

Präzisionsmikrogetriebe für Positionieraufgaben

Reinhard Degen, Frank Michel, Mainz

Wesentliche Anforderungen an innovative Mikroantriebssysteme für Positionieraufgaben sind neben einer miniaturisierten Baugröße und einem geringen Eigengewicht vor allem präzise und spielfreie Bewegungsabläufe. Mit dem Micro Harmonic Drive[®] ist ein hochübersetzendes Mikrogetriebe realisiert, welches zusätzlich zu seinen geringen Abmessungen ein spielfreies Übertragungsverhalten besitzt. Das Micro Harmonic Drive[®] ist somit perfekt für den Einsatz in Mikroantriebssystemen für Stellantriebe mit hoher Positionier- und Wiederholgenauigkeit geeignet.

Mikroantriebssysteme bestehen im allgemeinen aus einem Mikromotor und einem Mikrogetriebe. Durch die Mikrogetriebe wird den Mikromotoren der Einsatz in einem breiten Spektrum an unterschiedlichen Aufgaben eröffnet. Die Aufgabe der Mikrogetriebe besteht darin, die meist sehr hohen Drehzahlen der Mikromotoren von bis zu 100.000 min^{-1} und die im μNm -Bereich liegenden Abgabemomente an unterschiedlichen Einsatzbedingungen anzupassen.



Bild 1: Präzisionsmikrogetriebe basierend auf dem Harmonic Drive[®] Prinzip

Um im Bereich der Mikroantriebssysteme neuartige Anwendungsgebiete erschließen zu können, wurde am IMM (Institut für Mikrotechnik Mainz GmbH) ein spielfreies Mikropräzisionsgetriebe, das Micro Harmonic Drive[®] entwickelt (siehe Bild 1).

Innovative Verzahnungstechnik

Das Getriebeprinzip eines Harmonic Drive[®] hebt sich gegenüber anderen Bauformen, wie z.B. Stirnradstandgetrieben und Planetengetrieben, durch

seine präzisen und spielfreien Übertragungseigenschaften ab. Aufgrund seiner außergewöhnlichen Eigenschaften stellt das Harmonic Drive[®] Prinzip schon seit längerem in der Robotik, dem Werkzeugmaschinenbau, in Messgeräten, in der Luft- und Raumfahrt und in der Medizintechnik seine Qualitäten unter Beweis [1].

Ultra flaches Mikrogetriebe

Die Flachbauweise dieses Getriebeprinzips bietet besonders im Hinblick auf Mikroantriebssysteme folgende Vorteile:

- geringe Anzahl an Komponenten,
- kompakte Bauform und
- in einer Stufe kann die für Mikromotoren benötigte Übersetzungshöhe bereitgestellt werden.

Die Grundelemente des Harmonic Drive[®] in Flachbauweise werden aus dem Wellgenerator und den drei Zahnrädern Flex-Spline, Static-Spline und Dynamic-Spline gebildet. Der Wellgenerator verformt den Flex-Spline in jeweils zwei sich gegenüberliegenden Bereichen nach außen. Durch die radiale Verformung besitzt der Flex-Spline gleichzeitig Zahneingriff mit den

beiden Hohlrädern Static-Spline und Dynamic-Spline (siehe Bild 2). Bei Drehung des Wellgenerators wandern diese Bereiche des Zahneingriffs mit der Position des Wellgenerators. Aus dem Zähnezahlnunterschied zwischen Flex-Spline und Static-Spline resultiert eine Relativbewegung zwischen diesen Zahnrädern. Bei einer vollen Umdrehung des Wellgenerators verdreht sich der Flex-Spline gegenüber dem Static-Spline um den Zähnezahlnunterschied dieser beiden Zahnräder.

Der Dynamic-Spline besitzt die selbe Zähnezahl wie der Flex-Spline und daher auch die selbe Drehzahl und Drehrichtung. Der Dynamic-Spline stellt bei diesem Getriebetyp das Abtriebsselement dar.

Für die Realisierung des Wellgenerators gibt es eine Vielzahl von unterschiedlichen Lösungsvorschlägen. Die drei Varianten mit der größten Bedeutung den Wellgenerator aufzubauen sind das elliptische Kugellager, zwei über einen Steg verbundene Rollen und das Planetengetriebe. Für das Micro Harmonic Drive[®] stellt die Verwendung eines Planetengetriebes als Wellgenerator einen exzellenten Lö-

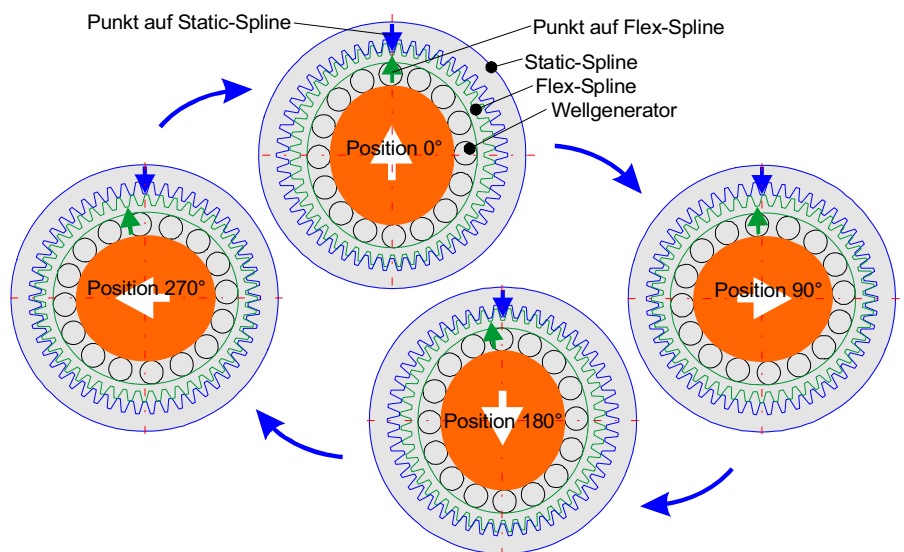


Bild 2: Funktionsprinzip eines Harmonic Drive[®] Getriebes

sungsweg dar. Im Hinblick auf den angestrebten Miniaturisierungsgrad bietet diese Bauform des Wellengenerators folgende Vorteile:

- die Herstellung aller Getriebekomponenten kann hochpräzise mit Hilfe des von W. Ehrfeld entwickelten LIGA-Verfahrens erfolgen,
- der Wellengenerator besteht nur aus drei Elementen, wodurch der Montageaufwand für das Mikrogetriebe verringert wird,
- das Planetengetriebe bewirkt eine zusätzliche Übersetzung und erhöht dadurch die Gesamtübersetzung des Harmonic Drive® Getriebes. Dadurch können die sehr hohen Drehzahlen von Mikromotoren in einer Stufe flexibel an die Erfordernisse angepasst werden.
- das Sonnenrad als Antrieb bewirkt im Gegensatz zu den anderen Wellengeneratorvarianten eine Verringerung der Massenträgheit des Getriebes und ermöglicht hochdynamische Positioniervorgänge.

Das als Wellengenerator eingesetzte Planetengetriebe kann die Gesamtübersetzung des Micro Harmonic Drive® in einem großen Bereich variieren. Allein durch die Verwendung unterschiedlicher Zähnezahlsverhältnisse von Planetenrad und Sonnenrad lässt sich z.B. eine Getriebebaureihe mit variierender Gesamtübersetzungen realisieren. Beispielhaft sind durch unterschiedliche Kombination von Planeten- und Sonnenrad die Gesamtübersetzungen 500 und 1032 in einer Stufe realisiert. Ohne Lagerung von An- und Abtrieb betragen die Abmessungen des Micro Harmonic Drive® in axialer Richtung 1 mm und im Durch-

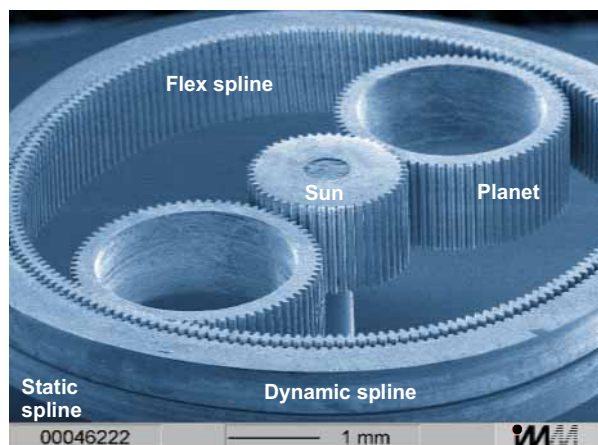


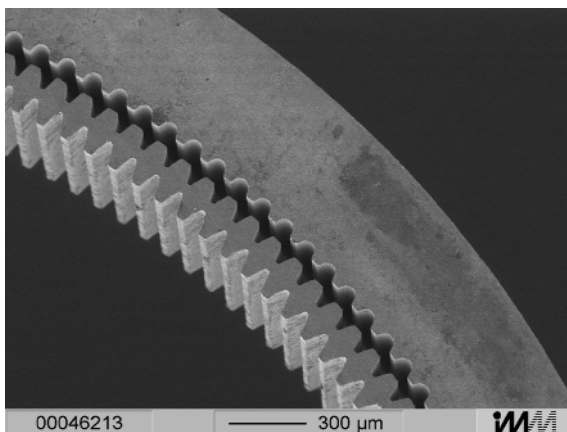
Bild 3:
Micro Harmonic Drive®:

Höhe: 1 mm,
Durchmesser: 8 mm
Übersetzung: 500
Modul: 34 µm

messer 8 mm (siehe Bild 3). Um gleichzeitig die hohen Übersetzungen und die geringen Abmessungen realisieren zu können, wird für die Zähne ein Modul von 34 µm verwendet. Alle Zahnräder des Micro Harmonic Drive® bestehen aus einer galvanisch abgeschiedenen Nickel-Eisen-Legierung.

Aufgrund seiner hohen Streckgrenze von 1.500 N/mm^2 , dem niedrigen Elastizitätsmodul von 165.000 N/mm^2 und seiner Dauerfestigkeit [2] bietet diese galvanisch abgeschiedene Legierung die zur Realisierung des Flex-Spline benötigten Materialeigenschaften.

Das anspruchvollste Bauelement des Micro Harmonic Drive® stellt das flexibel arbeitende Zahnrad dar: der Flex-Spline (siehe Bild 4). Im Gegensatz zu den konventionellen Getrieben nach



dem Harmonic Drive® Prinzip muss der Flex-Spline des Micro Harmonic Drive® nicht nur besonders dünnwandig sein, sondern benötigt zusätzlich gleichzeitig eine Außen- und Innenverzahnung. Diese doppelte Verzahnung ist aufgrund des Einsatzes eines Planetengetriebes als Wellengenerator notwendig. Zur Erzielung eines über den Umfang des Flex-Spline gleichförmigen Verformungsverhaltens wird für die Außen- und Innenverzahnung die selbe Zähnezahl verwendet. Die Herstellung der doppelten Verzahnung und die für eine spannungsarme Biege-

Einen weiteren wichtigen Punkt bei der Getriebeauslegung stellen die Zahnflankegeometrien der Zahnräder Flex-Spline, Static-Spline und Dynamic-Spline dar. Im Gegensatz zu konventionellen Getrieben ist die Zahneingriffsbewegung bei einem Harmonic Drive® Getriebe keine abrollende Bewegung, sondern ähnelt den Bewegungsabläufen in einem Keilschubgetriebe. Um eine exakte Dimensionierung der Verzahnungskenngrößen und besonders der Zahnflankegeometrien

Bild 4:
Flex-Spline des
Micro Harmonic Drive®:

Material: Nickel-Eisen
Ringdicke: 40 µm
Zahnbreite: 1000 µm

durchführen zu können, müssen hierzu die Bewegungsbahnen der Zähne des Flex-Spline relativ zu den Zähnen des Static-Spline und des Dynamic-Spline simuliert werden. Diese Bewegungsbahnen dienen als Grundlage für eine exakte Auslegung der Verzahnung aller Zahnräder des Micro Harmonic Drive®, wodurch sich eine störungsfreie Getriebefunktion und die für Positionierantriebe benötigte Präzision in den Bewegungsabläufen erzielen lässt.

Eine weitere Komponente, welche entscheidend zum spielfreien und präzisen Betriebsverhalten des Micro Harmonic Drive® beiträgt, stellt das Planetenrad des Wellengenerators dar. Die beiden Planetenräder besitzen vor allem die Aufgabe, den Flex-Spline exakt nach außen zu verformen. Zusätzlich müssen die Planetenräder Herstellungsfehler, Verschmutzungen und Verschleiß im Getriebe kompensieren können und trotzdem die exakte Verformung des Flex-Spline bewirken. Ziel bei der Dimensionierung und der konstruktiven Ausführung der Planetenräder war die Realisierung eines spielfreien Zahneingriffes für alle Zahnräder des Micro Harmonic Drive®. Diese Fehler kompensierenden Eigenschaften des Planetenrades werden durch seine Gestaltung als Federelement ermöglicht. Hierfür lassen sich die in radialer Richtung wirkenden Federeigenschaften von dünnwandigen ringförmigen Körpern ausgenutzt. Das

wechselbeanspruchung benötigte Dünwandigkeit des Flex-Spline wird durch den Einsatz des LIGA-Verfahrens [3] ermöglicht. Aufgrund dieses Verfahrens ist es möglich, bei einer Zahnbreite des Flex-Spline von 1000 µm eine Ringdicke im Zahnfuß von nur 40 µm zu realisieren.

Planetenrad ist als Ring ausgeführt, der sowohl genügend Elastizität zur Kompensation von Fehlern besitzt als auch ein steifes Übertragungsverhalten bewirkt. Aufgrund der in radialer Richtung federnden Planetenräder wird der Flex-Spline gleichzeitig in den Static-Spline und den Dynamic-Spline gepresst und kann über den Federweg des Planetenrades Fehler durch die Herstellung, Verschmutzung und Verschleiß kompensieren. Hierdurch besitzen sowohl die Außen- als auch die Innenverzahnung des Flex-Spline gleichzeitig mit der Zahnflanke und Zahnrückflanke Kontakt mit den kämmenden Zahnradern. Diese durch die Planetenräder erzeugte Vorspannung im Getriebe ermöglicht dem Micro Harmonic Drive® ein spielfreies Übertragungsverhalten und somit eine hohe Präzision.

Simulation und Kenndaten des Getriebes

Ziel der Getriebesimulation war die Optimierung der geometrischen Abmessungen der flexibel arbeitenden Zahnräder des Micro Harmonic Drive®. Mit Hilfe der FEM Analyse lassen sich die auftretenden mechanischen Spannungen im Flex-Spline aufgrund der Verformung durch den Wellgenerator und einer äußeren Belastung exakt bestimmen (siehe Bild 5). Die exakte Auslegung der Zahnräder und die hohe erzielbare Präzision des LIGA-Prozesses bei der Zahnradherstellung

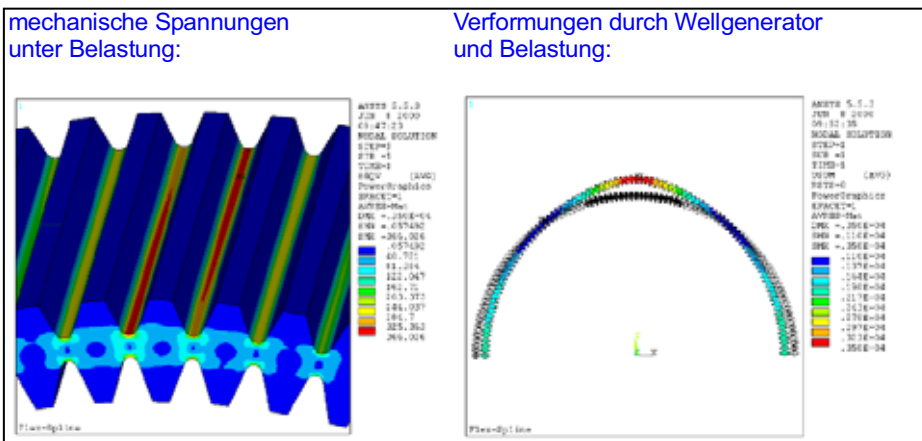


Bild 5: FEM Analyse der Spannungen und Verformungen des Flex-Spline

resultiert in sehr geringen Leerlaufverlusten dieses Mikrogetriebes. Trotz der Vorspannung durch die Planetenräder, die für ein spielfreies Übertragungsverhalten benötigt wird, liegt das gemessene maximale Verlustmoment bei 16 µNm. Der gemessene Wirkungsgrad beläuft sich bei einer Übersetzung von 500 zu 40 %. Mit diesem Getriebe lassen sich Abgabemomente bis zu 10 mNm übertragen.

Mikroantriebssystem aus Micro Harmonic Drive® und Penny-Motor

Ein leistungsstarkes, aufeinander abgestimmtes Mikroantriebssystem stellt die Kombination von Micro Harmonic Drive® und Penny-Motor [4] der Fa. MyMotors & Actuators mit Sitz in



Bild 6:

Mikroantriebssystem bestehend aus Penny-Motor und Micro Harmonic Drive®

Wendelsheim dar (siehe Bild 6). Der verwendete Scheibenläufermotor zeichnet sich durch seinen ebenfalls geringen Durchmesser von 12,8 mm und die extrem flache Bauhöhe von 1,4 mm aus. Mit dem extrem flach bauenden Micro Harmonic Drive® und dem Penny-Motor lässt sich ein Mikroantriebssystem von nur 4,3 mm axialer Länge und 13,4 mm Durchmesser realisieren. Dieses Mikroantriebssystem stellt bei einem Eigengewicht von gerade einmal 2,4 g ein Abgabemoment von bis zu 10 mNm und Abtriebsdrehzahlen bis 100 min⁻¹ bereit.

- der Medizintechnik auf dem Gebiet der Chirurgie und der transportablen Geräte,
- der automatisierten Montage- und Handhabungstechnik z.B. durch Positioniereinheiten für Halbleiter und den Einsatz in Mikrorobotern,
- der Luft- und Raumfahrt durch extrem kleine, leichte und energiesparende Antriebe,
- der Unterhaltungsindustrie durch Positionierantriebe zum Ausrichten von Magnetköpfen, Linsen und Spiegeln.

Die Micromotion GmbH, mit Sitz in Rheinland Pfalz, wird die Entwicklung und Herstellung des Micro Harmonic Drive® übernehmen.

Anwendungen für Mikroantriebssysteme

Die Verwendung von Mikroantriebssystemen bietet zusätzlich zu ihren bauraumsparenden Abmessungen folgende Vorteile:

- die geringe Masse,
- kleine Massenträgheit und
- trotz hoher Dynamik ein geringer Energieverbrauch

[1] R. Slatter: Weiterentwicklung eines Präzisionsgetriebes für die Robotik, Antriebstechnik, 2000

[2] S. Abel: Charakterisierung von Materialien zur Fertigung elektromagnetischer Mikroaktoren in LIGA Technik, Diss. Universität Kaiserslautern, 1996

[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. Stöling: Ultraflache Motoren im Pfnegformat, F&M, Jahrg. 108, Heft 4, Carl Hanser Verlag, München, 2000

Autoren

Dipl.-Ing. Reinhard Degen ist Geschäftsführer der Micromotion GmbH.

Dr.-Ing. Frank Michel leitet die Abteilung Feinwerktechnik am IMM.