poröser, bioaktiver Keramikstrukturen aus Hydroxylapatit eingesetzt. Ebenso sind die Herstellung von Bauteilen für Filtrationsanwendungen und Katalysatorträgerstrukturen oder die Herstellung komplexer Keramikkerne / -formen für den Feinguss möglich. Am IKTS wird derzeit ein handelsüblicher 3D-Pulverdrucker mit einer Bauraumgröße von 350 x 250 x 200 mm³ und einer minimale Schichthöhe von 87 µm genutzt.

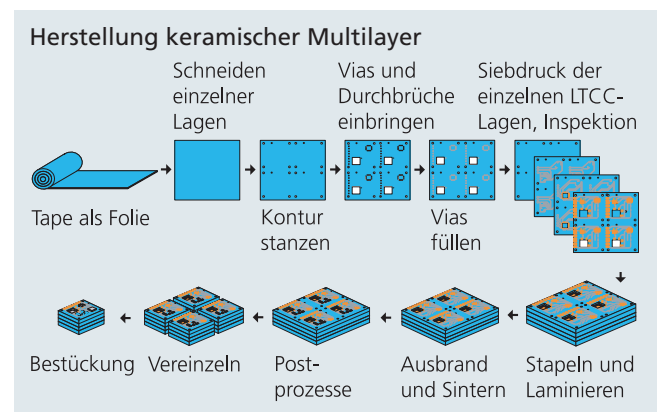
Selektives Lasersintern

Auch beim Lasersintern wird eine Pulverschicht mittels Rakel aufgebracht. Die selektive Verfestigung mit dem Laserstrahl kann zu einem dichten Werkstoffgefüge führen, wenn das Keramikpulver eine flüssigphasenbildende Komponente enthält (z. B. Al₂O₃ / SiO₂-Mischung). Daneben kann das Lasersintern, wie alle anderen additiven Verfahren, auch nur für die Formgebung des Keramikgrünkörpers genutzt werden. So wurden mit einer handelsüblichen Metalllasersinteranlage (CO₂-Laser) komplexe SiC-Bauteile hergestellt und mit den üblichen thermischen Nachbehandlungsschritten in SiSiC überführt. Die Werkstoffeigenschaften liegen auf demselben Niveau wie die mit konventioneller Technologie (Pressformgebung, Grün- und Finishbearbeitung) erreichbaren.

Laminated Object Manufacturing (LOM)

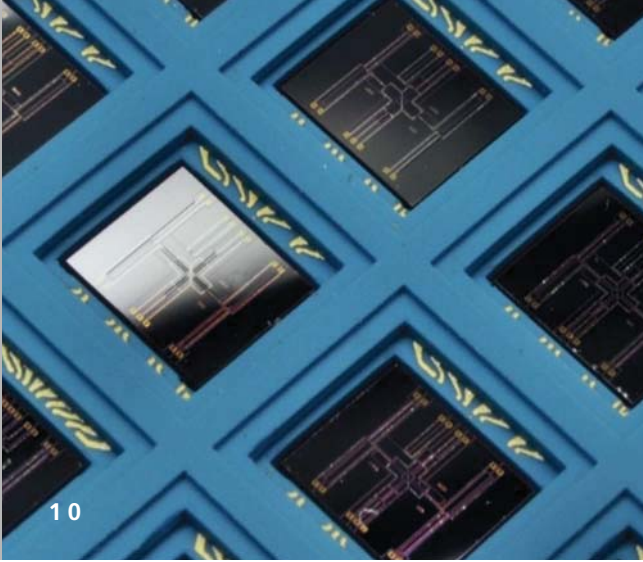
Eine am Fraunhofer IKTS seit 15 Jahren etablierte Technologie der Additiven Fertigung ist die keramische Multilayertechnologie bzw. Laminated Object Manufacturing (LOM). LOM eröffnet dem Anwender neben der technologieinhärenten Fähigkeit 3D-Komponenten aufzubauen, die Möglichkeit zur lagenweisen Integration weiterer Materialien und damit zur Einbettung verschiedener Funktionalitäten (z. B. Leiterbahnen, passive Bauelemente (R, L, C), Heizer und Sensoren). Der Technologiebezeichnung entsprechend werden zunächst keramische Folien mittels verschiedener Schlickergießtechnologien ein- oder mehrschichtig hergestellt und im Anschluss Layer für Layer strukturiert sowie z. B. mittels Sieb- und Schablonendruck

funktioneller Pasten mit den notwendigen Strukturen versehen.

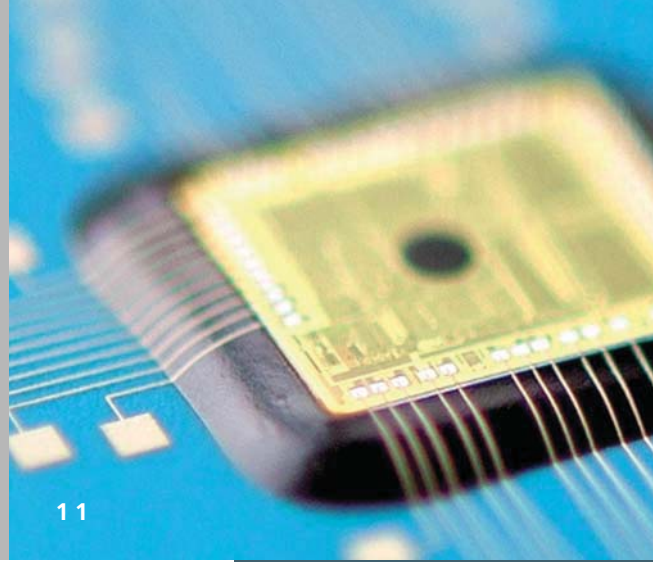


Durch Übereinanderschichten und Verpressen (Laminieren) der so hergestellten Einzelschichten wird die gewünschte 3D-Komponente generiert. Aktuelle Anwendungsgebiete des LOM sind die Aufbau- und Verbindungstechnik der Elektronik (keramische und glaskeramische Mehrlagenverdrahtungsträger für Hochfrequenz- und Leistungsanwendungen), die Herstellung keramischer Bauelemente (Multilayerkondensatoren und -spulen), die Aktorik (piezoelektrische Stapelaktoren) sowie Sensorik (diverse physikalische und chemische Sensoren) und Medizin- und Biotechnologie (µ-fluidische Komponenten). Das Portfolio an für LOM zur Verfügung stehenden Materialien ist sowohl die keramischen Basisfolien (LTCC – Low Temperature Cofired Ceramics, HTCC – High Temperature Cofired Ceramics), als auch die nutzbaren Funktionspasten betreffend, sehr vielfältig.

Das Fraunhofer IKTS deckt hierfür die gesamte Wertschöpfungskette vom Material über simulationsbasierte Komponentenauslegung, die vollständige Technologielinie zur Herstellung bis hin zur Funktionsüberprüfung und Systemintegration ab. Aktuelle Entwicklungsschwerpunkte bei LOM-basierten Komponenten sind deren weitere Miniaturisierung z. T. für MEMS-Packages auf Wafer-Level (Bild 10), welche die Erhöhung der Strukturauflösung der verwendeten Fertigungstechnologien erforderlich macht, die forcierte Integration sowie der 3D-Druck passiver Bauelemente und die Integration nicht-elektrischer Funktionen im Mehrlagenaufbau (z. B. Kammern, Kanäle und Membranen unter Nutzung von Opfermaterialien).



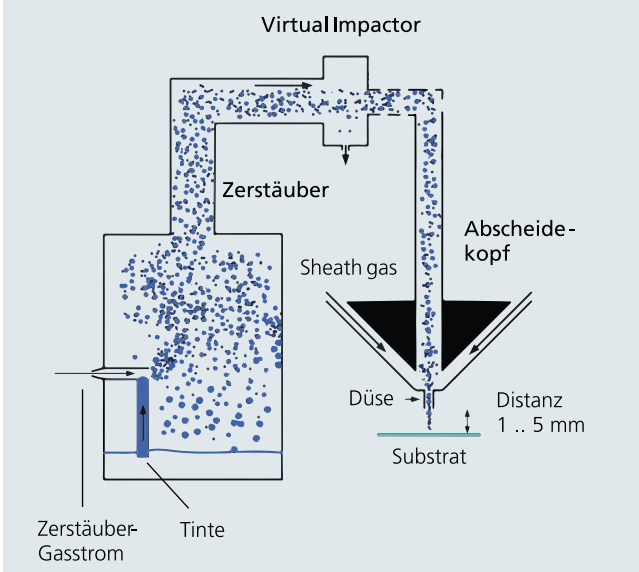
10



11

WERKSTOFFE UND VERFAHREN

Prinzipskizze des Aerosol-Jet-Verfahrens



Die Kombination des Laminated Object Manufacturing mit weiteren am IKTS etablierten Formgebungstechnologien (z. B. Ceramic Injection Molding – CIM) eröffnet zusätzliche Möglichkeiten zur Herstellung komplexer, funktionsintegrierter, miniaturisierter und kundenspezifischer keramischer 3D-Komponenten.

Schlüsseltechnologien für das Funktionalisieren derartiger 3D-Komponenten sind digitale Druckverfahren, mit deren Hilfe Freiformoberflächen hochauflösend mit den benötigten funktionellen Strukturen versehen werden können. Am IKTS sind hierfür verschiedene Mikroextrusions- und Dispensverfahren sowie die Ink- und Aerosol-Jet-Technologie verfügbar.

Die Aerosol-Jet-Technologie ist in besonderer Weise geeignet, 3D oder freigeformte Substrate mit funktionellen Strukturen (Leiterbahnen, R, L, C, Sensoren usw.) zu beschichten. Basis hierfür ist die Verdüsung, d.h. Aerosolisierung partikelfreier bzw. -haltiger Tinten im Mikromaßstab. Der so generierte Tröpfchenstrom wird am Druckkopf nochmals fokussiert (Durchmesser < 10 µm). Durch die vergleichsweise große Tailenlänge von 1–3 mm ist z. B. möglich, geometrische Stufen zu überdrucken, Funktionsstrukturen in Kavitäten zu schreiben oder auch Fasern zu beschichten

Zusammenfassung und Ausblick

Additive Fertigungsmethoden gestatten eine neue konstruktive Vielfalt keramischer Bauteile. Durch die werkzeugfreie Arbeitsweise und den schichtweisen Aufbau der Komponenten arbeiten diese Verfahren besonders kostengünstig und ressourcenschonend sowie nahezu abfallfrei. Damit rücken diese Methoden insbesondere für individualisierte Bauteile, Einzelteile oder Kleinserien in den Interessensfokus. Mögliche Anwendungen überstreichen dabei eine enorme Bandbreite von medizinischen, patientenspezifischen Instrumenten oder Implantaten über Spezialwerkzeuge bis hin zu individuellen Schmuckstücken oder Designartikeln. Der Trend der additiven Fertigung auf dem Gebiet der Keramik geht in Richtung der Erweiterung des Materialportfolios, in Richtung größerer Bauteildimensionen durch Vergrößerung der Bauräume der Fertigungsanlagen sowie in Richtung verbesserter Bauteileigenschaften, wie verbesserter Oberflächenqualität oder gesteigerter mechanischer Eigenschaften. Für eine zunehmende Funktionsintegration von keramischen Bauteilen werden Multimaterallösungen zur Eigenschaftskombination eine zunehmende Rolle spielen.

Mit angepassten, werkstofflichen und technologischen Entwicklungen wird es möglich sein, das hohe Innovationspotential der additiven Fertigung auch für die Keramik zu erschließen und so die industrielle Umsetzung voranzutreiben. Das IKTS ist dabei ein kompetenter, innovativer Forschungspartner sowohl für Keramikhersteller und -anwender als auch für Entwickler und Hersteller von Anlagen für die additive Fertigung.

7 LCM-Verfahren: Al_2O_3 -Mischerstruktur.

8 3D-Pulverdruck: Demonstratorbauteil (Felsenbein) aus Hydroxylapatit, Datensatz von Phacon GmbH.

9 Selektives Lasersintern: Detailaufnahme SiSiC-Werkzeugeinsatz.

10 MEMS-Packages auf Wafer-Level.

11 Chipkontaktierung mittels Aerosol-druck.