



Fraunhofer

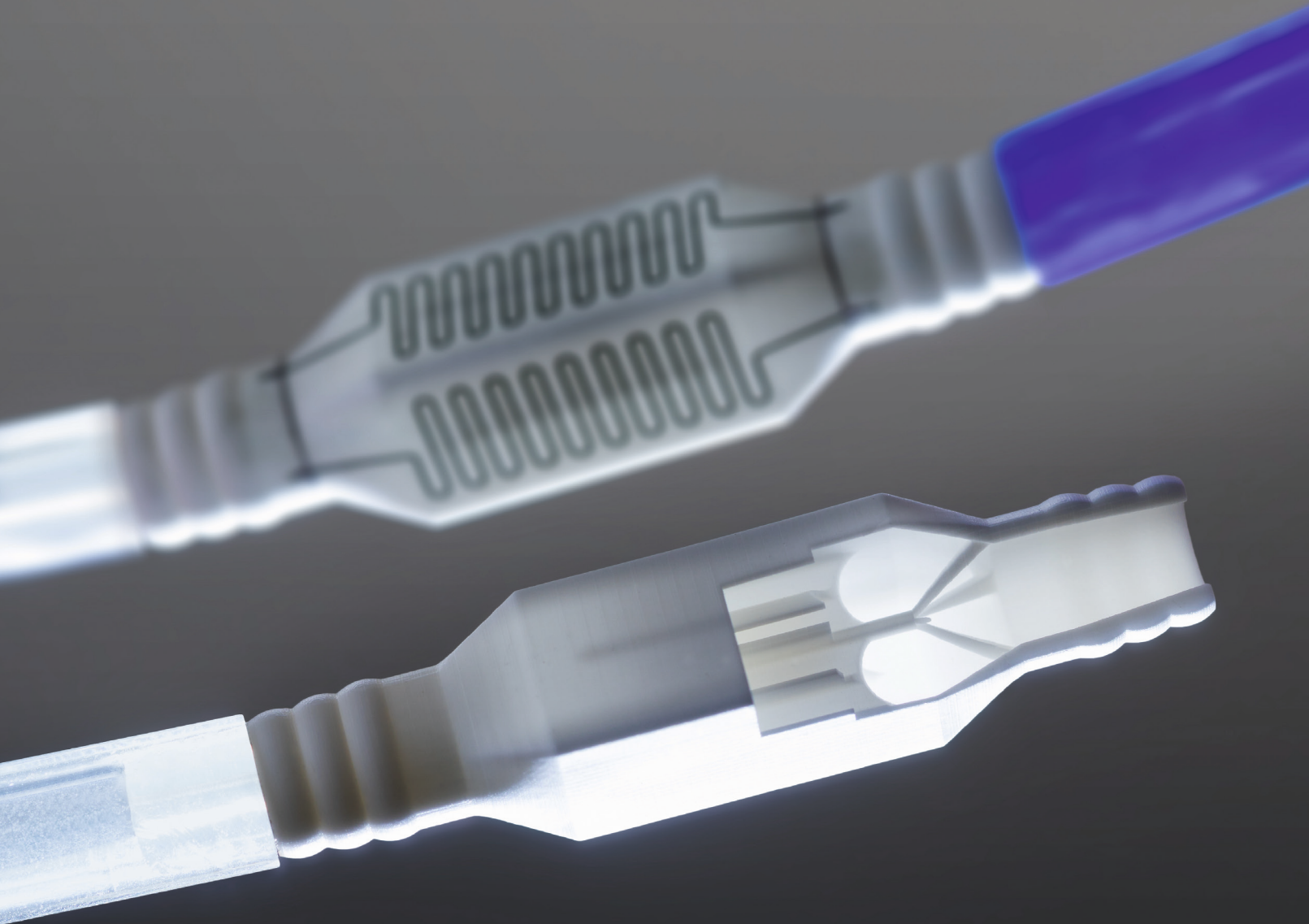
IKTS

FRAUNHOFER-INSTITUT FÜR KERAMISCHE TECHNOLOGIEN UND SYSTEME IKTS

INDUSTRIELÖSUNGEN

ADDITIVE FERTIGUNG

FERTIGUNG | FUNKTIONALISIERUNG | QUALITÄTSSICHERUNG



1	Überblick
2	Fertigung
6	Funktionalisierung
10	Qualitätssicherung
13	Neue Perspektiven in der Anwendung

TITELBILD *Additiv gefertigtes*

*Heizelement mit aufgedruckter
Leiterbahn.*

1 *Lithographiebasierte
Keramikfertigung für Mischer-
strukturen.*



1

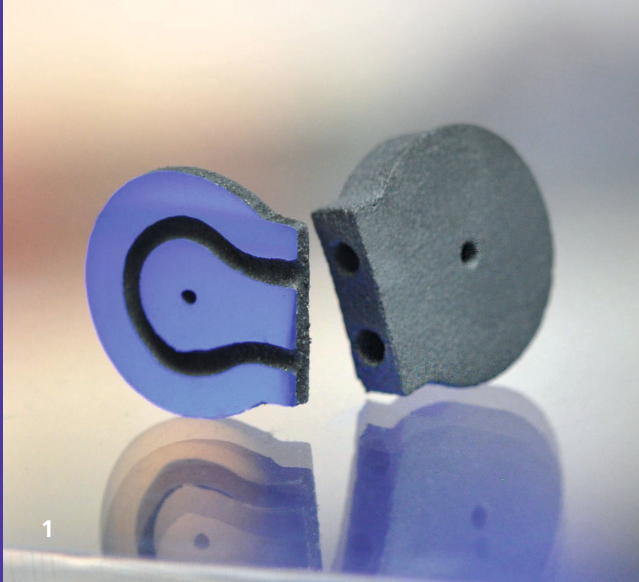
ADDITIVE FERTIGUNG

Unter Additiver Fertigung werden alle Verfahren verstanden, bei denen zur Erzeugung eines Bauteils das Material punkt-, linien- oder schichtweise hinzugefügt wird. Dieses Bauprinzip ermöglicht es, geometrisch komplexe und funktionalisierte Strukturen herzustellen, die sich mit konventionellen Fertigungsverfahren nicht oder nur aufwendig realisieren lassen. Aus dem Bauprinzip resultieren sehr rohstoffsparende Verfahren, da nur das Material verbraucht wird, das tatsächlich benötigt wird. Ein weiterer Vorteil besteht darin, dass es sich um werkzeugfreie Formgebungsmethoden handelt, womit auch individualisierte Einzelstücke oder Kleinserien ohne hohe Werkzeugkosten effizient gefertigt werden können.

Bereits seit den 1990er Jahren nutzt und entwickelt das Fraunhofer IKTS additive Fertigungsverfahren für keramische Bauteile und gehörte 1998 zu den Gründungsmitgliedern der Fraunhofer-Allianz Generative Fertigung. Heute steht das Fraunhofer IKTS für Komplettlösungen im Bereich der Additiven Fertigung von der Pulver- und Masseentwicklung, über die Auswahl der geeigneten Fertigungsmethode bis hin zur Funktionalisierung und Qualitätskontrolle neuartiger Bauteile und Systeme:

- Pulverbettbasierte additive Fertigungsverfahren: 3D-Pulverdruck, Selektives Lasersintern (SLS)
- Suspensionsbasierte additive Fertigungsverfahren: Lithographiebasierte Keramikfertigung (LCM), Laminated Object Manufacturing (LOM), Thermoplastischer 3D-Druck (T3DP), Fused Filament Fabrication (FFF)
- Funktionalisierung durch Applikationsverfahren: Inkjet-Druck, Aerosol-Druck, Siebdruck, Dispense-Jetting, Dioden-Lasersintern
- Zerstörungsfreie Prüfmethode zur Inline-Prozesskontrolle: Laser-Speckle-Photometrie (LSP), Optische Kohärenztomographie (OCT), Standardanalysemethoden: Ultraschallprüfung, Röntgen-Computertomographie, u. a.





FERTIGUNG

Generell lässt sich die Vielfalt additiver Fertigungsverfahren hinsichtlich der Aufbereitung der verwendeten Ausgangsmaterialien in pulverbasierte und suspensionsbasierte Methoden unterteilen.

Pulverbasierte Methoden gehen zumeist von einem Pulverbett aus, in dem sich die Pulver als gut rieselfähige und rakelfähige Granulate befinden und von dem aus eine lagenweise Verfestigung der Pulverpackung erfolgt. Die entstehenden Bauteile zeichnen sich dabei größtenteils durch eine poröse Struktur aus.

Im Fall suspensionsbasierter Fertigungsverfahren liegen die Ausgangsmaterialien in Form von Suspensionen, Pasten, Tinten oder Halbzeugen wie thermoplastischen Feedstocks, Grünfolien oder Filamenten vor. Da die Partikelverteilung des Pulvers einer Suspension homogener ist als in einem Pulverbett, werden über diese Formgebungsmethoden höhere Grundichten erreicht, die dann im gesinterten Bauteil zu einem dichten Gefüge und einer geringeren Rauigkeit der Oberfläche führen.

Typisch für alle additiven Fertigungsverfahren im Bereich keramischer Bauteile ist, dass im Nachgang zum additiven Bauprozess Wärmebehandlungsschritte wie Entbinderung und Sinterung angeschlossen werden müssen, die dem Bauteil seine finalen keramischen Eigenschaften verleihen.



3D-PULVERDRUCK (BINDER JETTING)

Das bekannteste additive Fertigungsverfahren ist der 3D-Pulverdruck. Analog zu einem konventionellen Tintenstrahldrucker wird eine Flüssigkeit über einen Druckkopf auf die Pulverschicht dosiert, wobei durch die Wechselwirkung zwischen Flüssigkeit, Pulver und Binder eine punktuelle Verfestigung erfolgt. Der Binder kann dabei entweder in der Flüssigkeit oder direkt im Pulver enthalten sein. Die Dichte der gedruckten Grünkörper ist relativ gering. Somit bietet das Verfahren insbesondere da Vorteile, wo eine Porosität explizit gewünscht ist – beispielsweise bei bioaktiven Keramikstrukturen aus Hydroxylapatit. Ebenso lassen sich Bauteile für Filtrationsanwendungen und Katalysatorträgerstrukturen oder komplexe Keramikkerne und -formen für den Feinguss herstellen. Die Bandbreite der Materialien ist groß – neben oxidischen und nichtoxidischen Keramiken können Gläser, Hartmetalle und Metalle in Pulverform über 3D-Druck verarbeitet werden.

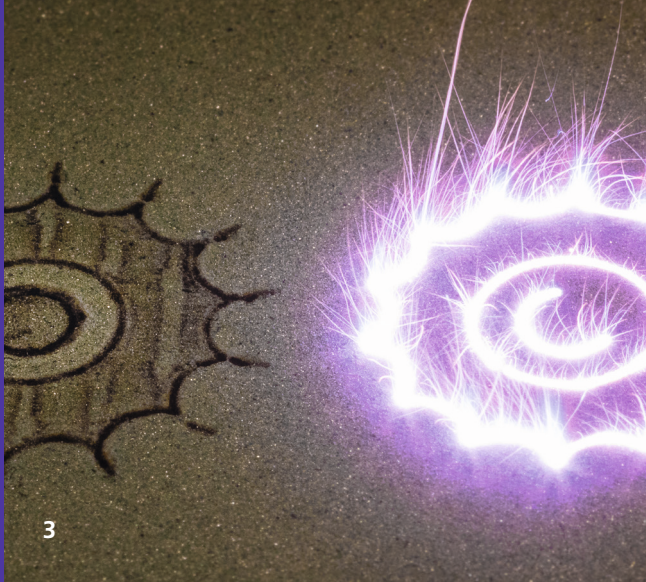
Leistungs- und Kooperationsangebot

- Entwicklung von Granulaten mit geeigneter Rieselfähigkeit
- Materialauswahl und keramikgerechte Bauteilkonstruktion
- Bauteilentwicklung auf Basis kundenspezifischer CAD-Files

Gerätetyp	Z510 (Z-Corp.)
Bauraumgröße	350 x 250 x 200 mm ³
Schichtdicke	87,5 oder 100 µm
Materialien	Oxide, Nichtoxide, Glaspulver, Hartmetalle, Metalle, Hydroxylapatit, Gips

1 Drahtziehdüse aus Hartmetall mit integriertem Kühlkanal.

2 3D-Pulverdruck einer Wabe mit inneren Querkanälen.



3



4

SELEKTIVES LASERSINTERN (SLS)

Beim selektiven Lasersintern erfolgt die Verfestigung des Pulvers durch einen Laserstrahl. Ausgangspunkt ist eine Pulverschicht, die mittels einer Rakel aufgebracht wird. Um ein dichtes Werkstoffgefüge zu erreichen, enthält das Keramikpulver eine flüssigphasenbildende Komponente (z. B. $\text{Al}_2\text{O}_3/\text{SiO}_2$).

Darüber hinaus kann das Lasersintern, ebenso wie alle anderen additiven Verfahren, auch nur für die Formgebung des keramischen Grünkörpers genutzt werden. So lassen sich beispielsweise komplexe SiC-Bauteile herstellen, die anschließend mit den üblichen thermischen Nachbehandlungsschritten in SiSiC überführt werden. Die Werkstoffeigenschaften der Bauteile liegen dabei auf demselben Niveau wie sie mit konventioneller Technologie (Pressformgebung, Grün- und Finishbearbeitung) erreicht werden.

Leistungs- und Kooperationsangebot

- Materialauswahl und Pulveraufbereitung
- Bauteilentwicklung auf Basis kundenspezifischer CAD-Files

Gerätetyp	EOSINT M 250 Xtended
Bauraumgröße	250 x 250 x 200 mm ³
CO ₂ -Laser	10,6 µm Wellenlänge, 1–240 W
Faserlaser	1,06 µm Wellenlänge, 3–500 W
Schichtdicke	0,02 mm – 0,2 mm
Scangeschwindigkeit	max. 1m/s
Materialien	SiSiC, Glaspulver, Metalle, Hartmetalle, Hydroxylapatit, Keramiken mit Glasphasenteil

3 Selektives Lasersintern einer Mikroturbine aus SiC.

LITHOGRAPHIEBASIERTE KERAMIKFERTIGUNG (LCM)

Dieses speziell für die Additive Fertigung von Keramiken entwickelte Verfahren arbeitet nach dem sogenannten Digital-Light-Processing-Prinzip. Das Fraunhofer IKTS nutzt hierfür die Anlage CerFab7500 der Lithoz GmbH.

Analog zur Stereolithographie erfolgt mit Licht einer definieren Wellenlänge eine radikalische Polymerisation des Bindersystems, wodurch die Suspension verfestigt wird. Über ein DLP-Modul wird die Suspension selektiv mit blauem Licht bestrahlt, wodurch alle zu vernetzenden Bereiche einer Ebene gleichzeitig belichtet werden. Dies führt zu einer hohen Produktivität. Die erreichbaren Dichten nach der konventionellen Wärmebehandlung der additiv hergestellten Grünkörper betragen für Al_2O_3 mind. 99,4 % der theoretischen Dichte und für ZrO_2 mind. 99,0 %.

Leistungs- und Kooperationsangebot

- Entwicklung von lichterhärtbaren Suspensionen aus kundenspezifischen Pulvern
- Keramikgerechte Bauteilkonstruktion
- Bauteilentwicklung auf Basis kundenspezifischer CAD-Files

Gerätetyp	CeraFab 7500 (Fa. Lithoz)
Bauraumgröße	76 x 43 x 150 mm ³
Schichtdicke	5–100 µm
Laterale Auflösung	40 µm (635 dbi)
Baugeschwindigkeit	2,5–10 mm/h
Materialien	Al_2O_3 , ZrO_2 , Hydroxylapatit, Glaspulver, AlN, Si_3N_4

4 Hybride Fertigung komplexer Knochenstrukturen.

THERMOPLASTISCHER 3D-DRUCK (T3DP)

Der thermoplastische 3D-Druck beruht auf einer unikalen Technologie- und Anlagenentwicklung am Fraunhofer IKTS, mit deren Hilfe entscheidende Grenzen bestehender Verfahren überwunden werden können. Im Fokus steht dabei die Herstellung größerer keramischer Grünkörper, die Funktionalisierung durch Einsatz verschiedener Materialien sowie eine signifikante Erhöhung der Baugeschwindigkeit.

T3DP zeichnet sich gegenüber anderen Verfahren dadurch aus, dass unabhängig von der Materialauswahl mehrkomponentige und/oder gradierte Bauteile hergestellt werden können. Das Verfahren basiert auf der Verwendung von partikelgefüllten thermoplastischen Massen mit niedriger Schmelztemperatur (80–100 °C), wobei die Viskosität der Ausgangsmassen relativ gering ist. Das Material wird dabei analog zu den Fused-Deposition-Modeling-Ansätzen im Polymerbereich nicht vollflächig aufgetragen, sondern nur an den benötigten Stellen. Mehrere heizbare Dosiereinheiten, die in allen drei Raumrichtungen angesteuert werden, bewegen sich über eine feststehende Plattform. Die thermoplastische Masse wird durch Wärmezufuhr in einen fließfähigen Zustand überführt, an der gewünschten Stelle abgeschieden und erstarrt sofort wieder bei Abkühlung.

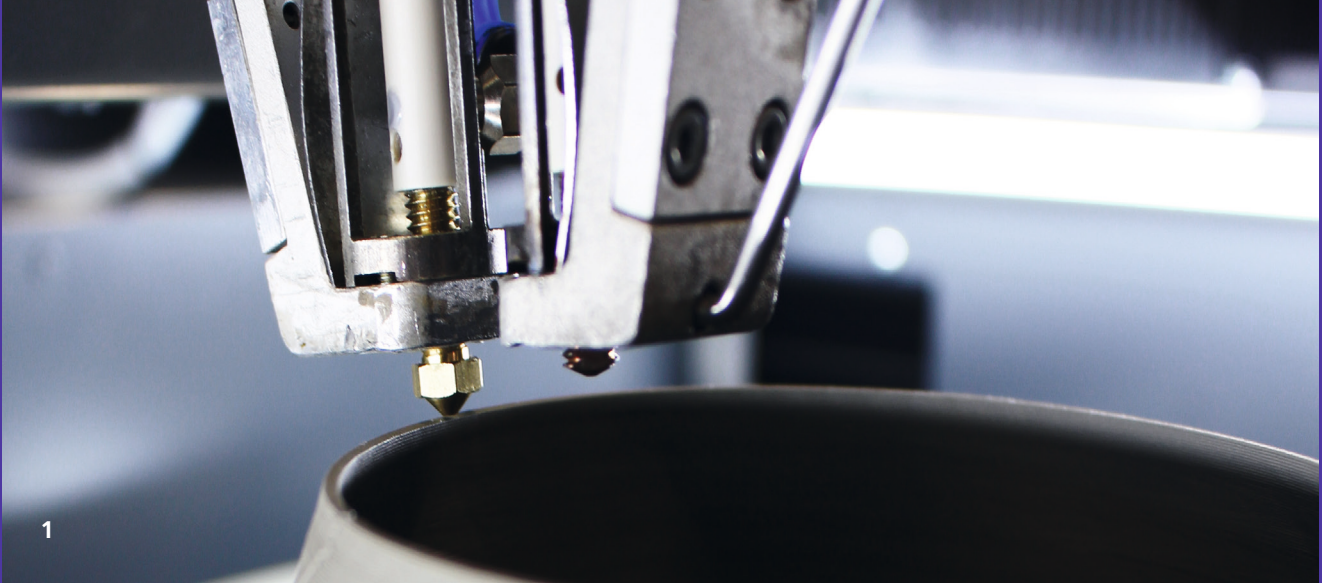
Dadurch erfolgt die Verfestigung der Masse nahezu unabhängig von den physikalischen Eigenschaften der verwendeten Pulver. Es können mehrere Vorratsbehälter und Dispenseinheiten verwendet werden und somit unterschiedliche Materialien, wie z. B. auch Stützstrukturen, orts aufgelöst in einem Bauteil abgeschieden werden.

T3DP erweitert die technologischen Grenzen der Additiven Fertigung in der Keramik und ist somit in der Lage, das Einsatzspektrum in verschiedensten Zielbranchen erheblich zu steigern.

Leistungs- und Kooperationsangebot

- Entwicklung und Charakterisierung geeigneter thermoplastischer Massen aus kundenspezifischen Pulvern
- Materialauswahl für Mehrkomponentensysteme und Entwicklung schwindungsangepasster thermoplastischer Massen
- Entwicklung von Co-Sinterwegen für Mehrkomponentensysteme
- Bauteilentwicklung auf Basis kundenspezifischer CAD-Files

Gerätetyp	Eigenbau
Bauraumgröße	100 x 100 x 100 mm ³
Schichtdicke	ca. 50–100 µm
Laterale Auflösung	ca. 200 µm
Baugeschwindigkeit	ca. 3 cm ³ /h pro Dosiersystem
Materialien	Al ₂ O ₃ , ZrO ₂ , Si ₃ N ₄ , WC-Co, Edelstähle



FUSED FILAMENT FABRICATION (FFF)

Fused Filament Fabrication basiert analog zum T3DP ebenfalls auf hochgefüllten thermoplastischen Massen, die aber deutlich höhere Viskositäten aufweisen. Diese Massen werden als Filamente den einzelnen Druckköpfen zugeführt, dort aufgeschmolzen und als Strang abgeschieden. Die Verfestigung erfolgt infolge der Abkühlung der Massen. Durch den selektiven Auftrag der Materialien über die verschiedenen Druckköpfe können unterschiedlichste Material- und Eigenschaftsgradienten im Bauteil erreicht werden. Auch wenn bei diesem Verfahren nur relativ geringe Auflösungen erzielt werden können, überzeugt es durch einen sehr großen Bauraum, eine hohe Produktivität sowie eine große Materialvielfalt. Zudem lassen sich keramische Fasern in die Filamente integrieren, so dass eine Additive Fertigung von CMCs möglich wird.

Leistungs- und Kooperationsangebot

- Entwicklung und Charakterisierung thermoplastischer Massen aus kundenspezifischen Pulvern
- Herstellung von Filamenten aus thermoplastischen Massen
- Materialauswahl für Mehrkomponentensysteme und Entwicklung schwindungsangepasster thermoplastischer Massen
- Bauteilentwicklung auf Basis kundenspezifischer CAD-Files

Gerätetyp	HAGE 140L
Bauraumgröße	700 x 500 x 400 mm ³
Schichtdicke	> 250 µm (je nach Düse und Material)
Laterale Auflösung	> 500 µm
Baugeschwindigkeit	>> 5 cm ³ /h
Materialien	Al ₂ O ₃ , Si ₃ N ₄ , SiC, faserverstärktes SiC

LAMINATED OBJECT MANUFACTURING (LOM)

Laminated Object Manufacturing wurde ursprünglich für den Aufbau elektrokeramischer Komponenten (Multilayerkondensatoren, Stapelaktoren) und für die Herstellung keramischer Multilagensubstrate (LTCC, HTCC) in der Mikroelektronik entwickelt. Im Kontext der Additiven Fertigung wird die LOM-Technologie für den Aufbau dreidimensionaler Mikrokomponenten mit integrierter Funktionalität genutzt. Basis dafür sind (glas)keramische Folien, die mittels kontinuierlichem Tape-Casting-Verfahren hergestellt werden. Hierfür stehen am Fraunhofer IKTS verschiedene Gießmaschinen zu Verfügung.

Nach dem mechanischen bzw. laserbasierten Strukturieren der einzelnen Lagen werden diese mit funktionellen Pasten oder Tinten bedruckt (siehe Abschnitt »Funktionalisierung«) und miteinander verpresst. Das anschließende Co-Firing, d. h. das Sintern aller im Mehrlagenaufbau enthaltenen Materialien in einem Schritt, stellt unter Volumenschwindung die gewünschten Komponenteneigenschaften ein. Dafür sind jedoch besondere Anforderungen hinsichtlich der Kompatibilität der verwendeten Materialien im Hinblick auf Schwindung, Sinteratmosphäre, chemische Kompatibilität oder thermische Ausdehnung zu berücksichtigen.

Leistungs- und Kooperationsangebot

- Entwicklung, Herstellung und Charakterisierung applikationsspezifischer Tinten, Pasten und Folien
- Komponentenauslegung, -entwicklung, -charakterisierung
- Elektrische Aufbau- und Verbindungstechnik
- Technologieentwicklung und -optimierung sowie Upscaling

1 FFF-Herstellung keramischer Komponenten.

FUNKTIONALISIERUNG

Während additive Verfahren durch ihr Prinzip grundlegend neue Optionen hinsichtlich Geometrie, Design und Funktionalität bieten, erweitert sich durch die Kombination mit etablierten 2D- und 2,5D-Methoden das Spektrum an Funktionen, Bauteilen und Anwendungen zusätzlich.

Schlüsseltechnologien für das Funktionalisieren von 3D-Komponenten sind digitale Druckverfahren, mit deren Hilfe Freiformoberflächen hochauflösend mit verschiedensten funktionalen Strukturen versehen werden können. Im Bereich polymerer Materialien sind diese bereits seit vielen Jahren etabliert, während sie sich im Bereich keramischer Funktionsschichten noch im Entwicklungsstadium befinden.

Besonders aussichtsreich für einen Einsatz im Rahmen der Additiven Fertigung keramischer Bauteile sind dabei adaptierte Inkjet- und Aerosoldruckverfahren, die sich jeweils durch spezifische Vorteile auszeichnen. Während sich mittels Inkjetdruck Funktionstinten auf größere Flächen berührungslos durch mehrere Druckköpfe abscheiden lassen, eignet sich der Aerosoldruck für feinere Strukturen, welche auch auf dreidimensionale Objekte appliziert werden können.

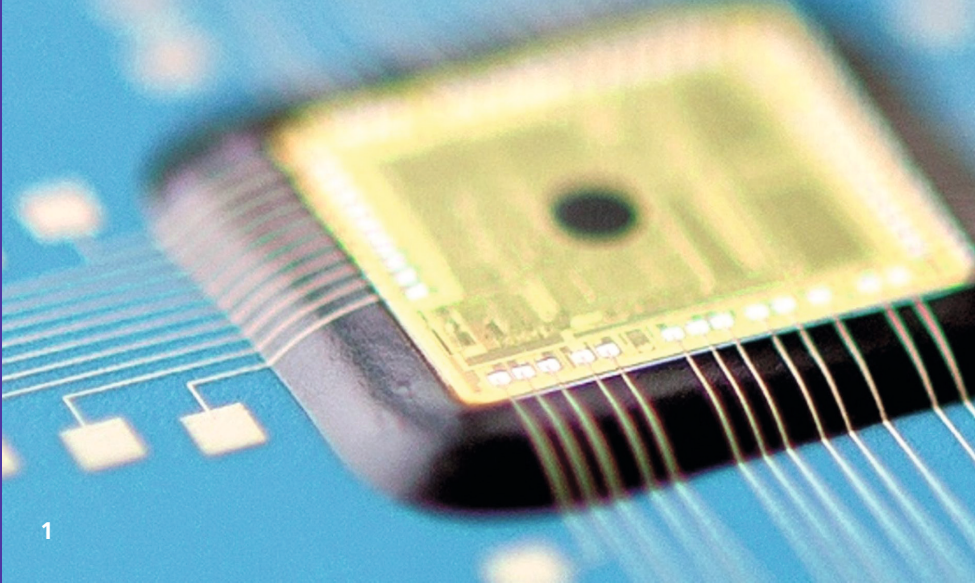
Im Mittelpunkt der aktuellen Forschung am Fraunhofer IKTS stehen die Adaption der Materialien und Technologien, deren Integration in ganzheitliche Prozess- und Anlagenkonzepte sowie die Erprobung an prototypischen Anwendungen mit Projekt- und Industriepartnern.

INKJET- UND AEROSOLDRUCK

Der Inkjetdruck ist ein berührungsloses Verfahren, das im Bereich graphischer Anwendungen und polymerbasierter funktionaler Strukturen seit vielen Jahren Stand der Technik ist. Das am Fraunhofer IKTS genutzte Drop-on-Demand (DOD)-Verfahren arbeitet mit hoch viskosen Tinten, welche über einen Druckkopf auf ein planares Substrat gespritzt werden. Insbesondere die Nutzung mehrerer Düsen ermöglicht das Bedrucken großflächiger Komponenten.

Am Fraunhofer IKTS werden bereits seit vielen Jahren hochspezialisierte Nanotinten für die Funktionalisierung keramischer Mikrosysteme mittels Inkjetdruck entwickelt, welche gegenwärtig für die Erweiterung additiver Fertigungsverfahren adaptiert werden. Besondere Kompetenz besteht dabei für angepasste Edelmetalltinten (Ag, Au, Pt, Pd), Metalltinten (Cu, Ni, Si) und Kohlenstofftinten.

Der Aerosoldruck ist ein Direktschreibverfahren zum dreidimensionalen Abscheiden extrem hochaufgelöster Funktionsschichten (Leiterbahnen, Widerständen, Sensoren etc.) und schließt damit die Lücke zwischen Siebdruck und Lithographie. Mit minimalen Strukturbreiten von unter 10 µm eröffnen sich zahlreiche Einsatzmöglichkeiten insbesondere in Kombination mit additiv gefertigten Komponenten. Bei dem Verfahren werden die zum Druck benötigten Tinten in einen feinen Nebel zerstäubt und in einen Gasstrom eingeleitet. Dieser wird nochmals verdichtet und zum Druckkopf geführt. Der Durchmesser des fokussierten Tröpfchenstroms ist danach kleiner 10 µm. Aufgrund der großen Taillienlänge können auch 3D-Substrat-topographien bedruckt werden.



Insbesondere mit Blick auf die spezifischen Anforderungen keramischer Bauteile hinsichtlich Co-Sinterung und Schwindungsverhalten verfügt das Fraunhofer IKTS über ein unikales Know-how in der Herstellung und Verarbeitung optimierter Tinten. Diese bestehen aus organischen Komponenten (Binde-, Dispergier- und Lösungsmittel) sowie Feststoffpartikeln (z. B. Metalle, Gläser, Oxide).

Neben einkomponentigen Tinten auf Basis gefällter Partikel geht die Entwicklung zunehmend in Richtung mehrkomponentiger Suspensionen, deren Eigenschaften, Haftfestigkeiten und Ausdehnungsverhalten wie bei den bewährten Dick-schichtpasten durch spezielle Glasphasen auf unterschiedliche Substratmaterialien angepasst werden können. Um eine gute Druckbarkeit als Tinte zu gewährleisten, wird der Glasphasenanteil in einer Hochenergie-Mahlung auf Korngrößen von $<1 \mu\text{m}$ gebracht. Durch die geeignete Auswahl von Flüssigphase und Dispergatoren sind Benetzungseigenschaften und Rheologie der Tinten einstellbar.

Leistungs- und Kooperationsangebot

- Herstellung ein- und mehrkomponentiger druckbarer Funktionstinten im Sub- μm -Bereich
- Charakterisierung von Tinten (Stabilität, Rheologie)
- Druck von Schichtdicken zwischen 3 bis $20 \mu\text{m}$ auf 3D-Objekten bei $20\text{-}50 \mu\text{m}$ Breite
- Anwendungsspezifische Lösungen aus Leitungs-, Widerstands-, Heizer- und Isolationstinten
- Anpassung der thermomechanischen Eigenschaften auf Spezifikationen verschiedener Substratmaterialien
- Technologie- und Komponentenentwicklung

Inkjetdruck

Gerätetyp	DoD300 von Schmid Tech. mit Dimatix-Druckköpfen SE, SQ sowie DMP-Klasse
Bauraumgröße	$300 \times 300 \text{ mm}^2$
Schichtdicke	$0,1\text{--}1 \mu\text{m}$ /Durchgang
Laterale Auflösung	$50 \mu\text{m}$
Baugeschwindigkeit	$0,1\text{--}10 \text{ cm/s}$
Materialien	Metalle

Aerosoldruck

Gerätetyp	Optomec M3D
Bauraumgröße	$200 \times 200 \times 10 \text{ mm}^3$
Schichtdicke	$0,5\text{--}5 \mu\text{m}$ /Durchgang
Laterale Auflösung	$10 \mu\text{m}$
Baugeschwindigkeit	$0,1\text{--}10 \text{ cm/s}$
Materialien	Metalle, Gläser, Keramiken, Polymere



SIEBDRUCK UND DISPENSE-JETTING

Neben den digitalen Drucktechnologien bieten auch klassische Siebdruck- und Dispense-Jetting-Methoden eine sinnvolle technologische Ergänzung für die Funktionalisierung additiv gefertigter Bauteile. Die Abscheidung funktioneller Schichten mittels Sieb- und Schablonendruck ist seit vielen Jahren in der Hybridelektronik, im Aufbau elektrokeramischer Komponenten sowie in der Energietechnik etabliert. Als Vorteile der Siebdrucktechnik kommen Kosteneffizienz und technische Leistungsfähigkeit zum Tragen. In den letzten Jahren ist es gelungen, die maximal mögliche Strukturauflösung in Bereiche kleiner 30 µm zu verschieben oder mittels Stufenschablonen orts- aufgelöst verschiedene Schichtdicken zu drucken.

Das Fraunhofer IKTS ist spezialisiert auf die Entwicklung funktionaler Pasten für die verschiedensten Anwendungen und Drucktechnologien. Neben der chemischen Komposition der verwendeten Feststoffe ist die rheologische Anpassung der Pasten auf die gewünschte Schichtmorphologie sowie verwendete Drucktechnik von Bedeutung.

Für den Auftrag von Pasten stehen am Fraunhofer IKTS zudem digitale, d. h. direktschreibende Drucktechnologien wie das Mikrodispensen oder das Dispense-Jetting zur Verfügung. Diese Verfahren werden insbesondere für den Pastenauftrag auf 3D-Oberflächen bzw. bei nichtplanaren Bauteiltopographien verwendet und sind damit insbesondere für additiv gefertigte Komponenten interessant.

Leistungs- und Kooperationsangebot

- Entwicklung und Herstellung kundenspezifischer funktionaler Pasten
- Technologie- und Komponentenentwicklung nach Kundenspezifikation
- Pastencharakterisierung (Rheologie, Druckverhalten, Sinter- bzw. Schwindungsverhalten, Schichtmorphologie, elektrische bzw. dielektrische Kennwerte)
- Zuverlässigkeitsuntersuchungen (Feuchte, Wärme, Thermozyklisierung, Powercycling etc.)

Sieb- und Schablonendruck

Gerätetyp	EKRA E5
Bauraumgröße	350 x 450 x 20 mm ³
Schichtdicke	0,35–25 µm
Laterale Auflösung	30 µm
Baugeschwindigkeit	3,5 s/Druck
Materialien	Diverse funktionale Pasten

Mikrodispensen und Dispense-Jetting

Gerätetyp	ASYMTEK Axiom TMX 1010
Bauraumgröße	500 x 540 x 90 mm ³
Schichtdicke	5–25 µm
Laterale Auflösung	50 µm
Baugeschwindigkeit	1–1000 mm/s
Materialien	Diverse funktionale Pasten

1 *Pastenherstellung als Ausgangspunkt suspensionsbasierter Verfahren.*

DIODEN-LASERSINTERN

Additiv hergestellte Strukturen benötigen für die Entfernung von organischen Komponenten und/oder die Sinterung von metallischen/keramischen Partikeln eine spezifische Nachbearbeitung. Insbesondere für funktionalisierte Oberflächen mit Leiterbahnen, Widerständen oder Antennen stehen konventionelle Additiv-Prozesse vor der Herausforderung, integrierte Verfahrensschritte zu entwickeln.

Um eine effiziente Verarbeitung von Multimaterialkomponenten zu ermöglichen, sind neue Ansätze in der Post-Prozessierung hilfreich, die die Vorteile aus der 2D-Funktionalisierung nutzen und diese für das neue Anwendungsgebiet weiterentwickeln. Die Effizienz dieser Prozessierung trägt entscheidend zur Wirtschaftlichkeit des gesamten Fertigungsprozesses bei.

Das Fraunhofer IKTS nutzt dafür ein innovatives Verfahren, welches auf einer mikrooptisch optimierten Hochleistungs-Diodenlaserlinie (HPDL) basiert. Diese Technologie ermöglicht eine extrem schnelle Funktionalisierung von gedruckten Materialien aus hochschmelzenden Metallen und leitfähigen Keramiken. Durch eine kontinuierliche Wärmediffusion wird die Prozessierung mit der HPDL ca. 20-mal effizienter als mit konventionellen Standard-Punktlasersystemen. Darüber hinaus erlaubt diese Methode aufgrund der ultraschnellen Aufheizung/Abkühlung ($>10^6$ K/s) eine selektive und präzise Energieübertragung sowie eine Bearbeitung an Luft.

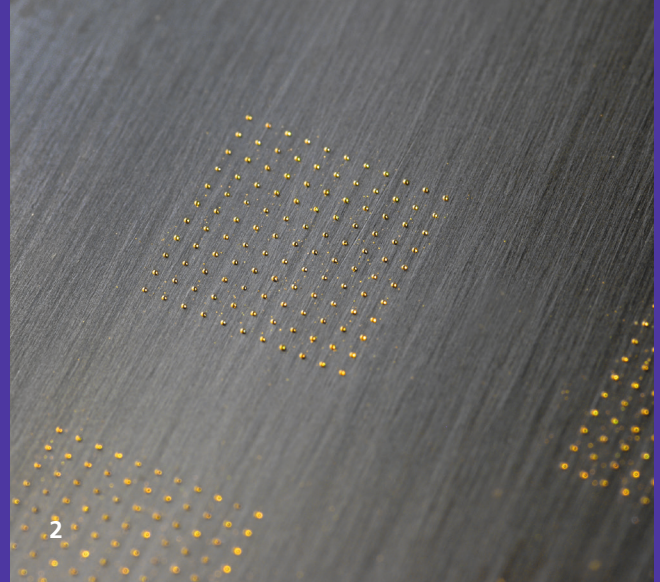
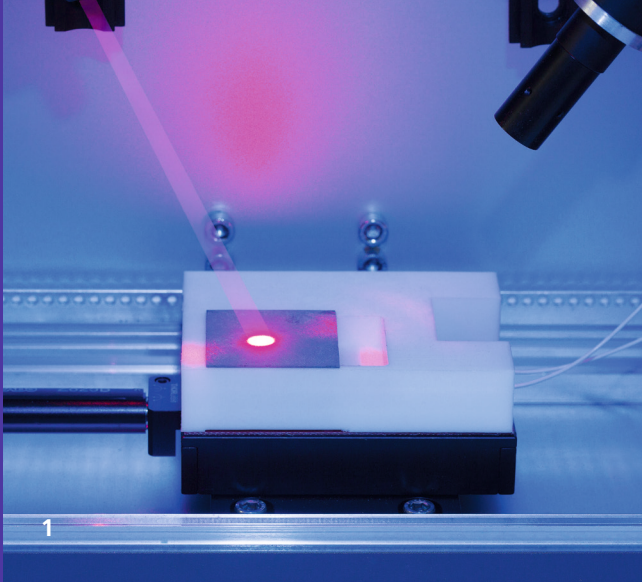
Die aktuellen Forschungsarbeiten konzentrieren sich auf die Untersuchung der Wechselwirkungen zwischen HPDL-Parametern, Tinten- und Pasteneigenschaften und der erforderlichen Struktur/Funktionalität. Das Portfolio an prozessierbaren

Materialien umfasst Nickel und Molybdän auf Aluminiumoxid sowie Silber, Gold und Kupfer, welche für Polymer-, Glas- und Al_2O_3 -Substrate geeignet sind. Die jüngsten Sinterversuche von gedruckten Molybdän-Schichten weisen auf die Erhitzung von gedruckten Strukturen auf Temperaturen >1600 °C hin.

Leistungs- und Kooperationsangebot

- Funktionalisierung von gedruckten metallischen und keramischen Strukturen
- Realisierung unikaler Werkstoffeigenschaften durch schnelle Aufschmelzung/Erstarrung z. B. durch spinodale Entmischung
- Machbarkeitsstudien und Demonstration im Labormaßstab

Gerätetyp	Diodenlasersystem
Bauraumgröße	250 mm x 300 mm
Max. optische Leistung	900 W, Nah-Infrarot-Dioden
Diodenlinienlänge	30 mm
Baugeschwindigkeit	0,01–60 m/min
Materialien	Ag, Au, Cu, Pt auf Polymer-, Glas- und Al_2O_3 -Substraten; Ni, Mo auf Al_2O_3 -Substraten



QUALITÄTSSICHERUNG

Für die Etablierung der Additiven Fertigung als wettbewerbsfähiges Herstellungsverfahren über die Prototypen- und Kleinserienfertigung hinaus, sind speziell für den Bereich der Keramik zahlreiche Fragestellungen zu Qualitätssicherung, Prozessdauer und damit Gesamtwirtschaftlichkeit zu betrachten.

Eine prozessintegrierte Überwachung additiver Fertigungsprozesse ist unabdingbar, um qualitativ hochwertige, reproduzierbare Bauteilergebnisse sicherzustellen. Gegenwärtig können mögliche Prozessfehler und Bauteildefekte in der Regel nur indirekt detektiert werden. Die bestehenden Systeme liefern keine konkreten Werkstoffkennwerte zur direkten Beurteilung der Bauteilqualität während der Herstellung. Potenzielle Defekte werden daher erst am Ende der Herstellung festgestellt, was die Effizienz hinsichtlich Rohstoffeinsatz, Kosten und Zeit mindert.

Eine Inline-Analyse soll es zukünftig erlauben, Fehler wie Poren oder Delamination direkt während ihres Entstehens im Bauprozess zu detektieren und auch sofort zu reparieren, sodass eine höhere Qualität bzw. ein höherer Ausstoß möglich wird. Am Fraunhofer IKTS werden daher intensiv existierende und neue zerstörungsfreie Prüfverfahren (ZfP) für die verschiedensten Materialien und additiven Fertigungsverfahren erforscht und für den industriellen Einsatz weiterentwickelt.

LASER-SPECKLE-PHOTOMETRIE (LSP)

Die am Fraunhofer IKTS entwickelte Methode der Laser-Speckle-Photometrie bietet ein besonderes Potenzial für die prozessintegrierte Qualitätssicherung für verschiedene Werkstoffklassen. Sie basiert auf der Auswertung der zeitlichen Veränderung von Speckle-Mustern mittels eines spezifisch optimierten Algorithmus.

Speckle-Muster werden sichtbar, wenn eine raue Oberfläche mit einer kohärenten Lichtquelle beleuchtet wird. Dabei entsteht eine räumliche Struktur mit zufällig verteilten Intensitäten, die mittels CMOS-Chip ausgelesen werden können. Wird das untersuchte Objekt zudem thermisch oder mechanisch angeregt, kann durch eine Korrelationsfunktion die Wechselwirkung zwischen Speckle-Dynamik und dem Zustand einer Oberfläche ermittelt werden. Die Laser-Speckle-Photometrie verfügt über eine hohe Empfindlichkeit sowohl für Out-of-plane- als auch für In-plane-Verschiebungen.

Ein auf Speckle-Sensorik basierendes Prüfsystem ist somit in der Lage, konkrete Werkstoffparameter (Porosität, Spannungszustand, Festigkeit) sowie Oberflächendefekte während des Fertigungsprozesses berührungslos zu detektieren. Die dabei anfallenden geringen Datenmengen ermöglichen eine hohe Messgeschwindigkeit und somit eine Echtzeit-Auswertung relevanter Qualitätskriterien additiv gefertigter Bauteile. Ein weiterer wichtiger Vorteil der Laser-Speckle-Photometrie liegt darin, dass sie neben Metallen auch für Messungen an Nichtmetallen sowie organischen Materialien geeignet ist.

1 *Anregung und Auswertung von Speckle-Mustern.*

2 *Untersuchung von Goldkontaktierungen auf Nickel-Legierung.*

Leistungs- und Kooperationsangebot

- Charakterisierung von additiv gefertigten Bauteilen
- Prozessoptimierung
- Entwicklung von Prüfsystemen von Lab-Scale bis Inline-Prozess-Monitoring zur Erfassung von Werkstoffparametern und Oberflächendefekten

Technische Ausstattung

- Verschiedene Laboraufbauten mit den Komponenten Laser/ Optik/Kamera/thermische bzw. mechanische Anregung – adaptierbar an einen weiten Bereich von Anwendungen
- Automatisierter Labor-Prüfplatz mit Arbeitsbereich bis zu 20 x 20 mm² (erweiterbar)

Laterale Auflösung	30 µm (Metall) – 400 µm (Keramik)
Messgeschwindigkeit	20 Messwerte/Sekunde 30 Bilder/Minute
Materialien	Metalle, Keramiken, Kunststoffe, Suspensionen
Verwendetes Licht	400–900 nm

RÖNTGEN-RÜCKSTREU-TOMOGRAPHIE

In der Qualitätskontrolle einzelner Bauteile sind Röntgenverfahren unerlässlich. Eine qualifizierte inlinedfähige Prozesskontrolle beispielsweise großer und massiver Bauteile ist jedoch bisher aufgrund zu geringer Geschwindigkeit nicht möglich. Um diese Hürden zu überwinden, entwickelt das Fraunhofer IKTS ein alternatives Verfahren der Röntgen-Rückstreu-Tomographie, das wesentlich schneller arbeiten kann.

Trifft Röntgenstrahlung auf Materie, wird sie zum einen je nach Material und Energie der Strahlung abgeschwächt, was der bildgebende Effekt bei Durchstrahlungsuntersuchungen ist. Zum anderen wird die Strahlung gestreut. Diese Streustrahlung ist in erster Näherung ungerichtet, sodass auch Intensität entgegen der einfallenden Strahlrichtung, also als Rückstreuung, nachgewiesen werden kann. Diese Strahlung kann zur Bildgebung verwendet werden und bietet bei großen bzw. massiven Bauteilen eine Möglichkeit, diese von einer Seite zu untersuchen.

Die Röntgen-Rückstreu-Tomographie erlaubt somit zukünftig ein dreidimensionales Abbilden des in Fertigung befindlichen Bauelements – berührungsfrei und mit großer Eindringtiefe für eine breite Palette von Materialien. Das Verfahren bietet daher ein besonderes Potenzial für die Additive Fertigung großvolumiger Bauteile.

OPTISCHE KOHÄRENZ-TOMOGRAPHIE (OCT)

Optische Prüfverfahren arbeiten schnell, berührungslos und können sehr flexibel an verschiedene Prozesse angepasst werden. Die Optische Kohärenztomographie bietet ein besonderes Potenzial für eine effiziente und kostengünstige integrierte Überwachung von additiven Fertigungsverfahren. Das Verfahren qualifiziert sich besonders dadurch, dass neben Informationen zur Bauteiloberfläche auch Volumeninformationen bis zu einer Tiefe von mehreren 100 µm gewonnen werden können.

Bei der OCT wird mittels nahinfrarotem Licht und einer Kombination aus interferometrischer und spektroskopischer Verarbeitung die räumliche Verteilung von Streuintensitäten im Prüfobjekt abgebildet. Aus den gewonnenen 3D-Informationen können neben der Geometrie auch die innere Struktur (Defekte und Einschlüsse) bis hin zum Layer-Layer-Interface additiv gefertigter Bauteile abgebildet werden. Hohe Messgeschwindigkeiten ermöglichen die Erfassung von bis zu 700 virtuellen Schnittbildern pro Sekunde. Die erfassten Teilvolumen des Prüfobjekts werden mit einer räumlichen Auflösung zwischen 2 und 10 µm abgebildet.

Mit Hilfe anwendungsspezifischer Bildanalysen werden die gewonnenen Bilddaten klassifiziert, um quantitative Produkt- und Fehlermerkmale zu extrahieren. Wichtige Qualitätskriterien sind beispielsweise die Dicke der zuletzt aufgetragenen Schichten, die Haftfestigkeit zwischen einzelnen Schichten, die Formhaltigkeit des Bauteils sowie die Homogenität des Materials.

Die Vielzahl an verschiedenen Produktmerkmalen, die hochfrequent zur Verfügung gestellt werden, ermöglichen eine detaillierte Prozesskontrolle und die Implementierung von Feedback-Loops zur Prozesssteuerung. Fehler im Fertigungsprozess können frühzeitig genau erkannt und notwendige Korrekturmaßnahmen oder ein Fertigungsabbruch ausgelöst werden. Die Optische Kohärenztomographie kann darüber hinaus auch zur berührungslosen Bauteilüberprüfung nach dem Fertigungsprozess eingesetzt werden.

Räumliche Auflösung	2–10 µm
Messgeschwindigkeit	Bis zu 700 Schnittbilder pro Sekunde
Materialien	Keramiken, Kunststoffe, Suspensionen
Verwendetes Licht	NIR (800–1300 nm)

Leistungs- und Kooperationsangebot

- Charakterisierung von additiv gefertigten Bauteilen
- Prozessoptimierung
- Entwicklung von Prüfsystem von Lab-Scale bis Inline-Prozess-Monitoring

Technische Ausstattung

- High-Resolution-OCT-System mit 3,5 µm Auflösung
- Long-Range-OCT-System mit 10 µm Auflösung
- Verschiedene Messköpfe mit Auflösungen von 2 µm bis 10 µm und Scanbereichen von 5 x 5 mm² bis 35 x 35 mm²
- Automatisierte Prüfplätze mit Arbeitsbereichen bis zu 400 x 400 mm²

1 *Demonstratorobjekte hergestellt mittels LCM.*

1



NEUE PERSPEKTIVEN IN DER ANWENDUNG

Die dargestellten Technologien ebnen den Weg für eine neue Generation werkzeugfreier Verfahren, um bereits in Kleinserien komplexe und multifunktionale Keramikkomponenten aus mehreren Materialien kosteneffizient zu fertigen. Die verkürzte Entwicklungs- und Fertigungszeit macht damit eine personalisierte und bedarfsgerechte Produktion (Production-on-demand) für verschiedenste Branchen und Einsatzfelder möglich.

Maschinenbau

Im Maschinen- und Anlagenbau kommen keramische Komponenten überall da zum Einsatz, wo andere Werkstoffe versagen. Durch die neuen Möglichkeiten hinsichtlich Design und Funktionsintegration sowie die Rentabilität bei Kleinserien eröffnet sich ein breites Spektrum für beispielsweise optimierte Düsen mit integrierten Kühlkanälen, Brenner, Dichtungen oder Fadenführer.

Werkzeug- und Formenbau

Während Gießereiformen und -kerne aktuell bereits Anwendung in der Metallindustrie finden, ist das Potenzial funktionalisierter Werkzeuge wie Greifer noch lang nicht erschöpft.

Medizintechnik

Besondere Aufmerksamkeit erhält die Additive Fertigung in der Medizintechnik, da zukünftig personalisierte endoprothetische Implantate individuell an den Patienten angepasst werden können. Darüber hinaus wird die Fertigung multifunktionaler komplexer chirurgischer Geräte wie Greifer, Zangen oder Endoskope auch in geringen Stückzahlen rentabel.

Luft- und Raumfahrt

Spiegel, Housings oder Stellvorrichtungen für Hochleistungsanwendungen in harschen Einsatzbereichen – die Luftfahrtindustrie ist einer der größten Innovationstreiber für additive Technologien.

Schmuck- und Kreativindustrie

Bereits heute erhalten Künstler mit additiven Verfahren völlig neue Designoptionen durch komplexe Gussformen/-kerne für Schmuckkomponenten. Aber auch die direkte Herstellung keramischer Schmuckkomponenten, personalisierter Uhren oder Brillengehäuse ist für Designer von größtem Interesse.

Automobilindustrie

Insbesondere im Premiumbereich bieten die ansprechenden optischen Eigenschaften kratzfester Keramiken ein unikales Highlight für Bedienelemente und weitere Interiorkomponenten. Neue Formenfreiheit und die Integration von Funktionselementen erweitern dieses Einsatzgebiet für gehobene Ansprüche.

Chemie und Pharmazie

Komplexe Reaktoren und Mischer mit integrierten Funktionalitäten sind nur zwei Beispiele für die Einsatzmöglichkeiten in der chemisch-pharmazeutischen Industrie.

Consumerprodukte

Die Additive Fertigung im Bereich polymerer Werkstoffe hat bereits anschaulich demonstriert, welche Einsatzmöglichkeiten für Sportartikel, Handyhüllen oder zahlreiche weitere kleine und große Dinge des Alltags bestehen. Gemeinsam mit Kunden erprobt das Fraunhofer IKTS dies für keramische Produkte.

KURZPORTRÄT DES FRAUNHOFER IKTS

Das Fraunhofer-Institut für Keramische Technologien und Systeme IKTS betreibt anwendungsorientierte Forschung für Hochleistungskeramik. Die drei Instituts-teile in Dresden und Hermsdorf (Thüringen) formen gemeinsam das größte Keramikforschungsinstitut Europas.

Als Forschungs- und Technologiedienstleister entwickelt das Fraunhofer IKTS moderne keramische Hochleistungswerkstoffe, industrierelevante Herstellungsverfahren sowie prototypische Bauteile und Systeme in vollständigen Fertigungs-linien bis in den Pilotmaßstab. Darüber hinaus umfasst das Forschungsportfolio die Kompetenzen Werkstoffdiagnose und -prüfung. Die Prüfverfahren aus den Bereichen Akustik, Elektromagnetik, Optik, Mikroskopie und Strahltechnik tragen maßgeblich zur Qualitätssicherung von Produkten und Anlagen bei.

Das Fraunhofer IKTS arbeitet in acht marktorientierten Geschäftsfeldern, um keramische Technologien und Komponenten sowie zerstörungsfreie Prüfverfahren für neue Branchen, Produktideen und Märkte jenseits der klassischen Einsatzgebiete zu demonstrieren und zu qualifizieren. Dazu gehören keramische Werkstoffe und Verfahren, Maschinenbau und Fahrzeugtechnik, Elektronik und Mikro-systeme, Energie, Umwelt- und Verfahrenstechnik, Bio- und Medizintechnik, Optik sowie die Material- und Prozessanalyse.



www.ikts.fraunhofer.de

KONTAKT

Industrielösungen

Additive Fertigung

Dr. Tassilo Moritz

**Fraunhofer-Institut für
Keramische Technologien
und Systeme IKTS**

Winterbergstraße 28

01277 Dresden

Telefon +49 351 2553-7747

tassilo.moritz@

ikts.fraunhofer.de