

# Materialforschung für die Mikrosystemtechnik

K.-H. Zum Gahr, IMF

## Einleitung

In dem Vorwort zu einer Gemeinschaftstagung der VDI/VDE-Gesellschaft Feinwerktechnik, VDI-Gesellschaft Werkstofftechnik, VDE/VDI-Gesellschaft Mikroelektronik und der Deutschen Gesellschaft für Metallkunde im Jahr 1989 findet man folgende Aussage „Für die Erschließung des Anwendungspotentials der Mikro-technik ist es von entscheidender Bedeutung, dass eine breite Palette von funktionspezifischen Werkstoffen zur Verfügung steht“ [1]. Dies unterstreicht die Wichtigkeit der Materialforschung in der Mikrosystemtechnik für die Realisierung visionärer Ideen, Entwicklung und Optimierung neuer Produkte, Miniaturisierung von Komponenten und Systemen sowie die Sicherstellung ihrer Zuverlässigkeit und hinreichenden Lebensdauer. Das hohe Potential der Mikrosystemtechnik in Bezug auf intelligente, mobile und miniaturisierte Produkte ist unstrittig [2]

und ebenso, dass seine volle Ausschöpfung nur durch die Nutzung der in den Basistechnologien (Halbleiter-, Material-, Mikrostrukturierungs-, Nano-, Biotechnologie etc.) erzielten Inventionen in Kombination mit einer intelligenten Systemintegration (Entwurfsmethodik, Simulationstechnik, Mikrofertigungstechnik, Aufbau- und Verbindungstechnik) möglich ist. An den bisher erreichten Erfolgen mikrotechnischer Systemlösungen hat die Materialforschung als eine wichtige Basistechnologie einen bedeutenden Anteil.

Mikrosysteme sind heute in vielen Schlüsselindustrien im Einsatz und erschließen sich ständig neue Anwendungsfelder u.a. in der Umwelt-, Sicherheits-, Medizin- und Bio-, Kommunikations-, Verkehrs-, Fertigungs-, Verfahrens-, Haushalts- und chemischen Mikroverfahrenstechnik. Die Verfügbarkeit fortschrittlicher, auf die Anforderungen der Mikro-

technik zugeschnittener Materialien und Prozesstechniken kann über einzelne spezifische Systeme hinaus ein weites Feld neuer Anwendungen eröffnen. Entsprechend der Breite des Einsatzpotenzials von Mikrosystemen sind die Anforderungen u.a. an funktionspezifische chemische, dielektrische, elektronische/elektrische, magnetische, mechanische, optische, thermophysikalische oder tribologische Eigenschaften der Materialien äußerst vielfältig. Hieraus und bei Berücksichtigung der strukturellen Abmessungen von Mikrokomponenten oder relevanten Wechselwirkungsmechanismen in Dimensionen von Mikro-, Submikro- bis zu Nanometern ergibt sich sowohl ein breiter grundlagenorientierter als auch systemspezifischer Forschungsbedarf. Dieser bezieht sich auf die Entwicklung und Prozesstechnik, Strukturierung und Modifizierung sowie Prüfung und Modellierung von Werkstoffen (Abb. 1).

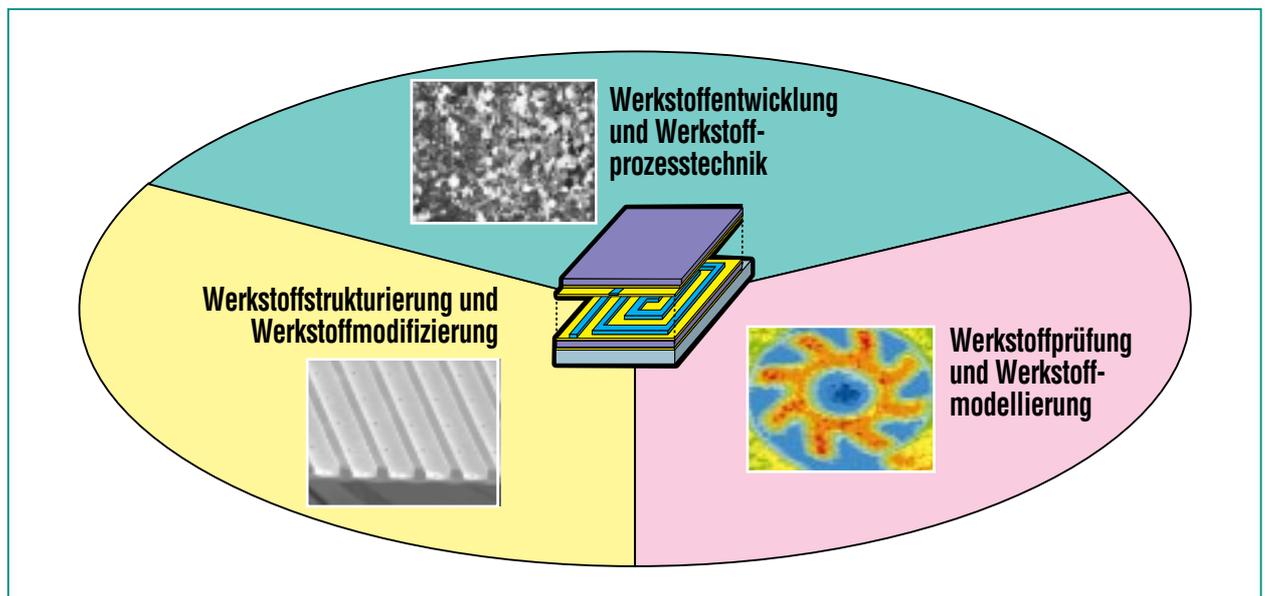


Abb. 1: Schwerpunkte der Materialforschung für Mikrosysteme.

Im folgenden werden einige Beiträge des Instituts für Materialforschung mit seinen Teilinstituten *Werkstoffphysik* (IMF I), *Werkstoffmechanik* (IMF II) und *Werkstoffprozesstechnik* (IMF III) zur Mikrosystemtechnik vorgestellt.

### Werkstoffentwicklung und -prozesstechnik

Die ersten mikrosystemtechnischen Produkte wurden auf der Grundlage der photolithographischen Technologien der Mikroelektronik mit entsprechenden Modifikationen realisiert. Dies bedeutete zugleich den Einsatz von Silizium als Basismaterial mit dem Vorteil der guten Kompatibilität zu mikroelektronischen Komponenten. Als wesentlicher Unterschied zu den zweidimensionalen Strukturen der Mikroelektronik sind in der Mikrosystemtechnik jedoch häufig dreidimensionale Strukturen erforderlich, wodurch die Fertigungsprozesse wesentlich komplizierter werden.

Obwohl die Silizium-Mikromechanik in zahlreichen Anwendungsfeldern erfolgreiche Produkte realisiert hat, kann die Materialbegrenzung auf Silizium eine deutliche Einschränkung für die Entwicklung neuer mikrosystemtechnischer Produkte oder die Erschließung neuer Einsatzbereiche darstellen. Durch die Verfügbarkeit anderer primärer Mikrostrukturierungstechniken wie das LIGA-Verfahren, die mechanische spanabhebende Mikrofertigung oder die Laser-Mikrostrukturierung und die nachfolgende sekundäre Strukturierung durch Replikationstechniken wie das

Mikro-Spritzgießen, Mikro-Prägen oder Mikro-Gießen wird die Materialpalette auf Metalle, Keramiken und Polymere erweitert.

Neben den systemspezifischen Anforderungen, z.B. an aktorische oder sensorische Fähigkeiten (Signalwandlung), Bioverträglichkeit oder Korrosionsbeständigkeit, müssen die einzusetzenden Materialien die mit den primären oder sekundären Strukturierungs-, Aufbau- und Verbindungstechniken verbundenen fertigungstechnischen Anforderungen erfüllen. Materialien für Bauteile mit Strukturabmessungen im Mikro- bzw. Submikrometerbereich müssen Korngrößen deutlich kleiner als die Strukturen aufweisen, um Anisotropieeffekte bei Annäherung der Strukturwandstärke an die mittlere Korngröße zu vermeiden. Ebenso muss in der Größe der Strukturabmessungen die Gefügehomoogenität und die Wirkung der Signalwandlerfähigkeit sowie die mechanische oder thermische Stabilität während der Strukturierungsprozesse oder im späteren Einsatz gewährleistet sein. Mit zunehmender Miniaturisierung und Strukturierungseinheit steigt das Verhältnis von Oberfläche zu Volumen der Mikroteile und damit der Umgebungs-, Oberflächentopographie- und Fertigungseinfluss, was zu extremen Eigenschaftsänderungen der Materialien führen kann. Schon diese wenigen Beispiele zeigen, dass in makroskopischen Abmessungen bewährte Materialien nicht oder nur sehr eingeschränkt in Mikrosystemen einsetzbar sind. Weiterhin geht die Trennung zwischen Halbzeug und Fertigteil

verloren, d.h. die Materialeigenschaften der Mikroteile werden vom Fertigungsprozess stark beeinflusst und sind damit Bauteileigenschaften. Kleiner, leichter, preisgünstiger und effektiver so formulieren Anwender ihre Wünsche an Mikrosysteme, was zu einer erheblichen Herausforderung für die Materialforschung führt.

Nachfolgend werden Beispiele zur aktuellen Materialforschung für Hochleistungsbauteile in mikrotechnischen Systemen mit elektronischen bzw. magnetischen, mechanischen, thermischen, tribologischen und chemischen Anforderungen vorgestellt.

### Materialien in Dünnschichttechnik

Dünnschichttechnologien, wie das Magnetronkathodenzerstäuben (PVD-Verfahren, physical vapour deposition), bieten vielfältige Möglichkeiten multifunktionale Sensoren oder Aktoren, u.a. auf der Basis magneto- oder elektrostrikativer, piezoelektrischer, Bimetall- oder Formgedächtniseffekte, zu realisieren. Hierbei lassen sich Funktions-, Hilfs- und Schutzschichten selektiv aufbringen und in komplexer Form kombinieren.

Die PVD-Dünnschichttechnologie bietet die Möglichkeit des nanoskaligen Designs von Gefüge und Schichtaufbau und damit einen hohen Freiheitsgrad in der Realisierung unterschiedlichster Schichtkonzepte im Submikrometer-Maßstab [3]. Die Entwicklungen beinhalten u.a. Viellagen-, Komposit-, Mischkristall-, Übergitter-Schichten mit modulierter Zusammensetzung und Struktur, superharte Multifunktions-, Gradi-

enten- und metastabile Schichtmaterialien. Innere Grenzflächen wie Phasen-, Korn- oder Subkorn Grenzen in kristallinen Einzelschichten und Grenzflächen zwischen amorphen und/oder kristallinen Einzelschichten beeinflussen stark die mechanischen Eigenschaften eines Schichtverbundes. Abb. 2 zeigt verschiedene Eigenschaften (Härte, Zähigkeit, Eigenspannungen und Verschleißwiderstand) von Viellagenschichten in Abhängigkeit von dem Volumen innerer Grenzflächen, d.h. Zahl der Schichtgrenzflächen, Korn- und Subkorn Grenzen multipliziert mit der Dicke des Übergangsbereichs, und das Bruchbild einer 100 lagigen Schicht mit einer Gesamtdicke von 5 µm. Der stufenförmige Bruchverlauf weist auf die Zähigkeitssteigerung durch die Grenzflächen zwischen den Einzelschichten in Folge energieverzehrender Mechanismen wie Rissab-

lenkung und Grenzflächendelamination hin. Zwei aktuelle Forschungsschwerpunkte in der Mikrosystemtechnik liegen auf Kohlenstoff-Stoffverbunden bzw. weichmagnetischen Materialien in Dünnschichttechnik.

Kohlenstoffschichten [4] wurden mit guter Haftfestigkeit auf Kohlenstoff- oder Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>-Substraten sowie Polymeren abgeschieden, wobei die Haftfestigkeit durch geeignete Zwischenschichten weiter erhöht werden kann. Harte, amorphe Kohlenstoffschichten bieten eine hohe chemische Resistenz sowie Bioverträglichkeit und sind elektrisch leitfähig. Hierdurch eröffnen sich interessante Anwendungsfelder zum Beispiel in der Bio- oder Medizintechnik. Untersuchungen in Hinblick auf den Einsatz in Systemen mit tribologischer Beanspruchung ergaben niedrige Werte der Gleitreibungszahl in Paarung mit Stahl. Durch

gezieltes Gefügedesign in Richtung von Nanokompositschichten lassen sich die tribologischen Eigenschaften weiter verbessern.

Hochfrequenztaugliche weichmagnetische Materialien werden in Dünnschichttechnik für Mikroinduktoren mit der Integrationsfähigkeit in Fertigungstechnologien der Mikroelektronik entwickelt. Mikroinduktoren als Induktionsspulen in elektrischen Hochfrequenzschaltkreisen sind von besonderem Interesse als Anpassungsnetzwerke im 1 bis 4 GHz-Bereich für die mobile Telekommunikation oder als Mikrotransformatoren. Heutige Mikroinduktoren werden als planare Luftspulen, ohne oder mit magnetischem Kern, in Dünnschichttechnik mit relativ kleinen Güten ( $Q < 20$ , wobei  $Q = 2\pi \cdot f \cdot L/R$  mit  $f$  = Frequenz,  $L$  = Induktivität und  $R$  = Induktorkwiderstand) hergestellt. Zukünftige Anforderungen, z. B. für Fre-

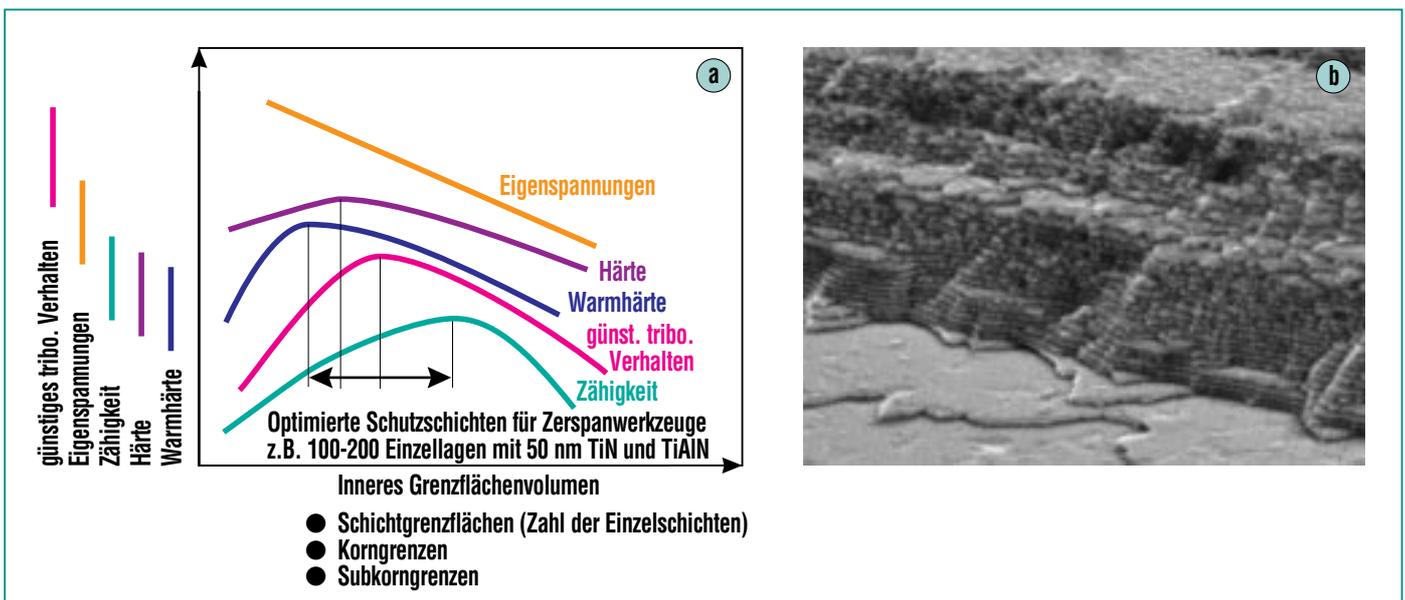


Abb. 2: Schematische Darstellung der Eigenschaften nanostrukturierter Viellagenschichten in Abhängigkeit vom Anteil an inneren Grenzflächen (a) sowie die Bruchfläche eines 100-lagigen TiC/SiC-Dünnschichtsystems mit einer Gesamtdicke von 5 µm (b).

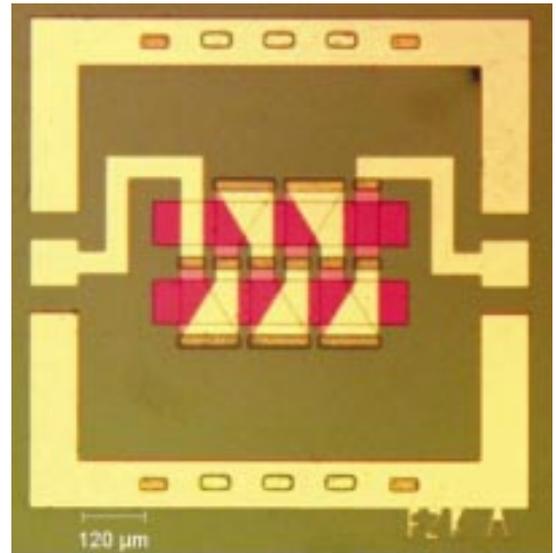
quenzfilter in Mobiltelefonen, die aufgrund der hohen Dichte des Mobilfunknetzes hohe Gütewerte aufweisen müssen, setzen hier wesentliche Leistungssteigerungen voraus. Für derartige Anwendungen werden ferromagnetische Dünnschichten [5] und gleichzeitig ein neuartiges Mikroinduktordesign [6] zur Verbesserung der Hochfrequenzeigenschaften, insbesondere in Hinblick auf hohe Güten und niedrige Verluste bis zu Frequenzen von 4 GHz, entwickelt. Abb. 3 zeigt einen Mikroinduktor mit zwei magnetischen Kernen. Die weichmagnetischen Schichten mit hoher Sättigungsmagnetisierung und Erhalt der Permeabilität bis zu hohen Grenzfrequenzen wurden auf Basis von Fe-Co oder Fe-Co-B-Si mit Hilfe des Magnetronspüterns auf oxidierten (100)-Siliziumsubstraten abgeschieden, wobei die Schichtkonzeption (Viellagen- oder Einlagenschicht bzw. die Art der ferromagnetischen Legierung) auf das Induktordesign abgestimmt wird. Durch FEM-Modellierung konnte das I-Induktordesign mit theoretischen Gütewerten von über 100 entwickelt werden. Die weiteren Arbeiten konzentrieren sich auf die Entwicklung temperaturstabiler weichmagnetischer Schichten in Hinblick auf die Fertigungsprozesse von Mikroinduktoren und die Anpassung des Induktordesigns an die entstehenden magnetischen Materialeigenschaften.

### *Mikro-Pulverspritzgießen mit Metall oder Keramik*

Die fortschreitende Miniaturisierung in vielen Produktbereichen führt zu steigenden Anforderun-

gen an mikromechanische Komponenten und die notwendigen Werkzeuge für ihre Herstellung. Zur Erzielung der Funktionssicherheit und ausreichenden Lebensdauer müssen Werkstoffe mit hinreichendem Verschleiß- und Korrosionswiderstand entwickelt werden. Derzeit eingesetzte Werkstoffe, wie Silizium, Polymere oder einige galvanisch abscheidbare Metalle (Ni oder Cu z.B. im LIGA-Verfahren) stoßen schnell an ihre Leistungsgrenzen. Keramische Werkstoffe oder härtere Stähle versprechen hier deutliche Verbesserungen. Während das Mikrospritzgießen oder andere Replikationstechniken von Polymeren schon Eingang in die Herstellung von Produkten gefunden haben, befindet sich der Fertigungsprozess für Metalle oder Keramiken noch im Entwicklungsstadium.

Aktuelle Forschungsarbeiten [7,8] beziehen sich daher auf die Entwicklung der Rohstoffe und Replikationstechnik für Mikroteile auf der Basis von Stählen (wie 1.4542, X5CrNiCuNb16-4) und Technischer Keramik ( $\text{Al}_2\text{O}_3$ ,  $\text{ZrO}_2$ ) oder Ingenieurkeramik genannt, wobei als Demonstratoren u.a. Komponenten einer Mikro-Zahnringpumpe und mikrostrukturierte Formeinsätze gewählt wurden. Das Herstellen von Bauteilen durch Mikropulverspritzgießen umfasst als Teilschritte das Einspritzen von Formmassen, bestehend aus Pulver plus organischem Binder, in Formeinsätze als strukturierte Negativform des abzuformenden Mikroteils, die anschließende Entformung und die Entfernung der Binderkomponente sowie das ab-



**Abb. 3: Lichtmikroskopische Aufnahme eines I-Induktors mit zwei magnetischen Kernen.**

schließende Sintern zum dichten Mikrobauteil. Ausgehend von der Entwicklung der spezifischen Pulveraufbereitung, dem Prozess des Mikropulverspritzgießens, numerischer Simulationstools und mikrotechnischer Prüfverfahren wurden Mikrobauteile und Formeinsätze erfolgreich realisiert. Abb. 4 zeigt beispielhaft keramische Teile für eine Mikro-Zahnringpumpe. Die damit verbundenen Anforderungen sind z.B. Stahlpulver mit einer Partikelgröße unter  $5\ \mu\text{m}$ , um Strukturdetails von  $50\ \mu\text{m}$  zu erreichen. Bei Keramiken stehen kommerzielle Formmassen mit mittleren Partikelgrößen der Pulver von ca.  $0,5\ \mu\text{m}$  ( $\text{Al}_2\text{O}_3$ ) bzw.  $0,35\ \mu\text{m}$  ( $\text{ZrO}_2$ ) auf Polyacetalbasis zur Verfügung, mit denen Strukturdetails durch Mikro-Pulverspritzgießen von  $20\ \mu\text{m}$  und Wandstärken von ca.  $100\ \mu\text{m}$  bei einem Aspektverhältnis von 10 abgeformt werden können.



**Abb. 4: Komponenten einer Mikro-Zahnringpumpe aus Oxidkeramik mit minimalen Wandstärken von 100  $\mu\text{m}$  und einer Strukturhöhe von 300  $\mu\text{m}$ .**

### *Schwindungsfreie Oxidkeramik*

Keramische Mikrostrukturen lassen sich über eine Prozesskette mit Synthese-, Formgebungs- und Verdichtungsverfahren herstellen [9]. Hierbei erzeugt man ausgehend von keramischen Pulvern durch Zumischen von Additiven stabile Suspensionen, die durch Formgebungsverfahren wie Foliengießen und Prägen oder durch Schlickerpressen zu mikrostrukturierten Rohlingen (Grünlinge) verarbeitet werden. Anschließend wird der poröse Rohling durch Sintern bei hohen Temperaturen verdichtet und erhält damit die notwendige Festigkeit und Steifigkeit. Die Abnahme der Porosität des Formkörpers während des Sinterns ist verbunden mit einem Schrumpfen von ca. 15 bis 20 Vol.%. Dieses Schrumpfen in den geometrischen Abmessungen des Formkörpers wird bei der Herstellung der Ausgangsformen (Modelle) berücksichtigt. Häufig erfolgt je-

doch die Schwindung nicht gleichmäßig, wodurch eine kostenintensive Nachbearbeitung notwendig wird, sofern sie überhaupt in den Mikrodimensionen und bei komplizierten Geometrien möglich ist. Hier setzt die Material- und Prozessentwicklung zur schrumpfungsfreien Herstellung keramischer Mikroteile ein. Mit der Zugabe von metallischen Verbindungen wie Zirkoniumdisilicid ( $\text{ZrSi}_2$ ) zu Zirkoniumdioxid ( $\text{ZrO}_2$ ) als Ausgangspulver lassen sich durch ein Reaktionssintern bei etwa 1600  $^\circ\text{C}$  dichte  $\text{ZrSiO}_4$ -Keramiken schwindungsfrei fertigen [10]. Während des reaktiven Sinterns kommt es durch die Oxidation des  $\text{ZrSi}_2$  zu einer Volumenzunahme, die bei exakter Abstimmung von Art und Menge der reaktiven Verbindung sowie der Porosität von Grünling und Keramik die durch das Sintern bedingte Schwindung kompensiert. Für diese keramischen Werkstoffe ergeben sich interessante Anwendungen u.a. in der Dentaltechnik.

## Werkstoffstrukturierung und -modifizierung

### *Laser-Mikrostrukturieren von Metallen, Keramiken und Polymeren*

Die dreidimensionale Lasermaterialbearbeitung [11-13] ermöglicht sowohl die primäre Strukturierung von mikrotechnischen Bauteilen, u.a. für mikrofluidische, medizin- oder biotechnische Anwendungen, als auch die Fertigung von metallischen, keramischen oder polymeren Formeinsätzen als Werkzeuge für die Abformung größerer Stückzahlen von Mikroteilen durch Replikationstechniken wie das Mikrospritzgießen. Alternative Verfahren der Herstellung von Formeinsätzen wie das LIGA-Verfahren, die Ultrapräzisionszerspanung oder das Mikrofunkenerodieren sind jeweils auf bestimmte Werkstoffgruppen beschränkt. LIGA-Formeinsätze werden aus galvanisch abscheidbaren Metallen, z.B. Nickel, mit Strukturabmessungen von ca. 0,2  $\mu\text{m}$  und Rautiefen  $R_a = 0,04 \mu\text{m}$ , hohen Aspektverhältnissen und hoher Formtreue im Mikrobereich mit einem allerdings relativ großen Zeitaufwand hergestellt. Ultrapräzisionszerspanen ist auf weiche bis mittelharte Werkstoffe und Mikrofunkenerodieren auf elektrisch leitfähige Materialien begrenzt, wobei in beiden Fällen die minimal erreichbaren Strukturen und Oberflächenqualitäten deutlich gröber als beim LIGA-Verfahren sind.

Das Laserstrukturieren lässt sich mit minimalen Strukturabmessungen von derzeit ca. 20  $\mu\text{m}$

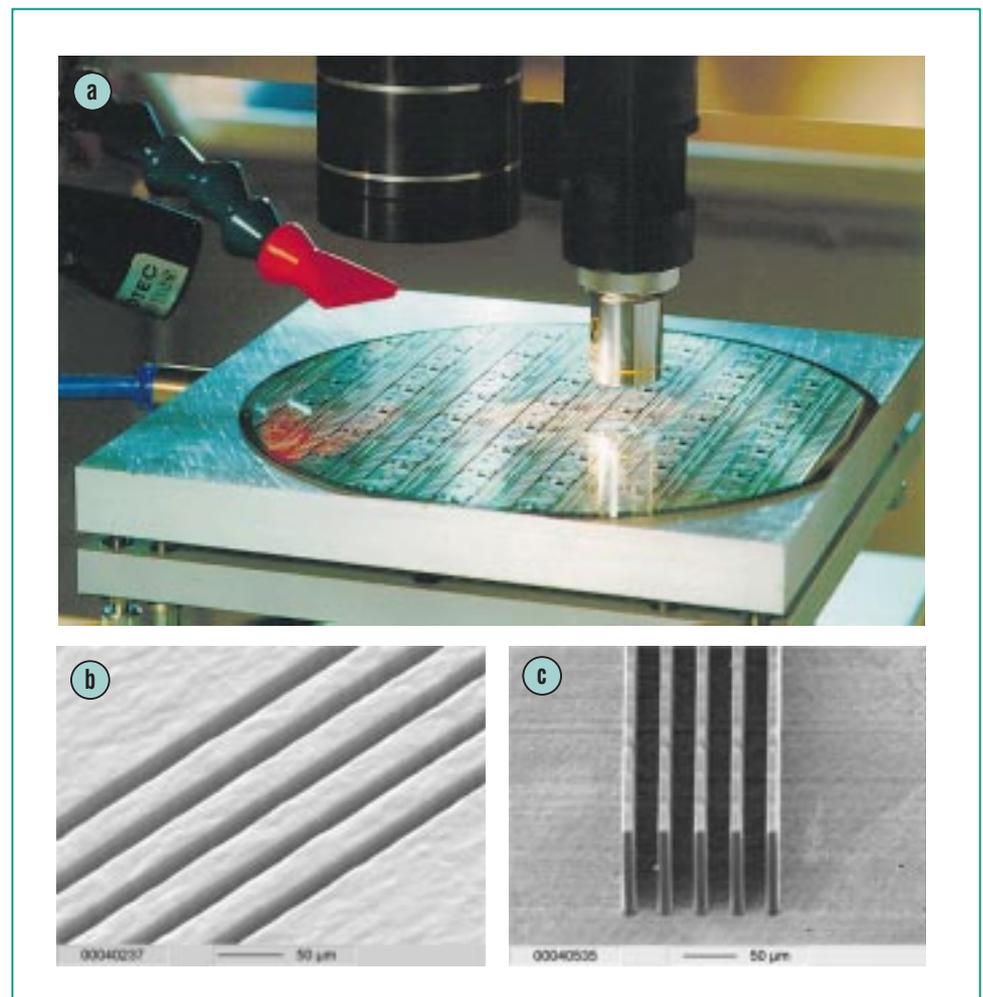
und Rautiefen  $R_a$  von  $0,2 \mu\text{m}$  (bei gehärteten Stählen) sowohl für weiche als auch harte, für elektrisch leitfähige und nicht leitfähige Metalle, Keramiken oder Polymere einsetzen. Besonders durch die prozesstechnische Entwicklung des Lasermikrospanens [12, 13] konnte die Oberflächengüte stark verbessert werden. Bei der Anwendung des Verfahrens zur Herstellung von Stahl-Formeinsätzen reagiert das durch Laserstrahlung (Nd:YAG-Laser im kontinuierlichen Mode mit  $\lambda = 1064 \text{ nm}$  Wellenlänge) erzeugte lokale Schmelzbad mit Sauerstoff als Reaktivgas und erzeugt einen Oxidschicht, der sich beim Erstarren aufgrund induzierter Spannungen vom Grundmaterial ablöst und auf diese Weise zum lokalen Formabtrag bzw. zur Strukturierung führt.

Je nach Bearbeitungsziel und Material werden unterschiedliche Laserstrahlquellen (KrF-Excimer mit  $\lambda = 193 \text{ nm}$  bis frequenzvervielfachte Nd:YAG-Kurzpuls-Laser mit einer Pulsdauer im Picosekundenbereich bei  $\lambda = 266 \text{ nm}$ ) eingesetzt. Wichtige Polymerwerkstoffe wie Polypropylen (PP), Polyetheretherketon (PEEK), Polysulfon (PS) oder Polyimid (PI) absorbieren die Laserstrahlung im Spektralbereich  $\lambda = 157 \text{ bis } 353 \text{ nm}$  stark. Die photochemische Dekomposition, bei der molekulare Bindungen im Bereich der optischen Eindringtiefe aufgebrochen werden und es durch den entstehenden Dampfdruck zu Ablation kommt, ist hierbei der dominierende Abtragsmechanismus. Zur Erzielung einer Strukturierung mit guter Formtreue und geringer Redeposition

des verdampften oder aufgeschmolzenen Materials sollten die thermischen Effekte möglichst klein sein. Abb. 5 zeigt die Strukturierung mit dem Excimer-Laser, den aus Polyimid strukturierten Formeinsatz sowie die durch UV-Reaktions-Mikrospritzgießen (UV-RIM, UV-light-induced reaction injection molding) in Polymethylmetacrylat (PMMA) abgeformte Struktur mit einer Stegbreite von  $10 \mu\text{m}$  und einem Aspektverhältnis (Höhe zur Breite der Struktur) von etwa 10 [13].

### Lokale lasergestützte Randschichtmodifizierung für Leitpfade

Die feinskalige lasergestützte Strukturierung elektrischer und thermischer Eigenschaften auf der Oberfläche von Funktionskeramiken stellt auf Grund ihrer hohen Flexibilität, durch Verzicht auf die aufwendige Maskentechnik, eine interessante Alternative zu Verfahren der Dickschichttechnik dar. Hierbei werden Leiterbahnen durch lokales Umschmelzen der



**Abb. 5:** Mikrostrukturierung mit (a) Excimer-Laserstrahlung eines (b) Formeinsatzes und (c) die damit durch UV-RIM in PMMA abgeformte Struktur mit einem Aspektverhältnis von ca. 10.

Randschicht mit Hilfe von CO<sub>2</sub>- oder Nd:YAG-Laserstrahlung unter gleichzeitigem Einbringen von Zusatzstoffen auf der Oberfläche oxidkeramischer Substrate erzeugt [14]. Durch das Lasereindispersieren von Wolfram in die Randschicht von Cordierit konnte in den Leitpfaden die Wärmeleit-

fähigkeit um den Faktor 10 verglichen zum Substrat erhöht und spezifisch elektrische Widerstände von 10<sup>-5</sup> bis 10<sup>-6</sup> Ωm erreicht werden. Ein Beispiel einer Heizleiterstruktur hergestellt durch die lokale lasergestützte Randschichtmodifizierung ist in der Abb. 6 wiedergegeben. Als mini-

male Breite des einzelnen Leitpfades werden derzeit je nach Wellenlänge  $\lambda$  der Laserstrahlung ca. 50 µm oder 200 µm bei  $\lambda = 1,06$  µm bzw. 10,6 µm erreicht.

### Rapid Prototyping für keramische Mikrostrukturen

Die Mikroreaktionstechnik stellt in der chemischen Verfahrenstechnik ein sich schnell entwickelndes Gebiet dar, weil sie durch Systeme, wie Mikromischer, Mikrowärmeübertrager oder Mikroreaktor mit inneren Strukturen im Millibis Mikrometerbereich, einen schnellen Masse- und Wärmetransport aufgrund des großen Verhältnisses von Oberfläche zu Volumen sowie definierte Verweilzeiten der Prozessgase erlaubt und dadurch eine Steigerung von Umsatz und Selektivität verspricht. Derzeitig werden Materialien wie Gläser, Metalle, Silizium oder Polymere verwendet, deren innere Strukturen bei metallischen Mikroreaktoren [15] durch spanabhebende Bearbeitung mit hochgenau profilierten Werkzeugen erzeugt werden.

Durch Technische Keramik, insbesondere auf Basis von Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, lassen sich die Einsatzmöglichkeiten von Kompaktreaktoren auch auf Anwendungen mit hoher korrosiver und thermischer Beanspruchung erweitern. Erstmals wurde ein vollkeramischer, modular aufgebauter Mikroreaktor für Prozesstemperaturen bis 1100 °C und sehr korrosiven Einsatzbedingungen entwickelt [16-18]. Durch den modularen Aufbau der Reaktionszone, dem möglichen schnellen Austausch von

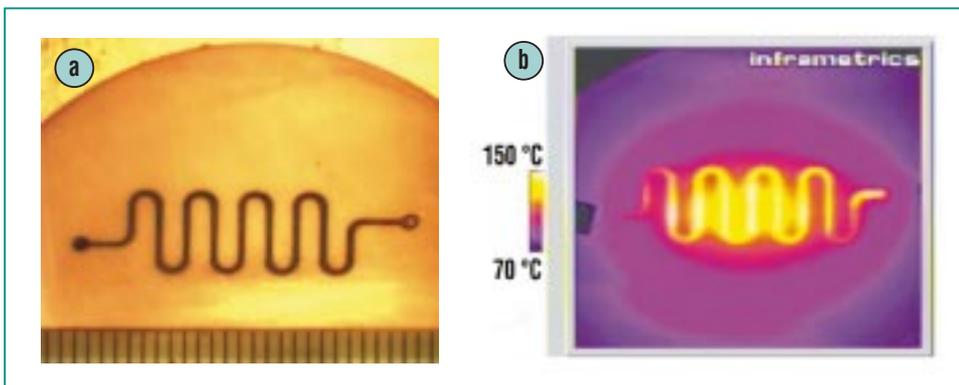


Abb. 6: Heizleiter hergestellt durch lokale lasergestützte Randschichtmodifizierung (a) lichtmikroskopische Aufnahme des Wolfram-Leitpfades auf Cordierit und (b) Wärmebild des Heizleiters.

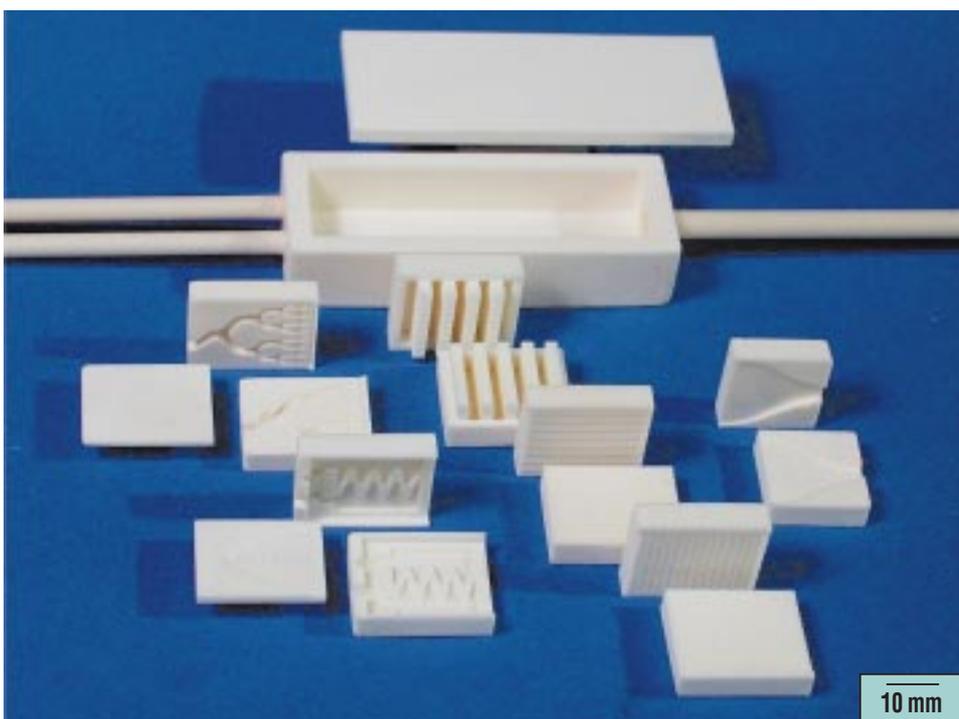


Abb. 7: Mikrostrukturierte Einlegeteile eines modular aufgebauten Kompaktreaktors aus Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>-Keramik.

Katalysatorträger und anderen Funktionselementen sowie der schnellen Anpassung an spezielle Reaktionsbedingungen bieten sich Anwendungen u.a. für das Katalysatorscreening oder für Hochtemperatur-Gasphasenreaktionen an. Ein wichtiger materialspezifischer Forschungsschwerpunkt lag hierbei in der Entwicklung einer keramikgerechten Mikrostrukturierungstechnik sowie in der Aufbau- und Verbindungstechnik. Die präzise Fertigung mikrostrukturierter Komponenten erfolgte über eine Rapid Prototyping Prozesskette [17]. Hierbei geht man von einem dreidimensionalen CAD-Modell aus, das in ein stereolithographisch erzeugtes Urmodell umgesetzt und danach in Silikonformen umkopiert wird. Diese werden als Abformwerkzeuge im Niederdruck-Spritzguss zur Herstellung der keramischen Mikrokomponente verwendet.

### Werkstoffprüfung und -modellierung

Eine auf die Dimensionen und Materialien der Mikrosystemtechnik zugeschnittene Prüftechnik und geeignete Simulationstools sind wesentliche Elemente in der Auslegungs- und Herstellungskette sowie in der Qualitätssicherung von Mikroteilen und Systemen [19, 20]. Sie liefern Eigenschaftskennwerte auf der Größenskala von Mikro- oder Submikrometer, charakterisieren die für die Funktionssicherheit relevanten Einflussfaktoren und Wechselwirkungsmechanismen bei der Systemintegration, zeigen Strategien für die Bauteil- oder

Systemoptimierung auf, analysieren Schädigungsmechanismen und schätzen die Lebensdauer sowie die Zuverlässigkeit von Mikroteilen und Systemen ab. Die eingesetzten Prüfmethoden ermitteln z.B. mikroanalytische, physikalische (elektrische, elektronische, dielektrische, magnetische, optische), mechanische, thermische, tribologische und korrosive Eigenschaftsmerkmale. Die Forschungsarbeiten sind sowohl grundlagen- als auch anwendungsorientiert und werden daher an Modellsystemen, Mikrobauteilen und/oder Mikrosystemen durchgeführt. Sie beinhalten weiterhin die Entwicklung von neuen anwendungsspezifischen Prüfmethoden, Prüfeinrichtungen und Simulationstools.

### Mikrotribologische Charakterisierung

Die Untersuchung tribologischer Eigenschaften, insbesondere Reibung und Verschleiß, von Mikrokomponenten bzw. Mikrosystemen muss die Systemabhängigkeit und damit eine Fülle von Einflussfaktoren berücksichtigen [21]. Reibung führt zu Energieverlusten und Verschleiß zu Oberflächenveränderungen und Materialverlusten, deren Folge der Ausfall von Mikrosystemen sein kann. In der Fertigungskette von Mikrokomponenten spielen die Replikationstechniken wie das Mikropulverspritzgießen oder Prägetechniken zur Abformung eine wichtige Rolle. Hierbei wird von den Abformwerkzeugen eine hohe Standzeit erwartet, die durch die tribologischen Wechselwirkungen mit den Formmassen bestimmt wird. Mit fortschrei-

tender Miniaturisierung und zunehmenden Anforderungen an die mechanische, thermische, tribologische oder korrosive Belastbarkeit von Mikrokomponenten müssen verschleißbeständigere Materialien verwendet werden. Der dadurch bedingte Einsatz verschleißfördernder Formmassen beim Pulverspritzgießen von Mikroteilen auf Basis von gefüllten Polymeren, Metallen oder Keramiken führt zu einer deutlich höheren tribologischen Beanspruchung der Formeinsätze im Vergleich zur Fertigung mit ungefüllten Polymeren.

Die Funktionsfähigkeit und Lebensdauer von Systemen wie Mikromotoren, Mikroturbinen oder Mikrozahnrumpfen, in denen Komponenten miteinander im mechanischen Gleit- oder Wälzkontakt stehen, werden von den tribologischen Eigenschaften entscheidend bestimmt. Abb. 8 zeigt schematisch einen mikrotribologischen Modellprüfstand mit dem Reibungs- und Verschleißmessungen unter den für mikromechanische Systeme relevanten Beanspruchungen mit Kräften im Milli-Newton-Bereich durchgeführt werden. Untersuchungen an einer superelastischen Formgedächtnislegierung NiTi sowie an hochreinem Nickel und Titan ergaben Grenzbelastungen, oberhalb derer durch die Zerstörung oxidischer Oberflächenschichten schwerer Verschleiß und hohe Reibungszahlen auftraten [22].

Abhängig von den Systembedingungen können Schutzschichten, aufgebracht durch PVD-Dünnschichttechnik, sehr effektiv sowohl die Reibung als auch den Verschleiß in Mikrosystemen re-

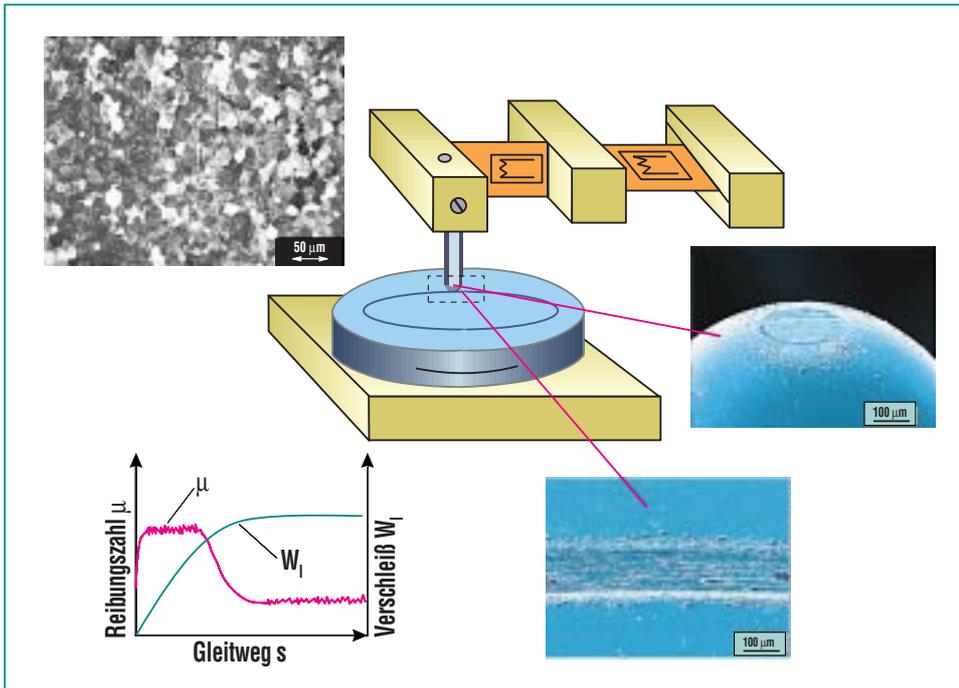


Abb. 8: Mikrotribometer zur Reibungs- und Verschleißmessung, Gefüge und Verschleißerscheinungsformen einer NiTi-Formgedächtnislegierung sowie die schematische Darstellung der Reibungszahl und des linearen Verschleißbetrages als Funktion des Gleitweges.

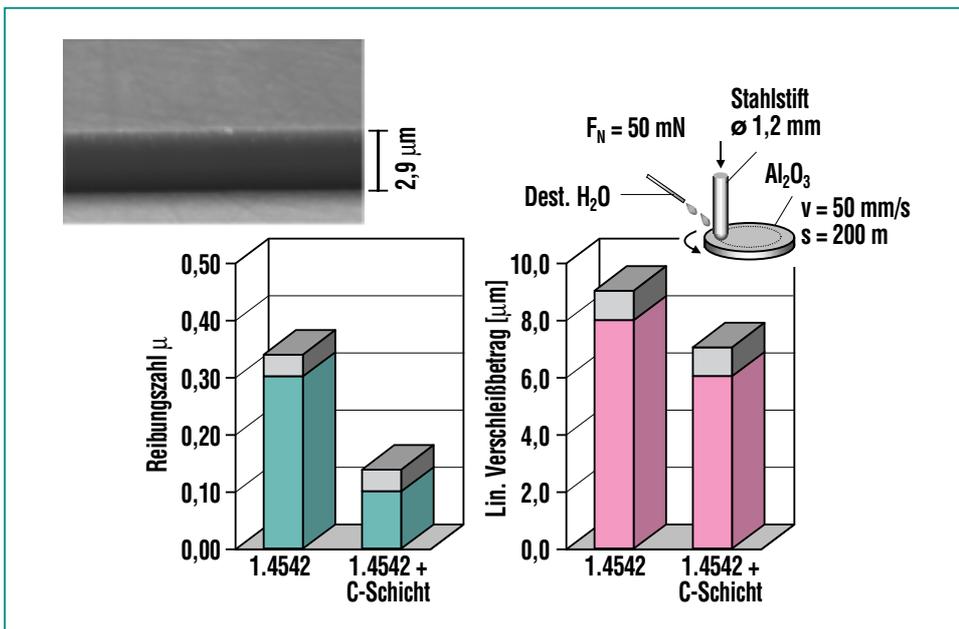


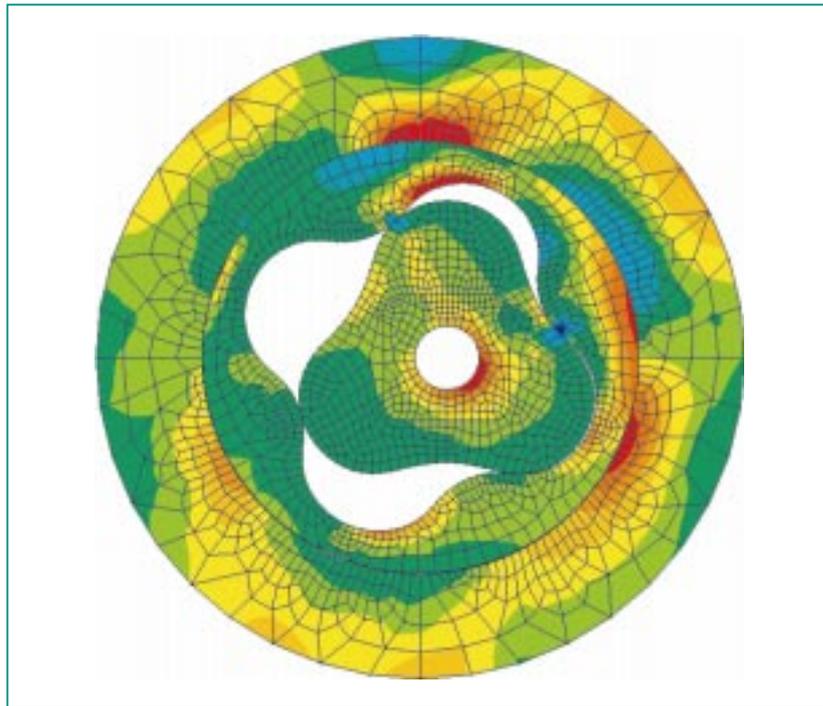
Abb. 9: Amorphe Kohlenstoff-Dünnschicht (PVD) auf dem Stahl X5CrNiCuNb 16 4 (1.4542) sowie der Vergleich von Reibungszahl und linearem Verschleißbetrag des unbeschichteten mit dem mit Kohlenstoff (C) beschichtetem Stahl in Gleitpaarung mit  $\text{Al}_2\text{O}_3$ -Keramik unter Wasserschmierung.

duzieren. In Hinblick auf biomedizinische Anwendungen werden zum Beispiel spezielle Dünnschichten auf Kohlenstoffbasis [4], die eine hohe Biokompatibilität aufweisen, auf Substratmaterialien wie Polymere, Oxidkeramik oder Glaskohlenstoff abgeschieden. Abb. 9 zeigt den Einfluss einer  $2,9 \mu\text{m}$  dicken amorphen Kohlenstoffschicht, mit einer Vickershärte von  $900 \text{ HV } 0,05$  abgeschieden durch Magnetronputtern (PVD-Verfahren) auf dem Stahl X5CrNiCuNb 16-4 (Härte von  $450 \text{ HV } 0,5$ ), auf die Reibungszahl und den Verschleißbetrag in Gleitpaarung gegen  $\text{Al}_2\text{O}_3$ -Keramik und unter Schmierung durch destilliertes Wasser [23]. Im Vergleich zum unbeschichteten Stahl wurde sowohl die Reibung als auch der Verschleiß wesentlich reduziert.

### Struktur- und Belastungsanalysen

Simulationsrechnungen sind wichtige Werkzeuge sowohl zur Optimierung der Auslegung, des Designs und der Fertigungsstrategie als auch der Abschätzung von Zuverlässigkeit und Lebensdauer von Mikrobauteilen. Mikrozaehnringspumpen [24] sind Verdrängerpumpen mit einem außenverzahnten Innenrotor und einem innenverzahnten Außenrotor, die leicht exzentrisch zueinander gelagert sind. Mit Hilfe von Finite-Elemente-Simulationen mit dem Programm ABAQUS-Explicit wurden Kontaktkräfte, Kontaktspannungen sowie die Zug- und Druckspannungsbereiche für Rotoren aus Keramik ( $\text{Al}_2\text{O}_3$ ,  $\text{Zr}_2\text{O}_3$ ) ermittelt [25]. Die bei einer Drehzahl von  $20000 \text{ min}^{-1}$  mit hoher

Geschwindigkeit aufeinander abgleitenden keramischen Zahnringe unterliegen der bremsenden und dämpfenden Wirkung des Fördermediums. Modelliert wurde die Kinematik der ineinander greifenden Teile unter Berücksichtigung dynamischer Effekte und der Fluidwirkung während der Rotation. Abb. 10 zeigt die Finite-Elemente-Netze von Außen- und Innenrotor einer Mikrozahlringpumpe zur Förderung von Fluiden und die Bereiche größter Zug- bzw. Druckspannung. Die ermittelten maximalen Zugspannungen liegen um den Faktor 1,5 unter der Dauerfestigkeit der Keramik, so dass sowohl eine Sicherheit gegen das Auftreten eines Gewalt- als auch Ermüdungsbruches gegeben ist.



**Abb. 10: Finite-Elemente-Analyse der Beanspruchungen zwischen Innen- und Außenrotor einer Mikrozahlringpumpe mit den höchsten Zug- (rot) bzw. Druckspannungen (blau).**

## Zusammenfassung

Exemplarisch wurden einige Forschungsthemen aus den verschiedenen Arbeitsfeldern der Werkstoffforschung für die Mikrosystemtechnik vorgestellt, die am Institut für Materialforschung in den drei Teilinstituten Werkstoffphysik (IMF I), Werkstoffmechanik (IMF II) und Werkstoffprozesstechnik (IMF III) bearbeitet werden. Die Forschungsarbeiten

sind zum einen grundlagenorientiert und mittelfristig angelegt und schaffen damit die unverzichtbare Basis für die Materialien bzw. Komponenten zukünftiger Mikrosysteme. Zum anderen sind sie direkt auf die Entwicklung derzeit aktueller Mikrosysteme ausgerichtet und dadurch eng verknüpft mit den gemeinsamen Forschungszielen aller kooperieren-

den Institute des Forschungszentrums Karlsruhe auf dem Gebiet der Mikrosystemtechnik. Darüber hinaus werden zahlreiche Forschungsarbeiten in Kooperation mit Industriefirmen und universitären oder nichtuniversitären Instituten durchgeführt.

## Literatur

- [1] N.N., *Werkstoffe der Mikrotechnik-Basis für neue Produkte. VDI-Berichte 796, Düsseldorf 1989.*
- [2] A. Botthof, W. Claußen, A. Schütze, H. Sturm, *Innovation durch Mikrointegration-Intelligente Produkte über Systemintegration von Mikro-, Bio- und Nanotechniken. VDI/VDE-Technologiezentrum, Teltow 1998.*
- [3] H. Holleck, H. Leiste, M. Stüber, S. Ulrich, *FZK-Nachrichten 31 (1) (1999) 13-20.*
- [4] M. Stüber, S. Ulrich, H. Leiste, A. Kratzsch, H. Holleck, *Surface and Coatings Technology 116-119 (1999) 591-598.*
- [5] K. Seemann, *Wissenschaftliche Berichte FZKA 6662, Karlsruhe 2001, S.7-17.*
- [6] A. von der Weth, J. Aktaa, *Wissenschaftliche Berichte FZKA 6662, Karlsruhe 2001, S.25-34.*
- [7] R. Ruprecht, Th. Gietzelt, J. Haußelt, *Wissenschaftliche Berichte FZKA 6662, Karlsruhe 2001, S.47-54.*
- [8] V. Piötter, T. Gietzelt, K. Müller, R. Ruprecht, *Keramische Zeitschrift 5 (2001) 394-398*

- [9] H.-J. Ritzhaupt-Kleissl, J. Haußelt, *Cfi/Ber. DKG 76 (9) (1999) D 16-D 20.*
- [10] J. Haußelt, V.D. Hennige, H.-J. Ritzhaupt-Kleissl, *Spektrum der Wissenschaft 4 (1999) 95-97.*
- [11] W. Pfleging, *LaserOpto 31(5) (1999) 54-57.*
- [12] T. Hanemann, W. Pfleging, J. Haußelt, K.-H. Zum Gahr, *Microsystem Technologies 7 (2001) 209-214.*
- [13] W. Pfleging, T. Hanemann, W. Bernauer, M. Torge, *in: Laser Applications in Microelectronic and Optoelectronic Manufacturing VI, M.C. Gower, H. Helvajian, K. Sugijoka, J. J. Dubowski, (eds.) Proc. of SPIE Vol. 4274 (2001) 331-345.*
- [14] S. Rüdiger, H. Gruhn, R. Heidinger, M. Rohde, J. Schneider, K.-H. Zum Gahr, *Laser induced surface modification of cordierite. Euromat 99, Vol. 11, Surface Engineering, H. Dimigen (ed.), Wiley-VCH Verlag, Weinheim 2000, pp. 510-515.*
- [15] K. Schubert, W. Bier, J. Brandner, M. Fichtner, C. Franz, G. Lindner, *Realization and testing of microstructure reactors, micro heat exchangers and micromixers for industrial applications in chemical engineering. IMRET 2, New Orleans 1998, Topical Conference Preprints (1998) pp.88-95.*
- [16] R. Knitter, W. Bauer, B. Linner-Krcmar, E. Hansjosten, *Rapid manufacturing of ceramic microcomponents, in Ceramics-Processing, Reliability, Tribology and Wear, G. Müller (ed.), EUROMAT 99, Vol.12, Wiley-VCH, Weinheim 2000, S. 75-80.*
- [17] R. Knitter, D. Göhring, P. Risthaus, J. Haußelt, *Microsystem Technologies 7 (2001) 85-90.*
- [18] R. Knitter, *Wissenschaftliche Berichte FZKA 6662, Karlsruhe 2001, S.101-107.*
- [19] C. Adelhelm, J. Aktaa, M. Rohde, H. Zimmermann, K.-H. Zum Gahr, K. Feit, *FZK Nachrichten 30 (3-4) (1998) 215-222.*
- [20] C. Adelhelm, J. Aktaa, K. Feit, M. Rohde, H. Zimmermann, K.-H. Zum Gahr, *Galvanotechnik 91 (1) (2000) 192-199.*
- [21] K.-H. Zum Gahr, *Tribological aspects of microsystems, in Micro Mechanical Systems – Principles and Technology, T. Fukuda, W. Menz (eds.), Elsevier, Amsterdam 1998, pp. 83-113.*
- [22] G. Kolbe, K.-H. Zum Gahr, *Z. Metallkunde 89, 5 (1998) 343-350.*
- [23] H. Leiste, M. Rohde, J. Schneider, T. Fett, *Wissenschaftliche Berichte FZKA 6662, Karlsruhe 2001, S.69-78.*
- [24] Th. Weisener, G. Vögele, H. Christmann, *Wissenschaftliche Berichte FZKA 6528, Karlsruhe 2000, S.49-50.*
- [25] N. Huber, J. Aktaa, *Wissenschaftliche Berichte FZKA 6662, Karlsruhe 2001, S.89-92.*