

ELEKTRONIK UND MIKROSYSTEME

Projektberichte

- 52 Vorkonfektionierte Dickschichtsensoren für variable Bauteiloberflächen
- 54 Design-Support-Tool zur Gewährleistung vibrationsfester Elektronik
- 55 Smart Transfer – Offene Technologieplattform zur Entwicklung smarter Produkte
- 56 Passgenaue Kompositwandler auf Basis piezokeramischer Fasern und Perlen
- 57 Funktionalisierung keramischer Schichten bei 200 °C

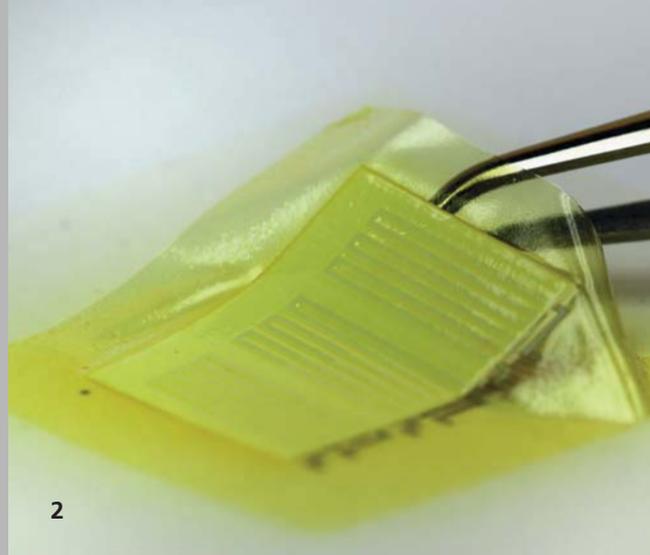
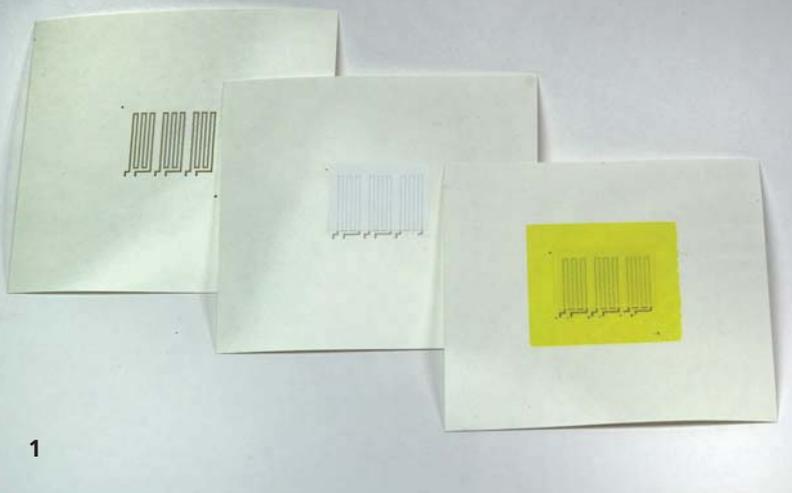
Im Geschäftsfeld »Elektronik und Mikrosysteme« bietet das Fraunhofer IKTS Materialien, Technologien, Komponenten und Systeme für die Mikro- und Nanoelektronik, Energietechnik, Sensorik und Aktorik sowie für industrielle Prüfsysteme.

Mikrosysteme werden zukünftig nicht nur deutlich komplexer, robuster und kleiner, sondern durch erweiterte Funktionalitäten zunehmend direkt mit ihrer Umwelt interagieren. Daraus ergeben sich steigende Anforderungen an die Entwicklung kostengünstiger sowie zuverlässiger Werkstoff- und Fertigungslösungen für miniaturisierte Baugruppen. Diese Herausforderungen löst das Fraunhofer IKTS durch eine integrierte Betrachtung von Material, Prozess und Systementwurf.

Das Fraunhofer IKTS entwickelt funktionskeramische Werkstoffe, die durch ihre außergewöhnlichen Eigenschaften für einen Einsatz in harschen Umgebungen geeignet sind. Diese können mit Hilfe verschiedenster Synthese-, Aufbau-, Füge-, Schichtabscheidungs- und Strukturierungstechnologien je nach Anforderung und Kundenwunsch verarbeitet und in komplexen Mikrosystemen appliziert werden. Mit standardisierten und bewährten Herstellungsprozessen lassen sich wettbewerbsfähige Kosten erreichen. Keramische Komponenten können zusätzliche fluidische, thermische, Sensor- oder Aktorfunktionen realisieren, die mit den elektronischen Komponenten der Signalverarbeitung oder Leistungselektronik direkt zusammenwirken. Eine besondere Kompetenz besitzt das Fraunhofer IKTS in Bezug auf multifunktionale Werkstoffe wie etwa Piezokeramiken, elektrokalendarische Materialien und Formgedächtnislegierungen. Mit solchen Werkstoffen lassen sich sogenannte »smarte« Systeme entwickeln, bei denen der Werkstoff selbst mehrere Funktionen miteinander verknüpft.

Einen Schwerpunkt im Portfolio des Geschäftsfelds stellen Sensoren und komplexe Sensorsysteme dar, mit denen viele chemische, elektrochemische, elektrische, thermische, akustische, elektromagnetische, mechanische sowie optische Parameter erfasst werden können. Angepasst an die individuellen Prozessanforderungen entsteht hausintern die Auswerteelektronik mit ihrer Hard- und Software. Die Systeme finden in der Automobil- und Energietechnik, der zerstörungsfreien Prüfung sowie der Zustands- und Prozessüberwachung Anwendung.

Im Geschäftsfeld »Elektronik und Mikrosysteme« stehen maßgeschneiderte Materialien, Designregeln und Prüftechnologien zur Verfügung, um die Einsatzgebiete miniaturisierter Systeme kontinuierlich zu erweitern, Entwicklungszyklen zu verkürzen und Systemzuverlässigkeit sicherzustellen. Die umfangreiche technische Infrastruktur sowie spezifische Industrieangebote gewährleisten einen industrieorientierten Entwicklungsprozess und einen effizienten Transfer von Know-how und Technologie zum Kunden.



VORKONFEKTIONIERTE DICKSCHICHTSENSOREN FÜR VARIABLE BAUTEILOBERFLÄCHEN

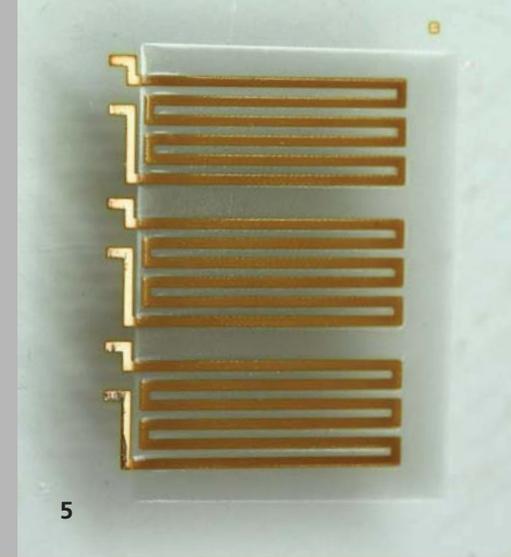
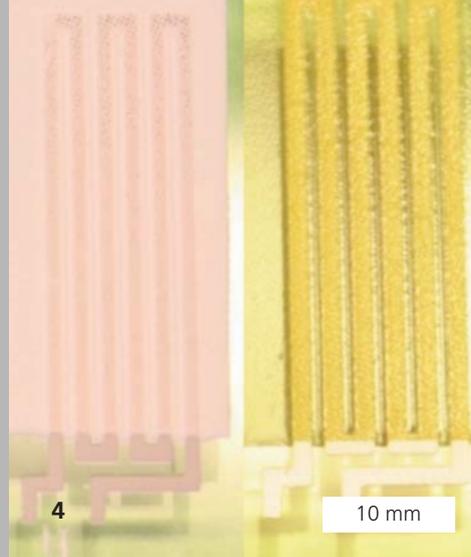
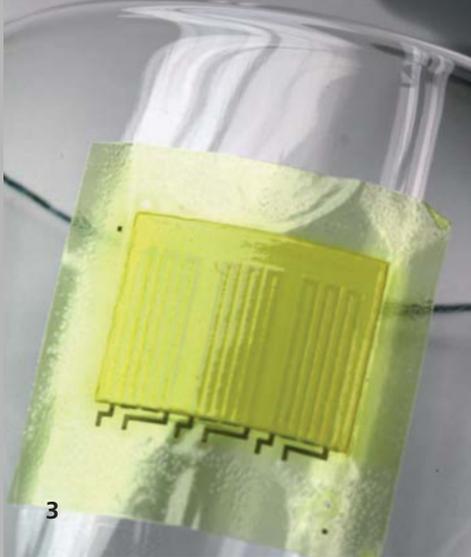
Dipl.-Ing. Thomas Seuthe, Dr. Markus Eberstein

Die Herstellung mehrlagiger, keramischer Funktionsschichten über Abscheidungsverfahren wie Siebdruck, Dispenser, Aerosol-Druck ist heute gängige Praxis. Jedoch ist in einer Produktionsumgebung teilweise erheblicher Aufwand nötig, um Druck und Einbrand mit der erforderlichen Präzision und der nötigen Reproduzierbarkeit zu realisieren (Reinräume, Personal). Auch werden die Anwendungsgebiete durch die Größe der bearbeitbaren Substrate eingeschränkt. So ist der Druck auf Substrate, die eine Kantenlänge von einem Meter überschreiten, z. B. mit einem herkömmlichen Labordrucker nur schwer realisierbar. Um hier eine Lösung zu finden, wurde ein Schiebepild-Verfahren untersucht, bei dem die zu erstellende Struktur mit allen Anforderungen an Schichtdicken und Kontureigenschaften zuerst auf eine nichthaftende Unterlage im Mehrlagenaufbau gedruckt und getrocknet wurde, um sie anschließend über eine Transportschicht auf Substrate beliebiger Größe zu übertragen, ähnlich wie es bei der Applikation von Dekorkeramiken bereits seit Längerem angewendet wird. Diese Art der Substratbearbeitung ermöglicht die Übertragung von Dickschichtsensoren auf Substrate variabler Größe und Form, wodurch der Anwendungsbereich der Dickschichttechnik erweitert wird. So konnte in einem Forschungsprojekt eine zweilagige Sicherheitsschaltung für Einscheiben-Sicherheitsglas (ESG) entwickelt werden.

Die Herstellung von ESG erfolgt durch eine Temperaturbehandlung, bei der eine herkömmliche Floatglasscheibe im sogenannten Vorspannofen schnell über ihre Transformations-temperatur (T_g) erhitzt und anschließend stark abgeschreckt wird. Die dabei eingefrorenen thermischen Spannungen führen zu einer signifikanten Festigkeitserhöhung des Glases. ESG findet daher Anwendung bei Glasschiebetüren, Glastischplatten, Fassadenverkleidungen, Autoseitenscheiben und Sicherheitsgläsern, z. B. für Schaufenster. Hier entstand der Bedarf nach zweilagige Alarmschaltungen, bestehend aus einer Leitbahn und einer Glasisolationsschicht, die während der kurzen Temperaturbehandlung im Vorspannofen sinterbar sind.

Die erste Herausforderung bestand in der fehlerfreien Abscheidung beider übereinander liegender Schichten auf ein speziell beschichtetes Papiersubstrat per Siebdruck. Über eine umfassende Optimierung der Druckparameter ist es gelungen, die übereinander liegenden Schichten (Leitbahn, Glasisolation, Übertragungslack) fehlerfrei und mit ausreichender Substratbenetzung abzuscheiden. Die Schichten müssen gemeinsam von dem Papiersubstrat auf das Glassubstrat übertragen werden können, ohne eine der Schichten zu beschädigen und somit deren Funktionalität zu beeinflussen. Da ESG nicht erneut über T_g erhitzt werden darf, besteht die zweite Herausforderung darin, die Schaltung direkt im Vorspannofen, d.h. bei hohen Heizraten von 100 K/s, einzubrennen. Weiterhin müssen die mit dem Schiebepild (Decal) aufgebrachten Lagen im Kosintern nacheinander verdichten, damit austretende Gase der verdichtenden unteren Schicht (Leitbahn) durch die zu diesem Zeitpunkt noch poröse obere Schicht (Glasisolation) austreten können. Um dieser Anforderung zu genügen, wurden die zur Erstellung der Schichten verwendeten Silber- und Glaspulver in ihrem Sinterverhalten so eingestellt, dass ein Einbrand während des Kosinterns mit Aufheizraten bis zu 100 K/s abgestuft ablaufen kann. Zu diesem Zweck musste ein Optimum der Sinterverläufe gefunden werden, bei dem die Sinterung der Schichten lange genug verzögert wird, um ein vollständiges Entweichen der Gase zu ermöglichen und die anschließende Verdichtung jedoch schnell genug abläuft, um eine vollständige Sinterung innerhalb weniger Sekunden zu gewährleisten.

Der optimierte Sinterverlauf der verwendeten Materialien ist in Diagramm 1 dargestellt. Die Sinterung des Silberpulvers beginnt bei etwa 300 °C und ist bei oberhalb 550 °C nahezu abgeschlossen. Erst jetzt beginnt die Sinterung der darüber liegenden Glas-/Isolationsschicht. Die für den Einbrand im Glasvorspannofen optimierten Decals für die Alarmschaltung erzeugen robuste und defektfreie Schichten. Der spezifische Widerstand der Leitbahnen erreicht dabei annähernd den von

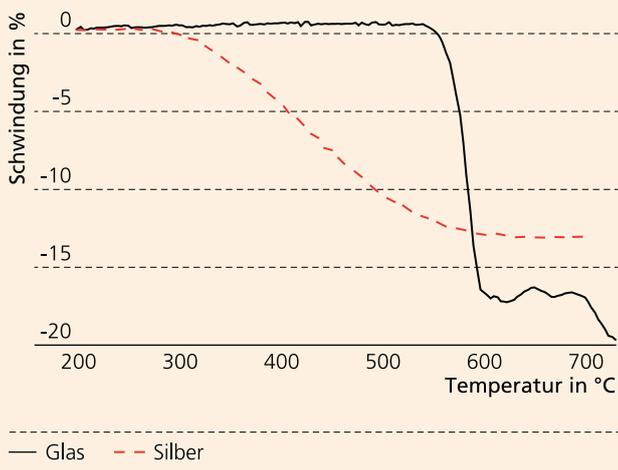


ELEKTRONIK UND MIKROSYSTEME

reinem Silber. Die Isolationsschicht zeigt, bei einer Schichtdicke von etwa 20 μm , eine Durchschlagsfestigkeit von mehr als 1 kV.

Das neue Decal-Verfahren zur Herstellung und Übertragung technischer keramischer Mehrlagenaufbauten ermöglicht bei einfacher Handhabung eine reproduzierbare Qualität hochauflösender Mehrlagenaufbauten und umgeht zudem die Einschränkung durch die bedruckbare Substratgröße. Es eignet sich somit zur Realisierung aktiver und passiver elektrischer Elemente (Sensoren, Antennen, Smart Label) hoher Qualität auf Substraten variabler Größe oder auch gewölbten Oberflächen und eröffnet somit völlig neue Anwendungsgebiete für die keramische Dickschichttechnik.

Erhitzungsmikroskopisches Schwindungsverhalten mit steigender Temperatur der verwendeten Glaspulver (schwarze Linie) und Silberpulver (rote Linie)

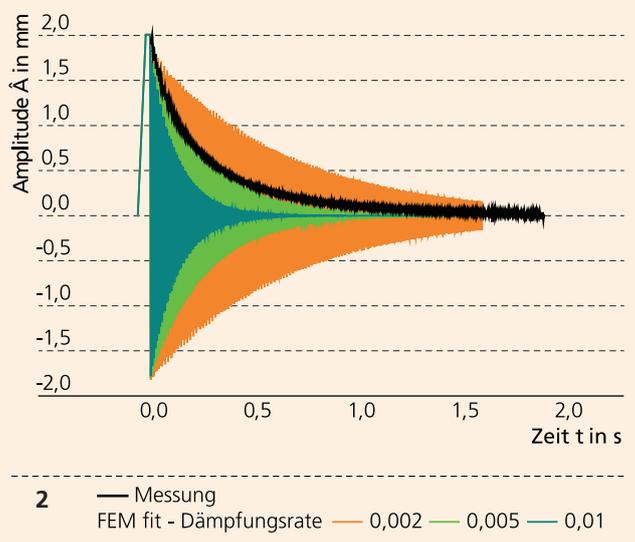
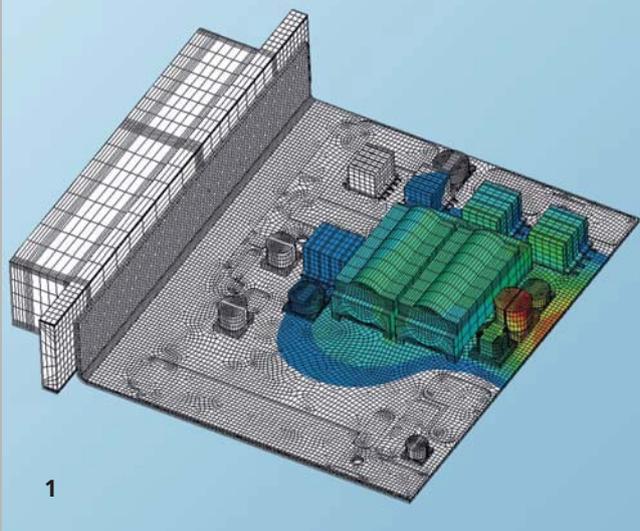


- 1 Auf Papier gedruckte, mehrlagige Funktionsschichten aus Leitbahn, Isolationsschicht und Lackschicht (von links nach rechts).
- 2 Ablösen der Funktionsschichten vom Trägerpapier.
- 3 Mehrlagenkeramik vor der Sinterung auf einem Trinkglas mit gewölbter Oberfläche.
- 4 Leiterschleife mit Isolationsschicht auf ESG vor (links) und nach dem Einbrand (rechts).
- 5 Leitbahn mit Isolationsschicht auf ESG nach dem Einbrand.

Danksagung

Wir danken dem BMWi und der AiF für die Unterstützung des Forschungsvorhabens KF 2087336AG3. Weiterhin bedanken wir uns bei unseren Projektpartnern H. J. Amann und R. Petersen der Firma Amann GmbH in Rehau für die ausgezeichnete Zusammenarbeit.





DESIGN-SUPPORT-TOOL ZUR GEWÄHRLEISTUNG VIBRATIONSFESTER ELEKTRONIK

Dr. Mike Röllig, Dipl.-Ing. René Metasch, Dipl.-Ing. Robert Schwerz

Zuverlässige Elektronik bedeutet für hochwertige und sicherheitsrelevante Produkte einen entscheidenden Wettbewerbsvorteil. Den Mittelpunkt der Untersuchungen im hier vorgestellten Projekt bildet die Zuverlässigkeit von Motorsteuerungen, wie sie in jedem Automobil eingesetzt werden. Deren Betriebsfestigkeit unter Stößen und Vibrationen muss in jeder Fahrsituation gewährleistet sein.

Die strukturmechanische Simulation über die Finite-Elemente-Methode (FEM) trägt hier entscheidend zur Auslegung und Konstruktion von Motorsteuerungen bei. Die Simulation erlaubt es, komplexe mechanische Zusammenhänge zu verstehen und unterschiedliche Konstruktions- und Werkstoffvariationen rasch umzusetzen. Ziel ist es, in möglichst kurzer Zeit ein robustes Design für die Motorsteuerung bereitzustellen, so dass keine kritischen mechanischen Beanspruchungen zu Frühausfällen von elektronischen Bauelementen führen.

Im Rahmen des Projekts ist ein Design-Support-Tool entstanden, das die extrem beschleunigte Netzgenerierung von FEM-Modellen ermöglicht. Der Zeitfaktor liegt hierbei bei 1:250. Komplexe Motorsteuerungen sind nun innerhalb von zehn Minuten modelliert und bedürfen nicht mehr des manuellen Aufwands über fünf Arbeitstage (Bild 1). Dabei sind Netzgeometrie, Werkstoffe und Belastungsprofile einbezogen. Das Design-Tool basiert auf einer FEM-Programmsprache (APDL-ANSYS) und greift auf eine Datenbank zu, in der einzelne Submodelle zur Erstellung von elektronischen Bauelementen hinterlegt sind. Diese Datenbank ist auf die Kundendatenbank qualifizierter Bauelemente zuschneidbar, d. h. jederzeit bei Neuqualifizierung von Bauelementen mit geringem Aufwand erweiterbar.

Über eine grafische Nutzereingabeschnittstelle (GUI) werden sämtliche Designparameter abgefragt, die für eine Belastungsberechnung unter Vibration erforderlich sind. In der gegenwärtigen Ausbaustufe werden Vibrationslasten in Form von

Power Spectral Density (PSD) und harmonischen Schwingungen berechnet.

Die Auswertung, ob es sich um gute oder weniger gut platzierte Bauelemente handelt, erfolgt über deren berechnete mechanische Beanspruchung. Es wurde ein Kriterium erarbeitet, welches den Vergleich zu über- oder unterbeanspruchten Bauelementen zulässt. Im Vorfeld erfolgte eine Kalibrierung des Schwingungsverhaltens von Substraten mit und ohne elektronische Bauelemente. Dafür wurden reale Schwingungsversuche zur Bestimmung des variablen Werkstoffdatensatzes für die Leiterplatte als Kupfer-Glasfaser-Polymergemisch zugrunde gelegt. Zudem wurden anhand von schwingungsmechanischen Stufentests die Beanspruchungslimits der Bauelemente bestimmt, die als Kriterium für ihren Ausfall vorliegen.

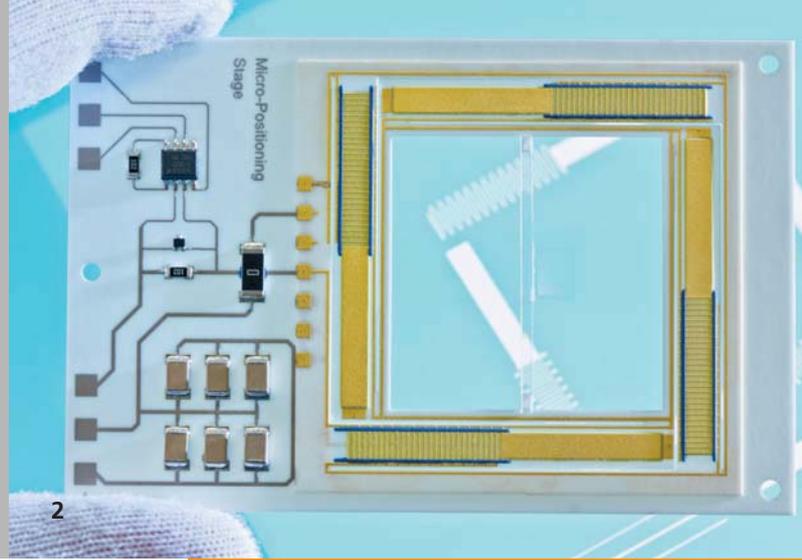
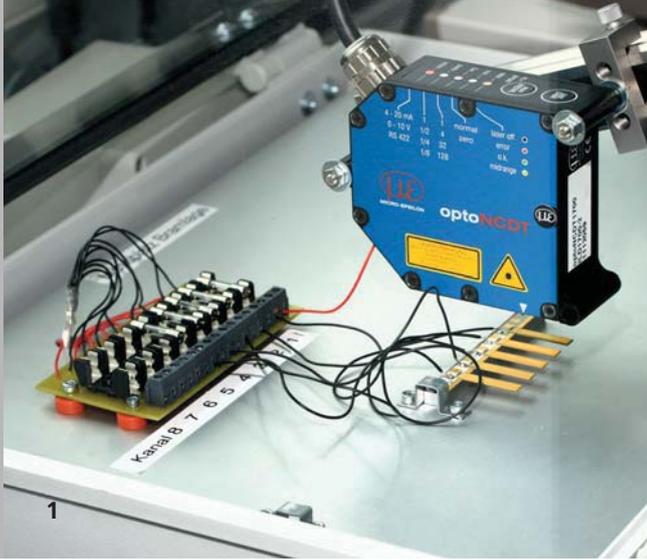
Dadurch können sofort nach der Berechnung Hinweise auf kritische Bauelementpositionen gegeben werden. Damit kann der Designer durch stabilisierende Maßnahmen gezielt eingreifen.

Der Design-Tool-Ansatz soll auch in thermische Beanspruchungsanalysen überführt werden. Hierbei wird eine Routine aus grob- und feinvernetzten Modellen eingebunden.

Danksagung

Das Team bedankt sich bei der Continental Automotive GmbH Regensburg für das entgegengebrachte Vertrauen.

- 1 FEM-Netz einer elektronischen Baugruppe einer Motorsteuerung modelliert in zehn Minuten, Darstellung der berechneten Verformung.
- 2 Gedämpftes Abklingverhalten eines Substrats und Kalibrierung der Dämpfungseigenschaften mittels FEM.



SMART TRANSFER – OFFENE TECHNOLOGIEPLATTFORM ZUR ENTWICKLUNG SMARTER PRODUKTE

Dr. Andreas Schönecker, Dr. Holger Neubert, Dr. Peter Neumeister

Die hier vorgestellte Technologieplattform »Smart Transfer« ist Teil des Initialkonzeptes »smart³ | materials-solutions-growth« zur Entwicklung marktfähiger Produkte hoher Funktionalität und struktureller Einfachheit und basiert auf der BMBF-Förderinitiative »Zwanzig20 – Partnerschaft für Innovation«. Das Nutzungs- und Kooperationsangebot richtet sich vor allem an KMUs, deren wirtschaftlicher Erfolg durch Faktoren wie fehlende Integrationstechnologien, Pfadabhängigkeiten in Innovationsprozessen und ungenutztes Marktpotenzial an Grenzen stößt, und die deshalb ihre Wertschöpfungsketten erweitern wollen. Die im smart³-Netzwerk verankerten Schlüsseltechnologien zur Entwicklung smarter Produkte sollen Vertragspartnern offen stehen. Hierfür werden geeignete strategische Organisations- und Kooperationsstrukturen geschaffen und praktisch erprobt. Geplant ist die Entwicklung einer offenen Technologieplattform in technischer und organisatorischer Hinsicht, die auch den Schutz des Know-hows der Nutzer sicherstellt.

Schwerpunkt des Technologieangebots sind Leistungen zur Auslegung und Technologieentwicklung für die Integration piezokeramischer Komponenten in Mikrosysteme. Additive Fertigung, Mehrkomponentenspritzguss sowie keramische Dickschichttechnik stellen dabei besondere Schwerpunkte dar. Profitieren können sowohl Werkstoff- und KomponentenhHersteller als auch potentielle Hersteller smarter Endprodukte für unterschiedliche Marktsegmente. Als erste Leitanwendung werden Generatoren auf der Basis elektromechanischer Energiewandler für die dezentrale Versorgung verbrauchsarmer Elektronik betrachtet. Technologische Fragestellungen betreffen die Herstellbarkeit des Generatormoduls mit den verfügbaren Verfahren der Mikrosystemtechnik, die Elektronikintegration und der Nachweis ausreichender Energieversorgung eines angeschlossenen elektrischen Verbrauchers. Als wirtschaftliche Fragestellung wird untersucht, zu welchen Kosten eine Akzeptanz am Markt erreicht werden kann. Weitere Leitanwendungen werden im Dialog mit Vertragspartnern abgeleitet. In »Smart Transfer« kooperieren die Fraunhofer Institute IKTS, IWU und

IAP sowie die Fima XENON Automatisierungstechnik GmbH als Technologiepartner, unterstützt durch Erfahrungsträger zur Anwendung von Formgedächtnislegierungen und Kunststoffen. Geeignete Organisations- und Kooperationsstrukturen der Technologieplattform werden durch den Lehrstuhl für Unternehmenskooperation der Freien Universität Berlin untersucht und gemeinsam mit den Netzwerkpartnern umgesetzt. Triple Helix DIALOG entwickelt die internen und externen Kommunikationsprinzipien. Die Sichtweise der Endverbraucher wird durch Einbindung von Design- und Gestaltungs kompetenz in die Forschungs- und Entwicklungsprozesse verankert. Die Technologiepartner sind in der Lage, bestehendes Technologie-Know-how praktisch und beispielhaft zu demonstrieren und für Anwender im Rahmen einer geförderten oder direkten Auftragsforschung und Entwicklung nutzbar zu machen. Das Verbinden der richtigen Partner, also der Leistungsanbieter der smart³-Technologieplattform mit den Leistungsnehmern, wird durch ein in Vorbereitung befindliches digitales, webbasiertes Instrument effizient und systematisch erfolgen.

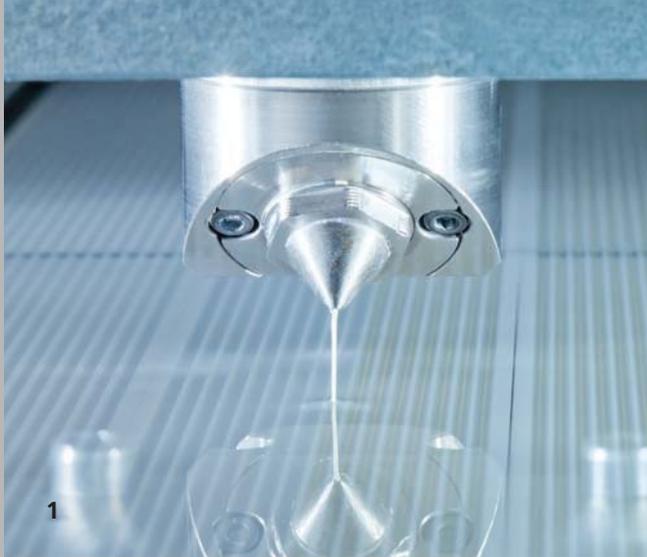
Leistungsangebot

- Darstellung marktfähiger Wertketten durch Inanspruchnahme der Technologieplattform (shared production) im Rahmen von Produktentwicklungen
- Klärung der Wertketten für eine Produktidee durch Versuchsproduktionen
- Unterstützung bei der Markterprobung innovativer Produkte

Quellen

- [1] www.smarthoch3.de
 [2] www.unternehmen-region.de/de/6829.php

- 1 Betriebsprüfung Biegeaktoren.
 2 Mikropositioniersystem für optische Linsen.



PASSGENAUE KOMPOSITWANDLER AUF BASIS PIEZOKERAMISCHER FASERN UND PERLEN

Dr. Sylvia Gebhardt, Dipl.-Ing. Kai Hohlfeld

Piezoelektrische Wandler auf Basis von Piezokeramik-Polymer-Verbundwerkstoffen finden als Sensoren, Aktoren, Ultraschallwandler oder Generatoren vor allem in der Adaptronik, in der Medizintechnik sowie in der zerstörungsfreien Werkstoffprüfung Einsatz. Im Hinblick auf eine leistungsfähige Auslegung und kosteneffektive Fertigung solcher Wandler müssen sowohl die verwendeten piezokeramischen Komponenten als auch die daraus entstehenden piezoelektrischen Composite speziell auf den Anwendungsfall zugeschnitten sein. Während für Aktoren und Ultraschallwandler piezokeramische Fasern mit gerichteter Anordnung von Vorteil sind, können für Sensoren und Generatoren auch regellos angeordnete Piezokeramik-Komponenten eingesetzt werden, die einen geringeren Fertigungsaufwand benötigen.

Das IKTS verfügt über eine Faserspinnanlage mit deren Hilfe piezokeramische Fasern quasi-kontinuierlich hergestellt werden können. Technologische Grundlage ist ein Phaseninversionsverfahren, bei dem ein lösungsmittelhaltiger Schlicker bestehend aus Binderlösung, piezokeramischem Pulver sowie Additiven in ein Wasserbad gesponnen wird. Durch den Austausch des Lösungsmittels im Schlicker mit Wasser als Nichtlösemittel koaguliert der Binder und es entsteht eine feste Grünfaser.

Über Einstellung des Düsendurchmessers D , der Extrusionsgeschwindigkeit v_E und der Verfahrgeschwindigkeit v_R beim Faserspinnen kann der Durchmesser der piezokeramischen Faser definiert eingestellt werden. Erprobt ist ein Durchmesserbereich der Piezokeramik-Fasern von $d = 100\text{--}800\ \mu\text{m}$.

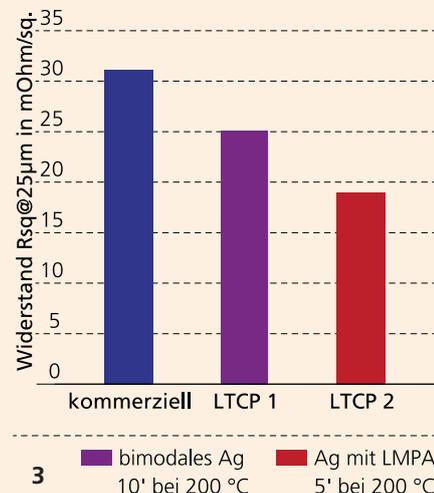
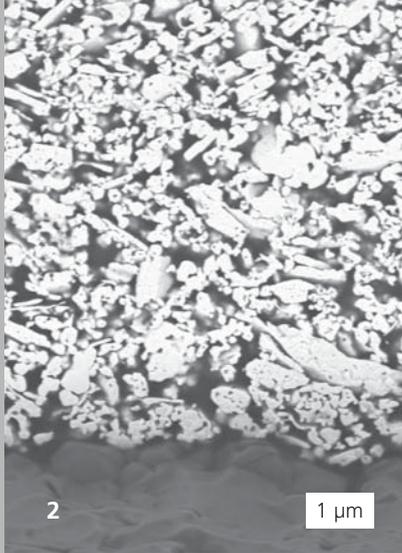
Zur Herstellung sphärischer piezokeramischer Komponenten wird der Schlicker durch eine Düse diskontinuierlich in ein Wasserbad getropft. Dabei bestimmen die Fallhöhe h , der Druck p sowie der Düsendurchmesser D die Geometrie und den Durchmesser der entstehenden Komponenten. Durch gezielte Variation lassen sich piezokeramische Perlen im Durchmesserbereich $d = 0,8\text{--}1,6\ \text{mm}$ fertigen.

Mit beiden Verfahrensvarianten steht eine leistungsfähige Technologie zur Herstellung dichter piezokeramischer Elemente in breiter Geometrievariation zur Verfügung.

Das Anwendungsspektrum der piezokeramischen Komponenten ist breit. Für die Schwingungs- und Geräuschdämpfung sowie für Aufgaben der Strukturkontrolle werden piezokeramische Fasern parallel z. B. als Monolage angeordnet und mit einem Epoxidharz vergossen. Nach dem Freilegen der Faserflächen durch Schleifen oder Sägen können Interdigitalelektroden zur Kontaktierung und Ansteuerung angebracht werden. Es entsteht ein Flächenwandler, der besonders für Aufgaben als Sensor und Aktor oder als Generator geeignet ist. Zur Fertigung von Ultraschallwandlern für die zerstörungsfreie Werkstoffprüfung, Medizin- oder Sonartechnik werden piezokeramische Fasern parallel z. B. als Bündel angeordnet und ebenfalls mit einem Polymer infiltriert. Der so entstandene Faser-Polymer-Block kann mechanisch durch Sägen, Fräsen und Schleifen in Form gebracht und anschließend kontaktiert werden. Durch die Anordnung der Fasern (definiert/undefiniert) sowie Dicke und Form des Wandlers können Ultraschallwandler für verschiedene Aufgaben (hochfrequent/niederfrequent, fokussiert/nicht fokussiert, segmentiert/flächig) maßgeschneidert werden. Vorteile beim Einsatz piezokeramischer Perlen in Verbundwerkstoffen werden besonders für die Realisierung sensorischer Aufgaben sowie zur Energieversorgung verbrauchsarmer Elektronik aus Schwingungen gesehen. Die Perlen werden dabei als Monolage in die Polymermatrix eingebracht und die Oberfläche für die Kontaktierung durch Schleifen freigelegt. Das Verfahren eignet sich besonders zur kosteneffektiven Fertigung großflächiger Wandler, bei denen geringere Leistungsdichten toleriert werden können.

1 Herstellung piezokeramischer Fasern durch Faserspinntechnik.

2 Mechanische Bearbeitung eines Piezofaserkomposits durch CNC-Fräsen.



FUNKTIONALISIERUNG KERAMISCHER SCHICHTEN BEI 200 °C

Dipl.-Chem. Stefan Körner, Dr. Markus Eberstein

Die keramische Dickschichttechnik ermöglicht die Herstellung elektronischer Schaltungen auf Substraten aus unterschiedlichsten Materialien (Aluminiumoxid, Aluminiumnitrid, Siliziumnitrid, Glas, Stahl o. ä.). Leitbahn-, Widerstands- und Isolationsschichten können durch hochauflösende Abscheidungsverfahren variabel und hochselektiv gedruckt und eingebrannt werden. Die für den Einbrand konventioneller Dickschichtpasten verwendeten Temperaturen liegen üblicherweise bei 850 °C, so dass weniger temperaturbeständige Substrate wie organische Polymere, Folien oder ITO-Schichten mit konventionellen Pasten nicht beschichtet werden können. Das IKTS entwickelt für diesen Anwendungsbereich spezielle Pasten auf Basis von Polymeren, welche bei 200 °C thermisch aushärten und mit Funktionsphasen gemischt werden. Je nach Anforderung der Anwendung können für Leitbahnpasten Silber und Kupfer oder für Widerstandspasten Kohlenstoff in verschiedenen Modifikationen (Ruß, Graphit, Carbon Nanotubes) verwendet werden.

Leitbahnpasten (LTCP – Low Temperature Conductor Pastes) erreichen einen Widerstand von 25 $m\Omega/\square$ bei einer Härtungsdauer von 10 Minuten bei 200 °C. Die Leitfähigkeit in diesem Verbund wird durch Perkolationpfade zwischen den leitfähigen Partikeln mittels bimodaler Pulvermischungen (Bild 2; Bild 3 LTCP 1) eingestellt. Alternativ kann man zu herkömmlichen Metallpulvern auch LMPA-Pulver (Low Melting Point Alloy) hinzugeben. Diese schmelzen während der Härtung auf und bilden zusätzliche leitfähige Pfade zwischen den Metallpartikeln. Der Widerstand sinkt bei einer Härtungsdauer von nur 5 Minuten bei 200 °C auf 19 $m\Omega/\square$ (Bild 3, LTCP 2). Entsprechende Pasten werden beispielsweise bei der Herstellung von hocheffizienten MWT+-Solarzellen (Metal Wrap Through) verwendet [1] eingesetzt (Bild 1).

Anwendungen im Bereich der Sensorik erfordern häufig funktionale Schichten mit einem definierten elektrischen Widerstand. Dafür werden am IKTS Pasten (LTRP – Low Temperature

Resistor Pastes) mit unterschiedlichen Kohlenstoffmodifikationen als Funktionsphase hergestellt und optimiert. Es können Schichten über einen Widerstandsbereich 10^{-3} bis $10^6 \Omega$ eingestellt werden. Eine Anwendungsmöglichkeit für Widerstandspasten auf Polymerbasis sind zum Beispiel Dehnungsmessstreifen mit einer hohen Sensivität für Längenänderungen. Die am IKTS hierfür entwickelten Widerstandspasten besitzen einen Widerstand von 2 $M\Omega/\square$ und Gauge-Faktoren von bis zu 16.

Die Dickschichtpasten auf Polymerbasis bieten neben der thermischen Härtung im Ofen die Möglichkeit, selektiv ohne thermische Beanspruchung des Substrats ausgehärtet zu werden. Dies kann durch Blitzlichtlampen oder photochemisch mittels UV-Bestrahlung geschehen, wofür die Bindersysteme jeweils angepasst werden. Alternativ kann ein induktives Härten der Paste erfolgen. Dieser Ansatz ist insbesondere für Leitbahnpasten interessant. Die niedrigen Härtungstemperaturen erleichtern die Erzeugung von Schaltungen und Sensoren auch auf Bauteilen, welche aufgrund von geometrischen Abmessungen nicht in üblichen Öfen prozessiert werden können. Entsprechende Sensoren können mobil und selektiv direkt auf das Substrat appliziert werden. So ist auch die Nachrüstung bestehender Systeme, wie etwa Windräder, möglich.

Quellen

[1] I. Dirnstorfer et al., Development of Silicon Heterojunction Metal Wrap Through Solar Cells, Proceedings PVSEC, 2014.

- 1 MWT⁺-Solarzelle mit Leitpaste auf Silber-Polymer-Basis.
- 2 Querschliff eines Leiterzuges (LTCP 1) einer MWT⁺-Solarzelle.
- 3 Leitbahnwiderstände verschiedener Niedertemperaturpasten in Abhängigkeit von Härtungsdauer und Zusammensetzung.

