

# WERKSTOFFE UND VERFAHREN

Projektberichte

28 Additive Fertigung von Keramik

32 Faserbeschichtung für die Entwicklung neuer Kompositwerkstoffe

36 Impedanzanalyse für die Materialdiagnostik

38 Leitfähige Keramik als Elektrowerkstoff für den Hochtemperaturbereich

39 Keramische Nanopartikel für elektrolytische Schichten

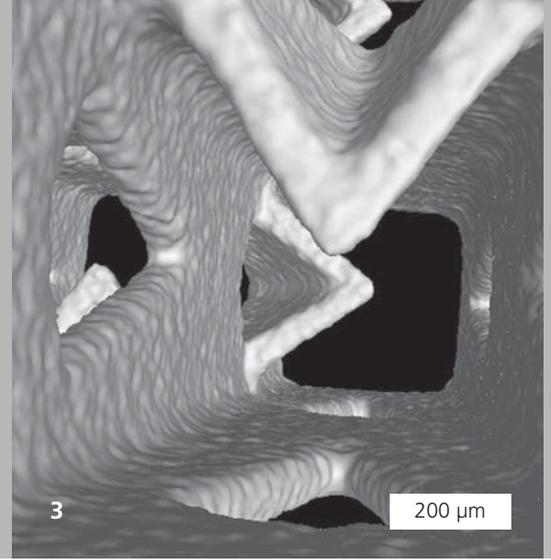
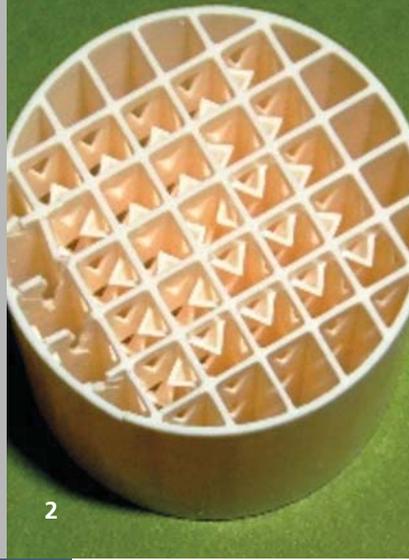
Das Geschäftsfeld »Werkstoffe und Verfahren« des Fraunhofer IKTS bietet oxidische, nichtoxidische und silikatkeramische Werkstoffe sowie Verbundwerkstoffe, Gläser, Hartmetalle und Cermets. Ausgehend von kommerziell verfügbaren Rohstoffen oder präkeramischen Vorstufen werden diese Werkstoffe für konkrete Anwendungen qualifiziert. Sie sind die Voraussetzung für die Herstellung von applikationsgerechten keramischen Prototypen und Kleinserien, die auf Grundlage nachhaltiger Verfahrensentwicklungen erfolgt.

Neue Anwendungsfelder werden durch eine gezielte Verbindung von strukturellen und funktionellen Eigenschaften in keramischen Werkstoffen oder Keramik-Metall-Verbunden erschlossen. Solche Konzepte finden sich unter anderem in Hochtemperaturwerkstoffen, leitfähigen Keramiken, Leuchtstoffen, transparenten Keramiken, polykristallinen Schleifstoffen oder funktionellen Schichten wieder.

Das Fraunhofer IKTS beherrscht und optimiert pulvertechnologische Fertigungsverfahren auf modernstem Niveau, sei es im Hinblick auf höchste Reinheit oder auf größte Kosteneffizienz. Damit wird die Basis für eine industriennahe Werkstoff- und Verfahrensentwicklung geschaffen. In mehreren Technologielinien werden Komponenten und Bauteile hergestellt. Ein Hochskalieren zu kleineren und mittleren Serien auf industrietauglichen Maschinen ist hausintern möglich.

Das breite Leistungsspektrum der Formgebungsverfahren reicht von der Press-, Gieß- und plastischen Formgebung über generative Verfahren bis hin zu Multilayertechnologie und Direktdruckverfahren. Eine große Anzahl von Wärmebehandlungsverfahren sowie eine leistungsfähige Grün- und Finishbearbeitung runden das umfangreiche Kompetenzportfolio des Fraunhofer IKTS ab. Mit Beschichtungsverfahren, wie beispielsweise der chemischen Gasphasenabscheidung oder dem thermischen Spritzen, lassen sich Oberflächeneigenschaften verändern und Bauteile den individuellen Anforderungen anpassen. Unsere Kunden können auch hier von geschlossenen technologischen Ketten profitieren, die eine Entwicklung vom Labor bis in den Pilotmaßstab ermöglichen.

Die Mitarbeiter verfügen zudem über langjährige Erfahrungen in der produktionsgerechten und kundenspezifischen Auslegung von Bauteilen sowie in der Charakterisierung der Werkstoffe und Herstellungsprozesse. Hierzu zählt auch die Versagens- und Schadensanalyse von Bauteilen und die Beratung zum Einsatz keramischer Werkstoffe. Das Leistungsangebot umfasst darüber hinaus die Erstellung von Fertigungskonzepten sowie die Bewertung von Produktionsprozessen unter den Aspekten Kosten, Qualitätssicherung und Energieeffizienz. Bei Einführung innovativer Technologien und der Realisierung neuer Produkte kann das IKTS seine Partner bis zur Überführung in die Produktion begleiten.



## 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

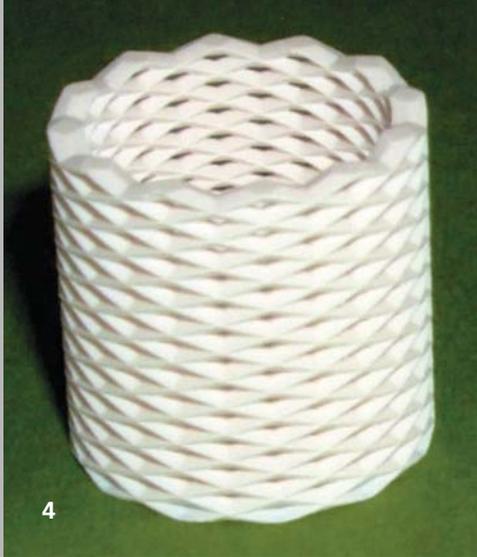
Um dichte Werkstoffgefüge mit hohem Eigenschaftsniveau zu erhalten, müssen additive Fertigungsverfahren genutzt werden, die Suspensionen oder Pasten verarbeiten, damit das Keramikpulver homogen dispergiert und mit möglichst hohem Volumenanteil vorliegt. Für die Herstellung dichter Keramikbauteile mit 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.

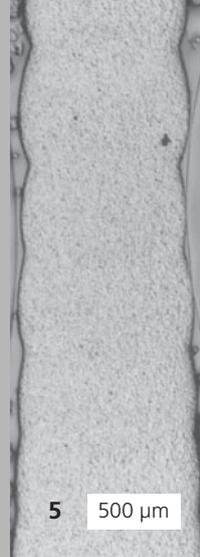
### Lithography-based Ceramic Manufacturing (LCM)

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 ( $\text{Al}_2\text{O}_3$ ,  $\text{ZrO}_2$  und Tricalciumphosphat) auf der LCM-Anlage verarbeitet werden. Die erreichbaren Dichten nach konventionell-thermischem Processing (Entbindern / Sintern) der additiv hergestellten Grünkörper betragen für  $\text{Al}_2\text{O}_3$  mind. 99,4 % der theoretischen

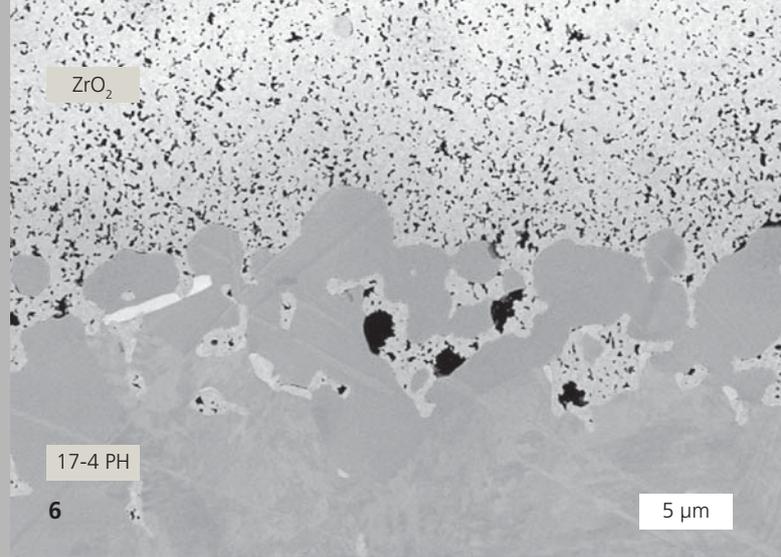


4



5

500 µm



6

17-4 PH

5 µm

## 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.

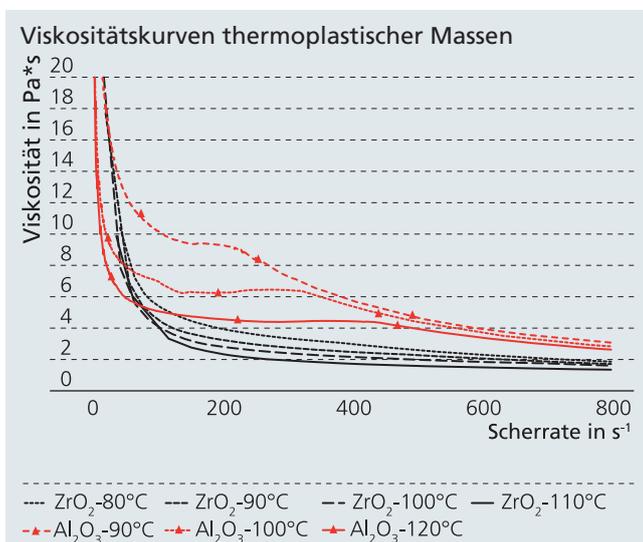
### Pulverbasierte additive Verfahren

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 mm<sup>3</sup> und einer minimale Schichthöhe von 87 µm genutzt.

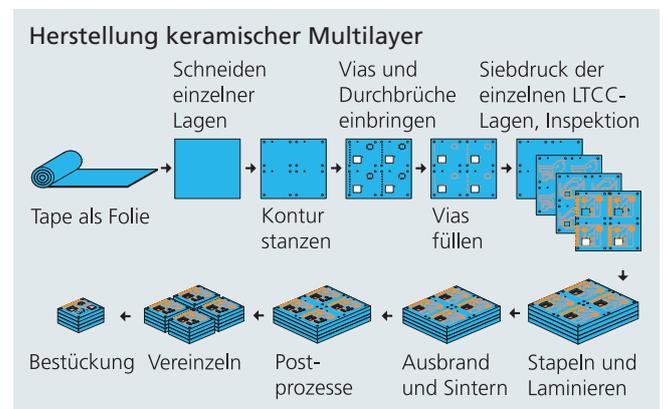
### Selektives Lasersintern

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. Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> / SiO<sub>2</sub>-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 (CO<sub>2</sub>-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)

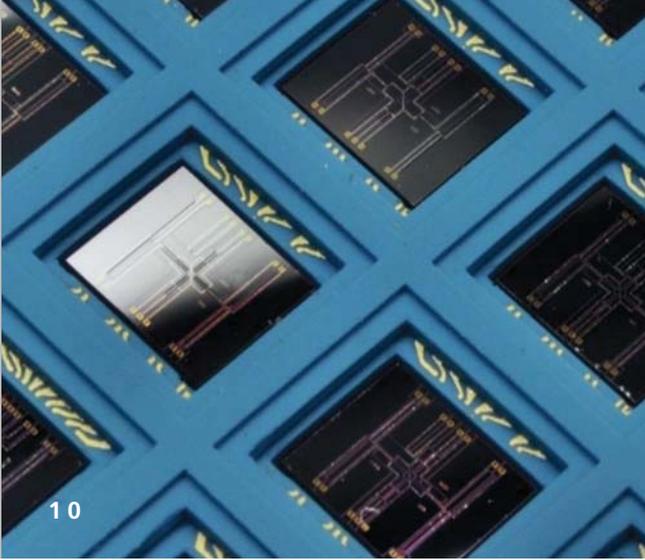
Eine am Fraunhofer IKTS seit 15 Jahren etablierte Technologie der Additiven Fertigung ist die keramische Multilayer-technologie bzw. Laminated Object Manufacturing (LOM). LOM eröffnet dem Anwender neben der technologieinhärenten Fähigkeit 3D-Komponenten aufzubauen, die Möglichkeit zur lagenweisen Integration 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

funktionaler Pasten mit den notwendigen Strukturen versehen.

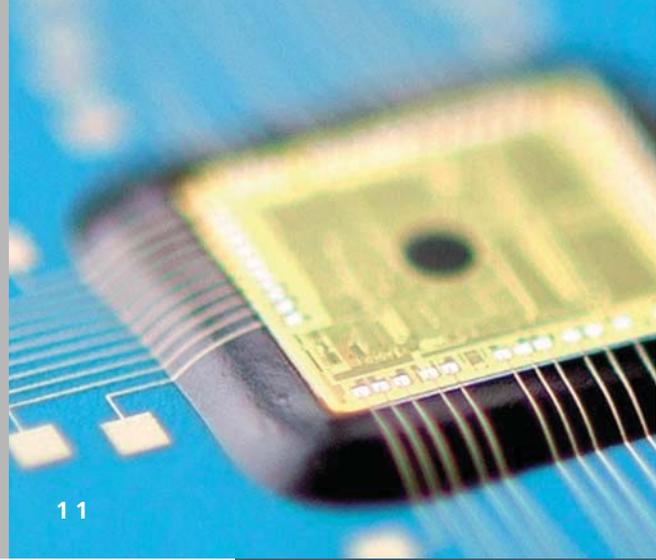


Durch Übereinanderschichten und Verpressen (Laminieren) der so hergestellten Einzellayer wird die gewünschte 3D-Komponente generiert. Aktuelle Anwendungsgebiete des LOM sind die Aufbau- und Verbindungstechnik der Elektronik (keramische und glaskeramische Mehrlagenverdrahtungsträger für Hochfrequenz- 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).



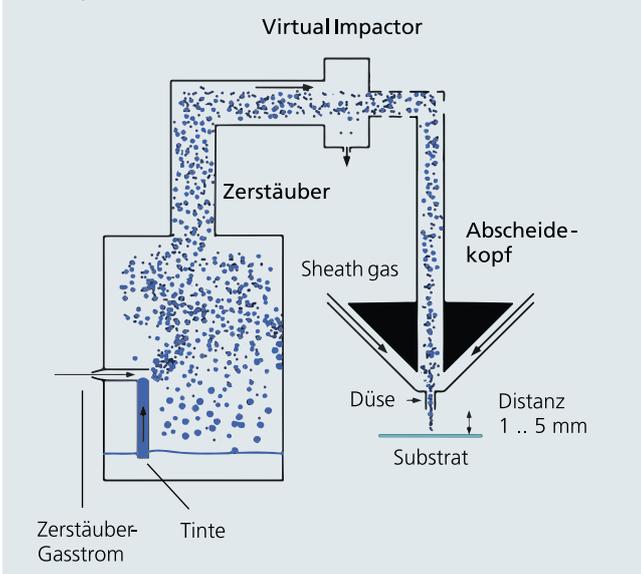
10



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 gesteigerten mechanischen 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.

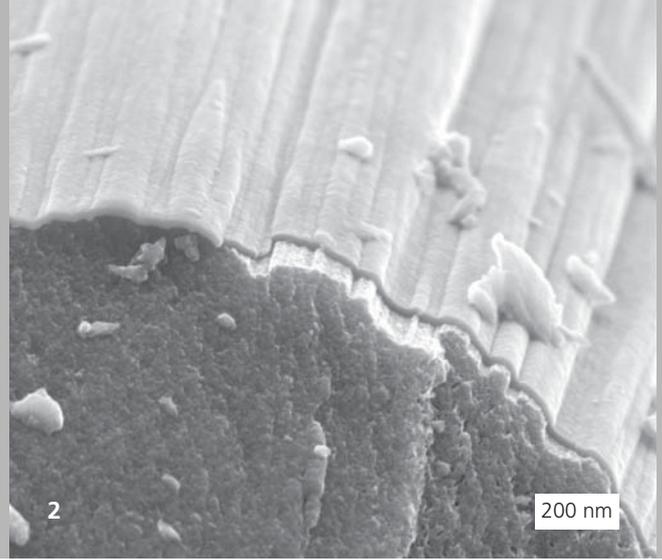
7 LCM-Verfahren: Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>-Mischerstruktur.

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.



WERKSTOFFE UND VERFAHREN

# FASERBESCHICHTUNG FÜR DIE ENTWICKLUNG NEUER KOMPOSITWERKSTOFFE

Dr. Ingolf Endler, M. Sc. Alfaferi Zainal Abidin, Dipl.-Phys. Mario Krug, Dipl.-Ing. Katrin Schönfeld, Dipl.-Ing. Clemens Steinborn, Dr. Hagen Klemm

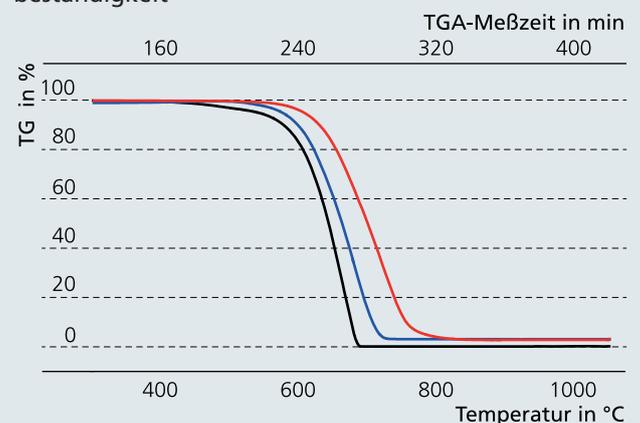
Faserverstärkte Verbundwerkstoffe finden aufgrund ihrer variablen Gestaltungsmöglichkeiten in vielen Bereichen der Industrie Verwendung. Dabei besitzen die verwendeten Fasern unterschiedliche Funktionen. Bei der Kombination von z. B. Glas oder Kohlenstofffasern mit einer duktilen Matrix wie Kunststoffe oder Metalle wird hauptsächlich das Ziel verfolgt, die Festigkeit und Steifigkeit dieser Werkstoffe zu verbessern. Im Falle von keramischen Faserverbundwerkstoffen soll mit den Fasern (Kohlenstoff oder keramische Fasern) hauptsächlich die Bruchzähigkeit und Schadenstoleranz der Werkstoffe erhöht werden. Unabhängig von der Art der Komposite besitzt das Faser-Matrix-Interface eine entscheidende Bedeutung bei der Einstellung optimaler Eigenschaften. Vielfältige Möglichkeiten eröffnen sich hier durch definierte Faserbeschichtungen, deren Funktion beispielsweise eine feste Matrixanbindung, der Schutz der Fasern vor möglichen Reaktionen mit der Matrix oder auch die Einstellung einer schwachen Faser-Matrix-Interface zur Realisierung eines schadenstoleranten Versagensverhaltens ist. Aktuell erfolgt im IKTS der Ausbau der Beschichtungsmöglichkeiten für unterschiedliche Faserwerkstoffe. Damit können zukünftig Endlosfasern und Rovings sowie dreidimensionale Fasergewebe homogen und im kontinuierlichen Betrieb beschichtet werden. Die Anlage eröffnet auch neue Möglichkeiten bezüglich der Schichttechnologien und Schichtvarianten. Sie ist sowohl für die Durchführung von CVD- als auch ALD-Prozessen konzipiert.

## Kohlenstofffaserverstärkte Metallmatrix-Komposite

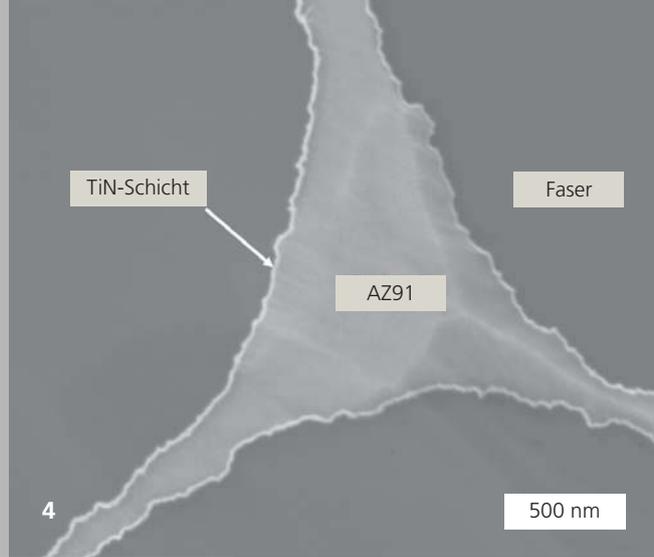
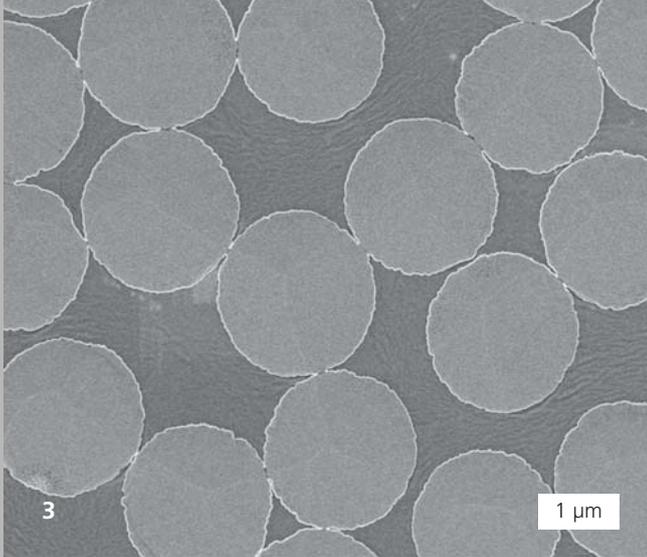
Die Herstellung moderner Metallmatrix-Komposite erfolgt heute unter Verwendung von 3D- und 2D-Kohlenstofffasergeweben, die aus Faserbündeln mit tausenden Einzelfasern bestehen. Schutzschichten aus Titanitrid (TiN) und Aluminiumoxid ( $\text{Al}_2\text{O}_3$ ), die auf den Geweben aufgebracht werden, verhindern unerwünschte Reaktionen zwischen den Fasern und der Metallmatrix. Im Fraunhofer IKTS werden hier zwei Beschichtungstechnologien zur Herstellung der Schutzschichten eingesetzt:

Chemische Gasphasenabscheidung (CVD) und Atomlagenabscheidung (ALD). Bild 1 zeigt eine neue Beschichtungsanlage, mit der zukünftig die kontinuierliche Beschichtung von Fasermaterialien sowohl mittels ALD als auch mit CVD möglich ist. Vielversprechende Ergebnisse wurden bisher sowohl mit ALD- $\text{Al}_2\text{O}_3$ -Schichten als auch mit CVD-TiN-Schichten erzielt, die in verschiedenen Laboranlagen hergestellt wurden. Beim ALD-Verfahren werden die Precursoren, sequentiell getrennt durch Spülgaspulse, zugeführt. Das im IKTS verwendete ALD-Verfahren zur  $\text{Al}_2\text{O}_3$ -Abscheidung erfolgte bei einer relativ niedrigen Substrattemperatur unterhalb von  $300\text{ }^\circ\text{C}$ , wobei als Precursoren Trimethylaluminium (TMA) und Ozon oder Wasser eingesetzt wurden. Die Herstellung der TiN-Schutzschichten erfolgt hingegen mittels CVD. Die Abscheidung wird in diesem Fall mit einer Gasmischung aus  $\text{TiCl}_4$ ,  $\text{N}_2$  und  $\text{H}_2$  im Temperaturbereich zwischen  $800\text{ }^\circ\text{C}$  und  $850\text{ }^\circ\text{C}$  durchgeführt. Mit beiden Verfahren konnte eine homogene Beschichtung der Fasergewebe erzielt werden. In Bild 2 sieht man die Bruchfläche einer Einzel-

TGA-Analyse zur Bestimmung der Oxidationsbeständigkeit



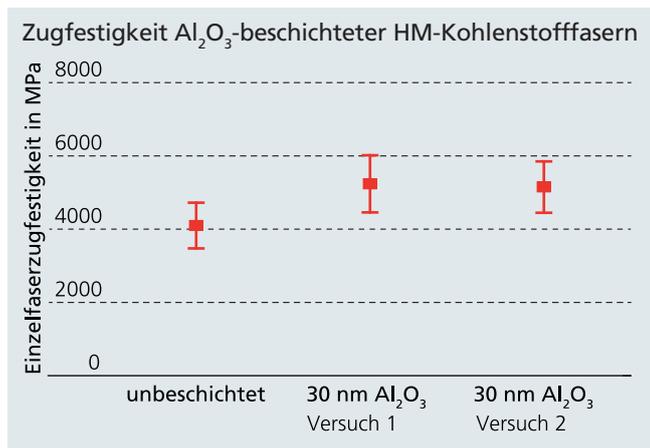
TGA @ 2,5 K/min (DIN 51006) — unbeschichtete Fasern  
 — TiN beschichtet 35 nm —  $\text{Al}_2\text{O}_3$  beschichtet 40 nm



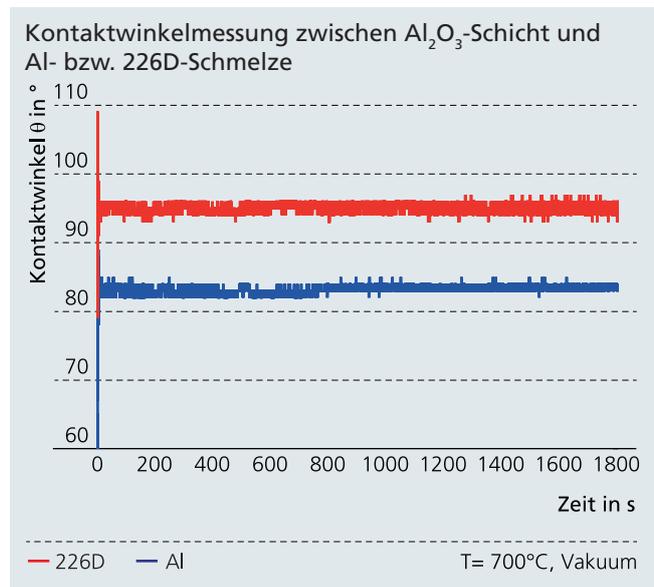
WERKSTOFFE UND VERFAHREN

faser mit konformer und gut haftender ALD- $\text{Al}_2\text{O}_3$ -Schicht. Bild 3 demonstriert die homogene Beschichtung des kompletten Faserbündels, das einem 3D-Kohlenstofffasergewebe entnommen wurde. Die  $\text{Al}_2\text{O}_3$ -Schicht besitzt eine amorphe Struktur mit glatter Oberfläche, die TiN-Schichten sind hingegen nanokristallin. Beide Schichtarten erhöhen die Oxidationsbeständigkeit der Fasern, wobei die  $\text{Al}_2\text{O}_3$ -Schichten den besten Oxidationsschutz bieten, wie thermogravimetrische Analysen (TGA) in der Graphik auf voriger Seite verdeutlichen.

Die Beschichtung beeinflusst jedoch die Zugfestigkeit der Fasern. Eine deutliche Abnahme der Zugfestigkeit wird bei TiN-beschichteten Fasern beobachtet. Diese kann durch die Verwendung geringer Schichtdicken und niedriger Beschichtungstemperaturen gemildert werden. Bei einer Beschichtungstemperatur oberhalb von 850 °C wird eine spröde und die Zugfestigkeit senkende  $\text{TiC}_x\text{N}_y$ -Zwischenschicht gebildet. Eine akzeptable Zugfestigkeit von 2000 MPa wird erreicht, wenn die TiN-Schichtdicke auf 30 nm begrenzt und eine Beschichtungstemperatur von 850 °C nicht überschritten wird. Die  $\text{Al}_2\text{O}_3$ -beschichteten Kohlenstofffasern zeigen im Vergleich zu einer unbeschichteten Faser keinen Festigkeitsabfall. Im Fall von Hochmodulfasern (HM-Fasern) wurde sogar eine reproduzierbar höhere Zugfestigkeit beobachtet, wie aus dem unteren Diagramm ersichtlich ist. Hier wirken sich die niedrige ALD-Beschichtungstemperatur unter 300 °C und die geringe Schichtdicke von 30 nm positiv aus. Die Herstellung der Komposite erfolgt durch die Infiltration der beschichteten 2D- und 3D-Gewebe mit Metallschmelzen von Aluminium- und Magnesium-

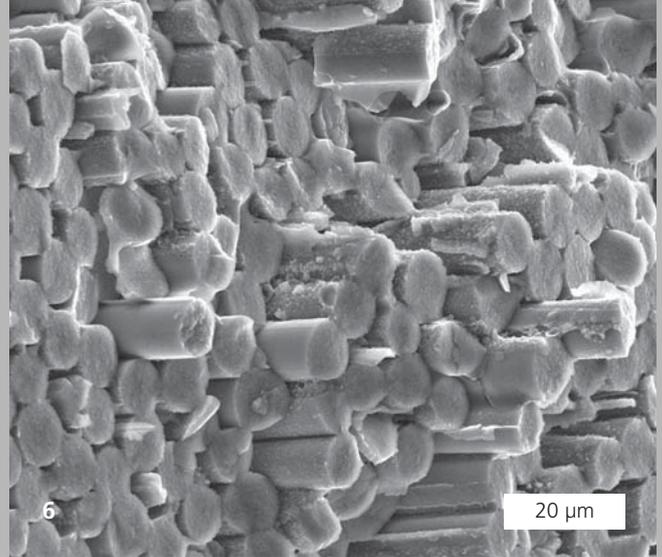
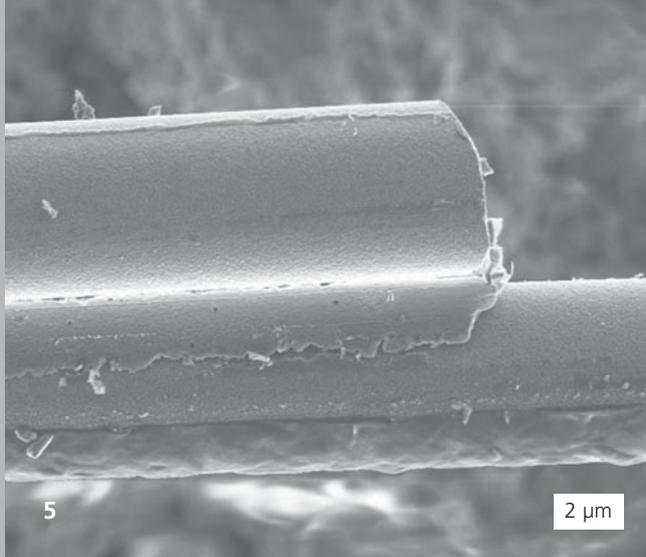


legierungen. Beide Schichttypen zeigen ein gutes Benetzungsverhalten für die verwendeten Metallschmelzen. Am FRI Krakow durchgeführte Kontaktwinkelmessungen mit Schmelzen aus reinem Al und Al-Legierungen zeigen jedoch erhebliche Unterschiede für beide Schichttypen. Die Messungen zum Vergleich der beiden Schichtsysteme für die Benetzung mit reinem Al ergaben Kontaktwinkel von 83 ° für die  $\text{Al}_2\text{O}_3$ -Schicht und ca. 130 ° im Fall der TiN-Schichten. Die Kontaktwinkelmessung für die  $\text{Al}_2\text{O}_3$ -Schicht ist in der Grafik unten rechts dargestellt. Die bessere Benetzbarkeit der  $\text{Al}_2\text{O}_3$ -Schicht erweist sich hier als Vorteil bei der Anwendung zur Herstellung von MMC mit Al-Legierungen.



Als Infiltrationsverfahren kam die Gasdruckinfiltration (GPI) zum Einsatz. Verwendet wurde eine kommerzielle Mg-Al-Legierung (AZ91) und eine Al-Si-Legierung (226D).

- 1 Neue Anlage für die kontinuierliche Faserbeschichtung.
- 2  $\text{Al}_2\text{O}_3$ -beschichtete Einzelfaser.
- 3 Querschnitt eines Faserbündels mit homogener  $\text{Al}_2\text{O}_3$ -Beschichtung.
- 4 REM-Aufnahme eines Komposits aus TiN-beschichteten C-Fasern und der Legierung AZ91.



## WERKSTOFFE UND VERFAHREN

Die Infiltration erfolgte in enger Zusammenarbeit mit dem Institut für Leichtbau und Kunststofftechnik der TU Dresden. Die  $\text{Al}_2\text{O}_3$ - oder TiN-beschichteten Gewebe konnten erfolgreich mit beiden Legierungen infiltriert werden. Der Komposit aus einem infiltrierten  $\text{Al}_2\text{O}_3$ -beschichteten 2D-Kohlenstoffasergewebe zeigt einen dichten Verbund mit geringer Porosität. Die unerwünschte Aluminiumcarbid-Bildung wird vollständig vermieden. Dies ist auch der Fall, wenn eine TiN-Schutzschicht verwendet wird. Ein Komposit aus TiN-beschichtetem 3D-Gewebe und der Magnesium-Aluminiumlegierung AZ91 zeigt ebenfalls ein dichtes Gefüge ohne  $\text{Al}_4\text{C}_3$ -Bildung am Faser-Matrix-Übergang (Bild 4). Sowohl TiN- als auch  $\text{Al}_2\text{O}_3$ -Schicht sind wirksame Diffusionsbarrieren und schützen die Kohlenstoffasern vor der aggressiven Metallschmelze bei der MMC-Herstellung.

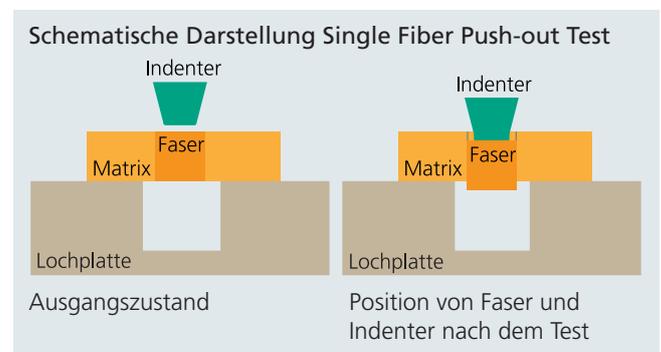
### Keramische Faserverbundwerkstoffe

Auch bei keramischen Faserverbundwerkstoffen, die z. B. als Leichtbauwerkstoff oder in Hochtemperaturprozessen Anwendung finden, werden Faserbeschichtungen benötigt, die neben einem zuverlässigen Oxidations- und Korrosionsschutz der Fasern vor allem ein schadenstolerantes Verhalten gewährleisten müssen. Somit liegt im Gegensatz zu anderen Kompositwerkstoffen mit einer duktilen Matrix, z. B. kohlenstoffaserverstärkte Kunststoffe (CFK) oder Metalle (MMC), der Schwerpunkt in dem Design einer Faser-Matrix-Anbindung, die eine Rissausbreitung im Bereich der Faser-Matrix-Interface gestattet.

Oft kommt es durch chemische Reaktionen bei der Wärmebehandlung während der Herstellung der Komposite zu einer sehr starken Bindung zwischen Faser und Matrix, die schadenstolerante Mechanismen wie Rissablenkung und Faserpull-out verhindern und somit ein sprödes Materialverhalten zur Folge haben. Durch eine zusätzliche Beschichtung der Fasern kann die Bindung zwischen Faser und Matrix gezielt eingestellt werden. Für nichtoxidische Komposite haben sich Schichten aus Kohlenstoff oder Bornitrid aufgrund der hexagonalen Schichtstruktur und der daraus resultierenden günstigen Abgleitbedingungen beim Pull-out durchgesetzt. Diese Schichten sind jedoch bei Langzeitanwendungen mit hohen Temperaturen an Luft nicht geeignet, da sie keine ausreichende Oxidationsstabilität besitzen.

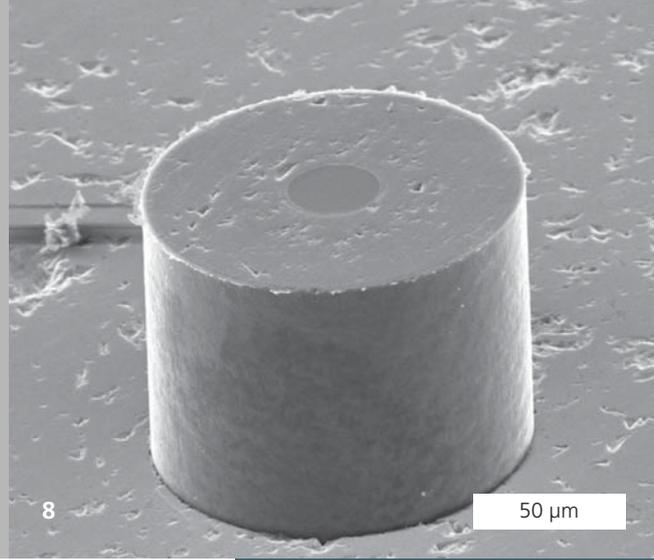
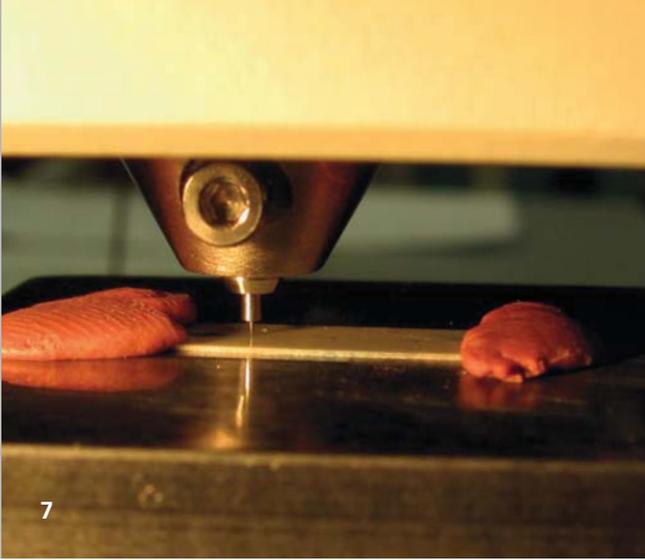
Bei künftigen Werkstoffentwicklungen müssen deshalb sehr hohe Anforderungen an das Beschichtungsmaterial bezüglich der chemischen und mechanischen Beständigkeit bei Temperaturen von  $> 1000\text{ °C}$  gestellt werden.

Zur kontinuierlichen Beschichtung der keramischen Fasern kommen zwei verschiedene Verfahren zur Anwendung, welche am IKTS installiert sind und eingesetzt werden. Beim CLPC-Verfahren (Continuous Liquid Phase Coating) wird ein flüssiger Precursor als Beschichtungsmedium verwendet, der durch thermische Prozesse in eine keramische Schicht umgewandelt wird. Als ein Beispiel für diesen Prozess sind in Bild 5 mit Pyro-Kohlenstoff beschichtete SiC-Fasern dargestellt. In Bild 6 ist das Gefüge eines SiC-/ $\text{Si}_3\text{N}_4$ -Komposits mit einer Kohlenstoffbeschichtung dargestellt.



Durch das Herauslösen der Fasern wird ein schadenstolerantes Bruchverhalten realisiert. Ein weiteres Verfahren ist die Faserbeschichtung durch die chemische Gasphasenabscheidung (CVD). Dieses Verfahren bietet den Vorteil, dass eine Schichtabscheidung durch den Materialtransport über die Gasphase auch in den kleinsten Zwischenräumen erfolgt, so dass auch im Faserbündel oder in Geweben eine Beschichtung nachweisbar ist. Es können sehr dünne, gleichmäßige Schichten erzeugt werden, wie in Bild 3 dargestellt.

Wie bereits erwähnt, ist die Stärke der Bindung zwischen Faser und Matrix entscheidend für das schadenstolerante Bruchverhalten des Komposits. Zur Messung der mechanischen Anbindung werden am IKTS Ausdrückversuche an Einzelfasern (single fiber push-out tests) durchgeführt.



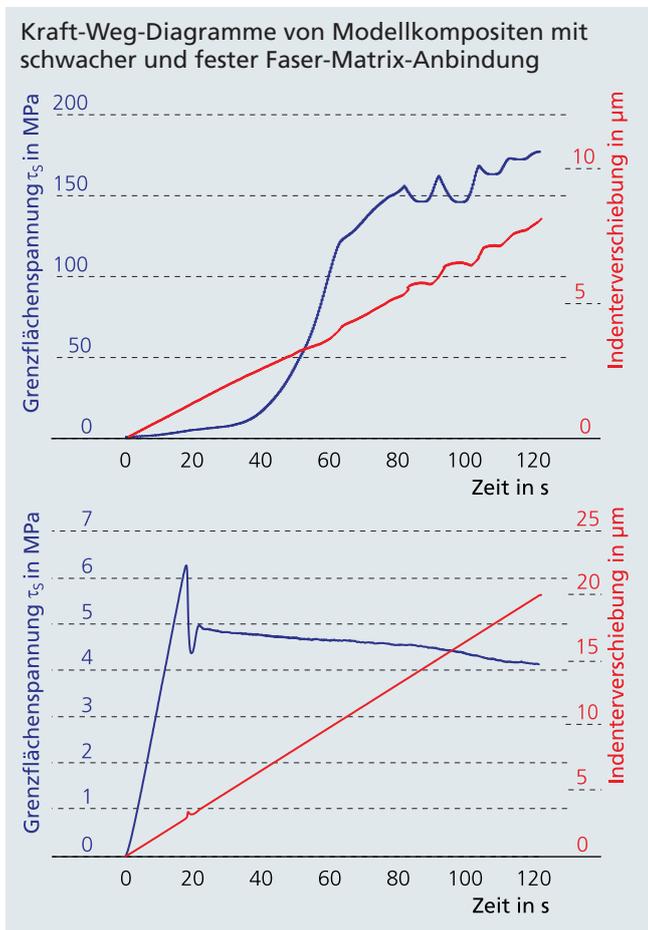
**WERKSTOFFE UND VERFAHREN**

In Bild 7 ist eine in Messung befindliche Probe dargestellt. Auf diese Weise ist es möglich, die Faser-Matrix-Anbindung in Abhängigkeit von der Art der Beschichtung und der Beschichtungstechnologie zu charakterisieren und die Anforderungen an die Materialentwicklung zu definieren.

Durch die Präparation sehr dünner Proben ist es mit dieser Methode möglich, reproduzierbare Kraft-Weg-Messungen durchzuführen und daraus die charakteristische Scherspannung für die Faserablösung zu berechnen. Eine geringe Scherfestigkeit wird durch eine sehr schwache Anbindung zwischen Faser und Matrix hervorgerufen. Die Faser kann sehr leicht aus der Matrix herausgedrückt werden, wie es in Bild 8 dargestellt ist. Diese schwache Anbindung wird durch eine Beschichtung der Fasern hervorgerufen. Im Gegensatz dazu besitzen unbeschichtete Fa-

sern eine sehr hohe Scherfestigkeit. Wie im Diagramm abgebildet, erfolgt bei einer geringen Anbindung das Ablösen der Faser von der Matrix schon bei niedrigen Spannungen (6 MPa) und es ist eine deutliche Verschiebung des Indenters zu verzeichnen. Bei starker Faser-Matrix-Anbindung ist ein steiler Spannungsanstieg bis 120 MPa zu beobachten, ohne dass eine deutliche Verschiebung des Indenters erfolgt. Bei diesen Spannungen ist die Druckfestigkeit der Faser erreicht, sodass sich in der Faser Risse bilden. Bei einer derartig großen Grenzflächen-spannung bzw. Faser-Matrix-Anbindung ist für den Komposit ein sprödes Versagensverhalten zu erwarten. Die ermittelten Grenzflächeneigenschaften lassen sich auch auf das mechanische Verhalten der Kompositwerkstoffe übertragen.

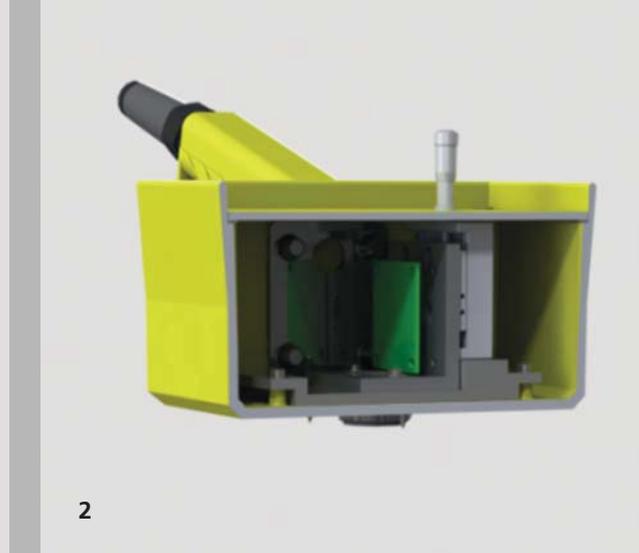
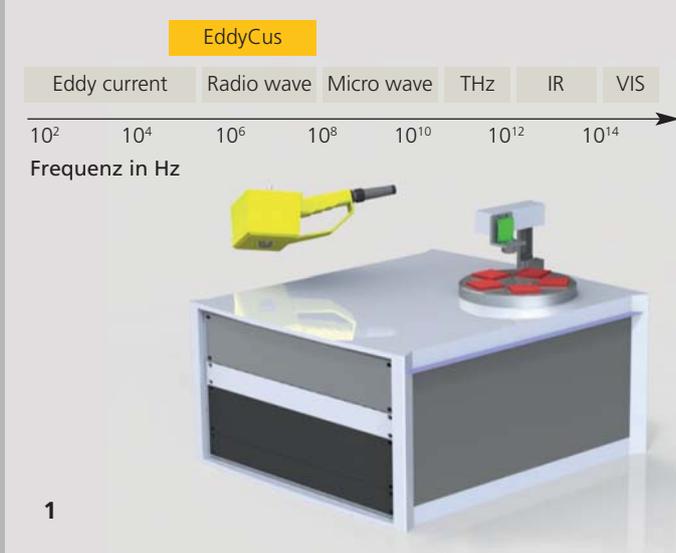
Durch diese Charakterisierungsmethode ist es möglich, ein geeignetes Design von Faser-Zwischenschicht-Matrix für den jeweiligen Anwendungsfall auszuwählen. Je nach Anwendung kommen oxidische oder nichtoxidische Fasern zum Einsatz. Das Matrixmaterial wird danach entsprechend den chemischen und mechanischen Anforderungen in Übereinstimmung zu dem oxidischen / nichtoxidischen Materialsystem ausgewählt. Um das geforderte schadenstolerante Verhalten zu erzielen, erfolgt als letzter Schritt im CMC-Design die Schichtauswahl an das jeweilige Materialsystem. Auf diese Art und Weise lassen sich, angepasst an den jeweiligen Anwendungsfall, die Compositeigenschaften gezielt einstellen.



**Leistungs- und Kooperationsangebot**

- Funktionelles Design der Faser-Matrix-Interface in Verbundwerkstoffen
- Kontinuierliche Faserbeschichtung über CLPC-, CVD- und ALD-Verfahren, Beschichtung von Fasergeweben
- Herstellung und Charakterisierung von MMC und CMC

- 5 Mit Pyro-Kohlenstoff über CLPC-Verfahren beschichtete SiC-Faser.
- 6 Bruchfläche eines CMC mit Beschichtung.
- 7 CSM-Gerät: Messvorrichtung für Push-out-Test.
- 8 SiC-ISCS-Faser mit schwacher Faser-Matrix-Anbindung nach dem Ausdrückversuch.



**WERKSTOFFE UND VERFAHREN**

# IMPEDANZANALYSE FÜR DIE MATERIAL-DIAGNOSTIK

Jun.-Prof. Henning Heuer, Dipl.-Ing. Iryna Patsora, M. Sc. Susanne Hillmann, Dipl.-Ing. (BA) Martin Schulze, Dipl.-Ing. (FH) Matthias Pooch

## Impedanzanalytische Verfahren

Verfahren der Impedanzanalyse zeichnen sich durch ihre Vielseitigkeit und einfache Handhabbarkeit aus. Die Impedanz ist ein materialspezifischer Parameter, der den Widerstand eines Materials gegen die Ausbreitung einer elektromagnetischen oder mechanischen Welle beschreibt. Im ersten Fall spricht man von der elektrischen, im zweiten Fall von der akustischen Impedanz. Beide Verfahren können eingesetzt werden, um komplexe Materialparameter, wie Dichte, E-Modul, Abweichung der stofflichen Zusammensetzung, Feuchte oder Polymerisation zu bewerten.

## Elektrische Impedanzanalyse

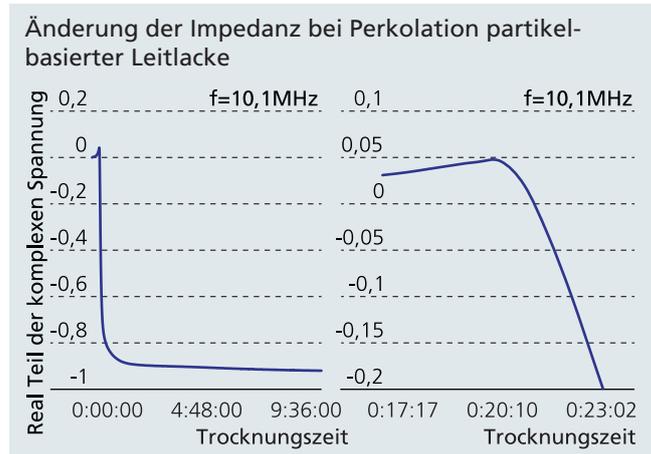
Die elektrische Impedanzanalyse kann sowohl mittels direkter elektrischer Kontaktierung eines Materials als auch mittels kapazitiver oder induktiver Einkopplung durchgeführt werden. Direktkontaktierende Verfahren sind meist an den Laborbetrieb gebunden und bei Festkörpern anwendbar. Für Flüssigkeiten, Pasten oder grüne Keramik kommen kapazitive bzw. induktive Verfahren zum Einsatz. Speziell die induktiven Verfahren im Radiowellen-Frequenzbereich ermöglichen eine Feldfokussierung. Damit erlauben sie sehr empfindliche, kontaktfrei arbeitende Sensoren mit einer, im Vergleich zu kapazitiven Sensoren, höheren Ortsauflösung.

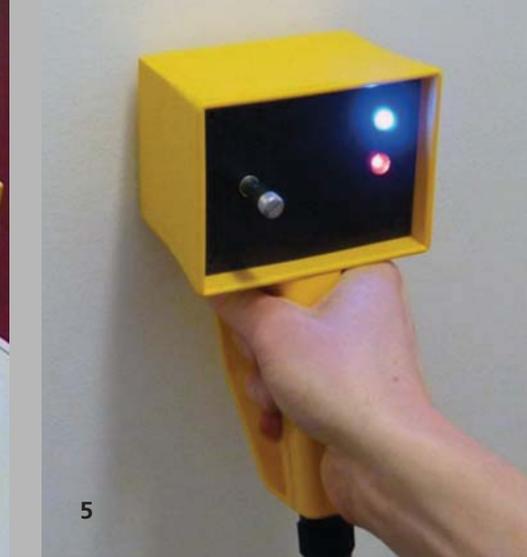
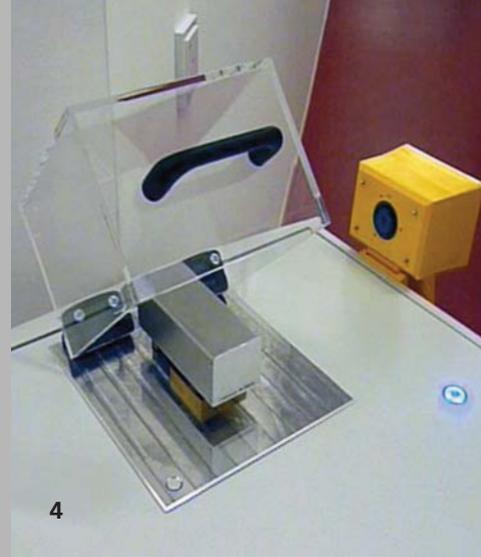
Grundlage des Verfahrens ist ein elektromagnetisches Wechselfeld, das über eine Induktionsspule in ein Objekt eingekoppelt wird. Bei elektrisch leitfähigen Objekten wird damit ein Wirbelstromfluss im Material angeregt. Für die Materialdiagnose wird die elektrische Impedanz der Messspule ausgewertet. Dielektrische Materialien können untersucht werden, da Verschiebestrome und Polarisierungseffekte das Feld und damit die Impedanz der Messspule beeinflussen.

Das Verfahren wird z. B. zur Bewertung des Trocknungsverhaltens von elektrisch leitfähigen Lacksystemen eingesetzt, die zukünftig als Blitzschutz im Flugzeugbau Anwendung finden können. Hierbei wird die Flugzeugoberfläche mit Lacken beschichtet, die mit elektrisch leitfähigen Partikeln versetzt sind.

Ziel des Verfahrens ist die Prognose der nach der Trocknung zu erwartenden Leitfähigkeit im noch nassen Zustand, also unmittelbar nach der Lackierung. Damit kann der Lack im Fall einer fehlerhaften Schichtdicke oder abweichenden Partikelkonzentration im nassen Zustand nachgearbeitet oder entfernt werden. Bisher ist die Prüfung des Beschichtungsergebnisses erst möglich, wenn der Lack getrocknet ist. Das kann sehr teuer werden, wenn der Lack bei einer Fehlbeschichtung auf der gesamten Flugzeugoberfläche mechanisch entfernt werden muss.

Der induktive Impedanz-Analysator »EddyCus® Wet« vom Fraunhofer IKTS ermöglicht die Bestimmung des Perkolationsverhaltens der Schicht über eine kontaktfreie Impedanzmessung sofort nach der Schichtabscheidung. Da die Partikel unmittelbar nach der Beschichtung noch nicht miteinander





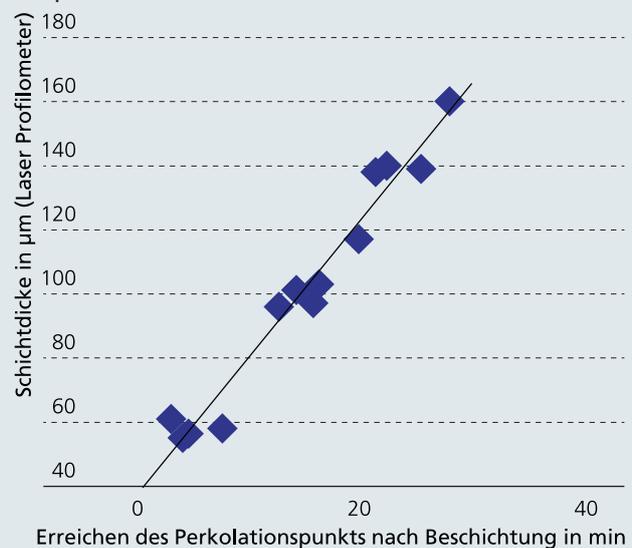
## WERKSTOFFE UND VERFAHREN

verbunden sind, hat die Schicht dielektrische Eigenschaften. Bei der Trocknung setzt die Perkolation ein, d. h. die Partikel-dichte erhöht sich. Kurz vor Erreichen des Perkulationspunkts dominieren kapazitive Effekte zwischen den dicht benachbarten Partikeln. Nach erfolgter Perkolation ist die Schicht elektrisch leitfähig aber noch feucht. Der Zeitpunkt des Perkulationspunkts kann aus der Impedanzmessung sehr gut bestimmt werden und korreliert mit der zukünftigen Schichtdicke im trockenen Zustand. Die Partikelkonzentration und damit die Schichtleitfähigkeit im trockenen Zustand kann aus der Amplitude im Perkulationspunkt vorhergesagt werden.

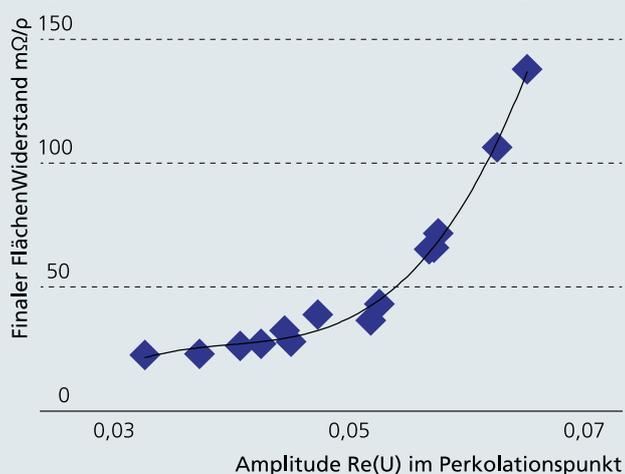
Über eine Kalibrierung des Messsystems kann zudem aus dem Perkulationspunkt auf die zukünftige Schichtdicke und Schichtleitfähigkeit geschlossen werden.

Der entwickelte Prototyp »EddyCus® Wet« verfügt über einen stationären und einen mobilen Sensor. Der stationäre Sensor dient der Referenzierung, der mobile Sensor kann am Objekt, z. B. auf einem Gerüst über Kopf am Flugzeug, angewendet werden.

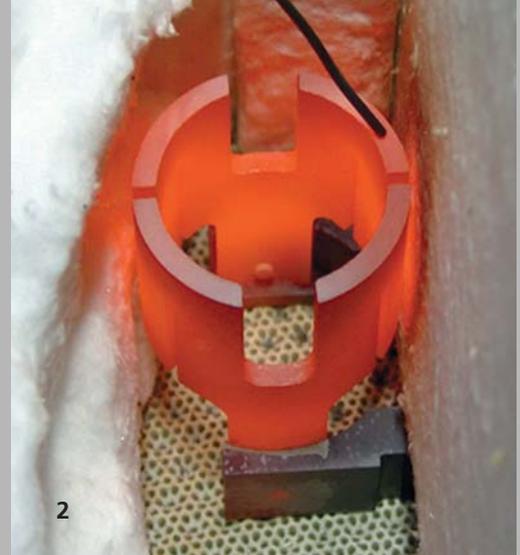
Prognose der Schichtdicke aus dem Perkulationszeitpunkt



Prognose des Flächenwiderstands aus der Amplitude



- 1 Einordnung von Radiowellenverfahren.
- 2 »EddyCus® Wet« – Konstruktions-system.
- 3 Prototyp »EddyCus® Wet«.
- 4 Stationärer Sensor zur Referenzierung des entwickelten Impedanz-Analysators.
- 5 Mobiler Sensor zur kontaktfreien Impedanzmessung.



# LEITFÄHIGE KERAMIK ALS ELEKTROWERKSTOFF FÜR DEN HOCHTEMPERATURBEREICH

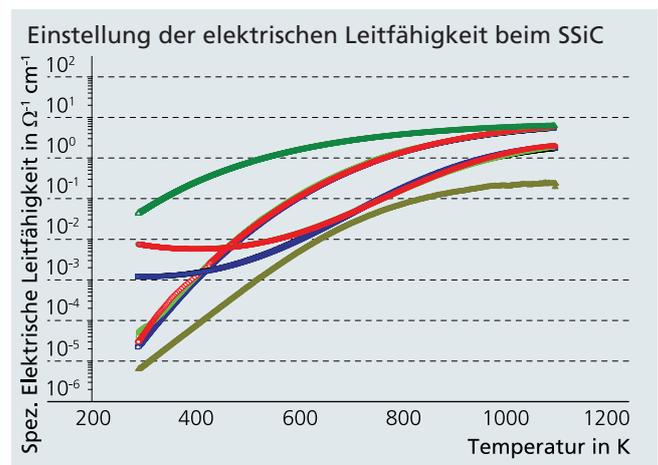
Dr. Hans-Peter Martin

Von keramischen Werkstoffen wird im Allgemeinen eine gute elektrische Isolation erwartet. Das trifft für sehr viele Keramikwerkstoffe zu. Andererseits sind Keramiken hinsichtlich der elektrischen Leitfähigkeit deutlich variabler als Metalle oder Kunststoffe. Keramikwerkstoffe sind insbesondere bei hohen Temperaturen elektrisch und konstruktiv, trotz inhärenter Sprödigkeit und Bruchanfälligkeit, vorteilhaft nutzbar. Auch für Temperaturen < 500 °C ist der Einsatz von Keramikwerkstoffen interessant, weil mechanische und chemische Stabilität fast immer vorhanden sind.

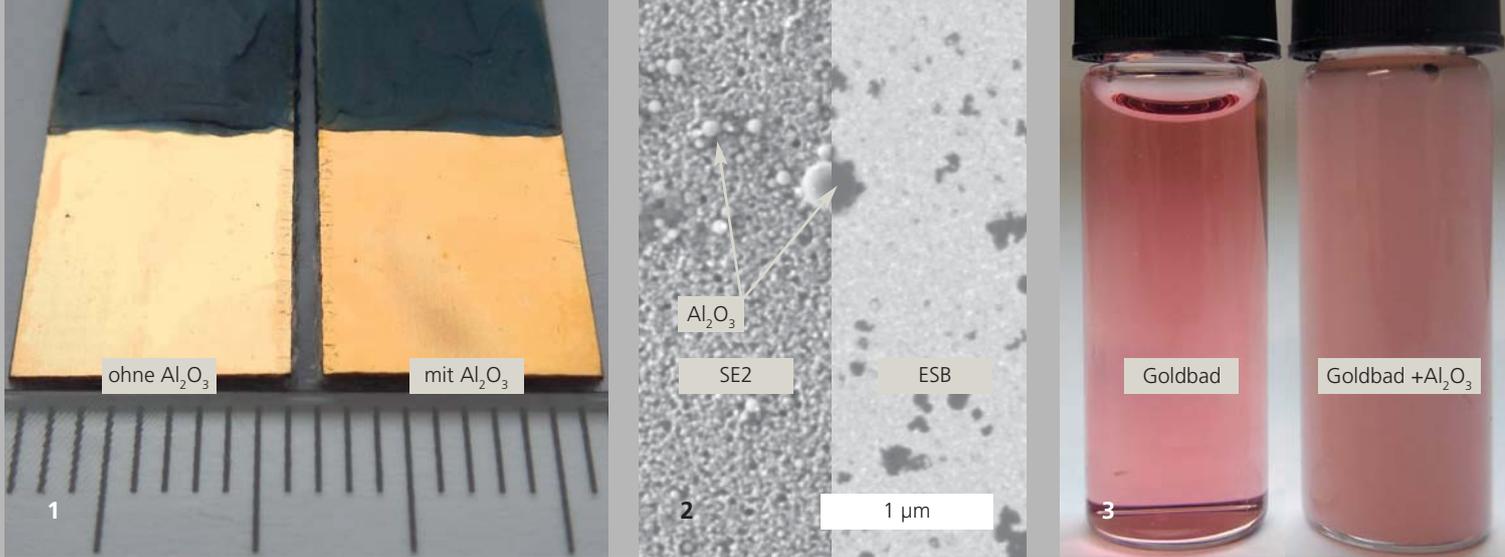
Metallähnliche Carbide (ZrC, TiC) oder Nitride (TiN, TaN) verfügen über eine hohe elektrische Leitfähigkeit bis zu 10<sup>5</sup> S/cm, die bei Temperaturerhöhung abfällt. Im Unterschied zu Metallen und Metalllegierungen sind die genannten Werkstoffe in den meisten Fällen deutlich härter, hochtemperaturfester und chemisch stabiler. Aktuell werden am IKTS industriell nutzbare Herstellungsverfahren für Zirconcarbid-Werkstoffe entwickelt, die Wolfram und Molybdänwerkstoffe für Hochtemperaturanwendungen ersetzen können. Zirconcarbid zeichnet sich selbst bei Temperaturen um 2000 °C durch einen ähnlich niedrigen Vakuumdampfdruck wie Wolfram aus.

Elektrisch halbleitende Keramikwerkstoffe sind beispielsweise Siliziumcarbid, Borcarbid oder Titansuboxid. Neben einer moderaten elektrischen Leitfähigkeit im Bereich von 10<sup>-2</sup> bis 10<sup>3</sup> S/cm bei Raumtemperatur, die auch bei einem Werkstofftyp über mehrere Größenordnungen verändert werden kann, verfügen diese Werkstoffe über eine thermische Belastbarkeit > 1000 °C, Abrasionsbeständigkeit und chemische Stabilität in aggressiver Atmosphäre. Das Eigenschaftsspektrum solcher Werkstoffe ist außergewöhnlich flexibel, so dass funktionale und konstruktive Aufgaben mit einem speziell angepassten Werkstoff gelöst werden können. Somit können beispielsweise Heizaufgaben und Temperatursensorfunktionen mit konstruktiv stützender Funktion durch Heizelementen aus Siliziumcarbid erfüllt werden.

Keramische Komposite aus metallähnlichen, halbleitenden und isolierenden Keramiken (z. B. Si<sub>3</sub>N<sub>4</sub> + SiC + MoSi) oder beliebige Kombinationen aus verschiedenen halbleitenden Keramiken (z. B. SiC + B<sub>4</sub>C) wurden am IKTS hergestellt und für spezielle Aufgaben angepasst. Für eine variable Multifunktionalität bieten derartige Kompositkeramiken eine verfügbare Basis. Genauer Kenntnis zu den jeweiligen Herstellungsbedingungen können erarbeitet werden und schaffen so die Voraussetzung für wirtschaftlich wettbewerbsfähige Werkstoffe mit zukunftsweisenden Optionen im Anlagenbau, für Maschinenkomponenten und in der Sensorik. Werkstoff- und Komponentenentwicklung sowie elektrische Messungen von Raumtemperatur bis 1000 °C einschließlich der Bestimmung elektronischer Werkstoffgrößen bilden die Grundlage anwendungsorientierter Projekte.



- 1 Gefüge eines bei 2000 °C drucklos gesinterten Zirconcarbidwerkstoffs.
- 2 Siliziumcarbidheizer.



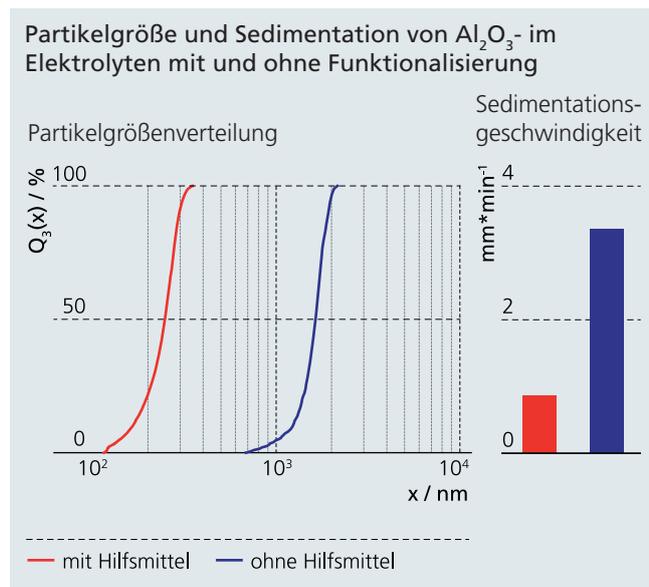
# KERAMISCHE NANOPARTIKEL FÜR ELEKTROLYTISCHE SCHICHTEN

M. Sc. Mathias Weiser, Dr. Anja Meyer, Dr. Annegret Potthoff, Dr. Michael Schneider

Durch den Einbau von keramischen Partikeln während der elektrolytischen Abscheidung können galvanische Schichten hinsichtlich ihrer Funktionalität und Eigenschaft modifiziert werden. So können beispielsweise die Härte und Verschleißfestigkeit von Nickelschichten durch Zugabe von keramischen Mikropartikeln (z. B.  $B_4C$ ) erhöht werden. Für die Entwicklung neuerer Dispersionsschichtsysteme geht der Trend zum Einbau submikro- und nanoskaliger Partikel, von denen man sich einerseits noch bessere mechanische Eigenschaften verspricht und die andererseits einen Einbau in noch dünnere Schichten erlauben.

Für viele Anwendungen ist es entscheidend, dass die keramischen Nanopartikel homogen in die elektrolytische Schicht eingebaut werden. Das setzt eine konstante Abscheiderate des Metalls wie der Partikel sowie eine konstante Konzentration vor der Elektrode voraus. Beides muss aufeinander abgestimmt werden. Zudem müssen Agglomeration und Sedimentation der keramischen Nanopartikel im galvanischen Bad vermieden werden. Da galvanische Bäder hoch leitfähig sind und die elektrochemische Doppelschicht um die Partikel nur eine geringe Reichweite aufweist, lassen sich nicht elektrostatisch gegen Agglomeration stabilisieren. Alternativ werden sterisch stabilisierende Hilfsmittel eingesetzt, die wiederum möglichst nicht in die Metallschicht eingebaut werden sollen. Die nebenstehende Grafik zeigt die erfolgreiche Stabilisierung nanoskaliger  $Al_2O_3$ -Partikel in einem Goldelektrolyten durch den Einsatz eines organischen Hilfsmittels. Die Partikelgrößenverteilung zeigt, dass der Äquivalentdurchmesser  $x_{50,3}$  von  $Al_2O_3$  nur 270 nm anstatt 1,6  $\mu m$  beträgt. Gleichzeitig sinkt die Sedimentationsgeschwindigkeit (Grafik rechts) und die zeitliche Stabilität des galvanischen Bads steigt, was für den Einsatz in der Galvanik vorteilhaft ist. Bild 3 zeigt die zur Beschichtung verwendete Suspension mit stabilisiertem  $Al_2O_3$  im Goldbad. Durch den Einbau nanoskaliger keramischer Hartstoffe wie  $Al_2O_3$ , WC u. a. können auch Goldschichten von weniger als einen Mikrometer Schichtdicke hart und verschleißbeständig

hergestellt werden. Das spart teure Edelmetalle als Auflage im Bereich der Schmuck- oder Uhrenindustrie oder erhöht die Lebensdauer von elektrischen Schwachstromkontakten.



## Danksagung

Die Autoren danken der AiF (IGF Nr. 16864 BR).

- 1 Goldschicht ohne und mit  $Al_2O_3$ -Nanopartikeln.
- 2 REM-Aufnahme von  $Al_2O_3$ -Nanopartikeln in einer Goldschicht (SE2 & ESB).
- 3 Goldbad ohne (l.) und mit (r.)  $Al_2O_3$ .

