

### Forschungsbereich A: Metall (M) / Halbleiter (HL)

	Subtraktiv	Additiv
M	A1: Entwicklung und Charakterisierung von neuartigen funktionellen Diamantwerkzeugen für die Ultrapräzisionsstoßbearbeitung	A2: Elektrophoretische Abscheidung funktionaler Kompositschichten
M	A3: ECM - Toolbox	A4: Charakterisierung und Einsatz von Mikrolaserschmelzen (MLS) in der Medizintechnik
M	A5: Prozesse zur Strukturierung von Oberflächen funktioneller Metall-Polymer-Interfaces in elektronischen Bauelementen	A6: Optimierung der mechanischen Eigenschaften der metallischen Komponenten durch Oberflächenmikrostrukturierung und die Verbesserung des Ermüdungsverhaltens
HL	A7: Kritische Reaktionsmechanismen für elektrochemische, selbstorganisierte 3D-Mikro- und Nanostrukturierung	A8: Strukturierungsmethoden für kapillare Freiformen

### Forschungsbereich B: Polymer (P) / Keramik (K)

	Subtraktiv	Additiv
P	B1: Aktuierbare Mikrostrukturen durch Kombination von Präge- und Freischreibprozessen	B2: Template-basiertes Abformen von Polymeren
P	B3: Herstellung und Charakterisierung ultra-dünner oxidischer Nanoschichten für neuartige Silizium-Solarzellenstrukturen	B4: Generierung von bioaktiven mikro- und nanostrukturierten Oberflächen
K	B5: Abtragsmechanismen bei der Funkenerosion nichtleitender Keramiken	B6: Generative Formgebung mikrostrukturierter funktionaler polymerbasierter Komposite
K	B7: Erzeugung von mikrogenauen Konturen auf spröden Materialien durch Nanozerspannung	B8: Mikrostrukturierung präkeramischer Polymere zur Realisierung funktionaler keramischer Dünnschichten
K	B9: Laserunterstütztes Schleifen von Hochleistungskeramiken mit einem Pikosekundenlaser	

## **A1: Entwicklung und Charakterisierung von neuartigen funktionellen Diamantwerkzeugen für die Ultrapräzisionsstoßbearbeitung**

Projektleiter: C. Müller

Kooperationspartner: H. Reinecke, J. Wilde, U. Mescheder

Beantragte Promotionsstipendien: 1

---

Das Ziel des Forschungsvorhabens „Entwicklung und Charakterisierung von neuartigen funktionellen Diamantwerkzeugen für die Ultrapräzisionsstoßbearbeitung,“ ist die Weiterentwicklung von Diamantwerkzeugen mit integrierter Sensorik und eine eingehende Charakterisierung der Stoßbearbeitung.

Basierend auf den etablierten Reinraumprozessen zur Herstellung von strukturierten Diamantschichten sollen neuartige Diamantwerkzeuge mit integrierten Temperatursensoren entwickelt werden. Die Strukturierung mittels lithographischer Prozesse erlaubt es, die heutigen Limitierungen bei der Werkzeugdiamantherstellung zu überwinden und so miniaturisierte und auch konvexe Werkzeuge herzustellen. Diese Werkzeuge können dann auf der bestehenden Stoßanlage charakterisiert werden. Mithilfe der integrierten Sensorik soll ein tieferes Verständnis der Stoßbearbeitung und den dabei entstehenden Temperaturen erlangt werden.

### **Stand der Technik:**

Im aktuellen Promotionskolleg GenMik wird der Prozess des Ultrapräzisionsstoßens untersucht. Hierzu werden die beiden Prozesse lineares Hochgeschwindigkeitsstoßen und Konturstoßen näher betrachtet. Beim linearen Hochgeschwindigkeitsstoßen werden Diamantwerkzeuge mit geometrisch bestimmter Schneide bei Geschwindigkeiten von bis zu mehreren m/s durch die Werkstückoberfläche gezogen, wobei die abzubildende Geometrie der der Diamantschneide entspricht (Abb. 1 links). Beim sogenannten Konturstoßen wird hingegen das Werkstück biaxial in zwei Richtungen bewegt und mithilfe eines in Schnittrichtung ausgerichteten Diamanten die Kontur erzeugt (Abb. 1 rechts).

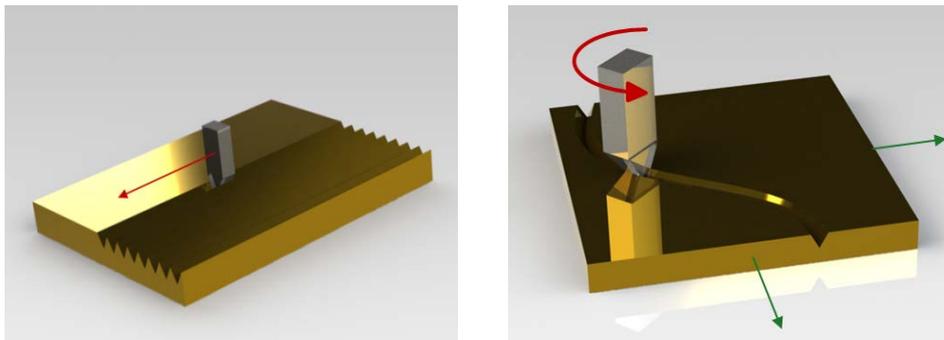


Abbildung 1: Schematischer Ablauf des linearen Hochgeschwindigkeitsstoßens (links) und Konturstoßens

Beide Prozesse des Ultrapräzisionsstoßens konnten anhand von Demonstratoren validiert werden. Anhand der Ergebnisse konnte gezeigt werden, dass wie bei konventionellen mechanischen Mikrobearbeitungsmethoden vergleichbare Ergebnisse erreicht werden können und dies bei wesentlich geringeren Prozesszeiten durch die hohen Prozessgeschwindigkeiten.

Aktuell werden hierzu konventionelle Diamantwerkzeuge benutzt. Diese werden industriell durch Schleif- und Polierbearbeitung hergestellt und sind dadurch in der Formgebung stark limitiert. Ertl hat als Alternative einen Herstellungsprozess für strukturierte Diamantschichten durch Aufwachsen von CVD-Diamant Schichten auf Siliziumwafern mit anschließender Strukturierung durch Reactive Ion Etching (RIE) vorgestellt. Im bestehenden Prozess konnten mikrostrukturierte Diamantskalpelle für die Ophthalmochirurgie hergestellt werden [1]. Ritzhaupt-Kleissl hat den bestehenden Prozess zur Herstellung von Diamantwerkzeugen verwendet, es konnte gezeigt werden, dass die hohe Konturgenauigkeit und Miniaturisierung einzig von der optischen Auflösung der Photolithographie abhängig ist [2]. Des Weiteren eröffnet sich so die Möglichkeit Werkzeuge mit Kammstrukturen (Abb. 2 links) herzustellen. Durch diese Parallelisierung kann die Prozesszeit beim linearen Hochgeschwindigkeitsstoßen noch mal um einen Faktor, der der Anzahl der Kammspitzen entspricht, reduziert werden. Eine weitere Neuerung ist die Herstellung von Diamantwerkzeugen mit extrem hohen Aspektverhältnissen. Im Vergleich mit konventionellen Werkzeugen, die einen Öffnungswinkel über der Schneide aufweisen, können so Werkzeuge mit mit senkrechten Flanken (Abb.2 rechts) realisiert werden, wodurch im Bereich der mikromechanischen Strukturierung neue Möglichkeiten eröffnet werden.

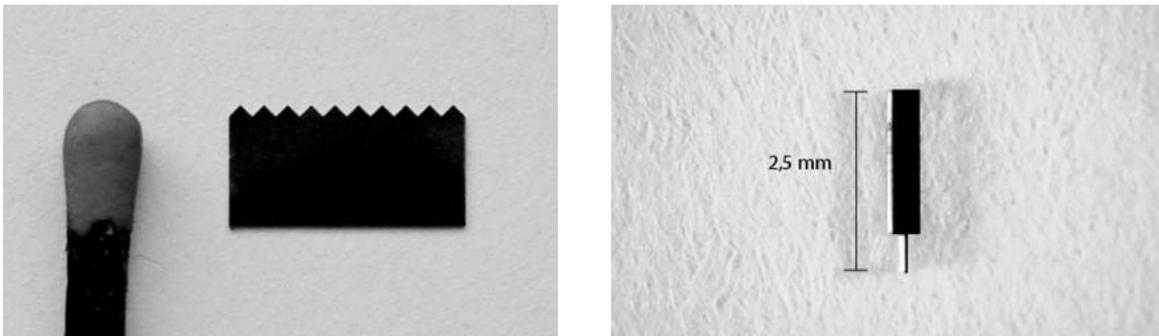


Abbildung 2: Mikrosystemtechnisch hergestellte Diamantkammwerkzeuge [2]

Zur genaueren Betrachtung der Generierungsmechanismen sollen derartige Werkzeuge auf der Stoßanlage charakterisiert werden. Um ein tieferes Verständnis des Vorgangs zu erhalten müssen hierbei die auftretenden Prozesskräfte und Schnitttemperaturen aufgenommen werden. Im Bereich der Kraftmessung kann hier auf konventionelle Dynamometer zurückgegriffen werden, um die Schnittkräfte zu bestimmen. Zur Bestimmung der Schnitttemperatur ist mit konventionellen Mitteln keine Messung direkt an der Schneide des Werkzeugs möglich. Alternativ wird heute optisch die Temperatur des Fließspanes gemessen [3], was jedoch bei zunehmender Miniaturisierung und den hohen Stoßgeschwindigkeiten sich zunehmend schwieriger gestaltet. Eine Möglichkeit direkt an der Schneide zu messen könnte durch eine strukturierte Dotierung des Werkzeugdiamanten zur Herstellung eines Temperatursensors liefern. Ein ähnliches Vorgehen wurde im BMBF Projekt MINOP II im Bereich von Koagulationsspitzen für die Chirurgie realisiert [4]. In Diamantschichten, die auf konventionellen Siliziumwafern erzeugt und strukturiert wurden, konnte ein Heizelement für die Koagulation und zur Temperaturüberwachung ein Sensorelement integriert werden (Abb. 3).

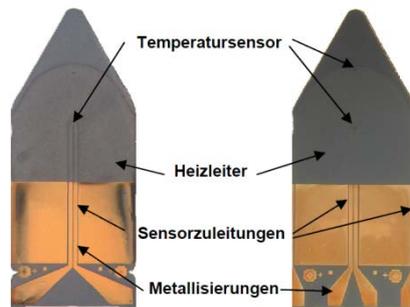


Abbildung 3: Beheizbaren Diamantklinge mit integriertem Temperatursensor [4]

### Projektbeschreibung und Vernetzung:

Um bei der mikromechanischen Oberflächenstrukturierung die Grenzen der Bearbeitung mit konventionellen Werkzeugdiamanten zu überwinden, soll an der Erforschung von neuartigen Werkzeugen gearbeitet werden. Diese sollen unter Zuhilfenahme von Prozessen und Methoden aus der Mikrosystemtechnik hergestellt werden. Die lithographische Strukturierung erlaubt im Gegensatz zu den konventionellen Schleif- und Poliertechniken eine hohe Geometriefreiheit. Es können sowohl konkave, als auch konvexe Schneiden und deren Kombinationen realisiert werden. Die so hergestellten Diamantschneiden müssen anschließend auf einem Werkzeughalter durch geeignete Fügeverfahren appliziert werden. In Zusammenarbeit mit der Forschungsgruppe von Prof. Dr. Mescheder sollen diese Verbindungen anschließend bezüglich deren Stabilität und Zuverlässigkeit mithilfe von Bondtestern untersucht werden und gegebenenfalls das Fügeverfahren gemeinsam mit der Forschungsgruppe von Herrn Wilde verbessert werden. Im nächsten Schritt werden die so hergestellten Werkzeuge auf der bestehenden Ultrapräzisionsstoßanlage bezüglich den erreichbaren Oberflächengüten, Geschwindigkeiten und deren Stabilität charakterisiert werden. Von besonderem Interesse sind hierbei auch die Grenzen der Miniaturisierung der Werkzeuge bezüglich der Stoßbearbeitung und deren Standzeit. Rückschlüsse auf den Werkzeugverschleiß sollen mithilfe von Kraftsensoren, integrierten Temperatursensoren und durch optische Bestimmung der Oberflächengüte bei unterschiedlichen Prozessparametern erarbeitet werden. Hierdurch soll ein tieferes Verständnis des Stoßprozesses erarbeitet werden und ein prozessbeschreibendes Model erstellt werden.

### Arbeitsplan:

Der Arbeitsplan für die vorgeschlagenen Projekte beinhaltet folgende Punkte:

- Entwicklung eines mikrosystemtechnischen Herstellungsprozesses für Diamantwerkzeuge mit integrierten Temperatursensoren
- Charakterisierung der Werkzeuge bezüglich erreichbarer Oberflächengüten, Schnittgeschwindigkeiten und Standzeit
- Erarbeitung eines tieferen Verständnisses der Generierungsmechanismen durch Monitoring der Prozesseinflussgrößen

### Dissertationsthema:

Entwicklung und Charakterisierung von neuartigen funktionellen Diamantwerkzeugen für die Ultrapräzisionsstoßbearbeitung

### Literatur:

[1] Ertl, S. (2004) *Untersuchung zur Herstellung und zum Einsatz mikrotechnisch gefertigter Diamantwerkzeuge*. Dissertation, Freiburg im Breisgau.

[2] Ritzhaupt-Kleissl, E., Müller, C., Sossalla, A., Ertl, S., and Gluche, P. (2005) Fabrication of diamond micro tools for ultra precision machining. *Microsystem Technologies*, 11(4-5), 278–279.

[3] Molnár, V. (2012) Investigation on Cutting Temperature and Tool-Wear and Comparing Them with FEM Results in 15th International Research/Expert Conference, Prague, Czech Republic.

[4] Ertl, S. (2003) *Entwicklung eines Instrumentenmoduls auf Basis von Diamantstrukturen. MINOP II MST zum Einsatz in der minimalinvasiven endoskopisierten neurochirurgischen Operationstechnik*, Um.

## A2: Elektrophoretische Abscheidung funktionaler Kompositschichten

Projektleiter: H. Reinecke

Kooperationspartner: T. Hanemann, C. Müller, U. Mescheder

Beantragte Promotionsstipendien: 1

Das Ziel des Forschungsvorhabens „Elektrophoretische Abscheidung funktionaler Kompositschichten,“ ist die Untersuchung von Verfahren zur Abscheidung funktionaler Kompositmaterialien aus Polymeren und Metallen oder Legierungen mit gezielten magnetischen elektrischen oder thermisch hoch leitenden Eigenschaften

### Stand der Technik:

Die Elektrophorese beruht auf dem Prinzip, dass geladene Teilchen in einem elektrischen Feld wandern. Abbildung 1 zeigt schematisch den Aufbau für einen solchen Prozess. Die geladenen Partikel in der Suspension wandern im elektrischen Feld entsprechend ihrer Ladung zur jeweiligen Elektrode.

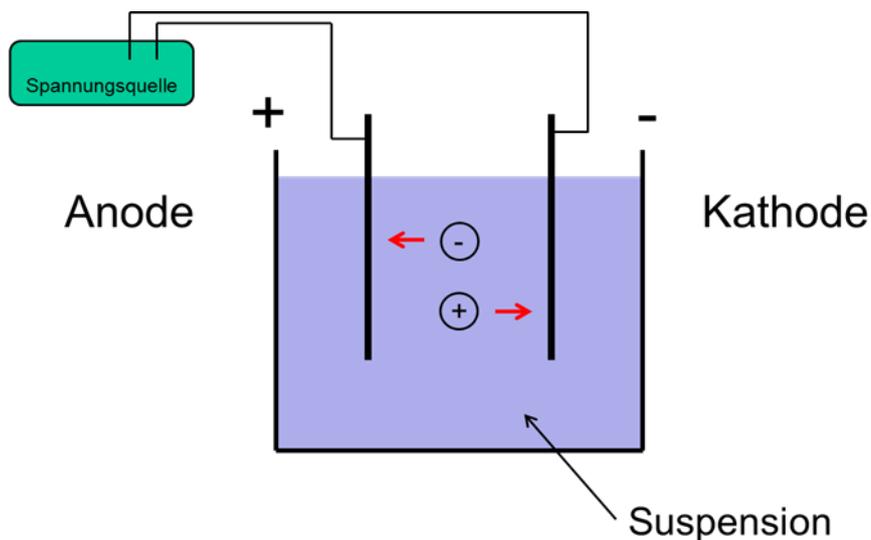


Abbildung 1: Schematische Darstellung der Elektrophorese

Möchte man einen Feststoff elektrophoretisch abscheiden, so muss man die Partikel in ein flüssiges Medium in Suspension bringen und mit einer Ladung versehen. Bei der Wahl der Trägerflüssigkeit muss berücksichtigt werden, dass die Viskosität möglichst niedrig ist, da die der elektrostatischen Anziehungskraft entgegenwirkende Stokessche Reibung proportional zur Viskosität ist. Man benötigt also mehr Kraft um ein Partikel durch die Flüssigkeit zu bewegen, wenn die Viskosität höher ist. Außerdem sollten die Partikel möglichst klein sein, da die Stokessche Reibung ebenfalls proportional zum Radius des Partikels ist.

Um nun Partikel und die Trägerflüssigkeit in eine stabile Suspension zu überführen, werden üblicherweise Tenside verwendet. Diese bestehen in der Regel aus zwei verschiedenen

funktionalen Enden einem hydrophoben, meist unpolar, und einem hydrophilen, meist polar, der bei ionischen Tensiden eine Ladung trägt. Während sich der hydrophobe Teil an der Oberfläche eines Partikels anlagert, wird der hydrophile Teil von einem polaren Lösungsmittel (z.B. Wasser) umschlossen (Helmholtz-Doppelschicht). Daran lagern sich wiederum lose Moleküle aus Lösung an (Gouy-Chapman-Doppelschicht, diffus). Es bildet sich also auf der Oberfläche des Partikels eine Schichtabfolge aus polaren Molekülen und es ergibt sich ein Potentialverlauf vom Partikel in die Lösung, wobei dasjenige Potential an der Grenze zwischen fester Helmholtz-Schicht und diffuser Gouy-Chapman-Schicht, das sog. Zeta-Potential, eine besondere Rolle spielt. Denn das Zeta Potential ist dasjenige Potential, welches man sieht, wenn man das Partikel von außen betrachtet. Das Zeta-Potential hängt stark vom pH-Wert ab und kann über diesen gesteuert werden.

### **Arbeitsplan:**

Der Arbeitsplan für die vorgeschlagenen Projekte beinhaltet folgende Punkte:

- Entwicklung eines mikrosystemtechnischen Herstellungsprozesses für Polymerabscheidung
- Charakterisierung der Komposite bezüglich polymerer Langzeitstabilität und metallener Eigenschaften

### **Dissertationsthema:**

Entwicklung und Charakterisierung von neuartigen Verfahren zur Erzeugung von Kompositmaterialien

### **Literatur:**

[1] Vogel, Sylvia (2010): Prozessentwicklung zur elektrophoretischen Abscheidung keramischer Schichten und Mikrostrukturen. Freiburg i. Br., Univ., Diss., 2010.

[2] Ma, Jan; Cheng, Wen (2002): Electrophoretic Deposition of Lead Zirconate Titanate Ceramics. In: Journal of the American Ceramic Society 85 (7), S. 1735–1737.

[3] Ferrari, Begoña; Moreno, Rodrigo; Cuesta, Jose A. (2006): A Resistivity Model for Electrophoretic Deposition. In: KEM 314, S. 175–180.

### **A3: Entwicklung einer Prozess-Toolbox zur elektrochemischen Mikrobearbeitung**

Projektleiter: C. Müller

Kooperationspartner: H. Mozaffari, J. Rühle

Beantragte Promotionsstipendien: 1

---

Ziel des Projektes ist die Entwicklung eines „Baukastensystems“ mit dessen Hilfe mikrotechnische Anwendungen für die elektrochemische Bearbeitung (ECM) verlässlich vorhergesagt werden können.

Auf Datenbasis der bestehenden Veröffentlichungen und der gewonnen Messdaten soll ein Baukasten für die elektrochemische Bearbeitung erstellt werden, welcher durch zuverlässige Vorhersagen kleinere Strukturen und Toleranzen ermöglicht. Dieses kann anhand von Beispielstrukturen mit den bestehenden ECM-Anlagen hergestellt und mittels verschiedener Messmethoden qualifiziert werden. Dadurch eröffnet sich für die elektrochemische Bearbeitung ein breites industrielles Anwendungsfeld.

#### **Stand der Forschung**

Mit dem ECM-Verfahren lässt sich eine breite Palette an metallischen Werkstoffen unabhängig von deren mechanischen Eigenschaften bearbeiten ohne die Materialeigenschaften wesentlich zu beeinflussen [1]. Dieses Bearbeitungsverfahren zeichnet sich durch eine hohe Bearbeitungsgeschwindigkeit unter anderem auch durch die mögliche Parallelisierung aus. Begrenzt wird die Anwendung in der Mikrotechnik durch die minimal erreichbaren Strukturgrößen. Im Gegensatz hierzu wurde gezeigt, dass auch die Mikrobearbeitung von metallischen Werkstoffen mit speziellen Verfahrensvarianten möglich ist [2, 3]. Dazu findet das sog.  $\mu$ ECM-Verfahren Anwendung welches mit sehr kurzen Pulsen arbeitet. Zwar können hiermit kleine Strukturen mit Abmessungen im Bereich von 20 $\mu$ m hergestellt werden, die Bearbeitungszeit ist allerdings durch die kurze Pulslänge sehr groß.

In eigenen Arbeiten wurde die Möglichkeit aufgezeigt mit verschiedenen mikrostrukturierten Werkzeugen, u.a. Kohlenfasern und strukturierte Siliziumwerkzeuge, zu arbeiten, welche durch ihre Dimensionen in der Größe von 5-7 $\mu$ m eine deutliche Reduzierung der Strukturgrößen zu lassen [4].

Im GenMik-Graduiertenkolleg werden zurzeit die thermodynamischen und kinetischen Bedingungen im Arbeitsspalt zwischen Werkzeug und Werkstück untersucht und in einer Prozessdatenbank katalogisiert. Außerdem wird der Einfluss der Spülbedingungen auf den Strukturierungsprozess untersucht. Im Rahmen einer zweiten Arbeit wird zusätzlich der Einfluss der Oberflächenstruktur auf das thermodynamische Verhalten charakterisiert.

#### **Projektbeschreibung und Vernetzung**

Zur Überwindung der bestehenden Einschränkungen beim Einsatz der elektrochemischen Bearbeitung für die Mikrostrukturierung, ist es notwendig ein zuverlässiges Vorhersagemodell zu entwickeln, welches Dimensionen und Toleranzen planbar macht. Hierzu sollen vorhandene Prozesse auf wichtige Kernparameter, wie Arbeitsspaltbreite, Rauheit, Abtragsrate, hin untersucht werden. Die hierzu notwendigen Messmethoden stehen an der Universität Freiburg und Hochschule Furtwangen zur Verfügung. Außerdem ist es ebenfalls notwendig den Einfluss der Kornstruktur des Werkstückes auf den Prozess zu bestimmen. Dies kann in Zusammenarbeit mit der Arbeitsgruppe von Prof. Mozaffari

geschehen, da diese über geeignete elektrochemische Mikromessverfahren, sowie über EDX- und XRD-Anlagen verfügt.

In einem nächsten Schritt müssen geeignete Werkzeuge generiert werden, welche ein elektrochemisches Freiformen ermöglichen, unter Berücksichtigung der optimalen Strömungssituation. Hierzu kann auf die komplette Palette an mikrosystemtechnischen Fertigungsverfahren zurückgegriffen werden.

Ein zusätzlicher Fortschritt kann die Kombination der elektrochemischen Strukturierung (ECM) mit dem Verfahren der gepulsten elektrochemischen Bearbeitung ( $\mu$ ECM) sein, um eine Steigerung der Geschwindigkeit der  $\mu$ ECM bei gleichzeitiger Verbesserung der Genauigkeit der ECM zu erreichen.

Im letzten Schritt sollen die Ergebnisse in einer Prozessstollbox zusammengeführt werden, die eine Vorhersage der relevanten Parameter, wie Spannung, notwendiger Arbeitsabstand, Spülgeschwindigkeit etc., zulässt, um eine mikrostrukturierte Geometrie innerhalb der gewünschten Toleranzen zu erhalten.

### **Arbeitsplan**

Der Arbeitsplan für das vorgeschlagene Projekt beinhaltet folgende Punkte:

- Charakterisierung der bekannten Strukturierungsprozesse
- Charakterisierung des Materialeinflusses auf den Prozess
- Kombination von ECM- und  $\mu$ ECM-Verfahren zur Steigerung von Prozessgeschwindigkeit und Präzision
- Aufbau einer Prozessstoolbox zur Vorhersage von elektrochemischen Mikrostrukturierungsprozessen

### **Dissertationsthema:**

Entwicklung einer Prozess-Toolbox zur elektrochemischen Mikrobearbeitung

### **Literatur**

[1] R. Förster, "Untersuchung des Potentials elektrochemischer Senkbearbeitung mit oszillierender Werkzeugelektrode für Strukturierungsaufgaben der Mikrosystemtechnik," Dissertation, Univ, Göttingen, Freiburg im Breisgau, 2004.

[2] V. Kirchner, "Elektrochemische Mikrostrukturierung mit ultrakurzen Spannungspulsen," Dissertation, Freie Univ, Berlin, 2001.

[3] R. Schuster, "Electrochemical Micromachining," Science, vol. 289, no. 5476, pp. 98–101, 2000.

[4] C. Blattert, C. Müller and H. Reinecke, "Micromachined Silicon Electrodes for Electrochemical Micromachining," 4 M 2008 Proceedings, Whittles/4M Network of Excellence, eds. S. Dimov and W. Menz, Cardiff/ UK, 2008, 153-156.

## A4: Charakterisierung und Einsatz von Mikrolaserschmelzen (MLS) in der Medizintechnik

Projektleiter: H. Mozaffari

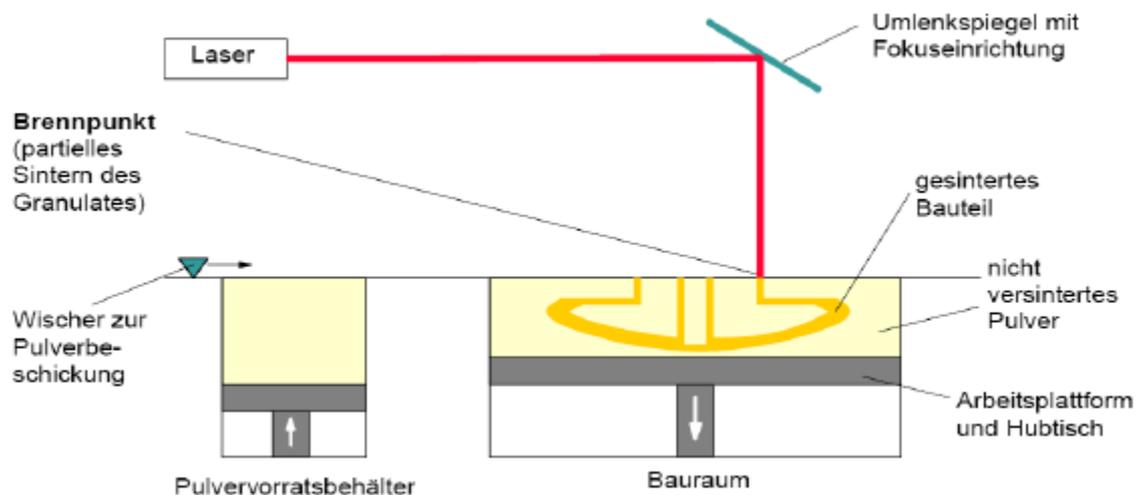
Kooperationspartner: H. Reinecke

Beantragte Promotionsstipendien: 1

Ziel des beantragten Forschungsvorhabens ist es, die Grundlagen für die Anwendung des Mikrolaserschmelzens (MLS) als Fertigungsverfahren für den Bereich Medizintechnik bereitzustellen und die damit verbundenen materialwissenschaftlichen Fragestellungen zu erforschen. Das Vorhaben soll in einem Konsortium aus Anlagenhersteller, Pulverlieferant, Komponentenanwender, Universität Freiburg sowie Hochschule Furtwangen erforscht werden.

### Stand der Forschung

Laser-Prototyping wird als Fertigungsverfahren für einige Industriezweige bereits eingesetzt. Die Anwendung dieser Verfahren in der Medizintechnik ist sehr umstritten. Dies beruht zum größten Teil darauf, dass die Eigenschaften derartiger Produkte noch nicht ausreichend untersucht sind. Die Anwendung des Mikrolaserschmelzens (MLS) für die Herstellung von z. B. Mikrobauteilen in der Medizintechnik könnte einen Wandel in der Medizintechnikbranche verursachen und vollkommen neue Gestaltungsmöglichkeiten anbieten.



Funktionsprinzip: Links der Vorratsbehälter, aus dem Pulver auf der Arbeitsplattform in einer dünnen Schicht mit einem Wischer verteilt wird. Der Laser fährt über das Pulver und verschmilzt im Brennpunkt das Material zu einem Bauteil. Durch Senken der Plattform wächst das Teil schichtweise weiter. Am Schluss wird das nicht versinterte Pulver entfernt. Quelle: inspire irpd

### Projektbeschreibung

Das Laserschmelzen vereint vier signifikante Vorteile:

1. Die Realisierung neuer Formen, wie z. B. geschwungene Kanäle oder Hinterschnitte, die spanend nicht herstellbar sind.

2. Die Integration bzw. Kombination von verschiedenen Bauteilen, wodurch Montagekosten gesenkt werden können und Produktionsabläufe optimierbar sind.
3. Einfacher Transfer von CAD-Daten auf die Maschine zur Produktion innerhalb weniger Stunden.
4. Hohe Stückzahlflexibilität durch individuelle Zusammenstellung der zu produzierenden Bauteile auf einer Trägerplatte.

Um die positiven Vorteile derartiger Prozesse in der Medizintechnik nutzen zu können, müssen die Eigenschaften der mit MLS hergestellten Produkte genauestens untersucht werden. Die Bauteileigenschaften werden verstärkt beeinflusst durch die eingesetzten Ausgangsmaterialien - sprich das Metallpulver - und die Prozessführung (hier wird nicht ein Volumenwerkstoff erhitzt, sondern nur ein Pulverpartikel). Somit ergeben sich für das Bauteil andere makroskopischen Eigenschaften. Teilweise liegen die Festigkeiten der Komponenten über denen des Volumenmaterials und beeinflussen deren Bauteilverhalten bei den Langzeitbelastungen. In diesem Projekt sollen gemeinsam mit den oben genannten Kooperationspartnern sowohl die geometrischen und topologischen Eigenschaften der hergestellten Bauteile, wie erreichbare Wanddicken und Maßgenauigkeiten, als auch die Oberflächengüte der so hergestellten Teile untersucht werden. Eine der materialwissenschaftlichen Fragen, die im Rahmen des Projektes erforscht werden müssen, ist der Einfluss des Prozesses auf das Materialverhalten während des Sintern. Vor allem können hier Seigerungserscheinungen und gebildete Karbide sowie entstandene spröde Sigma-Phasen Probleme verursachen, die das mechanische, aber auch das Korrosionsverhalten von derartigen Bauteilen stark beeinflussen.

**Arbeitsplan.** Der Arbeitsplan für die vorgeschlagenen Projekte beinhaltet folgende Punkte:

- Untersuchung des Materialverhaltens in Abhängigkeit von der Laserleistung
- Untersuchung des Diffusionsverhaltens der beteiligten Legierungselemente während des Sintervorgangs
- Metallkundliche Untersuchung der Bauteile (Analyse des Mikro- und Makrogefüges)
- Untersuchung der mechanischen Eigenschaften der Bauteile
- Analyse von Dichte und Porosität der Bauteile

### **Dissertationsthemen**

- Materialentwicklung und Charakterisierung der Metallpulver für die Anwendung des MLS-Verfahrens in der Medizintechnik
- Anwendung und Optimierung des MLS-Verfahrens in der Medizintechnik

### **Literatur**

1. Selektives Laserschmelzen für die Verarbeitung dentaler Legierungspulver. In: Quintessenz Zahntechnik 35 (2009), S. 1.112-1.125, Strietzel, R.
2. Festigkeit lasergesinterter Brückengerüste aus einer CoCr-Legierung. In: Quintessenz Zahntechnik 34 (2008), S. 140-149, Fischer, J.; Stawarczyk, B.; Trottmann, A.; Hämmerle.

## A5: Prozesse zur Strukturierung von Oberflächen funktioneller Metall-Polymer-Interfaces in elektronischen Bauelementen

Projektleiter: J. Wilde

Kooperationspartner: H. Reinecke, C. Müller

Beantragte Promotionsstipendien: 1

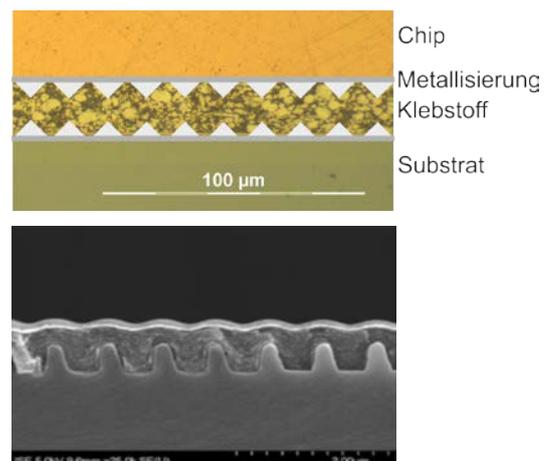
Ziel dieses Forschungsvorhabens ist die Entwicklung einer Methode zur Mikrostrukturierung von inneren und äußeren Oberflächen von Bauteilen der Leistungselektronik, um beim Kleben thermische Polymer-Metall-Grenzflächen mit niedrigen thermischen Übergangswiderständen zu erreichen.

**Stand der Forschung.** Das Leitkleben ist eine Standardtechnologie bei der Montage elektronischer Halbleiterbauelemente auf Wärmesenken. Elektrisch oder thermisch hoch leitfähige Klebmaterialien haben nahezu alle Anwendungen der Mikrosystemtechnik wie Sensorik, Optik oder Mikroelektronik erschlossen [1]. Trotz intensiver Anstrengungen war es aber nicht möglich, damit Anwendungen der Leistungselektronik hoher Leistungsdichte zu erschließen. Für die derzeit verfügbaren Klebstoffe werden zwar Bulk-Leitfähigkeiten angegeben, welche nahezu den Metallen (SnAg-Lot) entsprechen, es gelingt aber nur ansatzweise, diese in realen Bauelementen auszunutzen [2]. Neuere Forschungen zeigen, dass die wesentliche Ursache Polymer-Metall-Interfaces sind, welche quasi als Dämmschichten wirken [3]. Dabei liegt die Dicke der kritischen Polymerschicht im Bereich von 1  $\mu\text{m}$ . Es ist aber zu erwarten, dass durch die Eliminierung solcher Grenzschichten durchgängig metallische Wärmepfade erzeugt werden können. Das hier vorgestellte Konzept sieht dazu die Erzeugung deterministischer Wärmeleitstrukturen innerhalb der Klebstoffe und die Mikrostrukturierung der Fügeflächen vor.

**Projektbeschreibung und Vernetzung.** In dem vorliegenden Vorhaben soll das hoch praxisrelevante Thema der elektronischen Fertigungstechnik wissenschaftlich auf der Basis der Theorie der Verbundwerkstoffe in Kombination mit modernen Generierungsverfahren von Mikrostrukturen an Bauteiloberflächen behandelt werden. Im Zentrum der beantragten Arbeiten steht die Eliminierung von Polymer-Metall-Interfaces quer zum Wärmestrom und die Erzeugung wirkungsvoller metallischer Wärmepfade. Dabei sollen die thermischen Eigenschaften durch Metallstrukturen und die Adhäsion durch Polymere generiert werden.

Wesentliche Randbedingung aller Konzepte ist die Kompatibilität zu Prozessabläufen und Qualitätsanforderungen der Mechatronik. Im Hinblick auf Interfaces sind auf Leistungsbaulementen und Wärmesenken Oberflächenstrukturierungen herzustellen, welche beim nachfolgenden Kleben metallische Bindung an die Klebstofffüllstoffe aufbauen. Dazu erscheinen insbesondere pyramidenartige Topologien ähnlich einer Haifischhaut mit Dimensionen im Bereich von 1 bis 10  $\mu\text{m}$  gut geeignet, Abb. 1. Zur Oberflächen-

**Abb. 1:** Oben: Mögliches Design der strukturierten Oberflächen mit zwischenliegendem Klebspalt. Unten: Strukturierte Metallisierung einer Solarzelle. (Quelle: Fraunhofer ISE)



strukturierung sollen die in Genmik bereits vorhandenen additiven und subtraktiven Methoden wie Elektrochemie, Galvanik, mechanische Bearbeitung, Laserstrukturierung, Photolithographie oder Prägen angewendet werden. Das Vorhaben ist daher mit einer hohen Anzahl anderer Genmik-Arbeiten eng vernetzt, da es intensiv deren Prozesstechniken nutzt. Daneben sollen durch Galvanoformung oder Prägetechnik Wärmeleitstrukturen erzeugt werden, welche einerseits bereits bei geringen Metallanteilen hohe Leitfähigkeit und andererseits hohe Flexibilität der Klebstoffe erzeugen. Auch hierfür bieten sich intensive Zusammenarbeiten, insbesondere mit IMTEK PRO an.

**Arbeitsplan.** Der Arbeitsplan für die vorgeschlagenen Projekte beinhaltet folgende Aspekte:

- Analyse der Beiträge von Materialien und Grenzflächen zum thermischen Übergangswiderstand in metallisch gefüllten Leitklebverbindungen.
- Modellbildung und Konzept zur inneren Strukturierung von Klebstoffschichten durch integrierte, mikrotechnisch hergestellte Wärmeleitstrukturen.
- Herstellung von Klebverbindungen mit inneren, deterministischen Wärmeleitstrukturen.
- Konzept zur Minimierung thermischer Grenzflächeneinflüsse in Polymer-Metallsystemen durch geeignete Oberflächentopologie der elektronischen Bauteile.
- Erprobung von Prozessen zur nachträglichen Strukturierung der Oberflächen von Leistungsbau-elementen und Wärmesenken im Hinblick auf lokalisierte metallische Bindung.
- Aufbau von leistungselektronischen Musterschaltungen und Erprobung der system-relevanten Eigenschaften.

**Dissertationsthemen.**

- Herstellung und Modellierung deterministischer metallischer Mikrostrukturen zur Integration in thermische Hochleistungsklebstoffe
- Strukturierung metallischer Bauelementoberflächen und Modellierung thermischer Widerstände in leistungselektronischen Systemen

**Literatur**

1. Gesang, T.; Schäfer, H.; Wilde, J.: Kleben in der Elektronik – Forschungsbedarf und Marktpotentiale. DVS-Bericht 257, Düsseldorf, DVS-Verlag, 2009, ISBN 978-3-87155-259-5
2. J. Ocklenburg, J.; Rastjagaev, E.; Wilde, J.: Investigation of modern electrically conductive adhesives for die-attachment in power electronics applications." Proc. ECTC 2013, IEEE 2013.
3. Kleemeier M.: Bedeutung der Füge-teiloberflächen für die Wärmeleitung von Klebeverbindungen. Abschlussbericht AiF-IGF-Vorhaben 15.675 N, IFAM – Fraunhofer Institut für Fertigungstechnik und angewandte Materialforschung, 2010.

## A6: Optimierung der mechanischen Eigenschaften der metallischen Komponenten durch Oberflächenmikrostrukturierung und die Verbesserung des Ermüdungsverhaltens

Projektleiter: H. Mozaffari

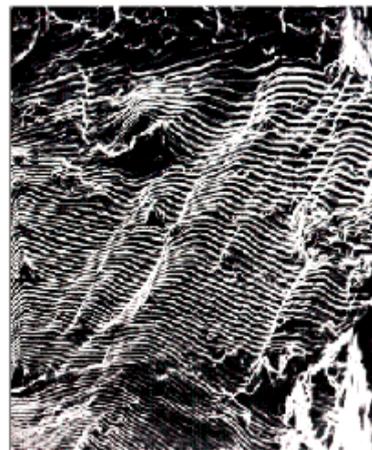
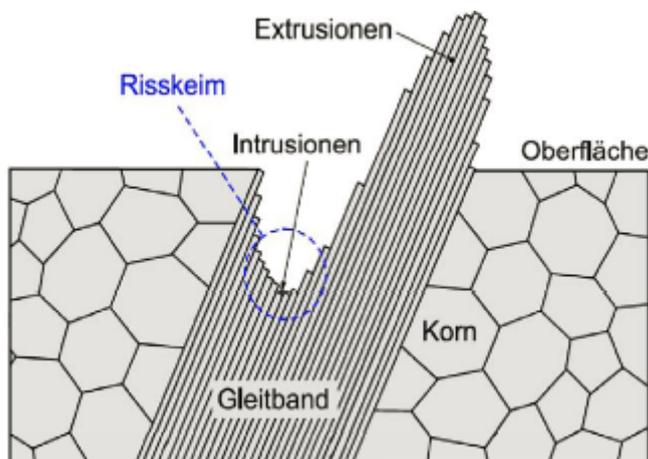
Kooperationspartner: H. Reinecke, J. Wilde

Beantragte Promotionsstipendien: 2

Ziel des beantragten Forschungsvorhabens ist es, die Auswirkung der Eigenspannungsverteilung auf die mechanischen Eigenschaften der metallischen Komponenten zu untersuchen und ausgehend von Oberflächeneigenschaften und -topologie der Bauteile deren Ausfallmechanismen zu klären. Diese Erkenntnisse können als Grundlagen für gezielte Mikrostrukturierung der Bauteiloberflächen eingesetzt werden, um somit deren Langzeitstabilität und Lebensdauer entscheidend zu verbessern.

### Stand der Forschung

Aus dem Bereich des Maschinenbaus ist bereits bekannt, dass bei wechselnder mechanischer Belastung von metallischen Bauteilen die Bewegung von Versetzungen die Bildung von „Intrusionen“ und „Extrusionen“ an den Bauteiloberflächen verursachen. Diese Mikrostrukturen sind die Hauptursache für die Bildung von Ermüdungsrissen, die verstärkt von den Bauteiloberflächen ausgehen. Es gibt einige Verfahren, wie z. B. Wärmebehandlung oder mechanische Prozesse, die es uns ermöglichen, die Bewegung von mikroskopischen Gleitbändern zu erschweren, bzw. zu blockieren.

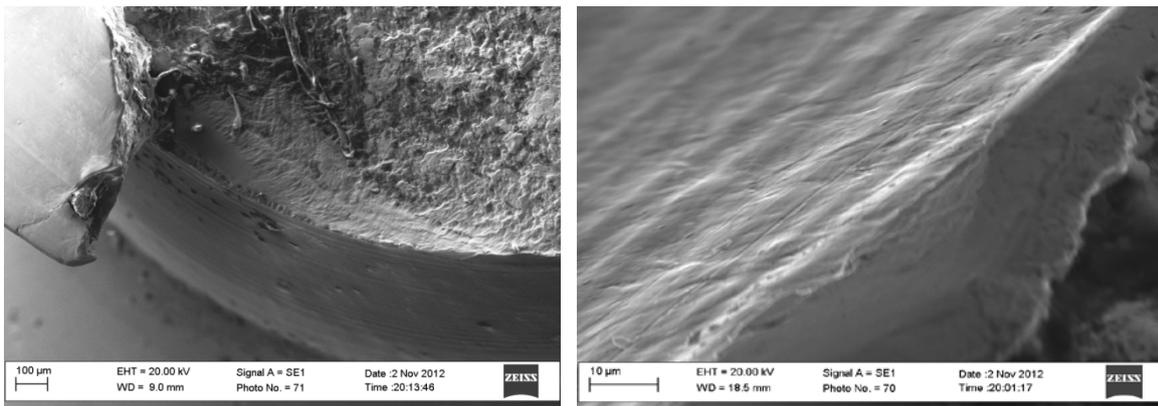


Entstehung von Ermüdungsgleitbändern und Risskeimbildung (Bild links). Rasterelektronenmikroskopische Aufnahme der Bruchfläche mit deutlich sichtbaren Schwingungstreifen (Bild rechts).

### Projektbeschreibung

Die Qualität und Lebensdauer der technischen Komponenten, wie z. B. hydraulische Ventile oder medizinischen Implantate, werden durch mehrere Faktoren beeinflusst. Einige dieser Einflussfaktoren sind die chemische Zusammensetzung der eingesetzten Legierungen und deren Korrosionsverhalten, der Gefügestand der eingesetzten Werkstoffe und deren

mechanische Eigenschaften sowie die Art der mechanischen Belastungen. Eine sehr entscheidende Rolle beim Versagen der Bauteile spielen Eigenspannungszustände und Eigenspannungsverteilungen der hergestellten Komponenten sowie deren Oberflächenqualität. Die Eigenspannungen in den Bauteilen werden zum größten Teil durch die eingesetzten Fertigungsverfahren bereits im frühen Stadium im Bauteil induziert. Diese Spannungen können in Wechselwirkung mit den vorhandenen Mikrostrukturen an der Bauteiloberfläche das Ermüdungsverhalten der Bauteile stark beeinflussen. Durch gezielte Mikro- und Nanostrukturierung der Bauteile und Bauteiloberflächen kann das mechanische Ermüdungsverhalten der Komponenten entscheidend verbessert werden. Einige an der Hochschule Furtwangen durchgeführte Untersuchungen aus dem Bereich der Medizintechnik bestätigen diese Verhaltensmechanismen beim Ausfall der Bauteile (s. Bild unten).



Bruchfläche und Bruchausgangsort der Fixationsschraube (Bild links). Flankenoberfläche in der Nähe der Bruchfläche (Bild rechts).

Das Projekt passt aufgrund der Oberflächentopologie und der dadurch implizierten Verhaltensweisen, bzw. der verfahrensbedingten Materialveränderungen, gut zum Forschungsbereich C und kann somit einen intensiven Austausch zwischen den einzelnen Bereichen fördern.

**Arbeitsplan.** Der Arbeitsplan für die vorgeschlagenen Projekte beinhaltet folgende Punkte:

- Röntgenfeinstrukturanalyse der Bauteile zur Bestimmung der Mikro-eigenspannungszustände und deren Einfluss auf das Ermüdungsverhalten der Komponenten
- Nano- und Mikrostrukturierung der metallischen Komponenten zwecks Verbesserung deren Ermüdungsverhaltens
- Analyse des Einflusses von Medium und Korrosionsprozessen auf die Riskeimbildung
- Analyse der verfahrensbedingten Oberflächentopologie der metallischen Komponenten

### Dissertationsthemen

- Charakterisierung und Optimierung des Ermüdungsverhaltens von Titanbauteilen in Abhängigkeit von der Mikrostruktur der Legierungen und deren makroskopischen und mikroskopischen Eigenspannungszuständen
- Verbesserung und Optimierung des Ermüdungsverhaltens von metallischen Komponenten durch Generierung von Mikrostrukturen und Anpassung der Oberflächentopologie
- Untersuchung der Bildung von Riskeimen bei metallischen Komponenten unter wechselnder Belastung in korrosiver Umgebung

### Literatur

1. Titan und Titanlegierungen (2010), Manfred Peters und Christoph Leyens, WILEY-VCH
2. Zyklische Festigkeit und Verformung, Ermüdung, Handbuch Hochtemperatur-Werkstofftechnik (1998), Ralf Bürgel, Springer Verlag
3. Ermüdung und Korrosion nach mechanischer Oberflächenbehandlung von Leichtmetallen, (Dissertation, 2006, TU Darmstadt), Christian Dindorf

## **A7: Kritische Reaktionsmechanismen für elektrochemische, selbstorganisierte 3D-Mikro- und Nanostrukturierung**

Projektleiter: U. Mescheder

Kooperationspartner: H. Reinecke, J. Wilde

Beantragte Promotionsstipendien: 1

---

Ziel des Forschungsvorhabens ist ein besseres Verständnis der kritischen Parameter der orts- und zeitabhängigen Reaktionen bei der Anodisierung von Halbleiteroberflächen und die Entwicklung einer daraus abgeleiteten Verfahrenstechnik zur mikro- und makroskopischen 3D-Formgebung.

### **Stand der Forschung**

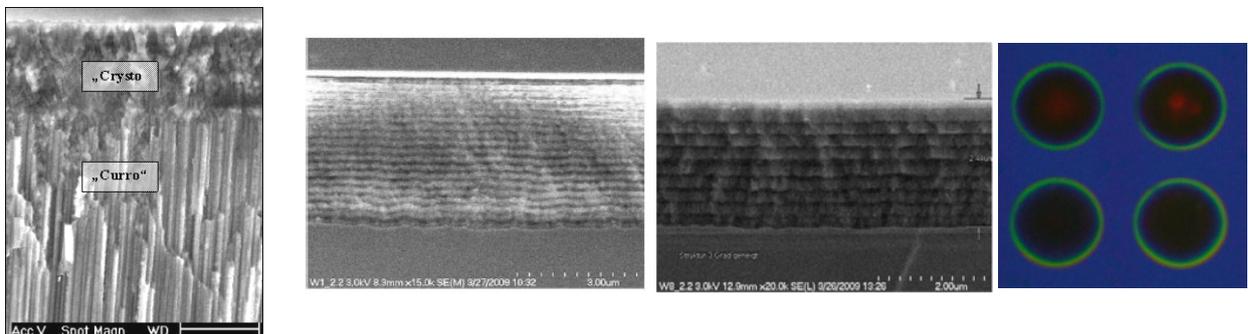
Beim sogenannten Anodisieren von Silizium [1] entsteht in einem selbstorganisierten Prozess poröses Silizium, dessen Poreneigenschaften (Porengrößen, Porosität, Morphologie) die makroskopischen Schichteigenschaften bestimmen. Der dabei kritische Prozess der Porenbildung ist ein sowohl zeitlich wie örtlich unbestimmter Prozess, was als örtliche und zeitliche Instabilitäten beobachtet wurde [3, 4], die für kritische Anwendungen wie z.B. optische Sensoren oder Filter beruhend auf porösen Multilayerschichten ( $\lambda/4$ -Schichten) oder bei der dreidimensionalen Strukturierung über porösem Silizium als Opferschicht störend wirken und unbedingt vermieden werden müssen. Zeitliche Instabilitäten machen sich dabei als Stromoszillation ( $j(U)$ ) und Ortsinstabilitäten durch Ausbildung von Überstrukturen bemerkbar und sind letztlich Ergebnis der Selbstorganisation bei der Bildung von porösen Strukturen mit Porengrößen im Nanometerbereich. Ein Beispiel für solche Instabilitäten ist der stochastische Übergang von Crysto- zu Curro-Poren (**Abb. 1** [2]). Bei Herstellung von Multilayerschichten werden durch genaue Einstellung der Porosität der Brechungsindex und die Schichtdicke (im Bereich nm) gezielt variiert [5, 7]. Da hierzu dynamische Prozesse (zeitabhängige Stromdichten, großer Tiefen- und Flächenbereich) erforderlich sind, liegen Nichtgleichgewichtsbedingungen vor, die gegenüber Anodisierung bei konstanten Bedingungen (Strom) deutlich komplexer sind. So wurde bei eigenen Vorarbeiten beobachtet, dass sich mit zunehmender Anodisierungszeit (Anzahl der Schichten) eine Überstruktur ausbildet, die einen deutlichen Einfluss auf das optische Verhalten dieser Vielfachschichten hat (**Abb.2**). Deutlich erkennbar ist die größere Welligkeit der zunächst planparallel sich ausbildenden Multilayer-Schichten mit zunehmender Ätztiefe. Integriert man die in Selbstorganisation erzeugten Nanostrukturen in Si-Mikrosysteme, so muss der Bildungsprozess durch eine geeignete Maskierungsschicht wie etwa  $\text{Si}_3\text{N}_4$  auf bestimmte Bereiche begrenzt werden. Im Übergangsbereich zwischen einer elektrisch isolierenden Maskierung und dem anodisierten Bereich kommt es zu einem Stromkonzentrationseffekt, der auch als Kanteneffekt bezeichnet wird. Aufgrund der damit verbundenen Stromdichtenverteilung ändern sich lokal die Anodisierungsbedingungen und damit in einer Multilayerschicht die Brechungsindizes, die wiederum die optischen Eigenschaften der Multilayerschicht bestimmen. Dieses Phänomen wird dann als Inhomogenität der gewünschten Zielstruktur (z.B. DBR-Filter) feststellbar (Farbvariation innerhalb der Filterchips).

## Projektbeschreibung und Vernetzung

In diesem Projekt geht es um die Untersuchung, Modellierung und Steuerung der kritischen Reaktionsmechanismen in Selbstorganisationsprozessen am Beispiel der Anodisierung von Silizium zur Bildung von porösem Silizium. Insbesondere soll das Phänomen der unkontrollierten Ausbildung von unerwünschten Überstrukturen und Maßnahmen zu deren Reduktion untersucht werden. Kritisch ist hier das Verständnis und die Beherrschung der Nukleationsphase bei der Porenbildung.

Die Verfahren sollen an Multilayerschichten untersucht werden, die als Indikatorstrukturen für Prozessinstabilitäten und Variationen genutzt werden und diese optisch (makroskopisch) sichtbar machen. Daher werden diese Strukturen auch als Indikatorstrukturen bei der Prozessentwicklung (ex-situ) verwendet, parallel zu strukturellen und analytischen Materialuntersuchungen.

Bezüglich der elektrochemischen Bearbeitung ist eine enge Zusammenarbeit mit der AG **H. Reinecke** vorgesehen. Stabilität des porösen Materials und der Multischichten soll in Kooperation mit der AG **J. Wilde** untersucht werden.



**Abb. 1:**  
Selbstinduzierte  
Curro-Crysto  
Übergänge in {111}-  
Si [2]

**Abb. 2:** Multilayer-Strukturen aus porösem Silizium, das naßchemisch an der Oberfläche von kristallinem Silizium gebildet wurde. Einzelschichten im Bereich 150 nm ( $N/4$ -Schichten) links: DBR-Struktur [7], Mitte: Fabry-Perot-Typ mit einer  $N/2$ -Schicht in der Mitte. Die Welligkeit der eigentlich planparallelen Schichten nimmt mit der Ätztiefe zu, rechts: optische Filterschichten aus porösem Silizium, die Farbänderung im Randbereich beruht auf dem Einfluss der Strominhomogenität bei der Bildung (Kanteneffekt), Durchmesser der Filter: 10 mm) [8]

## Arbeitsplan

- Definition und Simulation von Teststrukturen
- Bestimmung und Untersuchung des Parameterraums
- Untersuchung und Modellierung von Nichtgleichgewichtszuständen beim Anodisieren, insbesondere durch Stromvariation/Strompulse
- Untersuchung und Beeinflussung des „Keimbildungsprozesses“ beim Anodisieren
- Untersuchungen zur Konformität des Bildungsprozesses (Anodisierung)

## Dissertationsthema

Untersuchung und Beschreibung der kritischen Parameter für Prozessinstabilitäten (zeitlich und lokal) beim elektrochemischen Anodisieren von Halbleiteroberflächen

## Literatur

1. V. Lehmann and U. Gösele, "Porous silicon formation: a quantum wire effect", Appl. Phys. Lett. **58(8)**, 856 (1991).
2. S. Frey, "Novel formation regimes and mechanisms for macropores and porous anodic oxides in silicon", PhD Thesis, University of Kiel, 2005
3. H. Föll, S. Langa, J. Carstensen, S. Lölkes, M. Christophersen, and I.M. Tiginyanu, "Review: Pores in III-V Semiconductors", Adv. Mater. **15(3)**, 183 (2003)
4. J. Wloka, K. Mueller, and P. Schmuki, "Pore morphology and self-organization effects during etching of n-type GaP(100) in Bromide Solutions", Electrochem. Solid-State Lett. **8(12)**, B72, 2005
5. S. Chan, P. M. Fauchet, Y.Li, L.J.Rothberg and B.L.Miller, "Porous silicon microcavities for biosensing applications", Phys. Stat. Sol. A, vol. 182, p. 541-546, 2000
6. V. Parkhutik, A. Nassiopoulou, M. Sailor, and L.T. Canham (Eds.), "Proceedings, 5th International Conference, Porous Semiconductors - Science and Technology, Sitges, Barcelona, 2006", Phys. Stat. Sol. (a) **204(5)** (2007)
7. A. Kovacs, P. Jonnalagadda, X. Y. Meng and U. Mescheder, Optoelectrical detection system using porous silicon based optical multilayers, IEEE SENSORS Journal, Vol. 11, No. 10, October 2011, 2413-2420
8. U. Mescheder, A. Kovacs, Hochschule Furtwangen, noch unveröffentlichte Ergebnisse

## A8: Strukturierungsmethoden für kapillare Freiformen

Projektleiter: U. Mescheder

Kooperationspartner: H. Reinecke, Rühle, J. Wilde

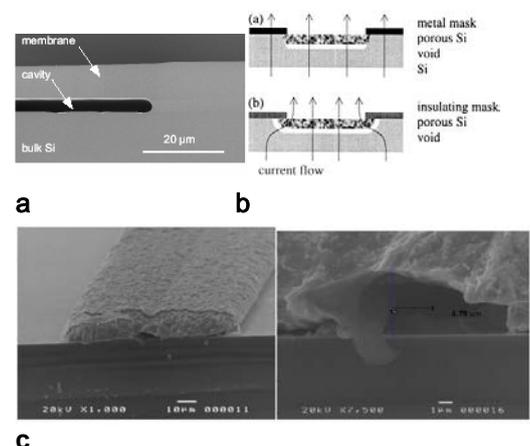
Beantragte Promotionsstipendien: 1

In dem beantragten Forschungsvorhaben sollen neuartige, mit planarer Technologie kompatible Strukturierungsmethoden zur Erzeugung kapillarer Freiformen entwickelt und untersucht werden. Ein besonderes Augenmerk soll dabei auf die Untersuchung der Erzeugbarkeit solcher Kapillarstrukturen in Materialien gelegt werden, die direkt in typischen mikrofluidischen Anwendungen genutzt werden können.

**Stand der Forschung.** Die Oberflächenmikromechanik mit der sogenannten Opferschichttechnik hat sich zur Erzeugung beweglicher Strukturelemente in planarer Technik etabliert. [1,2]. Die Formenvielfalt ist hierbei allerdings begrenzt und beschränkt sich auf zungenartige (Biegebalken für Beschleunigungssensoren oder Gyroskope) und membranartige (dünne Platten für Drucksensoren oder Mikrofone) Strukturelemente. Ein Ansatz zur Erzeugung hermetisch abgeschlossener Kavitäten über eine bei sehr hohen Temperaturen (1000°C) initiierte, selbstorganisierte Strukturumwandlung in einem zuvor über einen Anodisierungsschritt erzeugtem porösen Material wurde in [3] vorgestellt. Ein anderer Forschungsansatz verwendet zwar elektrochemische Anodisierung, benötigt allerdings keinen Hochtemperaturschritt zur Ausformung der einige Mikrometer unter der Oberfläche entstehenden kapillaren Strukturen [4, 5]. Neben diesen subtraktiven Strukturierungstechniken sind jüngst auch additive, elektrochemische Techniken zur Erzeugung solcher Strukturen untersucht worden [6].

Auch wenn die Realisierbarkeit vergrabener, kanalartiger Strukturen in planarer Technik grundsätzlich gezeigt wurde, so besteht noch Forschungsbedarf zum Verständnis der grundlegenden Prinzipien, die insbesondere die Steuerbarkeit der kapillaren Freiformoberfläche und v.a. die im Hinblick auf die Verwendung solcher Kapillarstrukturen äußerst wichtigen Oberflächeneigenschaften bestimmen. Eine weitere Forschungsfrage ist die Dichtigkeit der Strukturen (in [3] wird z.B. eine zusätzliche Schicht benötigt, die dann als eigentliche Membran fungiert und die Dichtigkeit gewährleistet).

**Projektbeschreibung und Vernetzung.** In diesem Projekt sollen sowohl additive wie subtraktive, mit konventioneller Planartechnik kompatible Strukturierungsmechanismen für kanalartige, hermetisch geschlossene Kanalstrukturen untersucht werden. Bei den subtraktiven Methoden soll insbesondere ausgehend von einem Verfahren zur 3D-Freiformherstellung die Übertragbarkeit auf vergrabene, kapillare Strukturen erforscht werden. Hierzu sind komplexe Modelle zu den elektrochemischen Vorgängen (Stromprofile, Diffusion, elektrochemische Reaktionskinetik gegebenenfalls Abtransport von



**Abb. 1:** Beispiele für kapillarartige Freiformoberflächen, a: Kavität als Referenzdruckkammer für Drucksensor, hergestellt durch thermisch induzierte Umwandlungsprozesse im verwendeten porösen Silizium [3], b: vergrabene Strukturen durch elektrochemisches Ätzen (hier im „polishing-mode“) [4], c: additiv erzeugte Kanalstruktur in Cu [6]

Reaktionsprodukten über Diffusion) und hierauf abgestimmte experimentelle Untersuchungen erforderlich. Für die bisher noch nicht gezeigte Erzeugung von Freiformoberflächen ist insbesondere das Verständnis über den kritischen, stromabhängigen Übergang von einem Electro-Polishing-Mode zu einem Mode, bei dem die Generierung von porösen Strukturen dominiert, von prinzipieller Bedeutung.

Im Bereich der additiven Verfahren über die elektro-chemische Abscheidung (Electro-plating) ist die Beschreibung (Modellierung/Simulation und experimentelle Validierung) und dann gezielte Einstellung der lateralen und vertikalen Wachstumsraten erforderlich, um dieses Verfahren zur Erzeugung vergrabener Kanalstrukturen anwendbar zu machen.

Eine Kombination subtraktiver und additiver Verfahren beruht auf der Gray-Scale-Lithographie in Verknüpfung mit speziellen Oberflächenaktivierungsverfahren, die Phasentrennung belichteter und unbelichteter Bereiche in den hierbei verwendeten photolithographisch strukturierbaren Polymeren (bevorzugt auf Silikonbasis) ermöglichen.

Neben den Strukturierungsverfahren selbst müssen auch materialspezifische Fragen erforscht werden, insbesondere die Materialkennwerte (mechanische Eigenschaften, Diffusions- und fluidische Eigenschaften) auf der Mikroskala.

Die Arbeiten sind in Zusammenarbeit mit den Arbeitsgruppen **H. Reinecke** (elektrochemische Prozesse) und **J. Rühle** (Oberflächenaktivierung) sowie **J. Wilde** (mechanische Charakterisierung und Zuverlässigkeit der Kapillarstrukturen) vorgesehen.

#### **Arbeitsplan:**

- Ermittlung der Prozess- und Designparameter für subtraktive elektro-chemische Verfahren zur Erzeugung von hermetisch dichten Kanalstrukturen
- Untersuchung der Morphologie und der Materialeigenschaften der Kanalstrukturen (incl. der einbettenden Umgebung)
- Integration von Verfahren zum gezielten Zugang zu den vergrabenen Kanalstrukturen
- Ermittlung der Prozess- und Designparameter für additive elektro-chemische Verfahren zur Erzeugung von geöffneten/hermetisch dichten Kanalstrukturen
- Untersuchung der Materialeigenschaften der additiv hergestellten Strukturen (insbesondere Dichtigkeit)
- Prozessentwicklung für Kanalstrukturen in Polymeren (Grayscale-Lithographie, Synthese von photoempfindlichen Silikonem, Oberflächenaktivierung zur Ausbildung einer definierten Phasentrennung im Polymer (belichtet/unbelichtet).
- Materialuntersuchungen (mechanische und thermische Stabilität, Langzeitverhalten)

#### **Dissertationsthemen**

- Subtraktive und additive elektro-chemische Strukturierungsverfahren zur Erzeugung von Kavitäten

In der weiteren Ausgestaltung des Promotionskollegs sind weitere Promotionsvorhaben in diesem Themenfeld geplant:

- Grayscale-basierte Strukturierungsverfahren von vergrabenen Kanalstrukturen in Polymeren

#### **Literatur**

[1] Bustillo, J.M.; Howe, R.T.; Muller, R.S. *Surface micromachining for microelectromechanical systems*, Proceedings of the IEEE, Vol.86, Iss.8, Aug 1998, Pages:1552-1574.

[2] U. Mescheder. *Mikrosystemtechnik: Konzepte und Anwendungen*, Stuttgart: Teubner-Verlag, 2. überarbeitete und ergänzte Auflage, 2004,

[3] Armbruster, S. et al *A novel micromachining process for the fabrication of monocrystalline Si-membranes using porous silicon*, Proceedings Transducers 2003, Boston, 246-249 Vol. 1

- [4] G. Lammel, P. Renaud *Free-standing, mobile 3D microstructures of porous silicon*, Sensors and Actuators A: Physical , Volume 85, Issues 1–3, 25 August 2000, Pages 356–360
- [5] U. Mescheder, A. Kovacs: *Surface Micromachining Process for C-Si as Active Material*, Digest of Technical Papers of the Transducers '01, Eurosensors XV, Munich, Germany, June 2001, p. 218-221
- [6] Lohith Pemmansani, Frederico Lima, Ulrich Mescheder, Hochschule Furtwangen, September 2013, unveröffentlichte Daten

## **B1: Aktuierbare Mikrostrukturen durch Kombination von Präge- und Freischreibprozessen**

Projektleiter: J. Rühle

Kooperationspartner: H. Reinecke, J. Wilde, U. Mescheder

Beantragte Promotionsstipendien: 1

---

Ziel des beantragten Forschungsvorhaben ist es, unter Verwendung von mit Radikalbildnern modifizierten Präpolymeren eine Methode zur Erzeugung aktuierbarer Mikrostrukturen durch die Kombination von Imprint- und Zweiphotonenlithographie zu entwickeln, die die Vorteile der einfachen Abformung mit Stempelwerkzeugen mit denen des maskenlosen Freischreibens kombiniert.

**Stand der Forschung.** Imprint Technologien (1) als Top-Down-Verfahren und die Zweiphotonenlithographie (2,3) als Bottom-Up-Technik sind jeweils sehr gut erforschte komplementäre Techniken auch für die Herstellung von Strukturen aus Hybridmaterialien. Die Kombination aus beiden Verfahren ist bislang nicht erforscht.

**Projektbeschreibung und Vernetzung.** Das Prägen von Strukturen (hot embossing, nano imprinting) ist eine fest etablierte Methode zur einfachen und auch großflächigen Herstellung von Mikro- und Nanostrukturen. Dabei werden jeweils auf mechanischem Wege im wesentlichen durch subtraktive Prozesse 2,5D-Strukturen erzeugt, wobei jedoch freitragende Strukturen nicht möglich sind. Die Zweiphotonenlithographie ist im Gegensatz dazu eine Methode, bei der mit großer Präzision in einem Freischreibverfahren dreidimensionale Strukturen durch ein additives Verfahren generiert werden können. Dabei ist jedoch die Größe der strukturierten Bereiche auf ca. Millimeter große Objekte begrenzt.

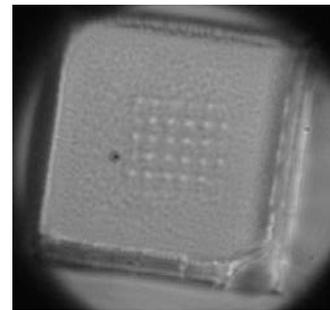


Abb. 1: Mit 2PC hergestellte Polymerstruktur (photonischer Kristall) auf einer abgeprägten Polymersäule (Säulendeckfläche:  $20 \times 20 \mu\text{m}^2$ )

Ziel der Forschungsarbeiten ist es, die Methoden zu kombinieren, um Strukturen aus unterschiedlichen Materialien und Eigenschaften nebeneinander zu generieren und hochpräzise und einfache, großflächige Objekte auf einem Substrat zu vereinigen. Dabei sollen beide Prozesse auf Vernetzungsreaktionen (4,5) beruhen, so dass beide Prozesse mit einem und dem gleichen Material durchgeführt werden können. In diesem Projekt soll dies exemplarisch anhand von Feldern aus integrierten aktuierbaren und passiven Mikrostrukturen gezeigt werden. Solche Strukturen sind beispielsweise für die Untersuchung biomechanischer Fragestellungen an Zellen nötig. Speziell diese Anwendungsoption erfordert zusätzlich auch eine Kontrolle der Oberflächeneigenschaften.

Wir möchten in diesem Projekt den bereits entwickelten vollständig neuartigen 2-Photonenvernetzungsprozess (2PC-Prozess) in photochemisch vernetzbaren Polymeren weiterentwickeln. Der Schwerpunkt liegt aber in der besseren Integration der beiden Prozessstypen, die in der ersten Förderperiode zwar gezeigt werden konnte aber noch eine genaue Ausarbeitung der Rahmenbedingungen und der gegenseitigen Beeinflussung der jeweiligen Parameter braucht. Diese Arbeiten sind in Zusammenarbeit mit **Reinecke** und **Mescheder** und **Wilde** geplant.

**Arbeitsplan.** Der Arbeitsplan für die vorgeschlagenen Projekte beinhaltet folgende Punkte:

- Synthese von Polymeren mit thermischen und photochemischen Radikalbildnern mit für 2-PL geeigneten chromophoren Gruppen
- Untersuchungen zur Schichtbildung und zum Vernetzungsverhalten der Polymeren
- Herstellung von Hybridmaterialien über 2PC und IL durch Einbringen von Nanopartikeln; Studium des Einflusses der Füllstoffe auf den Vernetzungsprozess.
- Untersuchungen zum kombinierten Einsatz von IL and 2PC ,zur Herstellung multifunktionaler mikrostruktuiertes Oberflächen.
- Kontrolle der Oberflächeneigenschaften der erhaltenen Mikrostrukturen.

### **Dissertationsthemen**

- Herstellung von Polymermikrostrukturen durch Kombination der vernetzende Imprintlithographie und der Zweiphotonenlithographie

### **Literatur**

1. A. del Campo, E. Arzt, Chemical Reviews 2008, 108, 911-945.
2. K.-S. Lee, R. H. Kim, et al.; Progress in Polymer Science 2008, 33, 631-681.
3. H. B. Sun and S. Kawata, Advances in Polymer Science 2004, 170, 169-273
4. R. Toomey, D. Freidank and J. Rühle, Macromolecules 2004, 37, 882-887
5. K. Schuh, O. Prucker and J. Rühle, Macromolecules 2008,41, 9284-9289.

## B2: Templat-basiertes Abformen von Polymeren

Projektleiter: J. Ruhe und H. Reinecke

Kooperationspartner: U. Mescheder

Beantragte Promotionsstipendien: 2

In diesem Forschungsvorhaben sollen die Bedingungen für die Herstellung von mit Hilfe von Templaten abgeformten Polymermikro- und Nanostrukturen untersucht werden. Dabei sollen Oberflächen mit extrem ungewöhnlichen Benetzungseigenschaften generiert werden, d.h. Strukturen mit sehr starker Modulation der Kontaktlinie. Dies sind insbesondere haar- oder pilzartige Strukturen bei denen ein starker Hinterschnitt der Strukturen vorhanden ist.

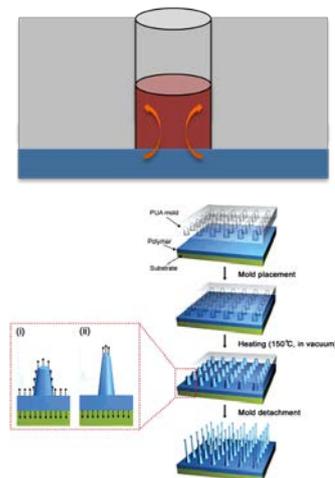
**Stand der Forschung.** Die Abformung von Templaten ist eine der wichtigsten Methoden zur Herstellung von Mikro- und Nanostrukturen aus Polymer. Beispiele hierfür ist die Abformung von lochartigen Strukturen in Metall und Silizium oder auch membranartigen Strukturen in Polymeren (ion track etched membranes). Hierbei sind vielfach interessante Formgebungen beschrieben worden, wobei jedoch oft eine stark empirische Beschreibung vorherrscht (1-4).

**Projektbeschreibung und Vernetzung** Erster Schritt des Abformungsprozesses ist das Einströmen des Polymeren in die porenartige Struktur durch Kapillarwirkung oder durch Druck. Dabei ist von entscheidender Bedeutung ob es sich um offene oder geschlossene Strukturen auf der dem Polymer abgewandten Seite handelt. Die Adhäsion an der Grenzfläche bedingt die Stärke der Haftung der Strukturen am Templat. Um ein gutes Trennen zu ermöglichen werden oft Antihafschichten aufgebracht. Ist die Haftung sehr stark, so kommt es beim Trennen der erwärmten Polymerschicht vom Templat zu einem kalten Fluss. Dies kann zu starkem Verformen der Strukturen führen und es kommt zur Ausbildung von stark elongierten Strukturen. Die Bildung der Strukturen als Funktion der physikalischen Parameter soll ermittelt werden und die erhaltenen Mikro- und Nanostrukturen anschließend photochemisch fixiert werden (5). Bei säulenartige Strukturen mit hohem Aspektverhältnis soll ein starker Temperaturgradient eingestellt werden, der zu einem partiellen Aufschmelzen am Ende und einer Verformung führt, so dass auf diese Weise pilzartige Strukturen erhalten werden sollen.

Dieses neue Projekt soll in enger Zusammenarbeit der beiden Antragsteller **Ruhe** und **Reinecke** erfolgen durchgeführt werden. Kooperiert werden soll insbesondere mit den Gruppen Wilde und **Mescheder**.

**Arbeitsplan.** Der Arbeitsplan für die vorgeschlagenen Projekte beinhaltet folgende Punkte:

- Simulationsrechnungen
- Mechanische und thermische Eigenschaften der Materialien
- Abpragen der Strukturen: Einfluss von Temperatur, Druck, Grenzflächenenergie, Herstellung von haar- und pilzartigen Strukturen
- Photochemische Fixierung der Schichten



**Abb. 1:** Templat-induzierte Abformung von Polymeren gefolgt von Verformung unterhalb der Schmelztemperatur (4).

- Messen der Benetzungseigenschaften gegenüber Wasser und Ölen .

### **Dissertationsthema**

Herstellung von Polymermikrostrukturen durch Templat-abgeformte Strukturen

### **Literatur**

1. N. Stutzmann, T. A. Tervoort, K. Bastiaansen, P. Smith, *Nature* 2000, 407, 613-616.
2. C. Kim, P. E. Burrows, S. R. Forrest, *Science*, 2000, 288, 831-833.
3. J. H. Choi, D. Kim, P. J. Yoo, P. J. Lee, P. J., *Adv. Mater.* 2005, 17, 166-167.
4. H.E. Jeong, S.H. Lee, K.Y. Suh, *Nano Lett.* 2006, 16, 1508-1513.
5. R. Toomey, D. Freidank and J. Rühle, *Macromolecules* 2004, 37, 882-887

### B3: Herstellung und Charakterisierung ultra-dünner oxidischer Nanoschichten für neuartige Silizium-Solarzellenstrukturen

Projektleiter: L. Reindl

Kooperationspartner: C. Müller, H. Reinecke

Beantragte Promotionsstipendien: 1

---

Es geht hier insbesondere um das Verständnis des Wachstums und der elektronischen Eigenschaften von Oxidschichten auf c-Si im Bereich 1-3 nm Dicke, die mit verschiedensten Verfahren (nasschemisch bis Hochtemperatur-CVD) hergestellt werden. Insbesondere die kritische Größe der Pinhole-Dichte kann bislang nur unzureichend gemessen werden. Elektrische Eigenschaften sind wegen Tunnelns von Elektronen mit klassischen Methoden (z.B. C-V) bislang nur sehr schwer bis gar nicht zu bestimmen. Die Schichten sind relevant für ladungsträgerselektive MIS-Kontakte und für sogenannte „passivierte Kontakte“ in klassischen p-n-basierten Silizium-Solarzellen.

## B4: Generierung von bioaktiven mikro- und nanostrukturierten Oberflächen

Projektleiterin: K. Lienkamp

Kooperationspartner: J. Rühle, C. Müller

Beantragte Promotionsstipendien: 1

---

Aufbauend auf den Erfahrungen und Ergebnissen des vorangegangenen Projekts (Kapitel 5.2.5 bzw. Abb. 1) sollen mithilfe von Kolloidlithographie, Stempellithographie und Dip-Pen-Nanolithographie (DPN) bioaktive mikro- und nanostrukturierte Oberflächen erzeugt werden.

**Stand der Forschung:** Bei der Kolloid-Lithographie werden kolloide Teilchen durch Selbstorganisation in einem zwei-dimensionalen Array angeordnet, der als lithographische Maske dient.<sup>1</sup> Bei der Mikrostampel-Lithographie hingegen wird durch einen Stempel das gewünschte Muster mit Dimensionen  $\geq 0.1 \mu\text{m}$  gedruckt.<sup>2,3</sup> Bei der DPN werden mit einer präzisionsgesteuerten, in eine chemische Substanz („Tinte“) getauchten Spitze die gewünschten Strukturen direkt geschrieben.<sup>4</sup> Über den Einfluss von Mikro- und Nanostrukturen auf biologische Systeme ist relativ wenig bekannt. Insbesondere das Adhäsionsverhalten von Proteinen, Bakterien und anderen Mikroorganismen lässt sich aber durch Mikro- und Nanostrukturen beeinflussen.<sup>5</sup> Dadurch kann die Entstehung von Biofilmen verhindert werden, was technisch z.B. bei der Wasseraufbereitung bedeutsam ist.

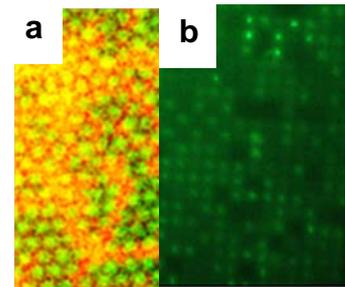


Abb. 1. Durch Kolloidlithographie (a, Bildbreite entspricht ca.  $10 \mu\text{m}$ ) bzw. Mikrostampel-Lithographie (b, Punkt-zu-Punkt-Abstand =  $4 \mu\text{m}$ ) von uns erzeugte Nanostrukturen aus dem Vorgängerprojekt.

**Projektbeschreibung und Vernetzung:** Um optimale Beschichtungen zu entwickeln, die Biofilmbildung verhindern können, muss zunächst der Einfluss der Größe von Mikrostrukturen auf die Adhäsion von Biomolekülen und Mikroorganismen verstanden werden. Dazu sollen von uns durch Kolloid- und Stempellithographie nahezu defektfreie Modell-Oberflächen mit Strukturen in verschiedenen Größenordnungen ( $10 \mu\text{m}$ -  $0.05 \mu\text{m}$ ) erzeugt werden, die bei der Interaktion mit biologischen Systemen relevant sind. Mit DPN sollen Proben mit mikro- und nanoskaligen Gradienten geschrieben werden. Die so erhaltenen Proben sollen durch orthogonale chemische Reaktionen mit antimikrobiellen und biobelag-verhindernden Polymeren funktionalisiert werden. Auf diesen Substraten soll das Adhäsionsverhalten von Proteinen, Bakterien und Mikroorganismen untersucht werden.

Die mikrostrukturierten Stempel sollen in Kooperation mit **C. Müller** erzeugt werden, die Oberflächencharakterisierung erfolgt in Kooperation mit **J. Rühle**.

### Arbeitsplan.

- Herstellung von defektarmen mikrostrukturierten Polymeroberflächen durch Kolloid- und Stempellithographie;
- Herstellung von Mikrostrukturgradienten durch DPN;
- Charakterisierung der Oberflächen u.a. mittels Rasterkraftmikroskopie, Kelvin-Probe-Force Mikroskopie, Fluoreszenzmikroskopie;
- Untersuchung des Adhäsionsverhaltens von Biomolekülen und Mikroorganismen durch Oberflächenplasmonenresonanz-Spektroskopie;

- biologische Assays (u.a. Live-Dead Stain) auf den erzeugten Mikrostrukturen.

### **Dissertationsthema.**

1. Interaktion von bioaktiven mikro- und nanostrukturierten Oberflächen mit Biomolekülen und Mikroorganismen.

In der weiteren Ausgestaltung des Promotionskollegs könnte man daran denken weitere Promotionsvorhaben zu folgendem Thema zu planen:

2. Generierung von dreidimensionalen bioaktiven Mikro- und Nanostrukturen durch Zweiphotonenlithographie.

### **Literatur.**

1. S.-M. Yang, S. G. Jang, D-G. Choi, S. Kim, H. K. Yu *Small* **2006**, 2, 458-475
2. B. D. Gates, Q. Xu, M. Stewart, D. Ryan, C. G. Willson, G. M. Whitesides *Chem. Rev.* **2005**, 105, 1171-1196
3. A. Perl, D. N. Reinhoudt, J. Huskens *Adv. Mater.* **2009**, 21, 2257-2268
4. R. D. Piner, J. Zhu, F. Xu, S. Hong, C. A. Mirkin, *Science*, 1999, 29, 661-663.
5. S. Krishnan, C. J. Weinman, C. K. Ober, *J. Mat. Chem.* **2008**, 18, 3405-3413.

## B5: Abtragsmechanismen bei der Funkenerosion nichtleitender Keramiken

Projektleiter: H. Reinecke

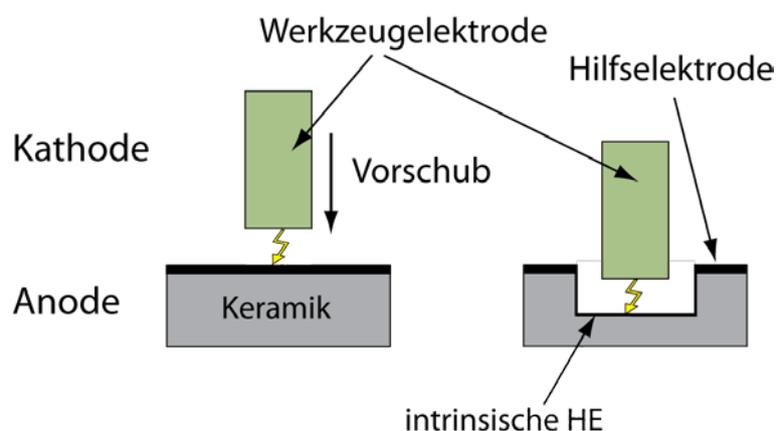
Kooperationspartner: J. Wilde

Beantragte Promotionsstipendien: 1

Das Ziel des Forschungsvorhabens ist die Charakterisierung der Funkenerosion von nichtleitenden Keramiken anhand der Materialeigenschaften unterschiedlicher keramischer Werkstoffe. Auf den aktuellen Arbeiten aufbauend soll der Einfluss der Materialeigenschaften unterschiedlicher keramischer Werkstoffe auf den funkenerosiven Abtragsprozess untersucht werden. Hierzu sollen keramische Werkstoffe entwickelt und charakterisiert werden. Zur Charakterisierung der soll ein spezieller Versuchsstand entwickelt und aufgebaut werden.

### Stand der Technik:

Technische Keramiken kommen aufgrund ihrer herausragenden mechanischen und thermischen Eigenschaften immer häufiger zum Einsatz. Durch diese Eigenschaften sind keramische Werkstoffe jedoch auch schwieriger mit konventionellen Strukturierungsverfahren zu bearbeiten. Die Funkenerosion ermöglicht die Strukturierung von Materialien unabhängig ihrer mechanischen Eigenschaften. Da dieses Verfahren auf dem Materialabtrag durch elektrische Entladungen zwischen Werkzeug und Werkstück basiert, ist die elektrische Leitfähigkeit dieser eine zwingende Voraussetzung. Um diese Voraussetzung zu erfüllen wird der Prozess modifiziert. Hierzu wird eine leitfähige Hilfselektrode eingesetzt [1]. Durch die auf die Keramik aufgebrachte Hilfselektrode kann der Prozess starten und auch nach Durchdringen dieser fortgeführt werden (Abb. 1). Grund hierfür sind Zersetzungsprozesse des eingesetzten Dielektrikums, die zu einer dünnen leitfähigen Kohlenstoffschicht auf der Keramikoberfläche führen. Durch diese intrinsische Hilfselektrode wird die Leitfähigkeit im gesamten Prozessverlauf aufrechterhalten und ermöglicht eine kontinuierliche Bearbeitung nichtleitender Keramiken.



**Abb. 1: Schematische Darstellung der Funkenerosion von nichtleitenden Keramiken mit einer Hilfselektrode.**

Die funkenerosive Bearbeitung nichtleitender Keramiken ist Teil des Promotionskollegs GenMik. Die Oxidkeramik Zirkoniumdioxid ( $ZrO_2$ ) sowie die nichoxidischen Keramiken Siliziumnitrid ( $Si_3N_4$ ) und Siliziumcarbid ( $SiC$ ) wurden erfolgreich mittels Senkerosion bearbeitet. Zudem wurden Untersuchungen zu den vorliegenden Abtragsmechanismen sowie zur intrinsischen Hilfselektrode angestellt [2]. Durch Einsatz statistischer

Versuchsplanung wurde der Einfluss der elektrischen Maschinenparameter bei der Senkerosion von SiC untersucht und anhand dieser Ergebnisse optimiert [3]. Mithilfe einer Mikrofunkenerosionsanlage wurde das funkenerosive Fräsen von SiC realisiert, wobei 3D Mikrostrukturen mit hohen Aspektverhältnissen bis zu 30 sowie minimale Strukturgrößen von  $10\ \mu\text{m}$  erreicht wurden [4]. Zum besseren Prozessverständnis wurden erste Simulationsmodelle des funkenerosiven Bearbeitens nichtleitender Keramiken erarbeitet [5].

### **Projektbeschreibung und Vernetzung:**

Die bisherigen Arbeiten zur Funkenerosion von nichtleitenden Keramiken wurden mit Proben großer kommerzieller Keramikhersteller durchgeführt. Es handelt sich also um Standardwerkstoffe die zu Versuchszwecken funkenerosiv bearbeitet wurden. Zudem sind die erreichbaren Abtragsraten sehr gering und liegen um Größenordnungen unter den Abtragsraten bei der Funkenerosion von Metallen. Da alle Werkzeug- und Maschinenseitigen Optimierungen zur Verbesserung der Abtragsrate ausgeschöpft sind, ist der nächste logische Schritt eine Anpassung der keramischen Werkstoffe. Dabei sollen zunächst umfangreiche Untersuchungen zum Einfluss unterschiedlicher Materialeigenschaften wie z.B. Korngrößenverteilung, Porosität, Dotierstoffe etc angestellt werden. Die benötigten keramischen Werkstoffe mit diesen unterschiedlichen Eigenschaften können in Kooperation mit dem Lehrstuhl für Werkstoffprozesstechnik (WPT) am IMTEK hergestellt werden. Um ein tieferes Prozessverständnis für die vorliegenden Abtragsmechanismen zu erhalten ist es erforderlich kleinstmögliche Materialabträge zu erhalten, wie dies in Einzelentladungsversuchen für metallische Werkstoffe der Fall ist. Mit industriellen Erodiermaschinen ist dies nicht möglich. Daher ist die Entwicklung eines eigenen Versuchsstands, der diskrete Entladungen ermöglicht, unerlässlich. Mithilfe dieses Versuchsstandes können die notwendigen Untersuchungen zum Abtragsmechanismus durchgeführt werden, die wichtige Daten für die Charakterisierung der hergestellten keramischen Werkstoffe liefern. Diese Ergebnisse können zudem in weiterführenden Arbeiten für die Simulation der Funkenerosion von nichtleitenden keramischen Werkstoffen herangezogen werden. Ziel ist die Entwicklung spezieller keramischer Werkstoffe die höhere Abtragsraten bei der Funkenerosion ermöglichen ohne Einbußen anderer Eigenschaften.

### **Arbeitsplan:**

Der Arbeitsplan für die vorgeschlagenen Projekte beinhaltet folgende Punkte:

- Herstellung nichtleitender Keramiken mit unterschiedlichen Gefügeeigenschaften
- Aufbau eines Versuchsstands zur Analyse des Abtragsmechanismus bei der Funkenerosion nichtleitender Keramiken
- Entwicklung von keramischen Werkstoffen, speziell zur Strukturierung durch Funkenerosion geeignet

### **Dissertationsthema:**

- Abtragsmechanismen bei der Funkenerosion nichtleitender Keramiken

### **Literatur:**

- [1] Hösel T, Müller C, Reinecke H (2009) Spark erosive structuring of electrically nonconducting zirconia with an assisting electrode. CIRP Journal of Manufacturing Science Technology, 4:357-361.

- [2] Ojha N, Hösel T, Müller C, Reinecke H (2012) Characterization of the Conductive Layer Formed during ( $\mu$ )-Electric Discharge Machining of Non-Conductive Ceramics. *Materials Science and Technology (MS&T) 2012*, 423-428
- [3] Ojha N, Hösel T, Zeller F, Müller C, Reinecke H (2013) Major Parameters affecting the electric discharge machining of non-conductive SiC. *Proceedings of the 10th International Conference on Multi-Material Micro Manufacture*, 171-174.
- [4] Zeller F, Hösel T, Müller C, Reinecke H (2013) Microstructuring of Non-Conductive Silicon Carbide by Electrical Discharge Machining, *Microsystem Technologies* (im Publikationsprozess)
- [5] Ojha N (2013) Thermo-Mechanical Simulation of the Die-Sinking  $\mu$ -EDM Process in ANSYS. *ANSYS Conference 2013*

## **B6: Generative Formgebung mikrostrukturierter funktionaler polymerbasierter Komposite**

Projektleiter: T. Hanemann

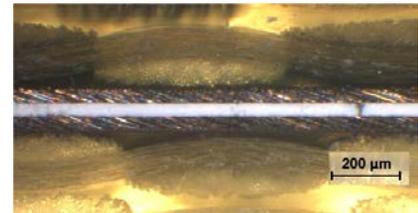
Kooperationspartner: H. Reinecke, C. Müller, J. Wilde, J. Rühle

Beantragte Promotionsstipendien: 1

---

Ziel des beantragten Forschungsvorhabens ist es, mittels generativer Fertigung mikrostrukturierte dreidimensionale Funktionsbauteile aus Polymer-Keramik- bzw. Polymer-Metall-Kompositen mit dielektrischen, ferroelektrischen oder magnetischen Eigenschaften zu realisieren.

**Stand der Forschung.** Polymer-Keramik/Metall-Komposite mit besonderen physikalischen Eigenschaften sind von besonderem Interesse in der Mikrosystemtechnik. Potenzielle Anwendungen sind integrierte Dünnschichtkondensatoren, piezoelektrische Sensoren, Aktuatoren oder magnetische Funktionselemente. Die Verwendung polymerbasierter Funktionskomposite erlaubt die Nutzung etablierter und neuer Formgebungsmethoden der polymeren Makro- und Mikrotechnik, wie Mikrospritzgießen, Reaktionsgießen oder Lithographie. Gleichzeitig ermöglichen funktionale mikro- oder nanoskalige Füll- oder Dotierstoffe, dispergiert oder gelöst in der polymeren Matrix, neue Funktionalitäten im Polymer [1,2].



**Abb. 1:** Integrierter Polymer-Barium-Titanat Kondensator, hergestellt über ein modifiziertes Foliengießverfahren [3].

Im Rahmen dieses Projektes soll die Eignung additiver 3D-Polymerformgebungsverfahren, welche in der Mikrotechnik bisher nicht etabliert sind und ihren Ursprung in der Entwicklung von Rapid Prototyping-Verfahren haben [4], zur Realisierung dreidimensionaler mikrostrukturierter Bauteile untersucht werden. Als geeignete Verfahren sind FDM (Fused Deposition Modeling) und Stereolithographie (STL) zu nennen. Erst seit kurzer Zeit stehen kostengünstige Geräte der additiven Fertigung, z.B. der Firmen Makerbot ([www.makerbot.com](http://www.makerbot.com), FDM-Prinzip) oder Formlabs ([www.formlabs.com](http://www.formlabs.com), STL-Prinzip) zur Verfügung, deren geometrische Spezifikationen Anwendungen in der Mikrotechnik erlauben. Allerdings sind für beide Varianten nur Standardmaterialien verfügbar (FDM: Acryl-Butadien-Styrol, ABS; STL: photohärtbare Monomere). Funktionspolymere oder Funktionskomposite werden derzeit mit diesen Verfahren nicht verarbeitet.

**Projektbeschreibung und Vernetzung.** Im Rahmen des neu beantragten Projektes sollen neue Polymer-Keramik/Metall-Komposite mit besonderen physikalischen Eigenschaften, z.B. hoher relativer Permittivität, dergestalt entwickelt werden, dass eine generative 3D-Formgebung zur Realisierung funktionaler mikrostrukturierter Schichten und Bauteile möglich wird. Dies bedeutet im Einzelnen die Herstellung von Kompositmaterialien mit möglichst hohem Füll- oder Dotierstoffanteil über geeignete Compoundierverfahren, die Einstellung des temperatur- und scherratenabhängigen Fließverhaltens über ausgewählte Additive wie Fließhilfsmittel, maßgeschneidert für die gewählte Fertigungsmethode, die Ermittlung optimaler Parameter zur Realisierung mikrostrukturierter Bauteile sowie deren umfassende Charakterisierung. Als geeignete Funktionskeramiken sollen Bariumtitanat oder Blei-Strontium-Titanat mit ihren außerordentlich hohen relativen Permittivitäten sowie geeignete Magnetwerkstoffe verwendet werden. Als polymere Matrices sind im Falle von FDM Acryl-Butadien-Styrol (ABS), im Fall von STL photopolymerisierbare Acrylate gut geeignet. In der Arbeitsgruppe bestehen zur erfolgreichen Realisierung des Neuantrages langjährige Erfahrungen in der Herstellung und im Maßschneidern von Polymer-Keramik-Kompositen, der Photopolymerisation und Replikation von reaktiven Monomeren bzw. Kompositen sowie

in der Herstellung von funktionalen Schichten aus Keramik oder polymerbasierten Kompositen.

Die Wahl geeigneter Thermoplaste als polymere Matrix für das FDM-Verfahren soll in enger Kooperation mit dem Lehrstuhl Prozesstechnik (**Reinecke, Müller**) erfolgen. Eine enge Zusammenarbeit ist hinsichtlich der Auswahl geeigneter Monomere und angepasster Photoinitiatoren sowie die systematische Anpassung der STL-Parameter mit dem Lehrstuhl Chemie und Physik von Grenzflächen (**Rühe**) geplant. Die Charakterisierung der mechanischen Eigenschaften der Kompositmaterialien bzw. von Bauteilen soll gemeinsam mit dem Lehrstuhl für Aufbau- und Verbindungstechnik (**Wilde**) durchgeführt werden.

**Arbeitsplan.** Der Arbeitsplan für das vorgeschlagene Projekt beinhaltet folgende Punkte:

- FDM: Entwicklung und Charakterisierung neuartiger ABS-Keramik- bzw. Metall-Funktionskomposite mit hohem Füllstoffanteil
- FDM: Gezielte Einstellung der Kompositfließigenschaften adaptiert auf die Schmelzextrusion im FDM-Verfahren
- FDM: Realisierung einfacher mikrostrukturierter 3D-Funktionsbauteile mittels FDM
- STL: Entwicklung und Charakterisierung neuartiger photopolymerisierbarer Funktionskomposite mit hohem Füllstoffanteil
- STL: Ermittlung geeigneter Material- und Prozessparameter
- STL: Realisierung einfacher mikrostrukturierter 3D-Funktionsbauteile
- Umfassende Charakterisierung der mikrostrukturierten Bauteile

### **Dissertationsthema**

- 3D-Freiformgebung mikrostrukturierter funktionaler polymerbasierter Komposite

### **Literatur**

1. T. Hanemann, D.V. Szabó, Polymer-Nanoparticle Composites: From Synthesis to Modern Applications, *Materials*, **3**, 3468-3517 (2010).
2. D.V. Szabó, T. Hanemann, Polymer nanocomposites for optical applications. In: *Advances in Polymer Nanocomposites: Types and Applications*; Ed. F. Gao, Woodhead Publ., Oxford, UK, 2012, 567-604, ISBN 978-1-8456-9940-6.
3. T. Hanemann, B. Schumacher, Realization of embedded capacitors using polymer matrix composites with barium titanate as high-k-active filler, *Microsystem Technologies*, **18**, 745-751 (2012).
4. T. Hanemann, W. Bauer, R. Knitter, P. Woias, Rapid prototyping and rapid tooling techniques for the manufacturing of silicon, polymer, metal and ceramic microdevices. In: *MEMS/NEMS Handbook: Techniques and Applications*, Ed. C. T. Leondes, Springer Publ., Berlin, FRG, 2006, Vol. 3, 187-255, ISBN: 0-387-24520-0.

## **B7: Erzeugung von mikrogenauen Konturen auf spröden Materialien durch Nanozerspanung**

Projektleiter: B. Azarhoushang

Kooperationspartner: H. Reinecke

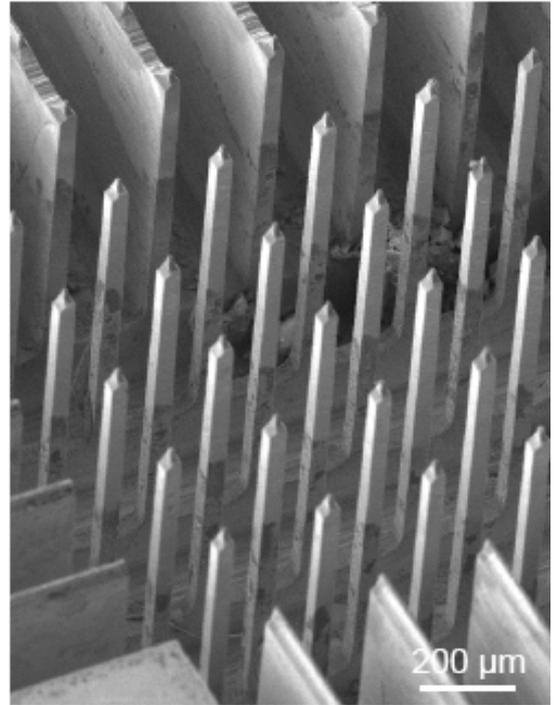
Beantragte Promotionsstipendien: 1

**Stand der Forschung.** In der Regel werden mikro-elektromechanische oder elektrochemische Systeme (MEMS) verwendet, um mikrostrukturierte Profile zu erzeugen; mit losen Schleifmitteln werden dann die endgültigen, hochglanzpolierten Oberflächen auf sprödharten Materialien erzeugt. Diese Prozesse sind in der Produktion jedoch eher ineffizient und führen zu Umweltverschmutzungen. Daher ist die Verwendung einer alternativen Methode mit einer höheren Effizienz von großem Interesse.

**Projektbeschreibung.** Ziel der Untersuchungen ist die Entwicklung eines effizienten Schleifprozesses mit einem hohen Zeitspannungsvolumen, um Mikrostrukturen mit Hochglanzoberflächen auf Hartmetall und Keramik in einem Prozess zu erzeugen.

Es wird eine ultrafeine Diamant-Schleifscheibe verwendet (ca. 3000#), um hochgenaue Konturen (Abb. 1) mit Submikro-Maßstab zu erzeugen. Um das genannte Ziel zu erreichen, müssen geeignete Schleifscheiben und Prozessparameter ermittelt werden. Hierbei soll die richtige Spannungsdicke mit dem größtmöglichen Materialabtrag bestimmt werden.

Die Herausforderungen liegen im Abrichten der ultrafeinen Diamantscheiben, dem Werkzeugverschleiß sowie der sehr hohen Reibung während der Spannbildung im Nano-Bereich.



**Abb. 1:** REM Aufnahme von präzisionsprofilierten Mikro-Nadeln, Werkstoff:  $\text{Al}_2\text{O}_3$ -TiC Keramik [IMT Institut]. [IMT institute].

**Arbeitsplan.** Der Arbeitsplan für die vorgeschlagenen Projekte beinhaltet folgende Punkte:

- Entwicklung einer mikro-Diamantschleifstifte mit Nanokorngröße
- Charakterisierung der Werkzeuge bezüglich erreichbarer Oberflächengüten, Schnittgeschwindigkeiten und Standzeit
- Optimierung der Bearbeitungsparameter
- Einsatz optimaler Kühlschmierstoffe

### **Dissertationsthemen**

- Erzeugung von mikrogenauen Konturen auf spröden Materialien durch Nanozerspanung

## Literatur:

1. J. Xie, Y.X. Lu, "Study on axial-feed mirror finish grinding of hard and brittle materials in relation to micron-scale grain protrusion parameters", *International Journal of Machine Tools and Manufacture*, Volume 51, Issue 1, January 2011, Pages 84-93
2. J. Xie, J. Tamaki, "In-process evaluation of grit protrusion feature for fine diamond grinding wheel by means of electro-contact discharge dressing", *Journal of Materials Processing Technology*, 180 (1–3) (2006), pp. 83–90
3. X. Kang, J. Tamaki, A. Kubo, Y. Machida, K. Tanaka, "Effect of cutting edge truncation on the grinding mechanism—theoretical analysis and the experimental investigation", *Journal of the Japan Society for Abrasive Technology*, 51 (5) (2007), pp. 296–301
4. E. Brinksmeier, Y. Mutlugünes, F. Klocke, J.C. Aurich, P. Shore, H. Ohmori, "Ultra-precision grinding", *CIRP Annals - Manufacturing Technology*, Volume 59, Issue 2, 2010, Pages 652-671

## B8: Mikrostrukturierung präkeramischer Polymere zur Realisierung funktionaler keramischer Dünnschichten

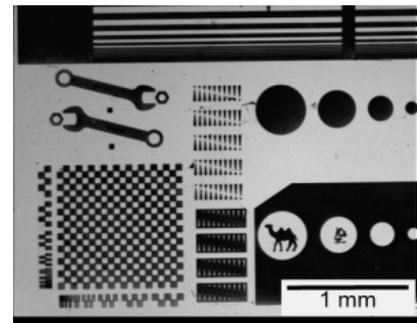
Projektleiter: T. Hanemann

Kooperationspartner: H. Reinecke, C. Müller, J. Rühle

Beantragte Promotionsstipendien: 1

Ziel des beantragten Forschungsvorhabens ist es, unter Verwendung der Sol-Gel-Technologie in Kombination mit UV-Lithographie funktionale mikrostrukturierte keramische Schichten mit piezo- und/oder ferroelektrischen Eigenschaften zu realisieren.

**Stand der Forschung.** Mikrostrukturierte keramische Funktionsschichten mit piezo- oder ferroelektrischen Eigenschaften werden i. Allg. über verschiedene Varianten des Foliengießens oder des Siebdrucks unter Verwendung geeigneter Schlicker, d.h. Dispersionen von feinskaligem Keramikpulver in einem Lösungsmittel, realisiert [1,2]. Die Qualität der keramischen Schicht wird stark durch die Partikelgröße und die Partikelgrößenverteilung bestimmt. Qualitativ bessere Schichten lassen sich über partikelfreie Systeme erzielen, beispielsweise über eine Sol-Gel-Synthese unter Ausnutzung metallorganischer Precursoren [3]. In der ersten Phase des Projektes konnte eine im Vergleich zum Stand der Literatur vereinfachte Prozesskette zur Realisierung sehr dünner Schichten aus ferroelektrischer Keramik entwickelt und somit die prinzipielle Eignung des Verfahrens gezeigt werden [4,5].



**Abb. 1:** UV-Lithographisch hergestellte Teststruktur aus einem PZT-Sol (Grünschicht).

**Projektbeschreibung und Vernetzung.** Die in der ersten Phase entwickelte Prozesskette hat ihre grundsätzliche Eignung zur Realisierung mikrostrukturierter defektfreier keramischer Dünnschichten anhand zweier Beispiele (Blei-Zirkonat-Titanat, PZT; Blei-Strontium-Titanat, PST) gezeigt. Allerdings sind die bisher erreichten defektfreien Schichtdicken, welche für eine Anwendung, z.B. als Aktor- oder als Kondensatormaterial mit hoher Permittivität, notwendig sind, mit 50 nm deutlich zu gering. Daher muss im Fortsetzungsantrag der Fokus auf die Erzielung von deutlich höheren Schichtdicken bis 10  $\mu\text{m}$  gelegt werden. Dies kann nur durch eine signifikante Erhöhung der keramischen Ausbeute nach der Pyrolyse und somit durch einen größeren Anteil der präkeramischen Anteile im Ausgangsol erreicht werden. Dies bedeutet, dass an allen Einzelprozessen der Prozesskette, beginnend mit der Solsynthese, Modifizierungen bzw. Neuentwicklungen vorgenommen werden müssen.

Ergänzend soll als neue alternative Mikrostrukturierungsmethode das InkJet-Drucken von Solen untersucht werden. Damit würde eine Freiformmethode als neues Mikrostrukturierungsverfahren zur Realisierung keramischer Funktionselemente etabliert werden.

Die Wahl geeigneter photopolymerisierbarer Monomere und die systematische Ermittlung der Polymerisationsparameter soll in enger Kooperation mit dem Lehrstuhl Chemie und Physik von Grenzflächen (**Rühle**) erfolgen. Eine enge Zusammenarbeit ist hinsichtlich der UV-Lithographie mit dem Lehrstuhl Prozesstechnik (**Reinecke, Müller**) geplant.

**Arbeitsplan.** Der Arbeitsplan für das vorgeschlagene Projekt beinhaltet folgende Punkte:

- Modifizierte Solsynthese mit erhöhtem präkeramischem Anteil
- Wahl geeigneter Monomere für die UV-Lithographie
- Ermittlung optimierter Parameter zur Schichtherstellung

- UV-Lithographische Strukturierung geeigneter Solschichten
- Ermittlung optimierter Pyrolyseparameter zur Realisierung defektfreier Funktionsschichten (Schichtdicken bis 10  $\mu\text{m}$ )
- Dielektrische Charakterisierung der Funktionsschichten
- Validierung des InkJet-Druckens als alternative Mikrostrukturierungsmethode von keramischen Solen.

### Dissertationsthema

- Mikrostrukturierung präkeramischer Polymere zur Realisierung funktionaler keramischer Dünnschichten

### Literatur

1. P. Muralt; Ferroelectric thin films for micro-sensors and actuators: a review; Journal of Micromechanics and Microengineering; vol. 10; pp. 136-146, **2000**.
2. S.R. Anton, H.A. Sodano; A review of power harvesting using piezoelectric materials (2003-2006); Smart Materials and Structures; vol. 16; pp. R1-R21, **2007**.
3. T. Kololuoma, J. Hiltunen, M. Tuomikoski, J. Lappalainen, J. Rantala, Y. Sidorin, A. Tervonen (Eds.); Directly UV-photopatternable PLZT thin films prepared with the sol-gel technique; Integrated Optics: Devices, Materials, and Technologies VIII; vol. 5355; pp. 33-39, **2004**.
4. M. Benkler, T. Hanemann, Ferroelectric thin film fabrication by direct UV-lithography, Microsystem Technologies, (**2013**), eingereicht zur Veröffentlichung.
5. M. Benkler, F. Paul, T. Hanemann, Herstellung ferroelektrischer Dünnschichten mittels direkter UV-Lithografie, Mikrosystemtechnik Kongress, 14.-16.10.**2013**, Aachen, DE, pp 309-312.

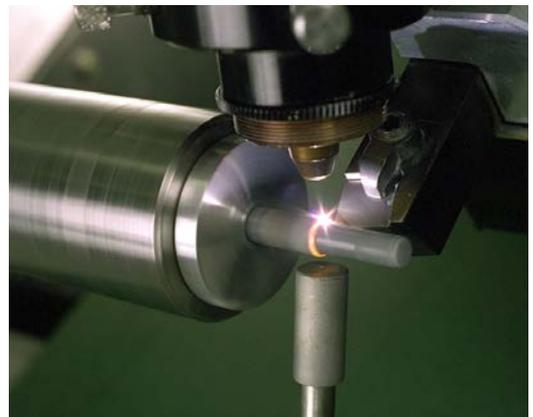
## **B9: Laserunterstütztes Schleifen von Hochleistungskeramiken mit einem Pikosekundenlaser**

Projektleiter: B. Azarhoushang

Kooperationspartner: H. Reinecke

Beantragte Promotionsstipendien: 1

**Stand der Forschung.** Obwohl Hochleistungskeramiken einzigartige Eigenschaften besitzen, stoßen sie bei der Verbreitung ihrer Anwendung auf großen Widerstand [1]. Dies ist meist den hohen Herstellungskosten geschuldet [2]. Duktiles Schleifen von Keramiken ist ein vielversprechender Prozess, der in der Lage ist, keramische Teile mit sub-mikro Präzision, engen Toleranzen und lediglich geringen Oberflächenbeschädigungen zu generieren [3, 4]. Durch die kontrollierte und lokale Erwärmung der Schleifzone (bis zu 1200°C) kann der Anteil der duktilen im Verhältnis zur spröden Zerspanung erhöht werden, was wiederum zu einer Reduktion der Härte des Werkstoffs, der Prozesszeit, den Schäden unterhalb der Oberfläche und des Werkzeugverschleißes führt; des weiteren können Oberflächenrauheiten im Nanometerbereich erreicht werden.



**Abb. 1:** Laserunterstütztes Drehen [5]

**Projektbeschreibung.** Laserunterstützte Bearbeitung hat sich bis jetzt vor allem auf die Bearbeitungsverfahren mit geometrisch bestimmten Schneiden fokussiert (Abb. 1).

Dieses Projekt zielt darauf ab, durch die Anwendung von ultrakurzgepulsten Laserstrahlen in der Schleifzone, das feine und kontrollierte Erhitzen des Werkstückmaterials zu erleichtern und eine polierte (mit Oberflächenrauheit im Nano-Bereich) und riss-freie Oberfläche zu erzeugen. Gleichzeitig soll die Überhitzung der geschliffenen Oberfläche vermieden werden.

**Arbeitsplan.** Der Arbeitsplan für die vorgeschlagenen Projekte beinhaltet folgende Punkte:

- Integrieren der Laseranlage in die Schleifmaschine
- Synchronisierung des Schleifprozesses mit der Laserstrahlung
- Auswahl geeigneter Parameter für die Laserbearbeitung
- Optimierung der Bearbeitungsparameter
- Entwicklung der duktilen Zerspanung bei spröden Werkstoffen

### **Dissertationsthemen**

- Laserunterstütztes Schleifen von Hochleistungskeramiken mit einem Pikosekundenlaser

### **Literatur:**

1. Malkin, S., Hwang, T.W., "Mechanisms for grinding of ceramics", in: „Handbook of advanced ceramics machining (ed. I. D. Marinescu)“, CRC Press, pp. 55-86, 2007.

2. Brinksmeier, E., Mutlugünes, Y., Klocke, F., Aurich, J.C., Shore, P., Ohmori, H., "Ultra-precision grinding," *CIRP Annals*, 59(2), pp. 652–671, 2010.
3. Bifano, T.G., Dow, T.A., Scattergood, R.O., "Ductile–regime grinding: A new technology for machining brittle materials", *Transactions of the ASME*, 113, pp. 184-189, 1991.
4. Liang, Z., Wang, X., Wu, Y., Xie, L., Jiao, L., Zhao, W., "Experimental study on brittle–ductile transition in elliptical ultrasonic assisted grinding (EUAG) of monocrystal sapphire using single diamond abrasive grain", *International Journal of Machine Tools and Manufacture*, 71, pp. 41-51, 2013.
5. Shin, Y., C., "Laser assisted machining", *Industrial laser solutions*, Volume-26, Issue-1, 01/01/2011.