

Mikro-mechatronische Antriebe für hochdynamische und hochgenaue Positionieraufgaben

Dr. Rolf Slatter, Dr.-Ing. Reinhard Degen, Micromotion GmbH, Mainz, Deutschland

Kurzfassung

Der Trend zur Miniaturisierung ist nicht zu übersehen. Für die Herstellung und Prüfung von immer kleiner werdenden Werkstücken werden auch zunehmend kleinere Antriebe benötigt. Obwohl Mikrogetriebe bereits entwickelt wurden, weisen bisher verfügbare Lösungen verschiedene Nachteile auf. Hauptsächlich aufgrund ihrer Spielbehftung sind die bisherigen Lösungen für präzise Positionieranwendungen, wie sie häufig in Präzisionsmaschinen gefordert werden, nicht geeignet. Das Micro Harmonic Drive[®] Getriebe hingegen ist ein spielfreies, hochuntersetzendes Getriebe, welches gezielt für präzise Positionieranwendungen entwickelt wurde. Dieses Getriebe wird mit dem Direkt-LIGA Verfahren, bei dem es sich um einen vom bekannten LIGA-Verfahren abgewandelten Prozess handelt, hergestellt. In den drei Jahren seit der ursprünglichen Entwicklung hat dieses Produkt den Sprung aus dem Labor in praktische industrielle Anwendungen geschafft und findet weltweiten Einsatz in Maschinen der Halbleiterfertigung, Medizintechnik und optischen Geräten.

1 Einleitung

Neue Positionieranwendungen in der Medizintechnik, Optik, Mikrorobotik und Halbleiterfertigung benötigen neue Antriebssysteme und Getriebe mit extrem geringen Abmessungen. Zusätzlich zu der geringen Größe benötigen diese neuen Anwendungen jedoch insbesondere eine hohe Positioniergenauigkeit und präzises Steuerungsverhalten. Mit den bis jetzt existierenden Mikrogetrieben können diese Anforderungen allerdings nicht erfüllt werden.

Nur durch den Einsatz geeigneter Mikrogetriebe wird der Einsatz bereits existierender Mikromotoren, die mit Drehzahlen bis zu 100.000 min^{-1} und bei Abtriebsdrehmomenten von einigen μNm [1] arbeiten, in einem breiten Feld unterschiedlicher Anwendungen ermöglicht. Das bevorzugte Funktionsprinzip von existierenden Lösungen ist das Planetengetriebe. Dieses Getriebeprinzip benötigt mehrere Stufen und damit eine große Anzahl an Einzelbauteilen. Der größte Nachteil von erhältlichen Produkten ist ihr Spiel von mehreren Grad. Dadurch ist mit den existierenden Lösungen keine hohe Positioniergenauigkeit erzielbar.

Um Zugang zu neuen innovativen Anwendungsfeldern im Bereich der Mikroantriebstechnik zu erhalten, hat die Micromotion GmbH eine neue Generation von hoch präzisen und spielfreien Mikrogetrieben entwickelt: das Micro Harmonic Drive[®] Getriebe (siehe **Bild 1**). Dieses Getriebesystem kombiniert die Vorteile eines kompakten Aufbaus, einer hohen Leistungsdichte und exzellenten Positioniereigenschaften. Dies alles wird erreicht durch den Einsatz von nur sechs Komponenten.



Bild 1 Micro Harmonic Drive[®] Getriebe

Die Konsequenzen sind: das Micro Harmonic Drive[®] Getriebe ist präziser, kleiner, einfacher und damit zuverlässiger als existierende Lösungen.

2 Das Micro Harmonic Drive[®] Getriebe

2.1 Das Funktionsprinzip

Bis vor kurzem gab es noch keine Mikrogetriebe, die für präzise Positionieraufgaben geeignet sind. Hierfür geeignete Mikrogetriebe dürfen nicht nur extrem klein bauen, zusätzlich müssen derartige Getriebe die folgenden Eigenschaften besitzen:

- eine hohe Wiederholgenauigkeit,
- Spielfreiheit,
- eine hohe Übersetzung und
- eine geringe Teileanzahl.

Die Lösung hierfür stellt das Funktionsprinzip der Harmonic Drive[®] dar. Diese besondere Art von Getriebesystem hebt sich bei seinen Übertragungseigenschaften gegenüber anderen Getriebeprinzipien, wie z. B. Stirnradstandgetrieben oder Planetengetrieben, durch seine hohe Präzision und Spielfreiheit ab.

Seine außergewöhnlichen Eigenschaften haben sich schon seit vielen Jahren in den Bereichen Industrieroboter, Werkzeugmaschinen, Messmaschinen, Luft- und Raumfahrt und Medizintechnik bewährt [2]. Ein Mikrogetriebe basierend auf dem Funktionsprinzip eines Harmonic Drive[®] bietet folgende, besonders für Mikrogetriebe wichtige Eigenschaften:

- Spielfreiheit bei miniaturisierter Baugröße
- exzellente Wiederholgenauigkeit
- hohe Drehmomentkapazität
- nur sechs Komponenten und dadurch eine hohe Zuverlässigkeit
- hoher Wirkungsgrad
- extrem flaches Design
- geringes Eigengewicht
- geringes Massenträgheitsmoment
- kompakte Außenabmessungen
- hohe Übersetzungsverhältnisse in nur einer Stufe, die besonders für die hochdrehenden Mikromotoren benötigt werden.

Die Basiselemente dieses mikrotechnisch hergestellten Harmonic Drive[®] Getriebes (siehe **Bild 2**) sind der Wave Generator bestehend aus zwei Planetenrädern und einem Sonnenrad und die drei Zahnräder:

- Flexspline,
- Circular Spline und
- Dynamic Spline.

Der Wave Generator verformt den elastisch biegsamen Flexspline elliptisch über die Hauptachse. Dadurch haben die Zähne der Außenverzahnung des Flexsplines gleichzeitig Zahnengriff mit den beiden Hohlrädern – Circular Spline und Dynamic Spline – in zwei sich gegenüber liegenden Bereichen der großen elliptischen Achse.

In den Bereichen der kleinen Achse des elliptisch deformierten Flexsplines existiert kein Zahnengriff zwischen dem Flexspline und den Hohlrädern (siehe **Bild 3**).

Wenn das Sonnenrad des Wave Generators gedreht wird, wandern die Zahneingriffsbereiche des Flexsplines mit der Winkelstellung der Planetenräder des Wave Generators. Da es eine kleine Zähnezahldifferenz zwischen der Zähnezahl des Flexsplines und des Circular Splines gibt (der letztere besitzt zwei Zähne mehr), resultiert dies in einer Relativbewegung zwischen diesen Zahnrädern.

Nach einer kompletten Umdrehung der Planetenräder des Wave Generators bewegt sich der Flexspline relativ zum Circular Spline um einen Winkel, der zwei Zähnen entspricht. Der Dynamic Spline wird bei der verwendeten Flachbauweise dieses Getriebetyps als Abtriebsselement verwendet und besitzt dieselbe Zähnezahl und damit auch Drehzahl und Drehrichtung wie der Flexspline.

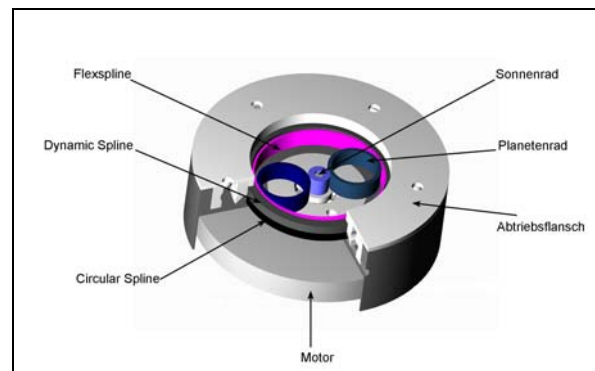


Bild 2 Bauteile des Mikrogetriebes

Im Hinblick auf den angestrebten Grad der Miniaturisierung dieses Mikrogetriebes besitzt die Verwendung einer Planetengetriebevorstufe als Wave Generator folgende Vorteile:

- Alle Zahnradkomponenten können mittels der hochpräzisen LIGA-Technik [3] hergestellt werden.
- Der Montageaufwand kann minimiert werden, da der Wave Generator aus nur drei Komponenten besteht.
- Die Gesamtübersetzung wird durch die Planetenvorstufe vergrößert. Dieser Aufbau kann daher sehr flexibel die sehr hohen Drehzahlen von Mikromotoren [4] in nur einer Stufe an die gegebenen Anforderungen aus der Anwendung anpassen.
- Diese Variante des Wave Generators besitzt nur ein geringes Massenträgheitsmoment und ermöglicht daher hoch dynamische Positioniervorgänge.

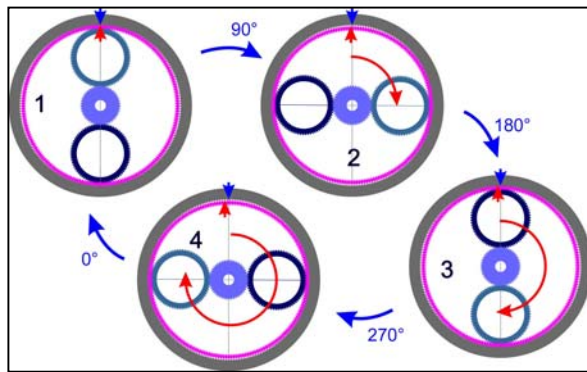


Bild 3 Funktionsprinzip

Durch den Einsatz der Planetenvorstufe als Wave Generator wird es ermöglicht, die Gesamtübersetzung dieses Mikrogetriebes in einem großen Bereich zu variieren. Für diese Getriebebaugröße können Übersetzungsverhältnisse von 160:1 bis zu 1000:1 in einer einzigen Stufe realisiert werden.

Die einzelnen Zahnräder dieses Mikrogetriebes werden mittels eines von dem bekannten LIGA-Prozess abgewandelten Fertigungsverfahren hergestellt. Im so genannten Direkt-LIGA Verfahren werden die Zahnräder in einer verlorenen Form aus einem speziellen, sehr dicken Foto-Resist galvanotechnisch hergestellt und bestehen aus einer Nickel-Eisen-Legierung. Aufgrund der hohen Zugfestigkeit von 1.800 N/mm^2 , dem niedrigen Elastizitätsmodul von 165.000 N/mm^2 und seiner guten Dauerschwingfestigkeitseigenschaften [5] besitzt diese galvanisch abgeschiedene Legierung die notwendigen Eigenschaften für eine einwandfreie Funktion der flexibel arbeitenden Zahnräder dieses Mikrogetriebes.

Die ausgewählte Nickel-Eisen Legierung ist weiterhin sehr korrosionsbeständig. Dies ermöglicht den Einsatz des Mikrogetriebes in schwierige Umgebungsbedingungen. Der Einsatz in Ultra-Hoch-Vakuum (bis 10^{-12} bar) ist bereits erfolgreich realisiert worden [6], zudem können die Zahnräder auch für medizinische Anwendungen sterilisiert werden.

2.2 Flexible Zahnräder

Der Flexspline repräsentiert das herausforderndste Bauteil dieses Mikrogetriebes (siehe **Bild 4**). Im Gegensatz zu konventionellen Getriebesystemen basierend auf dem Harmonic Drive®-Funktionsprinzip benötigt der Flexspline der mikrotechnisch hergestellten Variante dieses Getriebeprinzips zusätzlich zu seiner äußerst geringen Ringdicke gleichzeitig eine Außen- und Innenverzahnung. Diese beidseitige Verzahnung

ist notwendig, da als Wave Generator eine Planetengetriebevorstufe verwendet wird. Zur Erzielung eines störungsfreien Betriebs muss der Flexspline ein gleichförmiges Verformungsverhalten aufweisen. Diese Eigenschaft wird erzielt, indem dieselbe Zahnzahl für die Außen- und Innenverzahnung verwendet wird.

Die Herstellung der doppelten Verzahnung und der aufgrund der Deflektion des Flexspline für eine geringe Biegespannung notwendigen dünnen Ringdicke wird ermöglicht durch die Verwendung der Direkt-LIGA Verfahren. Aufgrund dieser Technik ist es möglich, eine Ringdicke im Zahnfuß von nur $26 \mu\text{m}$ bei einer Zahnbreite von $1000 \mu\text{m}$ zu realisieren.

Eine weitere Komponente, die wesentlich zum spielfreien und präzisen Betriebsverhalten dieses Mikrogetriebes beiträgt, stellen die flexiblen Planetenräder des Wave Generators dar. Das Planetenrad ist als ein dünner Ring konstruiert, der bei genug Flexibilität zur Kompensierung von Fehlern gleichzeitig eine hohe Steifigkeit bereitstellt. Durch die Planetenräder wird der Flexspline gleichzeitig in Zahneingriff mit dem Circular Spline und dem Dynamic Spline gepresst. Somit können durch den Federweg Fehler in den Zahneingriffsbereichen kompensiert werden.

Als Ergebnis werden sowohl die Außen- und Innenverzahnung mit der Vorder- und Rückseite der kämmenden Zahnräder in Kontakt gebracht. Die durch die federnden Planetenräder in diesem Getriebesystem erzeugte Vorspannung bildet die Grundlage für sein spielfreies Übertragungsverhalten und die hohe Positioniergenauigkeit des Micro Harmonic Drive® Getriebes.

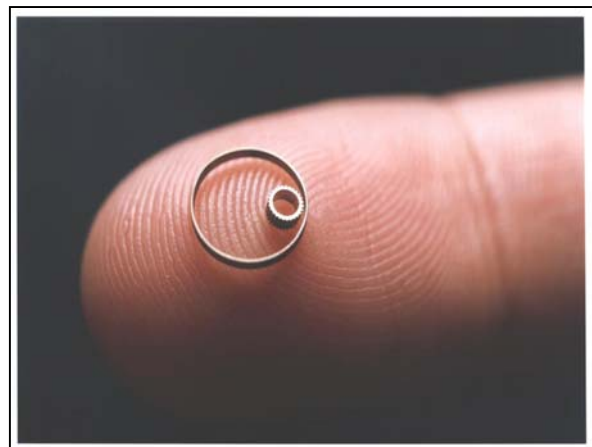


Bild 4 Flexible Zahnräder (Flexspline und Planetenrad)

3 Anwendungen für Mikroantriebssysteme

Zusätzlich zu ihren geringen Abmessungen bieten Mikroantriebssysteme bestehend aus dem Micro Harmonic Drive® Getriebe neue Vorteile aufgrund ihrer geringen Eigenmasse, ihrer geringen Massenträgheitsmomente und dem geringen Energieverbrauch, die kombiniert werden durch eine exzellente Positioniergenauigkeit und hoher Dynamik. Die präzisen Mikrogetriebe und Mikroantriebssysteme bilden eine Schlüsseltechnologie für eine neue Generation von miniaturisierten Geräten in einem großen Anwendungsbereich. Das Micro Harmonic Drive® Getriebe eignet sich ideal für präzise Positionieranwendungen in den folgenden Bereichen:

- Ausrichten von Linsen und Spiegeln in der Optik
- Medizintechnik
- Mikrorobotik
- Lasertechnik
- Biotechnologie
- Messmaschinen
- Luft- und Raumfahrt
- Halbleiterfertigung

Ein aktuelles Beispiel betrifft miniaturisierte Drehantriebe für Bestückungsmaschinen in der Halbleiterindustrie. Diese Antriebe werden benutzt, um sehr kleine Bauteile mit einer sehr hohen Winkelgenauigkeit auszurichten, bevor sie auf einem Substrat abgelegt werden. Bisherige Lösungen waren im Vergleich sehr groß und sehr schwer. Die neue miniaturisierte Lösung auf Basis des Micro Harmonic Drive® Getriebes (siehe **Bild 5**) wiegt nur ein zwanzigstel der bisherigen Lösung (25 g gegen 500 g) und ist sogar noch dynamischer und genauer. Dadurch wird die bewegte Masse der Bestückungsmaschine dramatisch reduziert, was eine deutlich höhere Produktivität ohne Genauigkeitsverlust ermöglicht.



Bild 5 Rotary Bond Tool

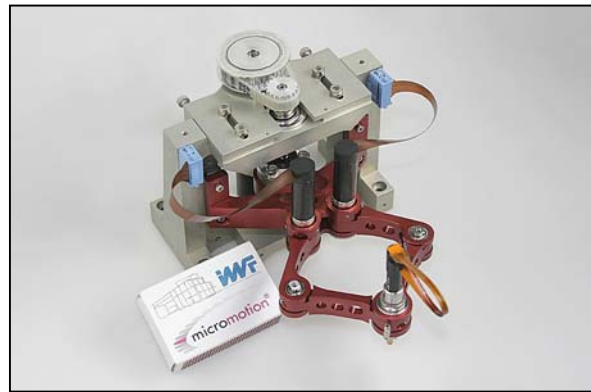


Bild 6 Mikroroboter „Parvus“

Ähnliche Vorteile wurden mit dem Mikroroboter „Parvus“ erreicht. Diese gemeinsame Entwicklung von Micromotion GmbH und dem Institut für Werkzeugmaschinen und Fertigungssysteme (IWF) der TU Braunschweig erreicht eine Wiederholgenauigkeit von besser als 1 µm in einem Arbeitsbereich von 50 x 80 x 20 mm³. Das sehr kleine Volumen des Roboters erlaubt die Realisierung einer kompletten Montageanlage auf einem Tisch. Weiterhin werden durch die kleinen Abmessungen die Kosten für der Einsatz unter Reinraum- oder klimatisierten Bedingungen drastisch verringert. Damit wird die Automatisierung vieler präziser Montageaufgaben erst wirtschaftlich sinnvoll.

4 Literatur

- [1] C. Thürigen, W. Ehrfeld, B. Hagemann, H. Lehr, F. Michel: Development, fabrication and testing of a multi-stage micro gear system. Proc. Of Tribology issues and opportunities in MEMS, pp. 397-402, Columbus (OH), November 1997, Kluwer Academic Publishers, 1998
- [2] R. Slatter: Weiterentwicklung eines Präzisionsgetriebes für die Robotik, Antriebstechnik, 2000
- [3] W. Ehrfeld, H. Lehr: Deep X-ray Lithography for the Production of three-dimensional Microstructures from Metals, Polymers and Ceramics, Radiat. Phys. and Chemistry 45 (1995) Nr. 3, 349-365
- [4] S. Kleen, W. Ehrfeld, F. Michel, M. Nienhaus, H.-D. Stölting: Ultraflache Motoren im Pfennigformat, F&M, Jahrg. 108, Heft 4, Carl Hanser Verlag, München, 2000
- [5] S. Abel: Charakterisierung von Materialien zur Fertigung elektromagnetischer Mikroaktoren in LIGA Technik, Diss. Universität Kaiserslautern, 1996
- [6] R. Slatter, R. Degen, Micro actuators for precise positioning applications in vacuum, Proc. of Actuator 2004, Bremen, 2004