

GALVANOFORMUNG ALS BAUSTEIN FÜR DIE (SERIEN-)FERTIGUNG VON MIKROSTRUKTURIERTEN WERKZEUGEN UND METALLISCHEN MIKROBAUTEILEN

**Markus Guttman, Klaus Bade, Konradin Kaiser, Pascal Meyer, Barbara Matthis,
Christian Mehne und Markus Wissmann**

**Forschungszentrum Karlsruhe GmbH, Institut für Mikrostrukturtechnik (IMT)
PF 3640, D-76021 Karlsruhe**

Tel.: 07247 / 823850; E-Mail: markus.guttman@imt.fzk.de

1. Einleitung

Die Mikrosystemtechnik stellt eine Vielzahl von Fertigungstechnologien zur Verfügung, mit denen vorhandene Produkte verbessert oder neue Produkte ermöglicht werden. Mit zweistelligen Zuwachsraten erobern die Produkte der Mikrosystemtechnik neue Märkte in vielen Branchen wie Informationstechnologie, Life Science, Fahrzeug- und Energietechnik, Maschinenbau, physikalische und chemische Verfahrenstechnik u. a.. Bis heute tragen zwar nur wenige Produkte, überwiegend in den Bereichen IT-Peripherie, Telekommunikation, Fahrzeugtechnik sowie Bio- und Medizintechnik, zum Großteil des Jahresumsatzes von über 50 Mrd. US \$ bei, eine Vielzahl weiterer Produkte hat jedoch bereits den Markteintritt erfolgreich geschafft. Diese Produkte beruhen überwiegend auf Produktionsverfahren zur Herstellung von Mikrokomponenten aus Silizium oder aus Kunststoffen.

Einige Anforderungen beispielsweise aus den Bereichen Kleinstgetriebe, Chemie, Telekommunikation und Biologie erfordern jedoch hoch belastbare Mikrokomponenten aus verschiedenen Metallen oder Legierungen. Aus der Feinwerktechnik ist das Potential dieser Werkstoffe sehr wohl bekannt, wenn Anwendungen im Fokus stehen, bei denen Anforderungen in Bezug auf Kräfte, Momente, Verschleiß, Korrosion oder hohe Temperaturen im Vordergrund stehen oder geringe thermische Ausdehnung, Sterilisierbarkeit oder Biokompatibilität gefragt sind. Jedoch bedarf es auch heute noch der Weiterentwicklung der Fertigungsverfahren, um Metalle und Legierungen auch für die Dimensionen der Mikrosystemtechnik zu erschließen.

Da sich der fertigungstechnische Aufwand für Mikrokomponenten häufig nur bei mittleren und sehr großen Stückzahlen lohnt, werden in der Mikrosystemtechnik meist typische Massenfertigungsverfahren benötigt. Die Mikrogalvanoformung stellt in Kombination mit lithographischen Verfahren ein solches Fertigungsverfahren dar, mit dem insbesondere (komplex geformte) Mikrobauteile aus Metall in großen Stückzahlen und mikrostrukturierte Werkzeuge (Formeinsätze) zum Einsatz für die Serienfertigung von Mikrobauteilen aus Kunststoff oder Keramik mittels Spritzgießen oder Heißprägen erfolgreich gefertigt werden.

Der Beitrag zeigt beispielhaft den Einsatz der Mikrogalvanoformung bei der Herstellung von Abformwerkzeugen und von Mikrobauteilen aus Metall von der Prototypenfertigung bis zum Potential für die Serie an Hand einiger am Institut für Mikrostrukturtechnik gefertigten Produkte auf.

2. Fertigung von mikrostrukturierten Werkzeugen

2.1 LIGA-Verfahren

Neben den klassischen formgebenden Methoden, wie zerspanender Mikrofertigung, elektrochemischer Verfahren oder Laserablation, wird für die Herstellung von Formeinsätzen mit besonders anspruchsvollen Strukturdetails und höchsten Anforderungen an die Seitenwandrauigkeit und das Aspektverhältnis vorrangig die Kombination aus Röntgenlithographie und Galvanoformung (LIGA-Verfahren) eingesetzt [1, 2].

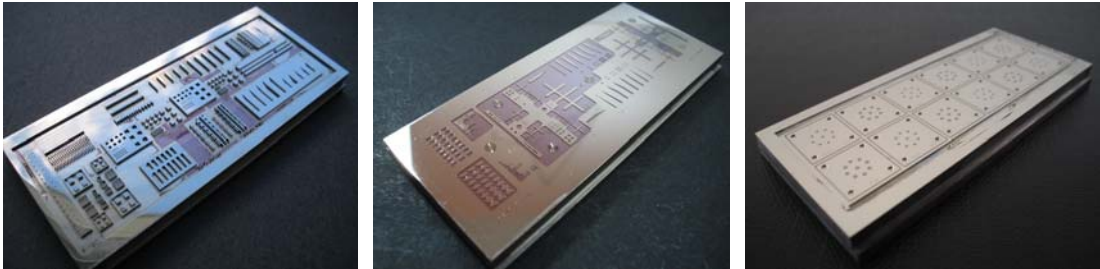


Abb. 1: LIGA-Formeinsätze mit unterschiedlichen Layouts: mikrostrukturierte Fläche ca. 20 x 60 mm²

Bei dem LIGA-Verfahren (die Abkürzung steht für **L**ithographie, **G**alvanoformung, **A**bformung = LIGA), wird für die Fertigung der Formeinsätze (Abb. 1) zunächst auf einer hochpräzisen beschichteten Substratplatte mit vorbehandelter Oberfläche ein Kunststoffplättchen (= Resist) justiert aufgeklebt und anschließend auf eine Dicke entsprechend der gewünschten Tiefe der Mikrokavitäten poliert.

Mittels Bestrahlung mit Synchrotronstrahlung wird die zweidimensionale Geometrie einer Arbeitsmaske über Schattenwurf in den Resist übertragen. Während der anschließenden nasschemischen Entwicklung werden die bestrahlten Bereiche des Resists aufgelöst. Nach dem möglichen Aufbringen einer partiellen oder vollflächigen Metallisierung erfolgt die Übertragung der Kunststoffstruktur in ein Metall (in der Regel in Nickel) über die Galvanoformung. (Ausführliche Details zur Nickelgalvanoformung mittels Sulfamatprozess am IMT können in [2, 3] und der dort zitierten Literatur nachgelesen werden.) Die Galvanoformung wird beendet, wenn die abgeschiedene Nickelschicht eine Dicke von ca. 6 mm erreicht hat. Daran anschließend erfolgt über Drahterodieren die äußere Formgebung des Formeinsatzes und die Trennung der Substratplatte (s. Abb. 2).

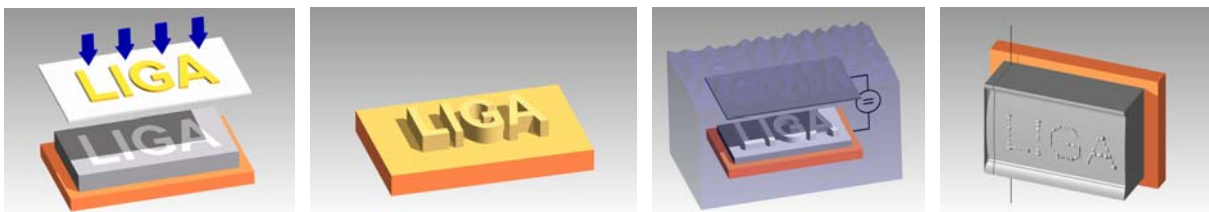


Abb. 2: Schematische Darstellung der Formeinsatzfertigung mittels des LIGA-Verfahrens
(Prozessschritte: Resiststrukturierung, Metallisierung, Galvanoformung und Erodieren)

Durch die Nachbearbeitungsschritte wie Polieren der Formeinsatzstirnfläche, dem Entfernen des Resists und dem Reinigen wird der Formeinsatz und dabei insbesondere dessen anspruchsvolle Strukturkavitäten und die Oberfläche in den Auslieferungszustand überführt. Zum Abschluss der Fertigung, die derzeit ca. 65 Fertigungsschritte umfasst, wird das Werkzeug in Hinblick auf die vorgegebenen Spezifikationen (Außenmaße, Rauheit, Härte, Ebenheit, Strukturtiefe, etc.) endgeprüft. Eine ausführliche Beschreibung des Fertigungsprozesses ist in [2] enthalten.

Die Formeinsätze, die u. a. als Spritzgießwerkzeuge für die Herstellung von Mikrospektrometern bei der Fa. Boehringer Ingelheim microParts GmbH [17] sowie für Untersuchungen zum Mikropulverspritzgießen im Forschungsprojekt SFB499 eingesetzt werden, unterliegen sehr hohen Anforderungen bezüglich der Materialeigenschaften, der Oberflächenbeschaffenheit bzw. der lateralen Struktur- und Außenmaße [1, 4].

Unter Einsatz des LIGA-Verfahrens galvanisch hergestellte Formeinsätze aus Nickel zeichnen sich durch nahezu senkrechte Seitenwände, eine sehr gute Seitenwandqualität mit geringer Rauheit, einer exakten Detailgenauigkeit (Strukturtreue) sowie durch eine hohe Standzeit beim Kunststoffspritzgießen aus. Ergebnisse aus Verschleißuntersuchungen zeigen eine weitere Stärke der LIGA-Formeinsätze aus Nickel gegenüber typischen gehärteten Werkzeugstählen.

2.2 Alternative Fertigungsverfahren

Bei dem o.g. Fertigungsprozess stellen die eingesetzten Lithographieverfahren (Röntgentiefenlithographie oder auch UV-Lithographie) oftmals eine Beschränkung in Bezug auf die Dimensionalität der zu realisierenden Mikrostrukturen und auf die maximale Größe strukturierbaren Fläche auf dem Werkzeug dar.

Am IMT werden deshalb in Zusammenarbeit mit externen Partnern alternative Verfahren erprobt, bei denen aus Kunststoff-Mikrobauteilen durch galvanische Replikation mikrostrukturierte Abformwerkzeuge aus Nickel gefertigt werden. Bei diesen Verfahren kommen als verlorene Formen Mikrobauteile zum Einsatz, die entweder durch Kunststoffabformung eines LIGA-Urformeinsatzes oder als direktlithographisch erzeugte Strukturen hergestellt wurden. Interessant ist diese Technik deswegen, da auch Mikrostrukturen mit Hinterschnitten wie sie bestimmte Lithographie-Verfahren liefern, umkopiert werden können.

Ausgangspunkt der Fertigung von Formeinsätzen waren zunächst Mikrobauteile aus Kunststoff (PMMA) mit optisch relevanten Strukturelementen (sphärische bzw. zylindrische Linsen sowie Mikroprismen), die an der Universität Brüssel mittels Protonenlithographie hergestellt wurden [5].

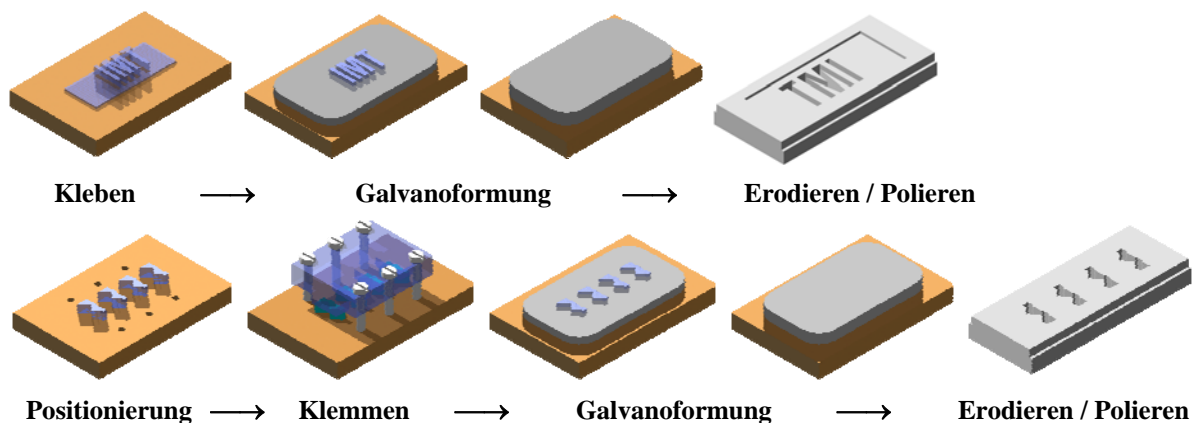


Abb. 3: Schematische Darstellung der Klebe- und der Klemmtechnik bei der Formeinsatz-Fertigung

Die Abfolge der Formeinsatz-Fertigung ist schematisch in Abb. 3 wiedergegeben und ausführlich in [6-8] beschrieben. Zunächst werden die Kunststoff-Mikrobauteile auf einem speziellen Kupfer-Substrat fixiert, wobei hierfür zum einen eine Klebtechnik und zum anderen eine Klemmtechnik angewendet werden kann. Anschließend wird mittels PVD-Verfahren vollflächig oder partiell eine leitfähige Galvanikstartschicht (10 nm Chrom / 50 nm Gold) aufgebracht, nachfolgend die Strukturen mittels Standard-Nickelgalvanoformung galvanisch

repliziert und der Formeinsatz über mechanische Verfahren (Erodieren und Polieren) endgefertigt.

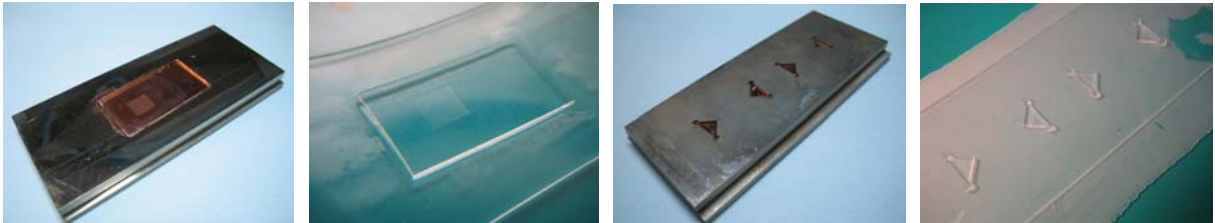


Abb. 4: Formeinsatz für sphärische Linsen (Klebeteknik) und Abformteil (links) sowie Formeinsatz für Mikro-Prismen (Klemmtechnik) und Abformteil (rechts)

Die rasterelektronenmikroskopischen Untersuchungen an den Formeinsätzen und an den Abformteilen haben gezeigt (Abb. 4), dass bei den mittels Klebeteknik und mittels Klemmtechnik erzeugten Werkzeugen alle Strukturdetails fehlerfrei in den Formeinsätzen wiedergegeben werden. Durch die Nickel-Galvanoformung werden Original-Bauteile bzw. verlorene Formen nahezu identisch kopiert. Somit werden auch Strukturfehler im Bauteil z.B. Löcher, raue Flächen oder gebrochene Kanten in den Formeinsatz kopiert. Diese Fehler können dann z.B. als Hinterschneidungen auftreten, die das Abformen bzw. Entformen beim Heißprägen oder Spritzguss behindern oder das abgeformte Bauteil beschädigen [7].

Für die Fertigung von Abformwerkzeugen für fluidische Anwendungen kam eine abweichende, in Bezug auf die Galvanoformung jedoch sehr anspruchsvolle Variante der Klebeteknik zum Einsatz. Als verlorene Formen wurden Kunststoffbauteile aus COC (bestehend aus 24 fluidischen Strukturelementen) verwendet, welche über das Heißprägen mit einem mikromechanisch erzeugten Urformeinsatz hergestellt wurden. Gegenstand der Arbeiten war zunächst die Erprobung des galvanischen Umkopierens eines einzelnen Bauteils, um anschließend über die Kopie einer Vielzahl von aneinander gesetzten Bauteile einen gegenüber dem Urformeinsatz deutlich großformatigeren Formeinsatz (mit 384 Strukturelemente) erzeugen zu können [6, 9].

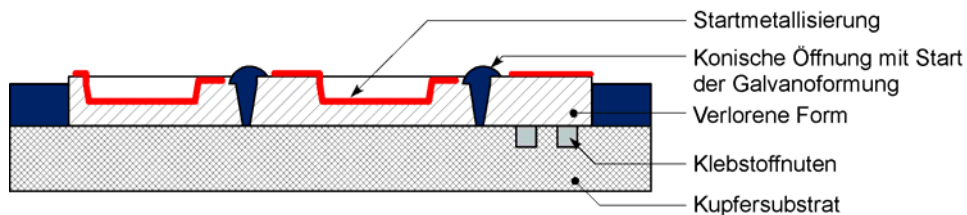


Abb. 5: Schnittdarstellung eines aufgeklebten Arrays mit fluidischen Strukturen zu Beginn der Galvanoformung

Die besondere Schwierigkeit liegt dabei in der Galvanoformung der Düsen, die ein hohes Aspektverhältnis besitzen. Diese müssen zunächst vollständig mit Nickel aufgefüllt sein, bevor die restlichen Strukturelemente galvanisch abgeformt werden können (Abb. 5). Das erfordert zum einen eine besondere Klebeteknik, um eine Galvanoformung der Düsen von der Unterseite her zu ermöglichen, zum anderen muss die für das Überwachsen der Strukturoberseite erforderliche Metallisierung ein besonderes Layout besitzen und justiert aufgebracht werden.

Wie in Abb. 6 gezeigt, konnte eine nahezu fehlerfreie galvanische Replikation der mikrofluidischen Struktur für vier Strukturfelder (= 96 Strukturelemente) erreicht werden [10]. Die Übertragung der Prozesskette auf das Mikrotiteplattenformat wird derzeit angestrebt.

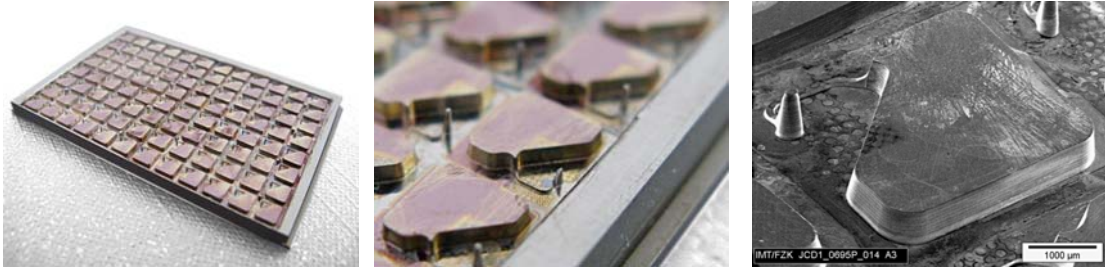


Abb. 6: Galvanisch erzeugter Formeinsatz mit fluidischen Strukturen (unterschiedliche Vergrößerungen)

3. Fertigung von vereinzelt Mikrobauteilen

Durch die Optimierung von einzelnen Fertigungsschritten und die Übertragung auf eine halb- oder vollautomatische Fertigungsabfolge ist es inzwischen möglich, unter Einsatz der bereits in Kap. 2 genannten Verfahrenskombination aus Röntgenlithographie und Galvanoformung metallische Mikrobauteile in größeren Stückzahlen und in unterschiedlichen Materialien zu fertigen. Das Hauptanwendungsgebiet liegt dabei vor allem in der Fertigung von Komponenten für mechanische Uhren und Getriebe. Bedingt durch den mechanischen Kontakt sind Materialien mit geringer Verformung unter Belastung, d.h. höherer Festigkeit von Interesse [11].

Die Fertigungsabfolge ist zunächst nahezu identisch, nur das hier mit Silizium-Substraten gearbeitet wird, die an der Oberseite eine leitfähige Galvanikstartsicht (Ti/TiO_x) aufweisen. Die Resistvorbehandlung und –strukturierung erfolgt wie bei den Formeinsätzen. Eine Metallisierung der Resiststrukturen wird nicht benötigt, so dass mittels Galvanoformung die Strukturkavitäten vom Grund aus galvanisch aufgefüllt werden können. Nach Ende der Galvanoformung wird in der Regel eine Nachbearbeitung (Planarisierung durch Schleifen und/oder Polieren) zum Einstellen der Endhöhe, die Entfernung des Resistmaterials sowie die Vereinzelung der Mikrostrukturen vorgenommen (Abb. 7 und 8).



Abb. 7: Mikrobauteile aus Hartnickel für die Uhrenindustrie (unterschiedliche Vergrößerungen; Bauteile noch auf dem 4-Zoll-Wafer fixiert)

Innerhalb der Fertigungskette treten eine Reihe von Schnittstellen auf, die für eine effiziente und sichere Fertigung wesentlich sind. Durch die gesamte Kette zieht sich die Substratform und –größe und die Lage und Anordnung des Layoutfeldes. Die Schnittstelle Resiststruktur – Mikrogalvanik (Haftung, Quellen, Ausbluten, Strippen) ist von entscheidender Bedeutung für den Erfolg des Prozesses. An dieser Stelle wird die Form des Mikrobauteils bestimmt.

Durch die Möglichkeiten der Mikrogalvanoformung können die Mikrobauteile inzwischen nicht nur in Nickel, sondern auch in dekorativen (wie z.B. Gold und Goldlegierungen) und anwendungsorientierten Materialien (wie z.B. Nickellegierungen NiFe, NiCo, NiW, NiP) hergestellt werden [12, 13]. Dadurch können die Anforderungen der Mikrobauteile in Bezug auf ihre mechanischen Eigenschaften (Härte, Temperaturstabilität, Duktilität oder Verschleiß), die Korrosionsstabilität und das Aussehen erreicht werden. Die Herausforderung liegt dabei vor allem im Abscheiden von Legierungen mit Dicken bis in den mm-Bereich. Dabei dürfen keine Risse auftreten und die Verformungen aufgrund von Eigenspannungen müssen innerhalb der vorgegebenen Maß- und Formtoleranzen (meist im unteren μm -Bereich) bleiben.

Hieraus resultiert im Bereich der Mikrogalvanoformung die Notwendigkeit einer Vielzahl an Optimierungsarbeiten, da einerseits die kommerziellen Verfahren und Elektrolyte aus der Makrogalvanik nicht direkt in die Mikrogalvanik übertragen werden können und andererseits die notwendigen Betriebsmittel und Anlagentechnik bisher nicht zur Verfügung steht. So wurden am IMT für einige Metalle und Legierungen Elektrolytzusammensetzung, Abscheidparameter (Stromdichte, Temperatur, pH-Wert) und Einflüsse der unterschiedlichen Layouts untersucht und entsprechend den gestellten Anforderungen angepasst [14, 15]. Unabhängig davon wurde das Equipment zur Aufnahme der unterschiedlichen Substrate in den vorhandenen Galvanikanlagen überarbeitet und optimiert. [16].



Abb. 8: Vereinzelte Mikrobauteile aus verschiedenen Materialien

4. Ausblick

Mit der Verfahrenskombination aus Röntgenlithographie und Galvanoformung ist bisher eine Fläche von $60 \times 20 \text{ mm}^2$ strukturierbar, wodurch auf einem 4-Zoll-Wafer bis zu 50 Mikrobauteile in Strukturhöhen zwischen 150 und $1500 \mu\text{m}$ gefertigt werden können. Die derzeit laufenden F&E-Arbeiten sind darauf fokussiert, die Strukturfläche zu vergrößern und gleichzeitig durch Aufbau und Inbetriebnahme der Fertigungslinie FELIG den Durchsatz deutlich zu erhöhen. Weiterhin wird in Zusammenarbeit mit einem externen Partner eine modular aufgebaute Galvanikeinheit erprobt, die ein neuartiges Konzept der Mikrogalvanoformung ermöglicht.

Durch die bisherigen umfangreichen F&E-Aktivitäten wurde das Prozessverständnis in der Fertigungskette vertieft. Prozessgrenzen sind erarbeitet und werden auch besser verstanden. Damit ergibt sich auch ein Potential für Erweiterungen. Einige Fragestellungen werden weiter bearbeitet: z.B. die Nacharbeit nach der Galvanoformung, das Erreichen höherer Abscheiderraten oder die Abscheidung bei Raumtemperatur. Die Galvanoformung wird bei der Erzeugung metallischer Mikrokomponenten auch weiterhin eine zentrale Rolle spielen.

Danksagung

Die Autoren danken den Mitarbeitern der beteiligten Funktionsbereiche des IMT für die Durchführung einer Vielzahl von Arbeiten sowie den Kollegen der extern beteiligten Forschungseinrichtungen und Firmen für die gute Zusammenarbeit.

Literatur

- [1] J. Schulz, K. Bade, M. Guttman, L. Hahn, A. Janssen, U. Köhler, P. Meyer, F. Winkler: „Ensuring repeatability in LIGA mold insert fabrication“, *Microsystem Technologies*, 10 (2004) 419-422.
- [2] M. Guttman, J. Schulz, V. Saile: „Lithographic Fabrication of Mold Inserts“ in „Advanced Micro and Nanosystems“, Vol. 3, *Microengineering of Metals and Ceramics*, edited by H. Baltes, O. Brand, G.K. Fedder, C. Hierold, J.G. Korvink, O. Tabata, Wiley-VCH Verlag GmbH & Co. KGaA, Weinheim, (2005) 187-219.
- [3] G. Schanz, K. Bade: „Microelectroforming of metals“ in „Advanced Micro and Nanosystems“, Vol. 4, *Microengineering of Metals and Ceramics*, edited by H. Baltes, O. Brand, G.K. Fedder, C. Hierold, J.G. Korvink, O. Tabata, Wiley-VCH Verlag GmbH & Co. KGaA, Weinheim, (2005) 395-420.

- [4] F. Winkler, M. Guttman, R. Laier: „*Ultraschallunterstützte Reinigung von mikrostrukturierten Abformwerkzeugen*“, Galvanotechnik, 97 (2006) 3034-3045.
- [5] B. Volckaerts, H. Ottevaere, P. Vynck, C. Debaes, P. Tuteleers, A. Hermanne, I. Veretennicoff, H. Thienpont: „*Deep lithography with protons: A generic fabrication technology for refractive micro-optical components and modules*“, Asian J. Phys. 10 (2001) 195-214.
- [6] M. Guttman, C. Mehne, M. Wissmann, M. Hartmann, M. Hecke: „*Galvanische Replikation von Kunststoff-Mikrostrukturen als alternatives Verfahren für die Fertigung von Abformwerkzeugen*“, Galvanotechnik, 97 (2006) 2530-2536.
- [7] M. Wissmann, M. Guttman, M. Hartmann, S. Manegold, B. Matthis, M. Hecke: „*Fertigung von Formeinsätzen über die galvanische Replikation von polymeren Mikrobauteilen*“, in: „Technologien und Werkstoffe der Mikro- und Nanosystemtechnik“, GMM-Fachbericht Nr. 53, VDE Verlag GmbH, Berlin und Offenbach, ISBN 978-3-8007-3033-9, (2007) 49-55.
- [8] M. Wissmann, M. Guttman, M. Hartmann, J. Mohr, S. Wilson, C.-J. Moran-Iglesias, J. Van Erps, R. Krajewski, O. Parriaux, S. Tonchev: „*Replication of micro-optical components and nano-structures for mass production*“, Proc. SPIE, Vol. 6992 (2008) 699208.
- [9] C. Mehne: „*Großformatige Abformung mikrostrukturierter Formeinsätze durch Heißprägen*“, Dissertation; Universität Karlsruhe, Institut für Mikrostrukturtechnik, (Oktober 2007).
- [10] K. Kaiser, M. Guttman, C. Mehne: „*Fertigungsverfahren für großformatige, mikrostrukturierte Formeinsätze*“, Galvanotechnik, 99 (2008) 1518-1527.
- [11] P. Meyer, O. Klein, M. Arendt, V. Saile, J. Schulz: „*Launching into a golden age (3) - gears for micromotors made by LIGA process*“, 11th Annual Internat. Conf. of Micro and Nano Systems (COMS 2006), St. Petersburg, Fla., August 27-31, 2006
- [12] K. Bade, M. Haj-Taieb, A.S.M.A. Haseeb: „*Legierungsabscheidung für LIGA-Mikroteile und Werkzeuge am Beispiel von Ni-Fe und Ni-W*“ in Technologien und Werkstoffe in der Mikro- und Nanosystemtechnik GMM-Fachbericht Nr. 53, VDE Verlag GmbH, Berlin und Offenbach, ISBN 978-3-8007-3033-9, (2007) 67-72.
- [13] N. Dambrowsky, J. Schulz, K. Bade, F. Köster: „*Mikrogalvanoformung von Goldbauteilen für mechanische Applikationen*“, Galvanotechnik, 97 (2006) 188-92.
- [14] N. Dambrowsky: „*Goldgalvanik in der Mikrosystemtechnik – Herausforderungen durch neue Anwendungen*“, Dissertation; Universität Karlsruhe, Institut für Mikrostrukturtechnik, (April 2007).
- [15] F. Winkler, L. Becker, M. Guttman: „*Galvanisch-Nickel-Phosphor – alternatives Material zur Beschichtung von Bauteilen oder zum Einsatz in der Mikrosystemtechnik*“ – Teil III: Ringversuch zur Abscheidung von galvanisch-Nickel-Phosphor in Mikrostrukturen, Galvanotechnik, 96 (2005) 2224-2235
- [16] M. Guttman, K. Bade, B. Matthis, H. Moritz: „*Vereinfachtes Handling von Substraten in der Mikrogalvanoformung und der Ätztechnik*“, Tagungsband VDI/VDE-Mikrosystemtechnik-Kongress 2005, Freiburg, 10.-12. Oktober 2005, S. 573-576.
- [17] Weitere Informationen unter: www.boehringer-ingelheim.de/produkte/mikrosystemtechnik/