

# Wirtschaftliche Herstellung von Mikrozahnrädern durch galvanische Abformung

Dr. Udo Kirsch und Dr.-Ing. Reinhard Degen

Der Wettlauf, in der Technik auf immer kleineren Bauraum möglichst viele Funktionen zu integrieren, erfordert eine Miniaturisierung der Bauteile, die in der Mikroelektronik begonnen hat und immer noch anhält. Dieser Trend setzte sich in der Halbleitertechnik, der Automobiltechnik sowie der Medizin- und Analysetechnik fort. Als auffälligstes Beispiel sei das Mobilfunktelefon genannt, dessen ursprüngliche Hauptfunktion nämlich das Telefonieren durch die vielen Zusatzfunktionen in den Hintergrund getreten ist.

Micromotion GmbH  
An der Fahrt 13  
D-55124 Mainz  
Tel. +49 6131 669 270  
Fax +49 6131 669 27 20  
info@micromotion-gmbh.de  
www.micromotion-gmbh.de

La course, dans la technique, pour intégrer le plus de fonctions possibles dans des espaces toujours plus réduits, exige une miniaturisation des composants, qui a commencé avec la micro-électronique et continue. Cette tendance se poursuit dans la technique des semi-conducteurs, la technique automobile, ainsi que dans les techniques médicale et analytique. L'exemple le plus frappant est le téléphone mobile, dont la principale fonction d'origine, à savoir la téléphonie, se retrouve à l'arrière-plan en raison des nombreuses fonctions additionnelles.

Für die Herstellung solcher kompakten Multifunktionsgeräte werden Bauteile benötigt, die nur wenige Millimeter gross sind. Für diese Mikrobauteile sind deshalb entsprechende Verfahren zu entwickeln und einzusetzen, die eine hohe Qualität der Teile im Mikromassstab gewährleisten können. Deshalb müssen zum Beispiel Standardverfahren, wie Bohren und Fräsen, für die Mikrotechnik herunterskaliert werden. Diese Verfahren stossen jedoch ab einer gewissen Bauteilgrösse an ihre Grenzen. Sobald die Bauteile eine derart filigrane Struktur erreichen, dass sie sich bei der Bearbeitung verbiegen, sind neuartige Technologien einzusetzen.

## Das «Direkt-LIGA»-Verfahren

Zu diesen Technologien gehört zweifellos die LIGA-Technik [1, 2], die in den Achtzigerjahren entstanden ist und seitdem ein wertvolles Werkzeug der Mikrosystemtechnik darstellt. Das Verfahren besteht aus insgesamt drei Verfahrensschritten: Röntgentiefenlithografie, Galvanik und Abformung.

Der erste Prozess ist die Lithografie, bei der mit Hilfe einer so genannten Arbeitsmaske und einer speziellen Form von Röntgenstrahlung durch Schattenprojektion ein beliebiges zweidimensionales Design hochpräzise in einen photoempfindlichen Resist übertragen wird. Danach erfolgt in einem zweiten Schritt die Galvanik, bei der die durch die Lithografie erzeugten Negativstrukturen im Resist nahezu verlustfrei in metallische Bauteile abgeformt werden. In einem anschliessenden Verfahrensschritt können diese metallischen Formen zum Beispiel als Formeinsatzwerkzeuge dienen, womit sich Mikrobau-

teile aus Kunststoff mittels Spritzgiessen herstellen lassen.

Von dieser Technologie wird mittlerweile eine verkürzte Variante zur wirtschaftlichen Produktion von metallischen Mikrostrukturen eingesetzt. Dabei werden nur die beiden ersten Verfahrensschritte Lithografie und Galvanik verwendet, da es hier meistens um die Herstellung von hochpräzisen Mikrobauteilen geht, bei denen ein zusätzlicher Abformungsprozess zu Genauigkeitsverlusten führen würde.

Dieses als «Direkt-LIGA» bezeichnete Verfahren wird von der Micromotion GmbH eingesetzt, um deren Mikrogetriebe herzustellen und damit kundenspezifische Mikroantriebe aufbauen zu können. Das Unternehmen hat sich auf die Herstellung und Entwicklung von Mikroantriebssystemen spezialisiert. Sie folgte damit dem Trend der Miniaturisierung, indem ein gut bekanntes und bewährtes Prinzip eines Präzisionsgetriebes, das so genannte «Harmonic Drive»-Getriebe, mit Hilfe des «Direkt-LIGA»-Verfahrens erfolgreich in



Bild 1: Grössenvergleich des kompletten Einbausatzes eines «Micro Harmonic Drive»-Getriebes mit dem Ziffernblatt einer Armbanduhr

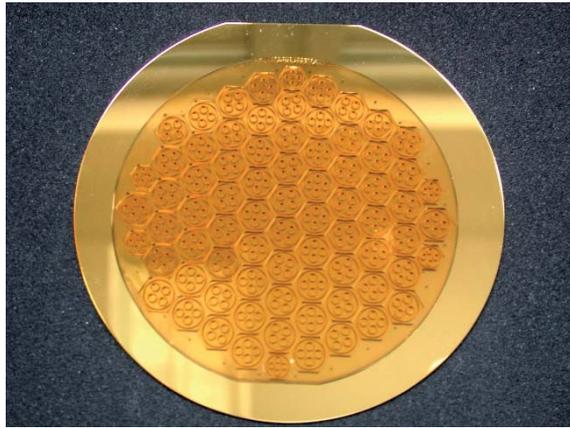


Bild 2: 4"-Silizium-Wafer mit Goldstartschicht und strukturiertem Photoresist

die Mikrotechnik zum «Micro Harmonic Drive»-Getriebe herunterskaliert und weiterentwickelt wurde (Bild 1). Der Lithografieprozess wird dabei von Micromotion extern als Dienstleistung zugekauft. Der fertig strukturierte Resist, der auf einem 4"-Silizium-Wafer mit Startschicht für die Galvanik aufgebracht ist (Bild 2 und 3), wird danach galvanisch als Nickel-Eisen-Legierung mit rund 14% Eisengehalt abgeformt. In Bild 4 ist das «Direkt-LIGA»-Verfahren und die bei Micromotion durchgeführten Verfahrensschritte zur Veranschaulichung als Ablaufplan skizziert.

**Konstruktionsfreiheit in zwei Dimensionen**

Der grosse Vorteil der Galvanoformung gegenüber anderen Bearbeitungstechniken, wie Erodieren oder Lasern, ist nicht nur die Möglichkeit der hochpräzisen Abformung sondern vor allem die grosse Freiheit des Konstrukteurs, in zwei Dimensionen nahezu jede beliebig komplexe Geometrie realisieren zu können. Nur in der dritten Dimension ist die Form etwas eingeschränkt. Dafür wird das Werkstück in den 2½-Dimensionen durch die galvanische Abscheidung hochpräzise abgeformt. Als Beispiel sind in Bild 5 und 6 Mikrozahnräder des «Micro Harmonic Drive»-Getriebe-



Bild 3: 4"-Silizium-Wafer nach der Galvanik mit gefüllten Zahnradstrukturen

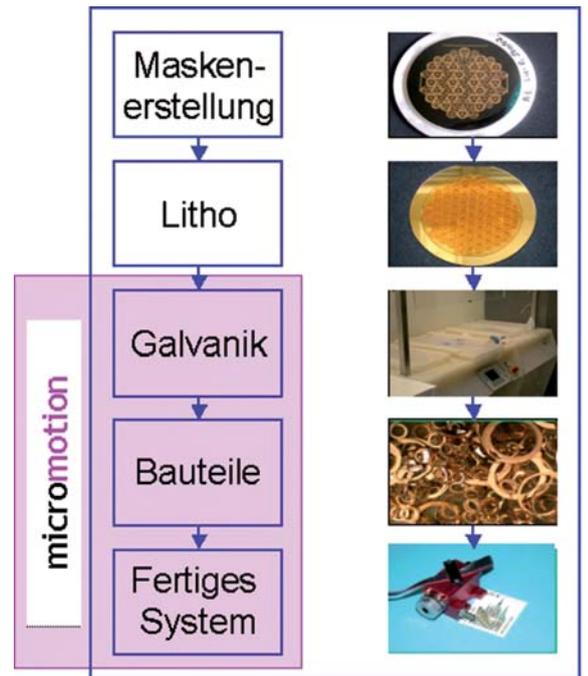


Bild 4: Ablaufplan des «Direkt-LIGA»-Verfahrens und die Schritte, die bei Micromotion durchgeführt werden

bes dargestellt, die sich in dieser Grösse und Komplexität mit herkömmlichen spanenden Techniken nicht herstellen lassen.

In Bild 5 ist ein vollständiges «Micro Harmonic Drive»-Getriebe zu sehen, das einen Durchmesser von kleiner als 10 mm besitzt. Die Bohrung des Sonnenrades im Zentrum des Getriebes hat gerade einmal 2 mm Durchmesser. Die Zahnköpfe des innen und aussen verzahnten Zahnrades, das von den drei Zahnrädern Sonnenrad und den beiden Planetenrädern aufgespannt wird, verlaufen in einem spitzen Winkel, so dass dabei ultrahohe Aspektverhältnisse (Verhältnis von Höhe zu lateralen Abmessungen) von der Galvanik abgeformt werden müssen. Dennoch sind die Zahnflanken sehr glatt und ohne Defekte.

Bild 6 zeigt einen vergrösserten Ausschnitt von Bild 5. Es vermittelt ein Beispiel für die grosse Designfreiheit des Konstrukteurs. Um ein radial federndes Verhalten unabhängig von der Zahnradstärke zu erzielen, wurden Hinterschnitte an den Zähnen angebracht. Sie haben ein Aspektverhältnis von 100 und sind in dieser Form mit einem mechanischen Verfahren ohne Grattbildung kaum zu realisieren. Die Masse der Hinterschnitte betragen 30 µm in der Länge, 10 µm in der Breite und 1000 µm in der Tiefe. So bleibt dieses Zahnrad, das ein relativ hohes Drehmoment [3] übertragen kann, elastisch genug, um deformiert werden zu können. Denn dies ist ein Grundprinzip des «Micro Harmonic Drive»-Getriebes, um spielfreie und sehr dynamische Bewegungen zu ermöglichen.

**Gezielte Einstellung von Materialeigenschaften möglich**

Doch damit nicht genug. Mit der Galvanoformung können nämlich nicht nur exakt sehr komplexe Strukturen abgeformt werden, sondern während der Abformung

lassen sich durch geschickte Wahl der Galvanikparameter auch die Materialeigenschaften beeinflussen. Bezogen auf die Zahnräder von Micromotion bedeutet dies, dass man durch die Wahl des Eisengehalts in der Legierung die Materialeigenschaften für den Einsatz in den Mikrogetrieben anpassen kann. Dies wurde durch eine Abstimmung des Verhältnisses des Eisengehalts im Elektrolyten und der Abscheidegeschwindigkeit in den Strukturen des Resists möglich. Die Höhe des Eisengehalts in der Nickel-Eisen-Legierung bestimmt im Wesentlichen die Dauerwechselfestigkeit der Zahnräder, die wie vorstehend bereits erwähnt, eine notwendige Eigenschaft für das «Micro Harmonic Drive»-Getriebe ist.

Um die entsprechenden Drehmomente übertragen zu können, muss auch eine gewisse Härte und Festigkeit der Zahnräder gegeben sein. Die Härte und Festigkeit der Legierung wird nicht nur durch den Eisengehalt beeinflusst, sondern es überlagern sich hier noch weitere Effekte, wie die Zugabe eines Kornverfeinerers in die Galvanik oder eine relativ hohe Abscheidegeschwindigkeit, die zu einer kleinen Kristallitgröße des Metalles beitragen. Mit kleinerer Kristallitgröße wächst bekanntermassen die Festigkeit und Härte. Durch die entsprechende Einstellung und Überwachung der Galvanikparameter lassen sich somit die Materialeigenschaften von Mikrobauteilen für ihre spätere Verwendung mittels der Galvanoformung gezielt einstellen.

Im Falle dieser Mikrozahnräder beträgt die mittlere Härte 55 HRC und die mittlere Zugfestigkeit rund 1800 N/mm<sup>2</sup>. Das Elastizitätsmodul, das ein Mass für die Elastizität der Zahnräder ist, liegt im Mittel bei 135000 N/mm<sup>2</sup>. Diese Werte sind jenen von Federstahl ähnlich und unterstützen somit die charakteristischen Eigenschaften des «Micro Harmonic Drive»-Getriebes optimal.

### Wirtschaftliche Vorteile der Galvanoformung

Ein weiterer wichtiger Vorteil der Galvanoformung ist die gleichzeitige Herstellung von sehr vielen Bauteilen in einem Prozessschritt, das auch als Batch-Prozess bezeichnet wird. Durch die Bestückung von bis zu 1000 Zahnrädern pro Wafer, die in einem Batch-Prozess herstellbar sind, verringern sich die Kosten gegenüber einer seriellen Herstellung. Werden zusätzlich mehrere



*Bild 5: REM-Aufnahme eines vollständigen «Micro Harmonic Drive»-Getriebes des Typs MHD-10-16Q-P mit einem Aussendurchmesser von weniger als 10 mm*



*Bild 6: Dieser vergrösserte Ausschnitt aus Bild 5 zeigt die markanten Hinterschnitte der Planetenräder, die für ein radial federndes Verhalten unabhängig von der Zahnradicke sorgen*

Wafer gleichzeitig in einem Galvanikbad abgeschieden, so reduzieren sich die Kosten um ein Vielfaches bei entsprechender Auslastung der Anlage.

### Zusammenfassung

Es konnte gezeigt werden, dass der Trend der Miniarisierung zu einem Umdenken für die Anwendung von neuen Verfahren, wie der Lithografie und der Galvanoformung, führen muss. Diese haben ihre Vorteile in der Übertragung von sehr komplexen Geometrien bei kleinsten Abmessungen der Mikrobauteile hauptsächlich in zwei Dimensionen und eingeschränkt in der dritten Dimension. Die Galvanoformung als Herstellungsverfahren bietet im Gegensatz zu konventionellen spanenden Verfahren die Möglichkeit, durch die Wahl der Prozessparameter die Materialeigenschaften optimal anzupassen. Dabei konnte in diesem Beitrag nur kurz auf die mechanischen Eigenschaften einer Nickel-Eisen-Legierung für Mikrozahnräder eingegangen werden. Diese Metalllegierung kann natürlich auch für andere Anwendungen interessant sein, zum Beispiel für magnetische Sensoren und Aktoren im Mikromassstab, bei denen die magnetischen Eigenschaften im Vordergrund stehen.

Allen Anwendungen ist jedoch gleich, dass mit der Galvanoformung ein wichtiges Werkzeug der Mikro-technik zur Verfügung steht, mit dem sich hochpräzise und komplexe metallische Mikrobauteile in einem Batch-Prozess herstellen lassen, deren Materialeigenschaften weitgehend einstellbar und von der Kostenseite wirtschaftlich sind.

### Literatur

- [1] Menz W., Mohr J.: Mikrosystemtechnik für Ingenieure. VCH, 2. Auflage, Weinheim 1997
- [2] Kirsch U., Degen R.: «Direkt-LIGA»-Verfahren Mikro-teile präzise produzieren. JOT, 2007, 1, S. X-XII, Vieweg Verlag/GWV Fachverlage GmbH, Wiesbaden. Download unter: <http://www.micromotion-gmbh.de/sites/deutsch/download-d-veroeff.html>
- [3] Unternehmensprospekt der Micromotion GmbH, 04/2005 MM 90 01 18. Download unter: <http://www.micromotion-gmbh.de/sites/deutsch/download-d.html#> ■