

Mikroantriebe für präzise Positionieranwendungen

ROLF SLATTER

Mikroantriebe sollen nicht nur Bewegungen erzeugen, sondern vielmehr zum Ausrichten oder Justieren kleinster Bauteile wie Linsen, Spiegel, Greifer usw. geeignet sein (Bild 1). Die wesentlichen Anforderungen an Mikroantriebssysteme in diesen innovativen Anwendungen sind neben der miniaturisierten Baugröße und dem geringen Eigengewicht vor allem eine präzise und spielfreie Bewegungsübertragung sowie eine hohe Wiederholgenauigkeit und Zuverlässigkeit. Der Beitrag beschreibt die Entwicklung von spielfreien Mikroantrieben für unterschiedliche Anwendungen.

Entwicklungstrends

Die Entwicklung in der Mikrosystemtechnik zeigt alle Anzeichen einer neuen technischen Revolution, vergleichbar mit der Entwicklung in der Mikroelektronik. In den führenden Industrienationen ist die Mikrosystemtechnik heute bereits auf dem Weg zur Schlüsselindustrie. Auslöser ist der Trend zur Miniaturisierung, der sich bereits seit Jahren in vielen Bereichen des täglichen Lebens abzeichnet. Machte sich die Technik eines Satellitennavigationsempfängers früher noch in einem satten 19-Zoll-Einschub breit, beansprucht sie heute gerade noch das Format eines Schokoladenriegels. Und während Mobiltelefone noch vor wenigen Jahren Größe und Gewicht stattlicher Kohlebriketts hatten, stoßen die neuesten Modelle mit ihren zierlichen Tasten an die Grenzen menschlicher Bedienfähigkeit. Mikrosysteme begegnen uns heute täglich – nur häufig ist man sich gar nicht darüber bewusst, da man die verwendeten Systeme meist gar nicht sehen kann. Beispiele sind der Airbag-Sensor im eigenen Auto oder der Druckkopf im Tintenstrahldrucker.

Beispiele für Mikrosysteme in der Antriebstechnik sind dagegen eher noch exo-



1: Der Mikroservoantrieb von Harmonic Drive bietet höchste Dynamik auf kleinstem Bauraum

tisch, aber es gibt eine deutliche Nachfrage nach kleinen Geräten für die Herstellung, Handhabung oder Prüfung von kleinen Objekten. Diese wiederum benötigen kleine Antriebe für Positionierachsen. Bei vielen Anwendungen in der Mikrorobotik, der Halbleiterfertigung, der Feinmechanik, in medizinischen Geräten oder in der Photonik genügt es nicht, diese einfach nur im Bauraum zu reduzieren, denn dabei verschlechtern sich häufig die Leistungsdaten, wie Antriebskraft und Präzision. Mikroantriebssysteme bieten den Vorteil, dass sie Bauraum optimierte Außenabmessungen und daher geringe Massen aufweisen. Die kleine Massenträgheit der bewegten Komponenten verleiht ihnen eine hohe Dynamik bei geringem Energieverbrauch und niedriger Antriebsleistung.

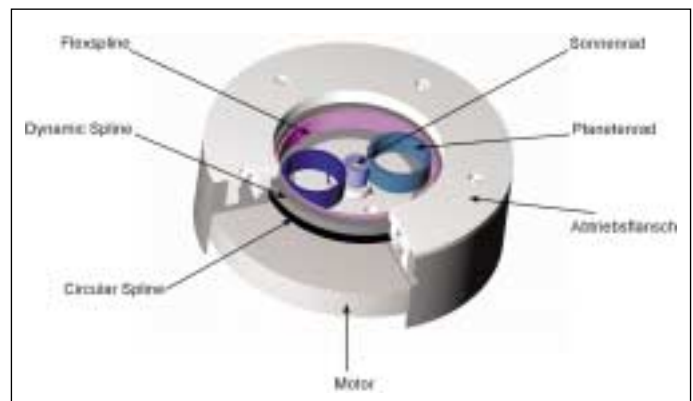
Mikrogetriebe an sich sind keine besondere Neuigkeit. Mikro-Planetengetriebe oder -Stirnradgetriebe sind bereits entwickelt und serienreif. Diese bisherigen Lösungen verfügen jedoch über einige Nachteile, die eine Anwendung in Positionierachsen von Maschinen oder Geräten ausschließt. Hierzu gehört, dass sie spiel-

behaftet sind, mit der Folge, dass ein genauer Positioniervorgang nicht möglich ist. Für den Maschinenkonstrukteur standen daher – auch wegen der teilweise extrem niedrigen zulässigen Belastung und der sehr kurzen Lebensdauer – bis jetzt kaum Lösungen für die Praxis zur Verfügung. Es gibt somit einen großen Bedarf an Mikrogetrieben für die Industrie.

Neuartiges Mikrogetriebe

Diese Anforderungen waren der Anstoß für die Entwicklung des neuartigen Mikrogetriebes vom Typ Micro Harmonic Drive der Firma Harmonic Drive. Das Funktionsprinzip der Harmonic Drive-Getriebe ist bereits etabliert und kommt in hochgenauen Positionierachsen in Industrierobotern, Werkzeugmaschinen, der Luft- & Raumfahrt, der Medizintechnik oder Maschinen für die Halbleiterfertigung zur Anwendung.

Miniaturisierte Getriebe mit einem Zahnmodul von nur 64 µm können noch mit konventionellen spanenden Herstellungsverfahren für Verzahnungen hergestellt werden. Dieser Modul stellt jedoch heute eine Grenze nach unten für die spanende Fertigung dar. Aufgrund der Nachfrage für noch kleinere Positioniergetriebe suchte Harmonic Drive nach neuen Fertigungsverfahren, um noch kleinere Verzahnungen mit hoher Genauigkeit herzustellen. Im Jahr 1999 entstanden die ersten Kontakte zwischen dem Institut für Mikrotechnik Mainz (IMM) und Harmonic Drive. Dies führte zu einem Entwicklungsauftrag, um das Harmonic Drive-Funktionsprinzip mikrotechnisch umzusetzen. Die Resultate dieser zweijährigen Entwicklung waren so viel versprechend, dass im März 2001 die Micromotion GmbH mit Sitz in Mainz-Gonsenheim als Schwesterunternehmen von Harmonic Drive ge-



2: Einzelteile des neuen Getriebes

Dr. Rolf Slatter ist Vorstand des Bereiches Marketing & Vertrieb der Harmonic Drive AG in 65555 Limburg

gründet wurde. Dort wurde das Micro Harmonic Drive-Getriebe weiterentwickelt, um den Schritt vom Labor in die industrielle Praxis zu verwirklichen.

Aufbau des Getriebes

Das Getriebe in der sogenannten Flachbauweise besteht aus dem Wave Generator und den drei Zahnrädern Flexspline, Circular Spline, und Dynamic Spline (Bild 2). Der Wave Generator besteht aus einem Sonnenrad, das üblicherweise an der Motorwelle angebracht ist, sowie zwei elastisch verformbaren Planetenrädern. Die Verzahnung der Planetenräder greift in die Innenverzahnung des Flexsplines ein. Der Flexspline ist ein dünnwandiger, elastisch verformbarer Ring, der die Form des elliptischen Wave Generators annimmt. Die Außenverzahnung befindet sich im Eingriff mit den Innenverzahnungen des Circular und des Dynamic Splines. Der Circular Spline ist ein innenverzahntes Hohlrad und befindet sich im Bereich der großen Ellipsenachse des Wave Generators im Eingriff mit dem Flexspline. Der Circular Spline besitzt zwei Zähne mehr als der Flexspline. Der Dynamic Spline ist ein innenverzahntes Hohlrad mit gleicher Zahnzahl wie der Flexspline. Dieses Bauteil rotiert in gleicher Drehrichtung und mit gleicher Drehzahl wie der Flexspline und wird bei der Übersetzung ins Langsame als Abtriebsselement benutzt. Das Funktionsprinzip ähnelt dem des konventionellen Harmonic Drive-Getriebes, je-

doch mit dem Unterschied, dass der Wave Generator als Planetengetriebe ausgeführt wird. Dadurch werden hohe Übersetzungen ins Langsame ermöglicht. Dies ist erforderlich, da die Mikromotoren eine sehr hohe Drehzahl von beispielsweise 50 000 min⁻¹ erzeugen. Um Spielfreiheit zu gewährleisten, sind die Planetenräder elastisch verformbar und im montierten Zustand unter Vorspannung gesetzt. Diese Lösung bietet neben der Spielfreiheit bei miniaturisierter Baugröße eine Reihe von Vorteilen, wie:

- eine exzellente Wiederholgenauigkeit für präzise Positionierung,
- eine hohe Drehmomentkapazität für dynamische Indexieranwendungen,
- einen hohen Wirkungsgrad,
- extrem flache Bauweise, die kompakte Geräteabmessungen ermöglicht,
- ein geringes Eigengewicht für Anwendungen in tragbaren Geräten sowie
- hohe Übersetzungen ins Langsame mit wenigen Bauteilen für die verlustarme Drehmomentvergrößerung von Mikromotoren.

Hohe Wiederholgenauigkeit

Die herausragende Eigenschaft ist dabei die Wiederholgenauigkeit. Wie schon erwähnt, gibt es schon seit längerem miniaturisierte Getriebe, allerdings können damit keine derartigen Wiederholgenauigkeiten in der Bewegungsübertragung von ± 10 Winkelsekunden geschaffen werden.

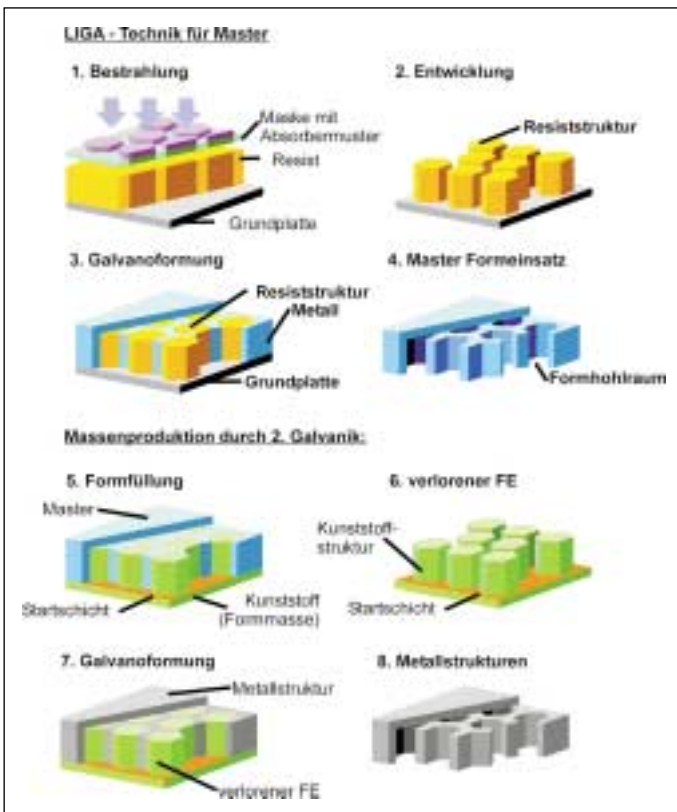
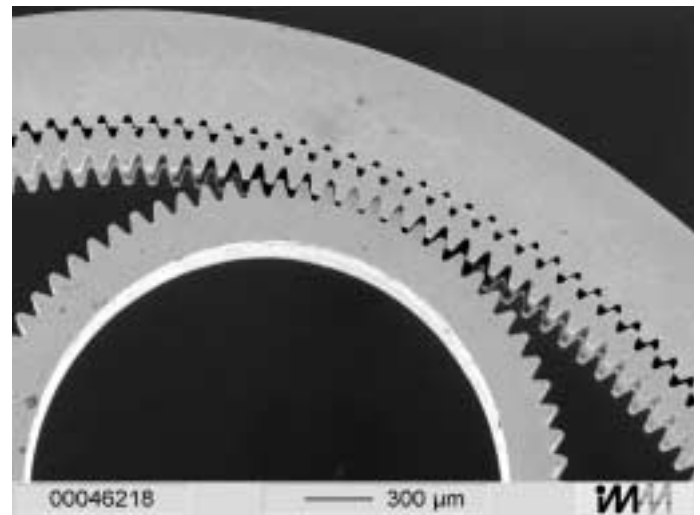
Konventionelle Verfahren zur Herstellung von Zahnrädern können wie bereits er-

wähnt in Abhängigkeit von der Zahngeometrie bis zu einem minimalen Modul von 60 bis 100µm verwendet werden. Allerdings müssen bei einem Modul dieser Größenordnung hinsichtlich einer optimalen Verzahnungsgeometrie Restriktionen hingenommen werden, um die Herstellbarkeit mit konventionellen Methoden zu ermöglichen. Zur Herstellung von Zahnrädern für Mikrogetriebe hat sich daher der Einsatz mikrotechnischer Verfahren wie beispielsweise das LIGA-Verfahren (Lithographie + Galvanoformung + Abformung) bewährt (Bild 3). Diese Technologien stammen aus der Halbleiterfertigung und basieren auf lithografischen Prozessen, das heißt die lateralen Strukturen befinden sich als Absorberschicht auf einer Maske und werden über Schattenprojektion hochpräzise in einen Fotoresist übertragen. Um Strukturen von bis zu mehreren Millimeter Höhe und gleichzeitig Abweichungen weniger Mikrometer zu erzeugen, muss aufgrund des hierfür verwendeten Materials eine hochenergetische, kurzwellige und hochparallele Synchrotron-Strahlung verwendet werden. Da diese primär erzeugten 3D-Strukturen in ihrer Herstellung sehr kostenintensiv sind, ist es das Ziel, durch einen anschließenden Abformprozess diese hochpräzisen Strukturen vielfach zu replizieren.

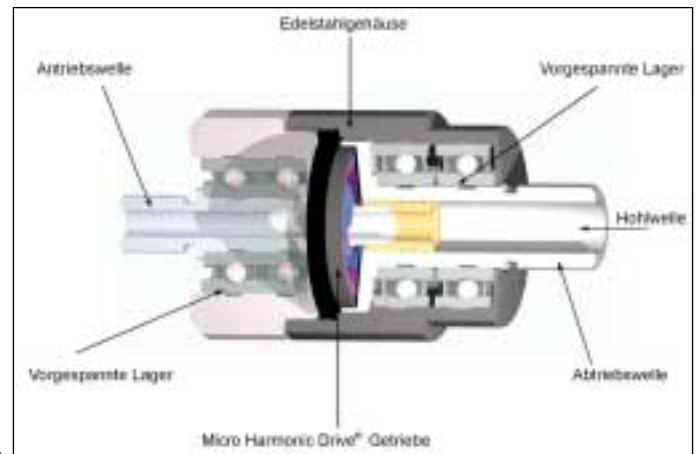
Neues Herstellungsverfahren

Für die Herstellung des neuen Getriebes wird ein Fertigungsverfahren eingesetzt,

4: Neue Verzahnung mit Maßstab ▶



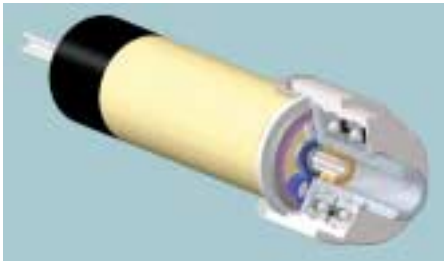
3: Übersicht über konventionelle Herstellung von Mikrogetrieben nach dem LIGA-Verfahren



5: Mikrogetriebebox der MHD-Baureihe im Schnitt dargestellt ▶

Kenngrößen	Baugröße				
	MHD 8		MHD 10		
	160:1	500:1	160:1	500:1	1000:1
Spitzendrehmoment [mNm]	6	16	10	26	40
Nenn Drehmoment [mNm]	3	8	5	13	20
Wiederholgenauigkeit [arcsec]	±10	±10	±10	±10	±10
Außendurchmesser [mm]	8	8	10	10	10
Gewicht [g]	3,5	3,5	5,7	5,7	5,7

Tabelle: Wichtigste Kenngrößen der neuen Mikrogetriebe



6: Der spielfreie Servoantrieb hat einen Außendurchmesser von nur 8 mm und eine Hohlwelle mit einem Durchmesser von 0,65 mm

welches eine kostengünstige Serienproduktion von metallischen Mikrozahnradern gestattet.

Um gleichzeitig die hohen Übersetzungen und die geringen Abmessungen realisieren zu können, wird für die Zähne ein Modul von $34 \mu\text{m}$ verwendet. Alle Zahnradern bestehen aus einer Nickel-Eisen-Legierung. Aufgrund der hohen Streckgrenze von 1500 N/mm^2 , des niedrigen Elastizitätsmoduls von 165000 N/mm^2 und der guten Dauerfestigkeit bietet diese galvanisch abgeschichtete Legierung exzellente Materialeigenschaften für hochbeanspruchte Mikrozahnradern.

Neue Entwicklungen

Ein Beispiel für ein Mikroantriebssystem ist nach Angaben von Harmonic Drive das kleinste spielfreie Getriebe der Welt. Der



7: „die attach“-Maschine vom Typ Easyline 8032 von Alphasem

Micro-Harmonic-Drive-Getriebeeinbausatz hat einen Außendurchmesser von nur 8 mm bei einer axialen Länge von 1 mm (**Bild 4**). Er bietet Übersetzungsverhältnisse von 160:1 bis 1000:1. Micromotion bietet verschiedene Getriebebauformen bzw. Abtriebslagerkonzepte an, um eine leichte Integration in verschiedenen Anwendungen zu ermöglichen. So sind die Mikrogetriebeboxen der Baureihe MHD (**Bild 5**) in zwei Baugrößen verfügbar, entweder mit gelagerter Antriebswelle oder für den direkten Anbau an allen gängigen Mikromotoren, z. B. von Arsape, Escap, Faulhaber, maxon, Mymotors, RMB usw. Zur Übersicht sind die wichtigsten technischen Daten der neuen Getriebeboxen in der **Tabelle** aufgeführt.

Vor kurzem wurde beispielsweise ein Getriebe mit einem um 25 % reduzierten Außendurchmesser und einem erweiterten Übersetzungsverhältnis realisiert. Besonderes Merkmal des neuen Getriebes ist die zentrale Hohlwelle. Daraus wurde ein Positionierantrieb (**Bild 6**) entwickelt, der unter anderem das Resultat einer engen Zusammenarbeit mit dem Motorenhersteller maxon motor darstellt. Das Getriebe wurde mit einem elektronisch kommutierten Motor vom Typ EC 6 in einer speziellen Ausführung mit Hohlwelle kombiniert. Der Bohrungsdurchmesser beträgt lediglich 0,65 mm und bietet damit ausreichend Platz für die Durchführung von Laserstrahlen oder optischen Fasern. Die axiale Länge der Mikro-Getriebebox ohne Motor beträgt 12,3 mm bei einem Außendurchmesser des Gehäuses von 8 mm. Die Gesamtlänge des Antriebes beträgt 31,3 mm, einschließlich magnetischem Encoder. Der verwendete Encoder liefert 100 Pulse pro Motorumdrehung. In Kombination mit der Standardübersetzung von 160:1 wird eine abtriebsseitige Auflösung von 20 Winkelsekunden ermöglicht.

Mögliche Anwendungsbereiche

Die ersten Serienanwendungen solcher Mikroantriebssysteme liegen im Bereich Photonik und der Halbleiterfertigung. Im erstgenannten Bereich, z. B. in hochwertigen optischen Schaltern, müssen Fasern bzw. Spiegel hochdynamisch und hochgenau positioniert werden. Hierfür ist das neue Getriebe mit seinem Drehmoment von 40 mNm bei einem Außendurchmesser von nur 10 mm besonders gut geeignet. Weitere Anwendungen in diesem Bereich gibt es in Mikroskopen, um die darin integrierten Linsen zu verstellen. Die kompakten Abmessungen des Mikrogetriebes erlauben es, jede Linse einzeln anzutreiben.

Bei früheren Lösungen mussten die Linsen hierfür mechanisch gekoppelt werden.

Im Bereich der Halbleiterfertigung ist vor allem die Fertigung und Montage moderner elektronischer Systeme zu nennen. Die einzelnen Komponenten in elektronischen Geräten sind kaum noch mit dem bloßen Auge erkennbar, müssen im Herstellungsprozess aber genau geprüft werden, in das Montagewerkzeug gelangen und exakt montiert werden. Die neueste Generation von Herstellungsmaschinen ist auf diese kleineren Bauelemente abgestimmt und dadurch auch physikalisch kleiner. Hierfür werden die beschriebenen, hochgenauen Getriebe benötigt.

Ein weiteres Anwendungsgebiet bietet die Medizintechnik. Auch hier bestehen Forderungen nach Mikroantrieben. Die Bewegung einer Endoskop-Kamera mittels Mikrogetriebemotor oder die Positionierung von mikrochirurgischen Instrumenten stellen solche Anwendungen dar. Zudem zeichnet sich in der Kommunikationstechnik ein breites Anwendungsspektrum für Mikroantriebssysteme ab. Satelliten haben derzeit noch die Größe eines Kleinwagens, sollen zukünftig jedoch nur noch so groß wie ein Fußball sein. Bau-raumoptimierte und zuverlässige Mikroantriebssysteme sollen die Antennen für die Datenübertragung hochgenau ausrichten.

Beispiel aus der Halbleiterfertigung

Der Halbleiterfertigungsprozess kann in einem „front end“-Prozess, bestehend aus



8: Die „rotary bond tool“-Baugruppe positioniert mit dem Micro Harmonic Drive-Getriebe Chips hochpräzise
Quelle: Alphasem AG

der photo-lithographischen Verarbeitung des Silizium-Wafers, und einem „back end“-Prozess, der bei dem Sägen des Wafers in einzelnen Chips anfängt und mit den fertig verpackten Elektronikbauteilen aufhört, unterteilt werden. Dabei werden sogenannte „die attach“-Maschinen, beispielsweise von Alphasem AG (**Bild 7**), in der Montagephase des „back end“-Prozesses verwendet. Die Maschine montiert und verbindet die Halbleiter-Chips in ihren schützenden Verpackungen. Dabei müssen die Chips mit Maßen von nicht mehr als $0,25 \times 0,25$ mm präzise ausgerichtet und positioniert werden. Die Maschine Easyline 8032 verfügt über ein neuartiges „rotary bond tool“ (**Bild 8**), um

die Chips mit extrem hoher Genauigkeit in beliebige Winkelstellungen zu positionieren.

Herzstück dieser Baugruppe ist eine Micro Harmonic Drive-Getriebebox in einer kundenspezifischen Ausführung. Das Getriebe wird durch einen Mikro-Schrittmotor angetrieben, der über eine Stirnradstufe das Mikrogetriebe antreibt. Die Getriebebox ist mit einer Hohlwelle ausgeführt, um eine Vakuumzufuhr durch das Getriebe zu ermöglichen. Die Hohlwelle erlaubt auch die Verwendung eines optischen Sensors, um sicherzustellen, dass der Chip erfolgreich gegriffen wurde. Die Abtriebswelle wird mit vorgespannten Kugellagern gestützt, um eine ausreichende Führungsgenauigkeit zu gewährleisten. Mit dieser Baugruppe, die komplett bei Micromotion montiert und geprüft wird, können die Chips mikrometergenau und mit hoher Geschwindigkeit positioniert werden. Während der Entwicklungsphase des „rotary bond tool“ wurden ausführliche Dauertests durchgeführt, um die Zuverlässigkeit der Baugruppe zu prüfen. Dabei wurden „ohne merklichen Unterschied in der Positioniergenauigkeit“ mehr als 18 Millionen Zyklen gefahren.

Anmerkung der Redaktion

Ausführliche Informationen über die Mikrogetriebe erhalten unsere Leser, indem sie die nachstehende Kennziffer in ihre Leserdienstkarte eintragen.

HARMONIC DRIVE