

## Funktionalisierung von additiv gefertigten Keramikkomponenten über Dickschicht- technologien

---

**Hochintegrierte Funktionskomponenten für Elektronik, Analytik,  
Sensorik und Prozesstechnik**

## Inhalt

---

1. Einleitung .....	3
2. Dickschichttechnologie in der Elektronik und Mikrosystemtechnik .....	3
3. Grundlagen der Dickschichttechnologie .....	4
4. Dickschichtpasten .....	4
5. Siebdruck von Dickschichtpasten und Wärmebehandlung.....	6
6. Assemblierung.....	7
7. Anwendungsbeispiele .....	7
8. Schlussfolgerungen.....	8
9. Übertragbarkeit auf weitere Materialgruppen .....	8

## Kontakt

---

### **Dr.-Ing. Lars Rebenklau**

Fraunhofer-Institut für Keramische Technologien und Systeme IKTS  
Winterbergstraße 28 | 01277 Dresden

Telefon +49 351 2553-7986  
lars.rebenklau@ikts.fraunhofer.de  
www.ikts.fraunhofer.de

## 1. Einleitung

Additive Fertigungsverfahren eröffnen für eine Vielzahl verschiedener Werkstoffe wie Kunststoffe, Metalle oder Keramiken gänzlich neue Möglichkeiten hinsichtlich geometrisch komplex geformter Komponenten. Für bestimmte Anwendungen besteht zudem ein hohes Interesse, diese Bauteile mit weiteren Funktionen zu versehen. Oftmals sind diese Ansätze mit elektrischen, sensorischen oder aktorischen Funktionen verbunden. Hieraus ergibt sich die Notwendigkeit die additiv hergestellten Komponenten mit entsprechenden Schichtsystemen zu »funktionalisieren«, wofür in verschiedenen wissenschaftlichen Arbeiten der Ansatz des Multimaterialdruckes verfolgt wird. Das bedeutet, dass für die Herstellung dieser Multimaterialkomponenten gleichzeitig verschiedene Verarbeitungsköpfe genutzt werden. Diese sind mit unterschiedlichen Werkstoffen befüllt. Hierdurch wird es beispielsweise im Falle von Keramiken möglich, sowohl den ungebrannten keramischen Schlicker als auch die elektrisch funktionalen Schichten gleichzeitig zu drucken. Nach dem Druck der Grünkörper wird in einem gemeinsamen thermischen Prozess der gesamte Körper eingebrannt und es entsteht das gewünschte multifunktionale Bauteil.

Im vorliegenden Beitrag wird ein alternativer Ansatz anhand keramischer Werkstoffe aufgezeigt, bei dem die multifunktionalen Komponenten in zwei separaten Technologieschritten realisiert werden. In einem ersten Schritt erfolgt die Herstellung der keramischen Komponente einschließlich der Sinterung. In einem zweiten technologischen Schritt wird diese Keramikkomponente funktionalisiert. Für  $\text{Al}_2\text{O}_3$  sowie weitere Keramiken bietet sich hierbei die in der Elektronik und Mikrosystemtechnik etablierte Dickschichttechnologie an. Mit dieser lassen sich elektrische Leiterbahnen, Widerstände, Heizelemente oder Sensoren auf die keramischen Substrate aufdrucken und einbrennen. Die elektrische Anschlusskontaktierung wird durch bewährte

Verfahren der Aufbau- und Verbindungstechnik der Elektronik realisiert. Der Vorteil dieses Ansatzes wird darin gesehen, dass die zur Funktionalisierung erforderlichen Materialien und Werkstoffe industriell verfügbar sind. Ebenso besteht umfangreiches Technologie-Know-How sowohl hinsichtlich der Prozessierung als auch der Weiterverarbeitung. Applikative Umsetzungen sind damit zeitnah möglich.

Das Whitepaper gibt einen stark vereinfachten Überblick über die Grundlagen der Dickschichttechnologie sowie ihrer Adaption auf additiv gefertigte Keramikbauteile auf Basis von Aluminiumoxid ( $\text{Al}_2\text{O}_3$ ).

## 2. Dickschichttechnologie in der Elektronik und Mikrosystemtechnik

In der Elektronik und der Mikrosystemtechnik werden definierte elektrische Funktionen durch elektronische Bauteile realisiert, die in einer Schaltung angeordnet sind. Es ist es notwendig, diese Bauteile auf Verdrahtungsträger zu montieren und elektrisch zu verbinden. Der Verdrahtungsträger ist hierbei ein mechanischer Träger, der gleichzeitig die erforderlichen Leiterbahnen trägt, die Kontaktierung der Bauteile ermöglicht und in ein übergeordnetes System eingebunden ist. Bedingt durch ökonomische Rahmenbedingungen im Bereich der Low-Cost- und Konsumgüterelektronik werden für diese Anwendungen hauptsächlich Verdrahtungsträger auf Basis organischer Werkstoffe eingesetzt. Diese sind allgemein als Leiterplatte bekannt.

Neben dieser Leiterplattentechnologie können im High-Performance-Bereich oder für Anwendungen unter rauen Umgebungsbedingungen auch keramische Werkstoffe für den Bau solcher Verdrahtungsträger verwendet werden. Diese bieten individuelle und materialbedingte Vorteile:



Abbildung 1: Druckjobvorbereitung eines Dreikammer-Fluidmischers (links), 3D-gedruckter Dreikammer-Fluidmischer mit unterschiedlichen Wandstärken und verdeckten Kanälen (Mitte), additiv gefertigter Fluidheizer mit aufgedruckten Leiterbahnen (rechts).

- Erhöhte Wärmeleitfähigkeit kombiniert mit hervorragenden elektrischen Isolationseigenschaften, auch bei höheren Betriebstemperaturen
- An aktive Halbleiterbauelemente angepasster thermischer Ausdehnungskoeffizient
- Höhere Prozesstemperaturen
- Möglichkeit der Montage von gehäuselosen Komponenten

Grundsätzlich gibt es verschiedene Möglichkeiten, Leiterbahnen auf keramischen Substraten zu erzeugen, um diese als keramische Verdrahtungsträger zu verwenden. Eine dieser Möglichkeiten ist die Dickschichttechnik. Sie ist damit auch geeignet, um additiv gefertigte keramische Bauteile zu funktionalisieren – z. B. weitere Eigenschaften wie Heiz- oder Sensorelemente hinzuzufügen.

### 3. Grundlagen der Dickschicht-technologie

Betrachtet man die Möglichkeiten der Verwendung keramischer Werkstoffe für die Realisierung von Verdrahtungsträgern, so wird deutlich, dass es auch hier verschiedene technologische Wege gibt. Jeder von ihnen hat spezifische Vor- und Nachteile für individuelle Anforderungen und wird entsprechend der Zielanwendung ausgewählt. So unterscheiden sich die Anforderungen grundsätzlich, ob z. B. ein Power-Modul für die Leistungselektronik oder ein Modul für Hochfrequenz-Anwendungen entwickelt werden soll. Bei der DCB/AMB-Technologie werden flache Kupferfolien entweder durch Sinterprozesse (DCB) oder auf Basis von Spezialloten über Lötprozesse (AMB) mit den keramischen Substraten verbunden. Ziel ist es, Leiterzüge mit sehr hohem Leiterzugquerschnitt zu erzeugen. Die Technologien werden beim Aufbau von Power-Modulen in der Leistungselektronik eingesetzt.

Diagonal andere Anforderungen an die Leiterzuggeometrien bestehen bei der Hochfrequenz-Technik. Hier wird ein fein aufgelöstes Leiterbild mit geringen Schichtdicken benötigt. Erzeugt werden diese mittels verschiedener Dünnschichtverfahren wie Aufdampfen oder Sputtern. Technologisch zwischen diesen beiden Varianten ist die Dickschichttechnik angeordnet. Sie basiert auf pastösen Materialien – den sogenannten Dickschichtpasten. Diese Pasten werden mittels geeigneter Drucktechniken auf keramische Substrate strukturiert gedruckt und anschließend in definierten Prozessen bei Temperaturen von ca. 850 °C miteinander versintert. So lässt sich mittels Dickschichttechnologie ein keramisches Substrat mit einem beliebig komplexen Leiterbild herstellen.

### 4. Dickschichtpasten

Über die Dickschichtpasten, die verschiedene unterschiedliche elektrische Eigenschaften wie Leitfähigkeit oder Widerstand aufweisen, ergibt sich ein ausgeprägter »Baukasten«, der verwendet werden kann, um unterschiedliche Funktionalitäten abzubilden. Die einzelnen Pasten werden im Folgenden beschrieben. Im Grundsatz bestehen Dickschichtpasten immer aus vier Komponenten: Funktionsmaterialien, Gläser, organische Bindemittel und Lösungsmittel. Dabei bestimmen die einzelnen Komponenten die elektrischen und mechanischen Eigenschaften der finalen Schicht und die Verarbeitungsparameter der Paste beim Druck.

Die Lösungsmittel und organischen Bindemittel bilden die Druckschubstanz und bestimmen das Druckverhalten. Sie werden während des Trocknens und Einbrennens entfernt. Die anorganischen Binde-

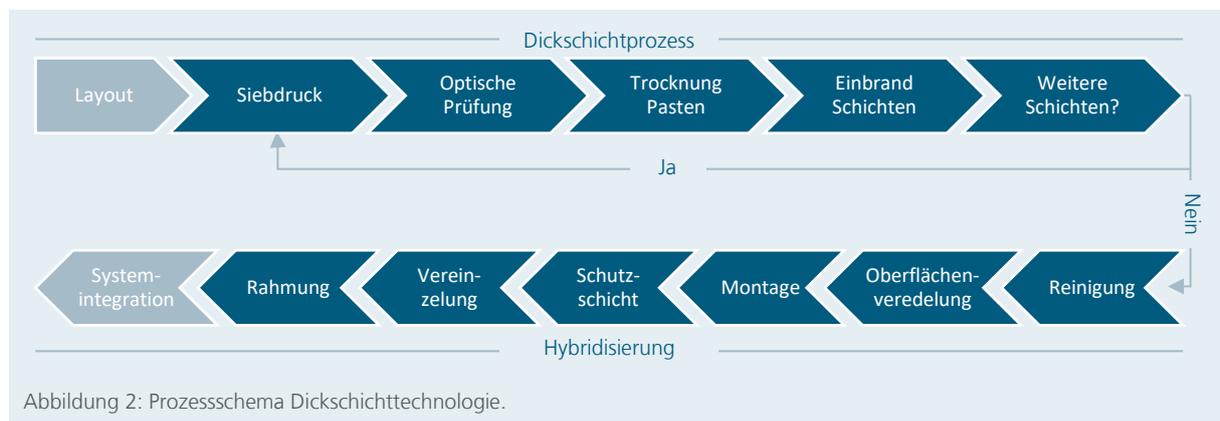


Abbildung 2: Prozessschema Dickschichttechnologie.

mittel dienen dazu, die Haftung der Partikel der aktiven Phase untereinander und auf dem Substrat zu gewährleisten. Das Funktionsmaterial bestimmt die elektrische Eigenschaft der Paste. Hier kann zwischen leitfähigen, isolierenden und Widerstandspasten unterschieden werden. Der Aufbau einer Dickschichtschaltung aus mehreren Pasten – einem sogenannten Pastensystem – setzt voraus, dass die Pasten beispielsweise mit dem gleichen Brennprofil verarbeitet werden können und miteinander chemisch kompatibel sind. Kommerzielle Pastensysteme bestehen aus leitfähigen, isolierenden und resistiven Pasten. Darüber hinaus gibt es auch Pasten für spezielle Anwendungen, z. B. Sensorpasten oder Pasten für spezielle Substrate (Stahl, Aluminium, Glas).



Abbildung 3: Dickschichtpaste für den Siebdruck auf keramischen Substraten.

Neben den elektrischen Eigenschaften der eingebrannten Pasten und deren Verträglichkeit muss auch das Fließverhalten (Rheologie) der zu druckenden Pasten den besonderen Anforderungen des Siebdrucks entsprechen. Einerseits muss sich die während des Druckvorgangs durch die einzelnen Maschen gepresste Paste zu einem zusammenhängenden Gefüge verbinden, andererseits soll dieses Gefüge nicht weiter auseinanderfließen. Diese gute Fließfähigkeit für kurze Zeit wird durch die Strukturviskosität und Thixotropie der Paste erreicht, die sich gezielt durch die Auswahl der organischen Bindemittel und Lösungsmittel beeinflussen lassen. Unter Thixotropie wird die reversible Abnahme der Viskosität bei konstanter Scherbeanspruchung verstanden.

## Leitpasten

Pasten mit Edelmetallen wie Gold oder Silber als Hauptbestandteil werden hauptsächlich zur Herstellung von leitfähigen Strukturen verwendet. Die elektrischen Eigenschaften können zudem durch den Zusatz von Palladium oder Platin gezielt beeinflusst werden. Eine Alternative stellen edelmetallfreie Kupferleitpasten dar. Um eine Oxidation beim Brennen zu vermeiden, müssen diese Pasten unter Inertgas (meist hochreiner Stickstoff) gebrannt werden. Der Vorteil durch die Edelmetalleinsparung wird jedoch durch die höheren Kosten für die Herstellung des Kupferpulvers und den notwendigen Einsatz eines Inertgases weitgehend aufgehoben.

Die gebrannten leitfähigen Strukturen müssen folgende Anforderungen erfüllen:

- Ausreichende Haftfestigkeit
- Gute elektrische Leitfähigkeit ( $RF = 1,5\text{--}50 \text{ m}\Omega/\text{qm}$ )
- Lötbarkeit und Bondbarkeit (falls erforderlich)
- Geringe Neigung zu Diffusion und Migration
- Korrosionsbeständigkeit

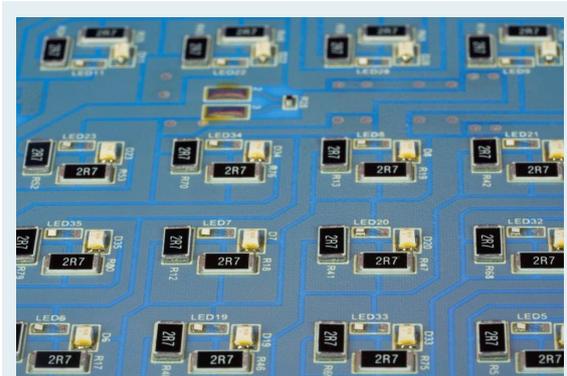


Abbildung 4: Mit elektrischen Bauelementen bestücktes keramisches Dickschichtsubstrat (Bestücktechniken, Löten, Kleben und Drahtbonden).

## Widerstandspasten

In Widerstandspasten werden hauptsächlich Rutheniumoxid ( $\text{RuO}_2$ ) und Bismutruthenat ( $\text{Bi}_2\text{Ru}_2\text{O}_7$ ) als Funktionsmaterial verwendet. Damit lassen sich gute elektrische Eigenschaften erreichen (Temperaturkoeffizient, Langzeitstabilität, Rauschen) und einen Widerstand im Bereich von  $10 \Omega/\text{Quadrat}$  bis  $10 \text{ M}\Omega/\text{Quadrat}$  abdecken.

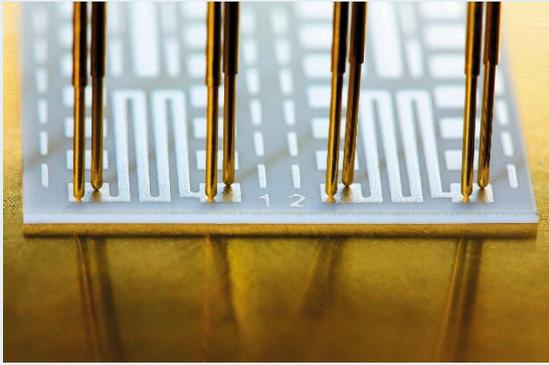


Abbildung 5: R(T)-Messung an einer Widerstandspaste.

Die reproduzierbare Herstellung von Dickschichtwiderständen mit definierten Eigenschaften erfordert die Kenntnis aller Einflüsse und die genaue Einhaltung des vorgeschriebenen Processings. Die meisten Widerstandspasten dürfen nur einmal gebrannt werden. Bei der Verwendung mehrerer Widerstandspasten mit unterschiedlichen Oberflächenwiderständen werden diese daher nacheinander gedruckt, getrocknet und anschließend gemeinsam gesintert.

### Dielektrische Isolationspasten

Die Hauptkomponenten dieser Pasten sind spezielle Glas- und Keramikfritten, die neben der jeweils gewünschten Dielektrizitätskonstante auch einen möglichst hohen Isolationswiderstand aufweisen. Sie lassen sich in drei Gruppen einteilen:

- Isolationspasten mit niedriger Dielektrizitätskonstante für den Mehrschichtaufbau
- Dielektrische Pasten mit hoher Dielektrizitätskonstante für die Herstellung von gedruckten Kondensatoren
- Niedrig-sinternde Abdeckpasten für den Oberflächenschutz und als Lötstopp

Isolationspasten mit einer niedrigen Dielektrizitätskonstante werden für Leiterzugkreuzungen (Cross-Over-Technologie) und zur Isolierung mehrerer leitender Schichten (Multilayer) eingesetzt. Um die unerwünschte kapazitive Einkopplung der isolierenden Leiterstrukturen möglichst gering zu halten, wird das Funktionsmaterial auf eine minimale Dielektrizitätskonstante hin optimiert (7 bis 9). Die Isolationschichten werden mindestens zweimal gedruckt, da durch den Mehrfachdruck eventuelle Poren geschlossen und die Dichtigkeit der Schicht verbessert werden.

Zur Herstellung von gedruckten Kondensatoren werden dielektrische Pasten verwendet. Um die benötigte Fläche für solche Kondensatoren gering zu halten, ist hier eine höhere Dielektrizitätskonstante (bis zu etwa 2000) erforderlich. Die Kapazität solcher gedruckten Kondensatoren variiert jedoch stark. Da keine befriedigende Abgleichtechnik bekannt ist, können mit solchen grob tolerierten Kapazitäten nur begrenzte Schaltungsaufgaben gelöst werden. Daher werden in Hybridschaltungen meist Chipkondensatoren verwendet.

Um gedruckte Widerstände vor Umwelteinflüssen zu schützen und ihre Langzeitstabilität und Zuverlässigkeit zu verbessern, werden Abdeckpasten eingesetzt. Sie bestehen aus niedrig schmelzenden Gläsern und können daher bereits bei 500 °C gesintert werden. Bei diesen Temperaturen werden die zuvor eingebrannten Widerstände nur geringfügig beeinträchtigt. Beim Druck von Abdeckpasten werden nur die Kontaktflächen freigehalten. Die Abdeckpaste wirkt somit als Lötstopp.

## 5. Siebdruck von Dickschichtpasten und Wärmebehandlung

Für die strukturierte Abscheidung von Dickschichtpasten gibt es verschiedene Druckverfahren wie Stempeldruck, Schablonendruck oder Aerosoldruck. Am häufigsten wird allerdings der Siebdruck angewandt. Dieser ist ein druckformgebundenes Verfahren. Das bedeutet, dass die zu übertragende Struktur als eine Art »Negativ« in der Druckform abgebildet ist. Hieraus ergibt sich, dass für jede zu druckende Funktionsschicht ein separates Drucksieb erforderlich ist. Siebdruckformen bestehen aus einem stabilen Metallrahmen, in dem feinmaschige Siebgewebe eingeklebt sind. Diese Siebgewebe sind mit Photopolymeren beschichtet, die belichtet und entwickelt werden. Hierbei werden die zu durchdruckenden Bereiche in der Siebstruktur freigelegt.

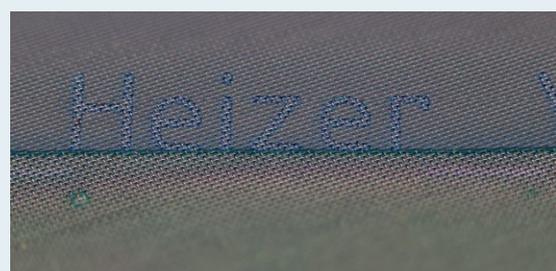


Abbildung 6: Siebdruckform.

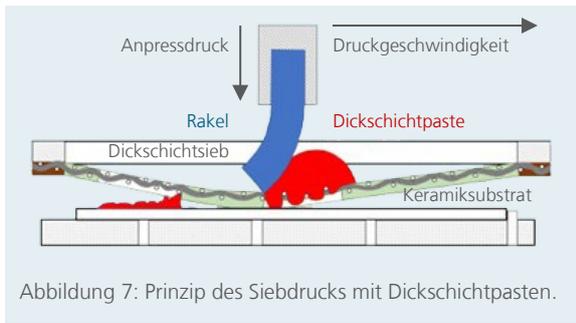


Abbildung 7: Prinzip des Siebdrucks mit Dickschichtpasten.

Während des Druckvorgangs wird das Drucksieb samt Paste über dem Substrat mit einem definierten Abstand positioniert. Nach dem Start des Druckvorgangs wird das Raket abgesenkt und mit einer definierten Geschwindigkeit über das Drucksieb bewegt. Dabei wird die Druckpaste auf dem Schablonenträger durch die offenen Maschen des Siebgewebes auf das Substrat gedrückt. Der Siebdruck ist sowohl auf flachen Substraten als auch auf zylindrischen Oberflächen beispielsweise von Rohren möglich.



Abbildung 8: Siebrunddruck zur Funktionalisierung von tubularen Strukturen für Heizer oder Durchflusssensoren.

An den Druck schließt sich die Wärmebehandlung an. Zunächst werden die gedruckten Schichten getrocknet. Danach erfolgt das Sintern bei 850 °C.

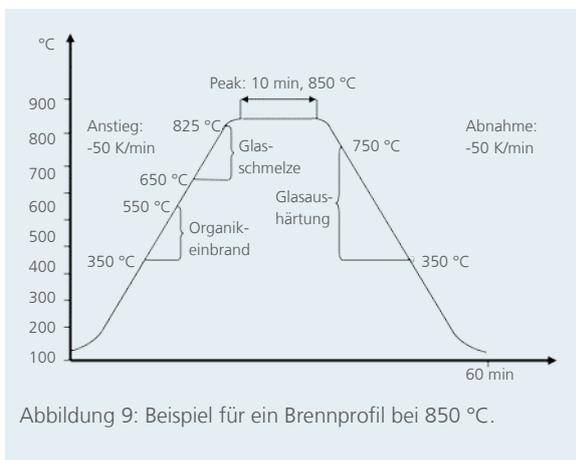


Abbildung 9: Beispiel für ein Brennprofil bei 850 °C.

## 6. Assemblierung

Die Montage von weiteren Bauelementen und Sensoren – die Assemblierung – erfolgt in der Regel auf den Leiterbahnen. An diesen Kontaktstellen kann dann ebenfalls die elektrische Kontaktierung der gesamten Komponente erfolgen. Typische Verfahren der Aufbau- und Verbindungstechnik (AVT) sind:

- Löten mit Weichloten und bei höheren Betriebstemperaturen Löten mit Hartloten
- Thermosonic Wire Bonding mit Golddrähten und Ultraschallbonden mit Aluminium- oder Kupferdrähten
- Gesinterte Montage von Leistungshalbleitern auf Basis von Nano-Silber-Sintern
- Verwendung von elektrisch leitfähigen oder elektrisch isolierenden Klebstoffen



Abbildung 10: Hochtemperatur-AVT zur zuverlässigen Kontaktierung von keramischen Heizelementen.

Kommerzielle Dickschichtpasten sind für diese Verfahren ausgelegt, allerdings ist die Betriebstemperatur der assemblierten Baugruppen dadurch eingeschränkt. Typische Betriebstemperaturen im Bereich der Elektronik liegen unter 200 °C. Daher sind gängige Materialsysteme auch nur für diesen Temperaturbereich ausgelegt. Allerdings wurden bereits spezielle Materiallösungen realisiert, die bis zu Temperaturen von 600 °C standhalten.

## 7. Anwendungsbeispiele

Wie eingangs beschrieben, lassen sich die Funktionalitäten der Dickschichttechnologie mit denen der additiven Fertigung von keramischen Bauteilen kombinieren und somit hochkomplexe Funktionskomponenten realisieren. Wichtige Funktionalitäten können beispielsweise das Aufbringen von Leiterzügen auf diesen Funktionskomponenten sein.



Diese können u. a. verwendet werden, um elektrische Anschlüsse oder zusätzliche Bauelemente auf diesen Komponenten zu realisieren. Sie können aber ebenfalls dazu dienen, weitere Dickschichtfunktionsschichten zu kontaktieren. Hierbei kann es sich sowohl um Heizer als auch Temperatursensoren handeln, die mittels Dickschichttechnik appliziert wurden.

Eine mögliche Anwendung für derartig funktionalisierte Keramikelemente liegt im Bereich der aktiven Heizung und Kühlung. Hier können sowohl der Einsatz von keramischen Werkstoffen als auch die Funktionalisierung ihre Vorteile ausspielen. Die Grundfunktionalitäten bestehen immer in einer schnellen Aufheizung bis zu Anwendungstemperaturen von 350 °C sowie einer schnellen Abkühlung der Temperatur bis auf Raumtemperatur. Die Kombination sorgt für schnelle Temperaturzyklen.

Der physikalische Aufbau besteht aus additiv gefertigten keramischen Strukturelementen aus Aluminiumoxid ( $\text{Al}_2\text{O}_3$ ) mit integrierten Kühlkanälen, die eine effektive Kühlung der Module ermöglichen. Die Grundkörper können als Platten oder als rohrförmige Elemente über das CerAM VPP (Vat Photo-Polymerization) Verfahren gefertigt werden. Nach dem Brennprozess werden die Bauteile mittels Siebdrucks funktionalisiert. Da die Betriebstemperatur der Komponenten bis zu 600 °C beträgt, ist die Verwendung von Dickschichtpasten auf Platinbasis erforderlich. Aufgrund dieser Temperatur mussten die Heizelemente mit einem modifizierten Schweißverfahren – Doppelspaltschweißen – kontaktiert werden. Für die Anschlussdrähte wurde ebenfalls Platin verwendet.

Darüber hinaus sind bisher verschiedenste weitere Anwendungen erfolgreich aufgezeigt worden. So wurden unter anderem auch geometrisch angepasste Sensorgehäuse für Anwendungen unter rauen Umgebungsbedingungen demonstriert. Ein weiteres Einsatzfeld sind aktiv gekühlte Komponenten

für die Leistungselektronik. In allen genannten Fällen werden immer geometrisch angepasste keramische AM-Baugruppen mit einer Funktionalisierung mittels Dickschichttechnik kombiniert.

## 8. Schlussfolgerungen

Harsche Umgebungsbedingungen mit hohen thermischen, chemischen und/oder mechanischen Belastungen sind eine besondere Herausforderung in nahezu allen Bereichen der Industrie. Hierbei kommen beispielsweise hochintegrierte sensorische Systeme mit metallischen oder polymeren Komponenten an ihre Grenzen und erschweren eine echtzeitbasierte Datenerfassung. Funktionalisierte 3D-Keramikkomponenten dagegen erfüllen die Anforderungen hinsichtlich Robustheit, Miniaturisierung und Zuverlässigkeit. Durch die gezielte Werkstoffauswahl und Kombination aus additiver Fertigung und Dickschichttechnologie vereinen sie die Vorzüge wie chemische und thermische Beständigkeit, hohe Härte, geringe Dichte oder bestimmte biologische Eigenschaften mit komplexen Geometrien wie unterschiedlichen Wandstärken oder verdeckten Heiz- und Kühlkanälen.

## 9. Übertragbarkeit auf weitere Materialgruppen

Ausgehend von den Darstellungen in diesem Beitrag stellt sich zwangsläufig die Frage, ob der beschriebene Ansatz der zweistufigen Funktionalisierung auch auf weitere Materialgruppen wie Gläser, Polymere oder Metalle übertragbar ist. Der Schlüssel zur Beantwortung dieser Frage liegt in den eingesetzten Dickschichtpasten und die Antwort lautet: »Im Grundsatz JA«. Die generelle Voraussetzung ist jedoch die materialtechnische Kompatibilität der »Grundkörper« mit denen der Funktionsschicht. Da es in den genannten Materialgruppen

aber eine Vielzahl von Werkstoffvariationen gibt, ist dieser Punkt nicht allgemein für alle Werkstoffkombinationen zu beantworten. Einige Beispiele werden im Folgenden gezeigt.

es erforderlich, den Stahl in einem ersten Technologieschritt zu isolieren, also eine Isolationsschicht aufzubringen. Im Folgenden können dann Leiterzüge, Heizer oder Sensoren aufgedruckt werden.

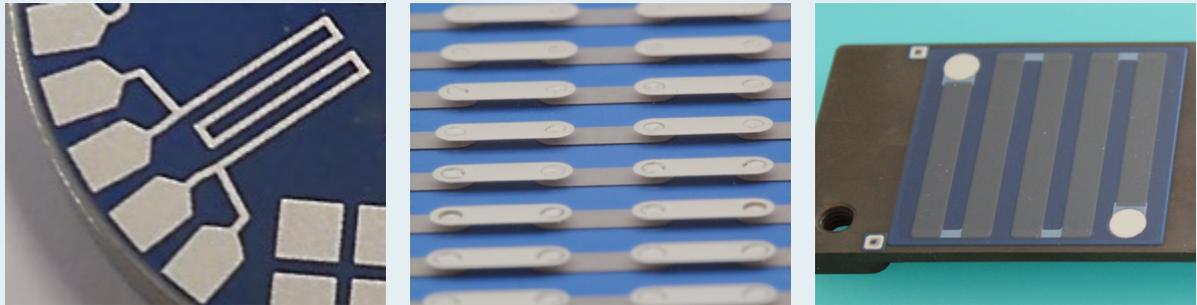


Abbildung 12: Teststruktur aus Polymerpaste im Multilayerdruck (links). Teststrukturen auf Glassubstrat. Auf Ober- und Unterseite befinden sich jeweils Metallsierungen, die durch Vias miteinander verbunden sind (Mitte). Dickschicht-Teststrukturen auf isoliertem Stahlsubstrat (Einbrand bei 850 °C, rechts).

**Kunststoffe:** Hierfür ist der Einsatz von Niedertemperaturpasten möglich. Diese sind dahingehend modifiziert, dass das Glas als Haftvermittler zum Substrat durch eine Polymermatrix ausgetauscht wird. Während der Prozessierung erfolgt der strukturierte Schichtauftrag dieser Pasten ebenfalls durch die genannten Drucktechniken. Jedoch erfolgt kein Brennen dieser Pasten bei 850 °C, sondern ein Härten bei deutlich geringeren Temperaturen. Die Haftfestigkeit zwischen Schicht und Substrat wird hierbei durch die adhäsive Wirkung der eingebrachten Polymerkomponente in der Paste erreicht. Eine Kompatibilität der Pasten zu den zu beschichtenden Kunststoffen ist Grundvoraussetzung für diese Funktionalisierung und muss jeweils geprüft werden. Derartige Pastensysteme sind für eine Reihe von Kombinationen technisch verfügbar und auch bedingt montagefähig.

**Gläser:** Zur Funktionalisierung von Gläsern bieten sich entweder Polymerpasten oder Dickschichtpasten mit reduzierten Einbrandtemperaturen an. Diese Pasten sind dahingehend modifiziert, dass die üblichen Gläser, die bei 850 °C prozessiert werden, durch Gläser ausgetauscht werden, die bei reduzierten Temperaturen, z. B. 500 °C, eingebrannt werden können. Auch für diese Materialsysteme sind Pasten kommerziell erhältlich. Jedoch beschränkt sich das Angebot auf Isolations- und Metallisierungspasten.

**Metalle:** Ein wesentlicher Unterschied zwischen den beschriebenen Keramiken und beispielsweise Stählen besteht in deren elektrischer Leitfähigkeit. Um elektrische Funktionsschichten wie Heizer oder Temperatursensoren auf dem Stahl zu erzeugen, ist

Auch an dieser Stelle gibt es für ausgewählte Stähle entsprechend nutzbare Pastensysteme.

---

#### Autoren

Dr.-Ing. Lars Rebenklau | [lars.rebenklau@ikts.fraunhofer.de](mailto:lars.rebenklau@ikts.fraunhofer.de)

Dr.-Ing. Uwe Scheithauer | [uwe.scheithauer@ikts.fraunhofer.de](mailto:uwe.scheithauer@ikts.fraunhofer.de)

#### Über das Fraunhofer IKTS

Seit mehr als 30 Jahren demonstriert das Fraunhofer IKTS das Potenzial keramischer Werkstoffe für eine stetig wachsende Breite von Anwendungsgebieten. Unser Antrieb ist es, innovative ganzheitliche Systemlösungen und Dienstleistungen zu entwickeln, aber auch spezifische Einzelprobleme innerhalb der Prozesse unserer Partner aus Industrie und Wissenschaft zu lösen. Durch unsere Expertise in der Charakterisierung und Analyse von Werkstoffen, Bauteilen und Systemen entlang ihres gesamten Lebenszyklus verfügen wir über einen einzigartigen Datenpool, um Neuentwicklungen effizient und schnell realisieren zu können.

Das Fraunhofer IKTS beschäftigt an seinen drei Hauptstandorten in Dresden und Hermsdorf sowie zahlreichen Außenstellen mehr als 800 Mitarbeiter. Damit ist es das größte Keramikforschungsinstitut Europas. Den Forschenden stehen auf über 40 000 m<sup>2</sup> Nutzfläche hervorragend ausgestattete Labors und Technika zur Verfügung. Dazu gehören sowohl industrietaugliche Pilotlinien als auch Applikationszentren, in denen neue Entwicklungen unter anwendungsnahen Bedingungen erprobt werden.

[www.ikts.fraunhofer.de](http://www.ikts.fraunhofer.de)