

# Herstellung metallischer Mikrobauteile unter Einsatz verlorener Kunststoffformen

G. Baumeister, N. Holstein, V. Piotter, R. Ruprecht, G. Schanz, IMF; M. Guttman, F. Winkler, IMT; A. Häfele, Freiburger Materialforschungszentrum

## Einleitung

Mikrosysteme werden weltweit nicht nur monolithisch in Siliziumtechnik gefertigt, sondern in zunehmendem Maß auch durch eine hybride Integration dreidimensionaler Bauteile aus unterschiedlichen Materialien. Neben ersten, bereits auf dem Markt erhältlichen Massenprodukten, wie z.B. Tintenstrahldruckköpfen, zeigen mehr und mehr Anfragen aus der Industrie in verschiedensten Anwendungsbereichen das wachsende Interesse an Mikrobauteilen aus Kunststoff, Keramik und Metall [1]. Beispiele für metallische Bauteile sind Zahnräder für Mikromotoren, kleine Relais, Transformatoren oder Mikrospulen für Anwendungen u. a. in der Telekommunikation (z.B. Handy) oder der Fahrzeugtechnik. Weitere Einsatzmöglichkeiten liegen in der Verwendung von Mikroreaktoren in der chemischen Technologie [26].

Ein offensichtlicher Mangel besteht derzeit jedoch in der Verfügbarkeit entsprechend entwickelter und etablierter Fertigungstechnologien für Mikrobauteile aus Metall. Diese müssen parallel zu den angestrebten Produkten entwickelt und bereitgestellt werden. Eine Zielsetzung am Forschungszentrum Karlsruhe (FZK) im Programm Mikrosystemtechnik (MIKRO) ist deshalb die industriennahe Entwicklung von Mikrofertigungstechniken zur Herstellung metallischer Mikrobauteile, das Darstellen ihrer Leistungsfähigkeit durch die Realisierung von

Demonstratorbauteilen und deren Vergleich zur Bewertung ihrer Zukunftsperspektiven [2].

Die Mikrozerspanung, das Mikroerodieren oder der Materialabtragung mit dem Laser sind Verfahren, mit denen Primär- oder Mutterstrukturen und kleine Serien von Metallmikroteilen gefertigt werden können. Für die Massenfertigung von Mikrobauteilen aus Metall soll das Mikro-Pulverspritzgießen entwickelt werden [3], dessen derzeitige Entwicklungsreife – auch bedingt durch die verfügbaren Pulver – nur für Machbarkeitsstudien ausreicht. Deshalb konzentriert sich dieser Beitrag auf die Beschreibung der beiden in Entwicklung befindlichen Verfahren Mikrogalvanoformung und Mikroguss, mit denen unter Verwendung verlorener, mikrostrukturierter Kunststoffformen quasi dreidimensionale Mikroteile aus Metall oder Legierungen in mittleren bis großen Stückzahlen hergestellt werden können.

## Herstellung mikrostrukturierter Kunststoffformen

Metallische Mikrostrukturen werden heutzutage überwiegend durch Verfahren der Galvanoformung hergestellt. Bei diesem Verfahren wird Metall in vorgefertigte, sogenannte verlorene Kunststoffformen abgeschieden (auch als „Zweite Galvanik“ bezeichnet)<sup>1)</sup>. Diese mikrostrukturierten Formen können sowohl direkt durch lithographische Verfahren (UV-, Elektronenstrahl- oder Röntgentiefen-

lithographie) als auch mit Hilfe mikrostrukturierter Werkzeuge durch Abformverfahren (Replikation), wie z. B. Heißprägen, Spritzgießen oder auch Reaktionsgießen, hergestellt werden [4]. Die lithographischen Verfahren sind gegenüber den Mikroabformverfahren für Kunststoffbauteile, die erst in letzter Zeit aus der Entwicklung an einige Industrieunternehmen übergeben wurden, bereits weitgehend standardisiert, und die notwendige Fertigungsausrüstung ist kommerziell erhältlich.

Die Wahl des adäquaten Herstellungsverfahrens für die Kunststoffformen wird von verschiedenen Parametern bestimmt, wie z. B. von der Geometrie (Höhe und laterale Abmessungen der Mikrostruktur) oder der gewünschten Stückzahl, aber auch von anderen Randbedingungen, wie z.B. einer Positionierung der Mikrobauteile bezüglich anderer bereits vorkonstruierter Geometrien [5], dem verfügbaren Verfahren oder der Kombination von Mikrofertigungsverfahren unter der Nutzung der jeweiligen Vorteile [4].

## Besonderheiten beim Mikrospritzgießen

Das Spritzgießen von mikrostrukturierten Kunststoffteilen stellt in Verbindung mit den nachfolgenden Fertigungsschritten eine Verfahrenskombination mit einem hohen Potenzial für eine Serienfertigung dar. Einen entscheidenden Anteil hat hieran das Mikrospritzgießen, welches die Vervielfachung von Primärmikrostruktu-

<sup>1)</sup> Der häufig verwendete Verfahrensbegriff „Zweite Galvanik“ begründet sich in der Annahme, dass für große Stückzahlen an Bauteilen die verlorenen Formen über den Weg der kostengünstigeren Kunststoffabformung produziert werden und der dafür notwendige Formeinsatz über die „Erste Galvanik“ hergestellt wurde [BAC98].

ren in großer Anzahl ermöglicht. Zur Formgebung der Kunststoffe über die Schmelze werden Werkzeuge mit mikrostrukturierten Formeinsätzen verwendet. Die Formeinsätze werden in Abhängigkeit vom gewünschten Fließlängen-zu-Wanddicken-Verhältnis (Aspektverhältnis) und den Erfordernissen der abgeformten Bauteile entweder mikrozerspannend, mittels LIGA-Technik, oder durch Kombination mit anderen Mikrostrukturierungsverfahren aus Metallen hergestellt [6-11].

Die Abformung mikrostrukturierter Formeinsätze in Thermoplaste durch Spritzgießen erfolgt unter Verwendung bestimmter Zusatzeinrichtungen, die in der makroskopischen Technik so nicht angewendet werden: Hierbei ist vor allem der Variotherm-Prozess zu nennen. Dabei wird das Spritzgießwerkzeug vor dem Einspritzen der Polymerschmelze auf Temperaturen nahe dem Schmelzpunkt des Kunststoffes erwärmt, um eine ausreichende Fließfähigkeit zu gewährleisten. Nach dem Einspritzen wird auf Temperaturen deutlich unterhalb der Erstarrungstemperatur abgekühlt, bei denen eine sichere Entformung des Bauteiles möglich ist. Eine weitere Besonderheit ist das Evakuieren der Werkzeuge vor dem Einspritzen, wodurch thermische Schädigungen am Polymermaterial und am Formeinsatz vermieden werden [4].

### *Mikrostrukturierte Kunststoffformen für den Mikroguss*

Beim Mikroguss werden Kunststoffformen aus ungefüllten Thermoplasten zur Herstellung von

keramischen Formen eingesetzt, wobei beim Sintern der Keramik die Kunststoffformen verbrennen. In die keramischen Hohlformen werden Schmelzen von Metalllegierungen eingegossen. Nach Erstarren und Abkühlen werden die Keramikformen gebrochen und die Keramikreste aus den Metallmikrostrukturen chemisch herausgelöst.

Zum Spritzgießen der verlorenen Kunststoffformen für den Mikroguss wird im Allgemeinen der Kunststoff Polymethylmethacrylat (PMMA) in Form eines kommerziell erhältlichen Granulats verarbeitet. Seltener kommt das Gießen mit Wachs zum Einsatz. Während letzteres bereits bei relativ niedrigen Temperaturen vor dem Sintern der Keramikform ausgeschmolzen wird, erfolgt die Entfernung des PMMA durch Pyrolyse, dem primär rückstandsfreien Verbrennen des Kunststoffes. Dies erfolgt drucklos, so dass die vorgetrocknete keramische Einbettmasse vor dem Sintern zur Keramikform beim Verbrennen des Kunststoffes keine Deformationen erfährt.

### *Mikrostrukturierte Kunststoffformen für die Galvanoformung*

Bei der „Zweiten Galvanik“ dienen die Kunststoffformen als Substrat mit mikrostrukturierter Oberfläche, auf dem das Metall über die Reduktion von Metall-Ionen aus einem wässrigen Elektrolyten galvanisch abgeschieden wird. Die Kunststoffmikrostrukturen werden somit in das Metall invertiert (d.h. im Umkehrton kopiert). Hierzu ist eine ausreichende Oberflächenleitfähigkeit der

Kunststoffformen sicherzustellen, damit diese als Kathode (Minuspol) im Galvanikbad kontaktiert werden können. Diese hohe Leitfähigkeit wird entweder durch eine Beschichtung von nicht leitenden Kunststoffmikrostrukturen oder durch das Spritzgießen mit leitfähigen Kunststoffen erreicht.

### **Kunststoffformen aus leitfähigen Kunststoffen**

Aufgrund ihrer chemischen Struktur handelt es sich bei den meisten Kunststoffen um Nichtleiter. Demgegenüber sind leitfähige Polymere zwar synthetisierbar, weisen im Allgemeinen jedoch schlechte Verarbeitungseigenschaften auf. In der Polymerchemie ist daher die Zugabe von leitfähigen Füllstoffen wie Kohlenstofffasern, Rußen oder Metallpulvern zu isolierenden Kunststoffen durchaus üblich. Das Spritzgießen von Thermoplasten, wie z.B. Polyoxymethylen (POM) oder Polyamid (PA), die mit unterschiedlichen Gehalten an Leitruß oder Kohlenstofffasern gefüllt sind, sogenannte Compounds, wird bereits seit einigen Jahren am FZK durchgeführt. Es gelingt mit diesen Compounds, auch komplexe leitfähige Mikrostrukturen abzuformen [12].

Alle Oberflächen der verlorenen Formen aus gefüllten Kunststoffen sind elektrisch leitend, so dass die galvanische Abscheidung auf der gesamten Oberfläche aufzuwachsen beginnt. Es wurden so u.a. Teststrukturen mit einer minimalen Strukturbreite von 270 µm und einem maximalen Aspektverhältnis von 4,8 spritzgegossen und galvanisch abgeformt. Dabei konnte die To-

pographie der Oberfläche präzise wiedergegeben werden. Es wurde jedoch festgestellt, dass bei eng beieinander stehenden Strukturen (Strukturarrays) Hohlräume in den Metallstrukturen auftraten.

Ein weiteres Beispiel für die Durchführbarkeit des angestrebten Prozesses sind gestufte Mikrozahnräder, die auf einer LIGA-Struktur basierend, galvanisch abgeformt wurden [13, 14]. In diesem Fall gestattet die besondere Geometrie eine ausreichende Ionendiffusion für die Galvanoformung. Bei Strukturarrays mit Aspektverhältnissen über 5, wie es für viele LIGA-Strukturen typisch ist, trifft dies aber nicht mehr zu.

Im Fall von dicht stehenden Strukturarrays mit hohen Aspektverhältnissen ist also eine homogene Leitfähigkeit über die gesamte Oberfläche der verlorenen Formen ungeeignet, da es zu einer bevorzugten Abscheidung im Bereich der Mikrostrukturwände und -stirnflächen kommt und eine galvanische Abscheidung am Fuß der Strukturen nur stark vermindert erfolgt, woraus die Bildung von Hohlräumen resultiert. Diese schränken den Einsatz der resultierenden Metallmikrostruktur als thermisch und/oder mechanisch belastetes Bauteil oder gar als Formeinsatz erheblich ein. Im Rahmen zukünftiger Entwicklungen ist daher ein Leitfähigkeitsunterschied derart anzustreben, dass die galvanische Abscheidung gerichtet vom Strukturgrund beginnend stattfindet.

### Einlegespritzgießen für Kunststoffmikrostrukturen auf leitendem Substrat

Durch das Spritzgießen mit leitfähigen Einlegeteilen können theoretisch unendlich hohe Leitfähigkeitsgradienten zwischen Substrat und Mikrostrukturen realisiert werden. Bei dieser Verfahrenvariante werden vorgefertigte (leitfähige) Formteile, z.B. aus mit Leitruß oder Kohlefasern gefüllten Kunststoffen, mit Durch-

gangsöffnungen auf einem mikrostrukturierten Formeinsatz so platziert, dass die Durchgangsöffnungen direkt über den Kavitäten (d.h. den Mikrostrukturen) des Formeinsatzes liegen. Wird nun eine zweite isolierende Kunststoffmasse durch das Einlegeteil in die Kavitäten gespritzt, entsteht ein Formteil mit einem leitfähigen Substrat (Grundplatte), auf dem isolierende Mikrostrukturen angeordnet sind (Abb. 1).

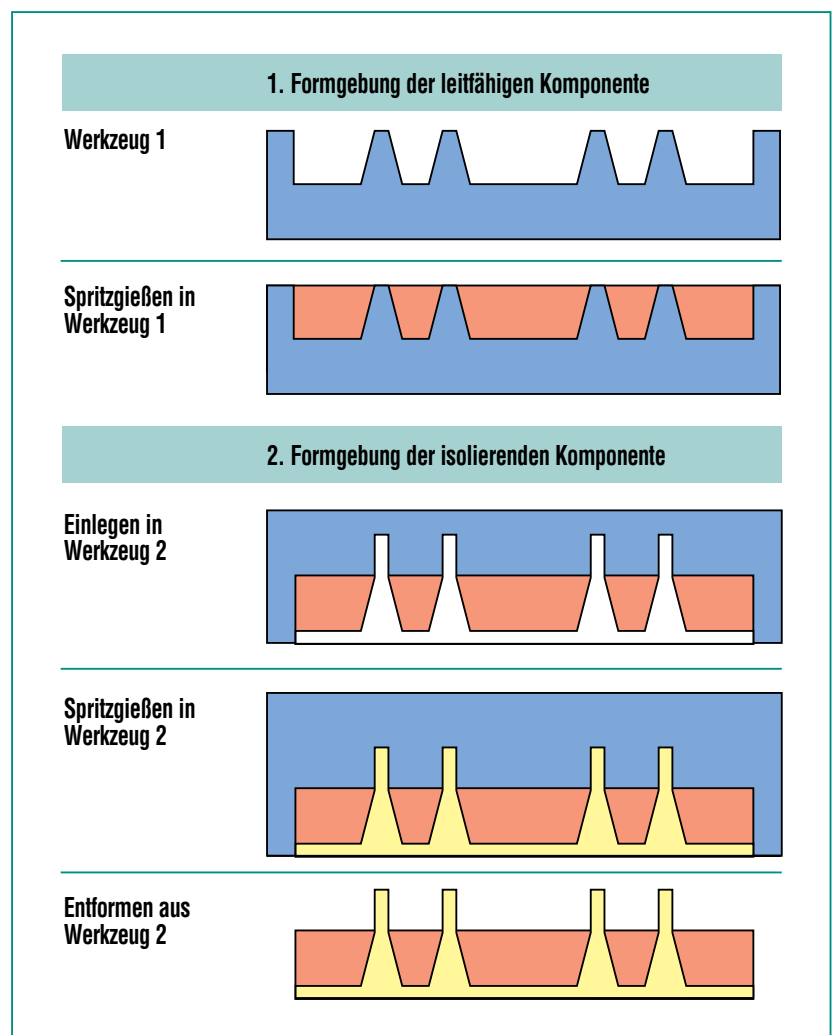


Abb. 1: Verfahrensschema zum Einlegespritzgießen für zweikomponentigen Formteile. Werkzeuge = blau, leitfähige Komponente = rot, isolierende Komponente = gelb.

## Formgebung von Metall-Mikrostrukturen über Legierungsschmelzen

### Herstellung von verlorenen Keramikformen

Das Mikrogießen basiert auf dem Feingießen metallischer Schmelzen, wie es in der Dentaltechnik angewendet wird. Es handelt sich dabei um einen Prozess mit verlorenem Modell und verlorener Form. Die Genauigkeit des Modells und seiner keramischen Abformung hat dabei großen Einfluss auf die Qualität des mikrogegossenen Bauteils. Deshalb soll zunächst die Herstellung der verlorenen Keramikform dargestellt werden, bevor auf den Mikro gießprozess eingegangen wird.

Für den Mikroguss wird eine keramische Hohlform erzeugt, indem spritzgegossene Kunststoffformen als Modelle auf einen Anguss montiert, in einen keramischen Schlicker, die Einbettmasse, eingegossen und nach dem Trocknen anschließend bei etwa 700°C gebrannt werden. Dabei schmilzt das Kunststoffmodell zunächst auf und wird dann rückstandsfrei pyrolysiert. Während des Brennprozesses sintert die Keramik zu einer festen Form zusammen. Die entstandene Hohlform kann nun mit einer metallischen Schmelze ausgefüllt werden.

An die keramische Einbettmasse werden vielfältige Anforderungen gestellt: niedrige Viskosität des keramischen Schlickers zur Erzielung einer hohen Abformgenauigkeit des Kunststoffmodells, hohe Temperaturbeständigkeit,

genügende mechanische Festigkeit, um eine Formbeständigkeit bei den auftretenden Gießkräften zu gewährleisten, eine gewisse Porosität zur Abführung von Gasen beim Gießen, geringe Oberflächenrauheit der gebrannten Einbettmasse und leichte Entfernbarkeit der Einbettmasse nach dem Gießen. Die Eigenschaften der Einbettmasse haben damit neben den typischen Gießparametern wie Gestaltung des Angusses, Vorwärmtemperatur der Form und Höhe des Fülldrucks maßgeblichen Einfluss auf das Gießergebnis. Die kommerziellen Einbettmassen weisen für den Einsatz in der Mikrotechnik hierbei Mängel auf. Der Entwicklung geeigneter Einbettmassen für den Mikroguss kommt daher eine hohe Bedeutung zu [15].

### Parameter beim Mikroguss

Der eigentliche Gießprozess besteht aus dem Aufschmelzen der Gusslegierung durch Widerstandsheizung, induktive Erwärmung oder im Lichtbogen und dem nachfolgendem Abgießen in die mikrostrukturierte keramische Form. Dabei wird die Wärme der gesinterten Form ausgenutzt, um die Erstarrung der Schmelze in der Form zu verzögern und damit die Formfüllung zu verbessern. Außerdem wird zu diesem Zweck Druck auf die Schmelze aufgebracht. Man unterscheidet dabei zwei Methoden: die Druckbeaufschlagung durch Druckluft (bis max. 4 bar), die bei den Vakuum-Druckgussgeräten verwendet wird, und die Druckbeaufschlagung infolge der Fliehkraft bzw. die Beschleunigungskraft (bis max. äquivalent 20 - 25 bar), die

bei den Schleudergießmaschinen ausgenutzt wird.

Das Formfüllungsvermögen wird in erster Linie von der Vorwärmtemperatur der Form beeinflusst. Das Fließvermögen einer Legierung nimmt dabei im Allgemeinen bis zum Erreichen der Schmelztemperatur mit steigender Vorwärmtemperatur zu, da die Wärmeabfuhr an die Umgebung abnimmt. Die Schmelze bleibt also länger fließfähig. Speziell bei Mikrobauteilen ist außerdem der mit abnehmendem Querschnitt hyperbolisch ansteigende Fülldruck zu berücksichtigen, der nach stark vereinfachten Berechnungen etwa unterhalb von 50 µm Durchmesser relevant wird. Fließlängenversuche an Fasern, die als Teststrukturen verwendet wurden, zeigen die Zunahme der erzielbaren Fließlänge mit zunehmender Temperatur bzw. zunehmendem Fülldruck (Abb. 2).

Letzteres ist besonders deshalb wichtig, weil Versuche von Wöllmer [16] gezeigt haben, dass die Oberflächenqualität der Gussstücke mit zunehmender Vorwärmtemperatur der Form abnimmt. Außerdem ist mit zunehmender Formtemperatur eine Kornvergrößerung zu erwarten, die sich negativ auf die mechanischen Eigenschaften des Gussteils auswirkt. Deshalb ist ein hoher Fülldruck bei niedriger Vorwärmtemperatur anzustreben. Da der hohe Fülldruck jedoch auch zu einer sehr exakten Abbildung der Oberflächenstruktur der Einbettmasse führt, ist speziell für den Mikroguss eine Einbettmasse mit sehr geringer Oberflächenrauheit bei gleichzeitig genügender Restporosität zur Abführung



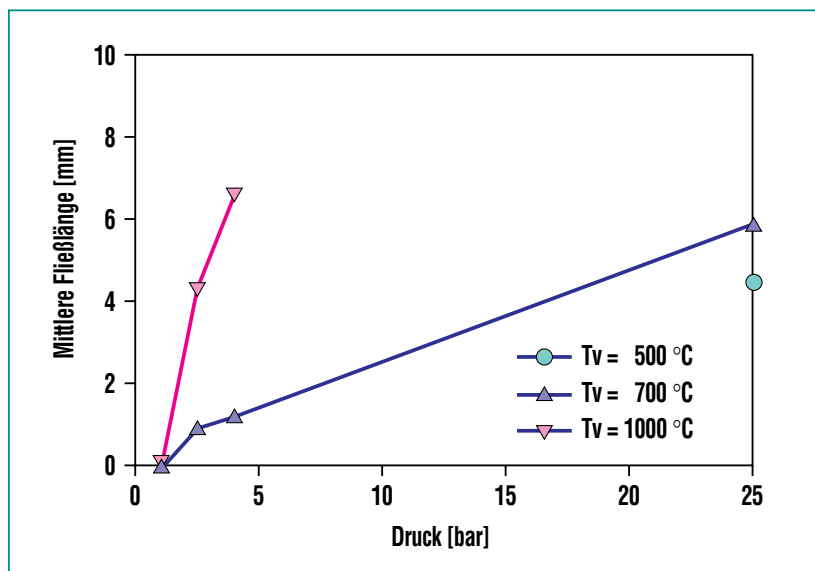


Abb. 2: Einfluss von Fülldruck und Vorwärmtemperatur ( $T_v$ ) auf die erzielbare mittlere Fließlänge beim Abguss einer Faserstruktur mit je zehn Fasern à 100  $\mu\text{m}$  Durchmesser; Gusswerkstoff: Goldbasislegierung.

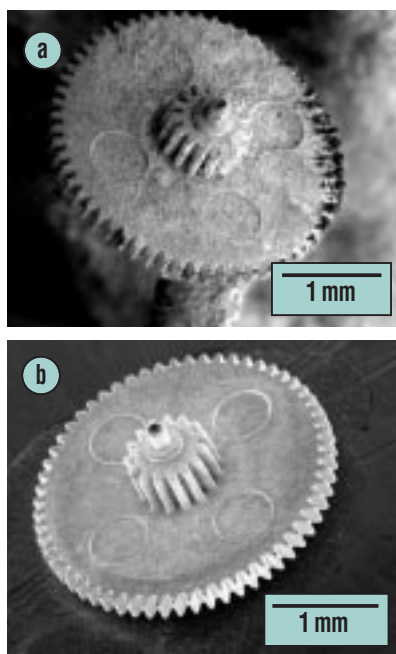


Abb. 3: Einfluss der Einbettmasse auf die Oberflächenrauheit abgegossener Zahnräder. a) kommerzielle Einbettmasse, b) modifizierte Einbettmasse; Gusswerkstoff: Goldbasislegierung.

der Gase erforderlich. In Gießversuchen konnte die Oberflächenrauheit gegossener Teile aus einer Goldbasislegierung durch Zugabe von feinskaligem  $\text{SiO}_2$ -Pulver zu einer kommerziellen Einbettmasse gemäß der ermittelten Rauheitskennwerte um die Hälfte reduziert werden. Abb. 3 zeigt das Ergebnis an REM-Aufnahmen zweier gegossener Zahnräder aus gleichen Modellen.

### Formgebung von Metallmikrostrukturen über die Galvanoformung

Bei Kunststoffformen aus isolierenden Kunststoffen (wie z.B. Polymethylmethacrylat PMMA, Polycarbonat PC, Polysulfon PSU, ...) muss vor der Galvanoformung eine leitfähige Oberfläche erzeugt werden, auf welcher der Start der Metallabscheidung erfolgt. Das kann u. a. durch Sputterbeschichtung oder Clusterabscheidung

realisiert werden. Als weitere Methoden stehen für die Startschichtherzeugung andere PVD-Verfahren, die photochemische Metallisierung und die nasschemische Bekeimung (vorrangig für die stromlose Metallabscheidung) zur Verfügung [17].

### Beschichtungsverfahren an isolierenden Kunststoffformen

#### Sputterbeschichtung

Bei der Sputterbeschichtung werden Argon-Ionen auf ein Target (Metallplatte) beschleunigt, welche beim Aufprall Metallatome wegschleudern, die sich auf allen kälteren Oberflächen abscheiden. Die Abscheiderate liegt bei 0,1 bis 1 nm/sec. Höhere Raten verursachen einen höheren Wärmeeintrag in die Oberfläche. Die Kunststoffformen werden so mit einer ausreichend elektrisch leitenden, 10 bis 100 nm dünnen Startschicht versehen (siehe Abb. 4 oben). Vorrangig wird Gold als Schichtmaterial verwendet, da es den chemischen Bedingungen der Elektrolyte widersteht und keine Passivschichten an sauerstoffhaltiger Atmosphäre bildet [18].

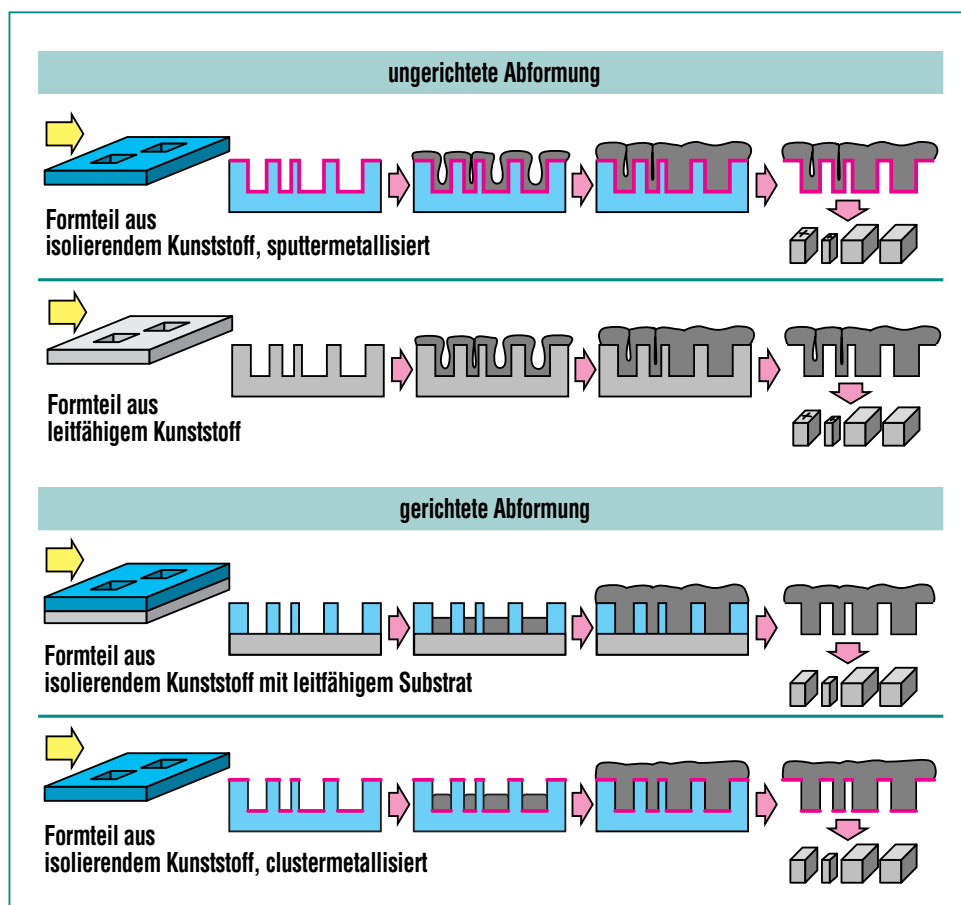
#### Clusterbeschichtung

Durch die gerichtete Abscheidung von Metall-Clustern (Partikel aus hundert bis zehntausend Atomen) kann eine leitfähige Oberflächenschicht primär auf dem Strukturgrund einer Kunststoffform erzeugt werden. Dies erlaubt nach Kontaktierung eine gerichtete galvanische Metallabscheidung oder eine Startbekeimung für die stromlose Metallabscheidung. In ersten Arbeiten wurden Silber-

cluster mit einer Schichtdicke von 30 nm und einer Abscheidegeschwindigkeit von 10 nm/s am Boden und an den Stirnflächen einer Kunststoff-Mikrostruktur abgeschieden, ohne dass die senkrechten Strukturseiten-(wand)-flächen mit Metall bedeckt wurden [19]<sup>2)</sup>. Nach Kontaktierung der zusammenhängenden, leitfähigen Fläche am Strukturboden wurde durch galvanische Abscheidung am Strukturboden beginnend die Kunststoffstrukturen bis zum Kontakt mit der Stirnfläche gleichmäßig aufgefüllt und danach mit einer zusammenhängenden Metallschicht überwachsen (siehe Abb. 4 unten).

In der Folge wurde nach einer Vereinfachung des Verfahrens gesucht, welche u. a. auch die Verwendung einer kommerziellen Clusterquelle ermöglicht. Hierzu wurden in Kooperation mit dem Freiburger Materialforschungszentrum (FMF) Untersuchungen vorgenommen, bei denen das in Freiburg entwickelte Energetic-Cluster-Impact (ECI)-Verfahren zur Metallisierung von Kunststoffformen verwendet wurde. Metallabscheidungen mittels des ECI-Verfahrens wurden bisher nur auf Keramik, Glas oder Metall vorgenommen. Die Beschichtung auf Kunststoffen (PMMA) sowie die anschließende Galvanoformung wurden im Rahmen dieser Kooperation erstmals untersucht.

Beim ECI-Verfahren wird ein Strahl aus Metallclustern mit variabler kinetischer Energie auf die zu beschichtende Unterlage beschleunigt. Die Cluster werden da-



**Abb. 4: Schema der verschiedenen Verfahren zur Galvanoformung in verlorenen Kunststoffformen.**

bei zunächst durch Zerstäuben des gewünschten Materials mit einer DC-Magnetron-Sputterkathode und anschließender Kondensation des entstandenen Metalldampfes in einer Ar-Atmosphäre erzeugt, wobei die Größe der Cluster durch verschiedene Parameter der Clusterquelle (wie Druck, Gasflussrate und Sputterleistung) gesteuert werden kann. Nach Ablenkung der ionisierten Cluster aus dem Strahl werden diese in einem elektrischen Feld auf Energien von bis zu 10 eV pro Atom im Cluster beschleunigt. Der Aufprall eines

solchen energiereichen Clusters ist vergleichbar dem eines Schneeballs, der mit Überschallgeschwindigkeit gegen eine Wand geworfen wird. Cluster- und Oberflächenmaterial werden stark komprimiert, Druck und Temperatur an der Aufschlagstelle steigen für extrem kurze Zeit (einige ps) stark an. Unter diesen extremen Bedingungen vermischen sich die auftreffenden Clusteratome gut mit denen der Unterlage und es entstehen schon bei Raumtemperatur sehr glatte und auf der Unterlage gut haftende Schichten [20, 21]

<sup>2)</sup> Die Erzeugung der Silber-Cluster erfolgte unter Verwendung einer Ofenquelle (Eigenbau am Institut für Mikrostrukturtechnik) mittels Expansion durch eine Düse in ein Vakuum.

### Bewertung der Beschichtungsverfahren

Bezüglich der beiden vorgestellten Metallisierungsverfahren für Kunststoffformen zur Erzeugung von Galvanikstartschichten ergibt sich folgender Vergleich (Tab. 1). Über die Auswahl eines Verfahrens entscheiden im derzeitigen Entwicklungsstadium vorrangig das Aspektverhältnis der Mikrostruktur, die Anforderungen an die Startschicht, die Art der Galvanoformung (gerichtet oder ungerichtet) sowie die gestellten Anforderungen an das galvanisierte Bauteil.

### Parameter der Galvanoformung

In verlorene Kunststoffformen werden die Metalle Nickel (Struktur- und Formeinsatzherstellung [22]), Kupfer (Strukturherstellung), Gold (Absorberstrukturen für Röntgenmasken), die Legierungen NiFe, NiW und NiCo [23] galvanisch und Nickel-Phosphor (Ni(P)) außenstromlos (chemisch) abgeschieden [24, 17].

Die galvanische Metallabscheidung erfolgt im FZK sowohl in kleinvolumigen Versuchsanlagen als auch in Galvanikanlagen der

Firma HEGA. Als Elektrolyt für die Erzeugung von Bauteilen aus Nickel wird ein Borsäure haltiger Nickelsulfamat-Elektrolyt verwendet, der sich für die Mikrogalvanoformung als besonders geeignet erwiesen hat [7, 22]. Die Metallabscheidung wird in der Regel bei einer Stromdichte von  $1\text{A}/\text{dm}^2$  vorgenommen (Abscheidegeschwindigkeit =  $12\ \mu\text{m}/\text{h}$ ). Die Höhe der galvanisierten Schicht betrug für die clustermetallisierten Proben 100, 250 oder 500  $\mu\text{m}$ , bei anderen Proben können durchaus bis zu 1000  $\mu\text{m}$  galvanisiert werden. Um die Bedingungen

Kriterium	Clustermetallisierung	Sputtermetallisierung
<b>Metallisierung</b>	Strukturgrund bzw. Stirnfläche; Seitenwände bleiben frei → gerichtete Galvanoformung	vollflächig → ungerichtete Galvanoformung
<b>Aspektverhältnis</b>	unabhängig	begrenzt (bis max. 10)
<b>Metall</b>	Ag, Cu, Ti, Pd	Au, Cr, Ti, Ni, Cu
<b>Schichtdicke</b>	von 20 bis 100 nm	von 10 bis 100 nm
<b>Haftung</b>	sehr gut, unabhängig von der Schichtdicke	abhängig von Metall (Au, Ti, Cr sehr gut; Cu, Ni schlecht) abhängig von der Schichtdicke
<b>Temperatureintrag</b>	gering bezogen auf gesamte Form	hoch bezogen auf gesamte Form
<b>Kosten</b>	hoch bezogen auf die Anlagen und die Anzahl der Teile pro Zeit	mittel Kosten von Anlagen, Güte und Größe des Metalltargets abhängig
<b>Durchführung</b>	aufwendig, derzeit noch hoher apparativer Aufwand	einfach, geringer apparativer Aufwand
<b>Galvanoformung für einzeln stehende Metallstrukturen</b>	nur mit Verbindungssteg zur Kontaktierung	ja, Vereinzelung nach Bearbeitung der verbindenden Galvanikoberfläche

Tab. 1: Vergleich der Beschichtungsverfahren für Kunststoffformen.

gen bei der Mikrogalvanoformung in engen Grenzen konstant zu halten und somit eine fehlerfreie galvanische Abformung der Mikrostrukturen zu ermöglichen, ist eine intensive Kontrolle der Prozessparameter notwendig [18, 25].

Für die Herstellung vereinzelter Mikrobauteile erfolgt die gerichtete Auffüllung der Form mit Metall in der Regel zu ca. 70 % bezogen auf die Höhe der Kunststoffstruktur. Ist eine Nachbearbeitung der Galvanikoberfläche erlaubt oder gewünscht, kann die Strukturhöhe bis nahe 100 % aufgefüllt werden. Anschließend wird die Form nasschemisch aufgelöst und es verbleiben in Abhängigkeit vom vorgegebenen Strukturdesign ein oder mehrere metallische Mikrobauteile zur weiteren Verarbeitung. Aspektverhältnisse und Qualität (Steilheit/Rauhigkeit etc.) der Metallmikrobauteile orientieren sich dabei vor allem an der Güte und Werkstoffwahl der verlorenen Kunststoffformen. Die Galvanoformung von Mikrostrukturen mit Details im Submikrometerbereich ist gut möglich, da den Elektrolyten mit hoher Mikrostreufähigkeit entsprechende Netzmittel zugegeben werden.

### Untersuchungen an sputtermetallisierten Proben

Durch Sputtern wurden Teststrukturen aus PMMA mit Aspektverhältnissen (AV) um 5 allseitig beschichtet. Höhere AV (bis 10) sind möglich, wenn die Sputterparameter Leistung, Abstand und Zeit angepasst werden. Im Sinne einer präzisen galvanischen Abformung der Kunststoffformen sind

die Sputterschichten möglichst dünn zu halten. Zur Erzeugung einer ausreichend leitfähigen Schicht reicht bereits eine Schichtdicke um 10 nm aus. Die senkrechten Wände innerhalb der Strukturen werden dabei ebenfalls beschichtet, so dass auch dort ein galvanischer Niederschlag erfolgt. Die als Galvanik-Startschichten üblicherweise verwendeten Goldschichten verbleiben nach der Galvanoformung aufgrund der hohen Haftung zwischen Nickel und Gold vollständig auf dem Nickelniederschlag (Abb. 5).

### Untersuchungen an ECI-metallisierten Kunststoffformen

Die mittels ECI-Verfahren metallisierten Kunststoffformen aus PMMA erlauben eine gerichtete galvanische Metallabscheidung. In zunächst durchgeführten Versuchen an unstrukturierten Substraten aus PMMA (ohne Mikrostruktur) wurde festgestellt, dass eine Clusterschichtdicke von 30 nm bei den untersuchten Metallen Titan, Kupfer und Silber als Startschicht für die Galvanik ausreichend ist. Die Metallisierung startet auf diesen Schichten gleichmäßig und homogen (siehe Abb. 6). Bei der Trennung des Substrats von der galvanisierten Schicht (durch Abheben oder nasschemisches Auflösen des PMMA) wurde beobachtet, dass die Silber- bzw. Kupfermetallisierung auf der Nickelschicht verbleibt, während die Titanmetallisierung auf dem PMMA-Substrat haftet.

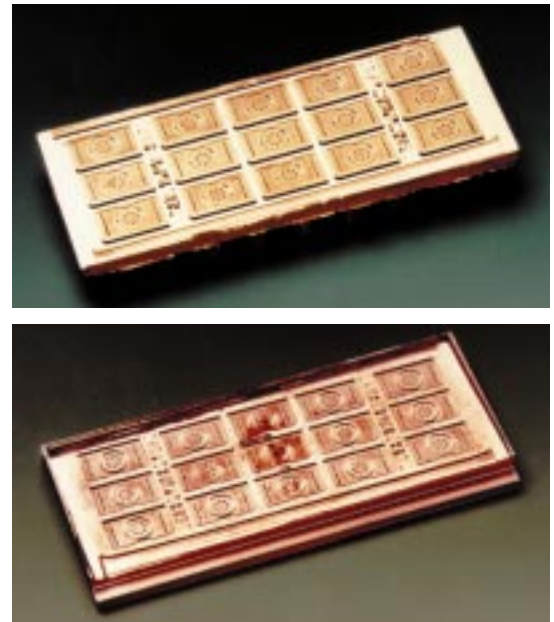


Abb. 5: Au-Sputterschicht auf einer PMMA-Form (oben) und resultierende Ni-Abformung (unten).

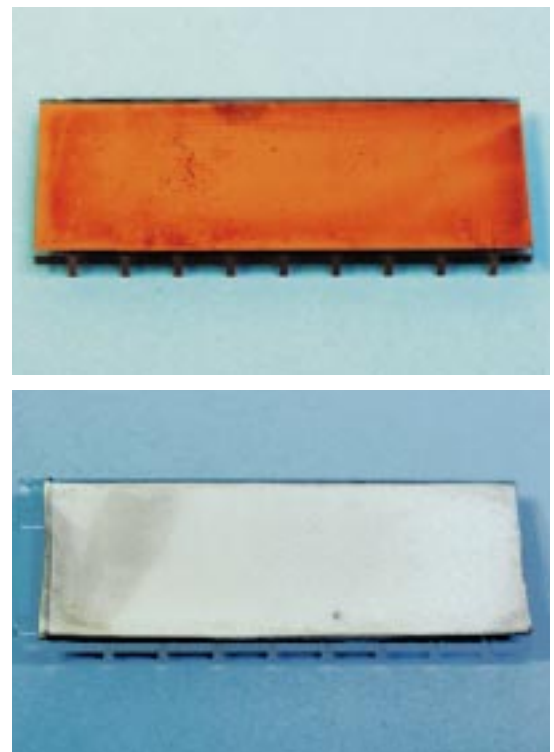


Abb. 6: Oben: Clustermetallisiertes Kunststoffbauteil aus PMMA (Cu, 60 nm), unten: nach der Nickel-Galvanoformung (250 µm).



Bei der Galvanoformung in Kunststoffmikrostrukturen mit kleinen lateralen Abmessungen ( $\leq 100 \mu\text{m}$ ) und einem Aspektverhältnis von  $\geq 10$  startet die galvanische Metallabscheidung im Strukturgrund nicht. Bei galvanisch abgeschiedenen Nickelschichten  $\geq 250 \mu\text{m}$  ist eine Metallisierung der Seitenwände und eine deutliche Durchbiegung der PMMA-Substrate nach der Galvanoformung zu erkennen. Clusterschichten, die sich an den Strukturstirnflächen befinden, lösen sich zum Teil schon vor der Galvanoformung beim Temperaturengleich der PMMA-Form mit dem Nিকেlelektrolyten ab. Die lokal schlechtere Haftung der Schichten an der Strukturoberseite ist Folge der bei der Clusterbeschichtung entstehenden Raumladung an der Stirnfläche der Kunststoffstrukturen, die nur schlecht abfließt. Die Metallisierung der Seitenwände wird auf den nicht ganz senkrechten Aufprall der Metallcluster bei der Beschichtung sowie die leicht angeschrägten Seitenwände der verwendeten Kunststoffformen (Winkel  $< 5^\circ$ ) zurückgeführt. Deshalb wird eine weitere Modifizierung des Beschichtungsverfahrens angestrebt. Die Galvanoformung in clustermetallisierte mikrostrukturierte Kunststoffformen befindet sich derzeit in einer ausführlichen Erprobungsphase. Nach der Optimierung bisher noch kritischer Parameter sollte über diesen Weg eine Verfahrenskombination zur Verfügung stehen, die die Herstellung von zusammenhängenden Bauteilen auch mit hohen Aspektverhältnissen ermöglicht. Für den Einsatz in der Fertigung muss jedoch die Clustertechnologie in ein einfaches industrietaugliches Verfahren überführt werden.

### Galvanoformung in Kunststoffformen aus dem Einlegespritzgießen

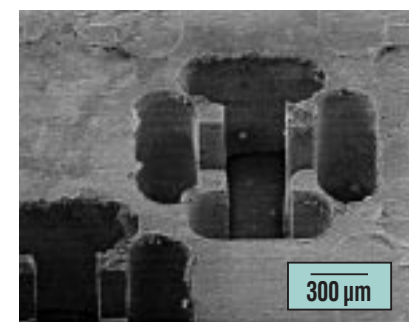
Allseitig leitfähige Kunststoffteile erlauben zwar eine präzise galvanische Auffüllung von Mikrostrukturen, bei Aspektverhältnissen größer 5 wachsen aber enge Mikrostrukturen als Folge der dichteren elektrischen Feldlinienverteilung bevorzugt an den Kanten zu, bevor die Kavitäten dieser Strukturen vollständig gefüllt sind. Deshalb wurden am FZK Kunststoffformen durch Einlegespritzgießen hergestellt, welche prinzipiell eine gerichtete, vollständige Galvanoformung von der Substratoberfläche aus gestatten (Abb. 7). Dabei ist eine Anpassung der maximalen Startstromdichte an die unterschiedliche Leitfähigkeit der Substratoberflächen notwendig, da diese deutlich unter der auf metallischen bzw. metallisierten Schichten liegt. So beträgt der Oberflächenwiderstand bei mit Kohlefasern gefülltem Polyamid PA um  $10^2 \text{ Ohm}$ , bei Polyetheretherketon PEEK sogar um  $10^3 \text{ Ohm}$ . Solche niedrigen Leitfähigkeiten werden durch die nicht homogene Verteilung der Kohlenstofffasern, wie im Beispiel PEEK, verursacht und bedingen bei nicht angepasster Startstromdichte eine unvollständige Abformung. Eine reduzierte Startstromdichte von  $0,1 \text{ A/dm}^2$  bewirkt bei den PA-Typen eine gleichmäßige Beschichtung (Abb. 8). Die Keimbildung an den Fasern führt auch bei kompakten Schichten zu einer körnigen Oberflächenstruktur. Fasern an der Oberfläche werden im Metallniederschlag

eingebaut und beim Auflösen der Kunststoffformen nicht entfernt.

Die Nickel-Galvanoformung in den verlorenen Kunststoffformen, die durch Einlegespritzgießen mit isolierenden, 1 mm hohen POM-Mikrostrukturen gefertigt wurden, erfolgte bis zur vollständigen Auffüllung. Spalte mit  $25 \mu\text{m}$  Breite bedeuten  $\text{AV} = 40$  bei 1 mm Strukturhöhe (Abb. 8). Auch kleinere Strukturen, die bei der Herstellung des Einlegeteiles zustande kommen, werden bei der Galvanoformung



**Abb. 7: Gleichmäßige Nickel-Galvanoformung (Dicke  $48 \mu\text{m}$ ) auf PA12, mit Leitruß gefüllt. Die Kunststoffmikrostrukturen aus isolierendem POM weisen eine Strukturbreite von ca.  $280 \mu\text{m}$  auf.**



**Abb. 8: REM-Aufnahme einer galvanisierten Mikrostruktur aus Nickel. Minimale Stegbreite in Metall  $30 \mu\text{m}$ ; Grabenbreite ca.  $280 \mu\text{m}$ , Grabentiefe  $1000 \mu\text{m}$ .**

präzise in Nickel abgebildet. Die galvanische Abscheidung auf leitfähigen Kunststoffen ist stark abhängig von den verwendeten Füllstoffen, deren Struktur und Mengenanteil in den Formen. Daher wird zur Zeit das Abscheideverhalten verschiedener Kunststoffformen zu Beginn der Metallabscheidung (bis 12 µm Schichtdicke) untersucht, um die optimalen Startparameter und die Qualität des weiteren Auffüllverhaltens bis hin zur Formeinsatzschichtdicke (5-6 mm) zu ermitteln.

### Vergleich der Formgebungsverfahren für Mikroteile aus Metall

Zur Herstellung von gewöhnlichen Metallteilen können in Verbindung mit Formen oder Modellen aus organischen Werkstoffen beispielsweise die Galvanoformung oder die Gießtechnik eingesetzt werden. Vergleichbares wird auch für die Mikrotechnik entwickelt. Mit der Galvanoformung steht ein hochpräzises Abformverfahren für die Herstellung von Mikroteilen aus reinen Metal-

len Ni, Cu, Au oder einfachen, meist binären Legierungen NiCo, NiFe zur Verfügung. Mit der Entwicklung des Verfahrens Mikroguss soll die große Palette der schmelzbaren Metalllegierungen für die Mikrotechnik erschlossen werden.

In den Tabellen 2 bis 4 ist zusammenfassend sowohl ein einfacher Vergleich für die beiden Mikrofertigungstechniken, die verlorene Kunststoffformen verwenden, als auch für die mit diesen Verfahren herstellbaren metallischen Mikro-

Kunststoffform	Galvanoformung		Mikroguss
	isolierend + beschichtet	partiell leitfähig	isolierend
Stückzahl	mittel bis groß	mittel bis groß	klein bis mittel
Abbildungsgenauigkeit	Submikrometer	Submikrometer	einige Mikrometer
Automatisierbarkeit	gut erreicht	erreichbar	gering
Zykluszeit	groß	mittel bis groß	(Einzelfertigung)
Geometriefreiheitsgrad	gering	mittel	groß

Tab. 2: Vergleich der Fertigungsverfahren für Mikroteile aus Metall unter Einsatz spritzgegossener Kunststoffformen.

Kunststoffform	Galvanoformung		Mikroguss
	isolierend + beschichtet	partiell leitfähig	isolierend
min. Strukturbreite	10 µm	10 µm	20 µm
max. Strukturhöhe	1 mm	1 mm	> 120 µm
max. Aspektverhältnis	5 (10)	40	ca. 60
Rautiefe $R_t / R_z^*$	0,3 µm	0,3 µm	< 5 µm
Mittenrauwert $R_a^*$	0,1 µm	0,1 µm	< 0,8 µm
vereinzelte Mikrobauteile	bedingt	ja	ja

Tab. 3: Vergleich der geometrischen Bauteileigenschaften von Metallmikrostrukturen (\*abhängig von Kunststoffart und Qualität des Formeinsatzes beim Spritzgießen).

	Galvanoformung	Mikroguss
Werkstoff	Nickel	Gold-Legierung
Dichte	8,9 (makro)	13,9 (makro)
Korngröße	2-10 µm (mikro)	20-50 µm (mikro)
Biegefestigkeit		R <sub>m</sub> = 890 MPa (makro)
Zugfestigkeit		R <sub>m</sub> = 624 MPa (mikro) R <sub>p0,2</sub> = 450 MPa (mikro)
Härte	~ 250 HV (makro)	275 HV5 (makro) 270-350 HV 0,025
Bruchdehnung	10-35 % (makro)	6 % (makro)

Tab. 4: Vergleich der bauteilspezifischen Werkstoffeigenschaften, ermittelt an Millimeter- („makro“) und Mikroprobekörpern („mikro“: 200 x 200 µm<sup>2</sup>).

bauteile in Hinblick auf den derzeitigen Entwicklungsstand aufgeführt.

### Danksagung

Für die Mitarbeit an der Realisierung der vorgestellten Arbeiten und die Diskussion der Ergebnisse danken die Autoren allen betei-

ligten Kollegen, besonders den Herren Prof. H. Haberland (FMF), O. Rusu (FMF), Dr. K. Bade (IMT) sowie B. Kloppe, J. Lorenz, K. Müller, C. Nold und Dr. E. Oskotski (alle IMF III). Für die Förderung der Arbeiten bedanken wir uns bei der FZK-Programmleitung MIKRO sowie der DFG (Sonderforschungsbereich SFB 499, Mikro-

Urformen, in Kooperation mit der Universität Karlsruhe, und Schwerpunktprogramm SPP 1012, Mikro-mechanische Produktionstechnik).

### Literatur

- [1] J. Fahrenberg, *Galvanotechnik*, 90 (1999) S. 1107-1109
- [2] <http://www.fzk.de/pmt/>
- [3] R. Ruprecht, T. Gietzelt, M. Guttman, T. Hanemann, M. Hecke, K. Müller, V. Piotter, *FZKA-Bericht 6423*, Forschungszentrum Karlsruhe, (März 2000), S. 31-36.
- [4] H. Dittrich, T. Hanemann, M. Hecke, K. Müller, V. Piotter, R. Ruprecht, M. Worgull, *in dieser Ausgabe der Nachrichten*.
- [5] A. Both, W. Becker, M. Hecke, R. Ruprecht, *FZKA-Bericht 5071*, Forschungszentrum Karlsruhe (1995).
- [6] T. Schaller, L. Bohn, D. Scherhauser, K. Schubert, *ASPE 13th Annual Meeting, 1998 Proceedings Vol. 18 (1998)*, S. 108-111
- [7] W. Bacher, K. Bade, B. Matthis, M. Saumer, R. Schwarz, *Microsystems Technologies*, 4 (1998), S. 117-119
- [8] W. Pflöging, V. Piotter, T. Hanemann, *Proc. European Conference on Laser Treatment on Materials, Hannover (1998)*
- [9] J. Mohr, J. Göttert, A. Müller, P. Ruther, K. Wengeling, *SPIE vol.3008 (1997) S. 273-278*
- [10] H. Lorenz, *SKZ-Tagung, Würzburg, 21. + 22.09.2000, Beitrag 6 im Tagungsband*
- [11] H. Weule, J. Schmidt, J. Elsner, V. Hüntrup, H. Tritschler, *Proc. HARMST Conference (2001), will be published in J. Microsystem Technologies*
- [12] V. Piotter, J. Haußelt, J. Konys, R. Ruprecht, *Proc. MICRO System Technologies '96, Potsdam (1996), S.193-198*
- [13] R. Ruprecht, T. Benzler, J. Konys, K. Müller, V. Piotter, A. Thies, H. Wöllmer, J. Haußelt, *Jahrbuch Oberflächentechnik 1998; Band 54; Hüthig Verlag Heidelberg (1998), S. 83-92*
- [14] R. Ruprecht, V. Piotter, *Jahrbuch Oberflächentechnik 1999; Band 55; Hüthig Verlag Heidelberg (1999), S. 95-108*

- 
- [15] G. Baumeister, S. Rath, R. Ruprecht, J. Haußelt, in <http://www.materialsweek.org>
- [16] H. Wöllmer, *Dissertation Uni Freiburg (1999)*
- [17] M. Guttman, K. Bade, J. Fahrenberg, M. Kautt, *Interner Bericht, Forschungszentrum Karlsruhe, (Februar 2000)*
- [18] G. Schanz, E. Walch, M. Guttman, C. Nold, J. Konys, *Interner Bericht, Forschungszentrum Karlsruhe, (April 2001)*
- [19] A. Thies, V. Piötter, J. H. Hausselt, O. F. Hagena, *Microsystem Technology, 4 (1998), S. 110-112*
- [20] H. Haberland, M. Moseler, Y. Qiang, O. Rattunde, T. Reiners, Y. Thurner, *Surf. Rev. Let. 3 (1996), S. 887-890*
- [21] G. Kleer, E. Schäffer, M. Bodmann, J. Kraft, Y. Qiang, H. Haberland, *Mat.-wiss. und Werkstofftechnik, 29 (1998) S. 545-554.*
- [22] K. Bade, *Galvanotechnik, 90 (1999), S. 801-808*
- [23] K. Bade, M. Guttman, *Jahrbuch Oberflächentechnik (Hrsg. A. Zielonka), Giesel-Verlag, Isernhagen, Band 57 (2001), S. 103-120*
- [24] M. Guttman, E. Walch, G. Schanz, J. Konys, *Teil 1: Metalloberfläche 54, Heft 11 (2000), S. 16-28, Teil 2: Metalloberfläche 55, Heft 1 (2001), S. 34-36*
- [25] K. Bade, A. Fath, W. Leskopf, *Metalloberfläche 53, Heft 9 (1999), S. 34-38*
- [26] R. Knitter, D. Göhring, P. Risthaus, *in dieser Ausgabe der Nachrichten*