

Micro Harmonic Drive[®]: innovative Antriebstechnik miniaturisiert mit LIGA

Reinhard Degen, Institut für Mikrotechnik Mainz GmbH, Mainz, Deutschland
ab 1.7.2001 IMM-Ausgründung: Micromotion GmbH, Bodenheim, Deutschland

Kurzfassung

Mikrogetriebe müssen die von existierenden Mikromotoren bereitgestellten hohen Drehzahlen von bis zu 100.000 min^{-1} und die geringen Abgabemomente im Bereich von einigen μNm an die Erfordernisse von vielen unterschiedlichen Applikationen anpassen. Zusätzlich zu ihrer miniaturisierten Baugröße und dem geringen Eigengewicht müssen Mikrogetriebe ebenso Spielfreiheit und präzise Winkelübertragung aufweisen, wenn sie in Mikropositionieranwendungen eingesetzt werden sollen, z.B. in medizinischen Geräten, Mikrorobotern, Glasfasertechnik und Anwendungen für die Luft- und Raumfahrt.

Am Institut für Mikrotechnik Mainz wurde das Funktionsprinzip eines Harmonic Drive[®] Getriebes unter Einsatz des LIGA-Verfahrens zur Realisierung eines Mikrogetriebes mit nur 1 mm axialer Länge und 8 mm Durchmesser verwendet. Zusätzlich zu seiner geringen Baugröße erreicht das Micro Harmonic Drive[®] in einer einzigen Stufe eine sehr hohe Übersetzung zwischen 500 und 1032 und überträgt ein Abgabemoment von 10 mNm bei einem minimalen Verlustmoment geringer als $16 \mu\text{Nm}$. Die einzelnen Zahnräder des Micro Harmonic Drive[®] bestehen aus einer NiFe-Legierung. Durch seine Wiederholgenauigkeit und Lost Motion geringer als $10''$ hebt sich das Micro Harmonic Drive[®] gegenüber existierenden Mikrogetrieben ab und eignet sich ideal für Applikationen in Mikroantriebssystemen für hochpräzise Positionieraufgaben.

1 Einleitung

Mikrogetriebe repräsentieren ein Schlüsselement in Mikroantriebssystemen. Erst durch geeignete Mikrogetriebe ist es möglich, existierende Mikromotoren mit Drehzahlen von bis zu 100.000 min^{-1} und Abgabemomente im Bereich nur einiger μNm [1] in einem breiten Spektrum unterschiedlicher Applikationen einzusetzen.



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

Zur Erschließung innovativer Anwendungsgebiete im Bereich der Mikroantriebssysteme wurde am Institut für Mikrotechnik Mainz GmbH (IMM) ein neuartiges spielfreies Mikropräzisionsgetriebe entwickelt, das Micro Harmonic Drive[®] (siehe Bild 1).

2 Das Micro Harmonic Drive[®]

2.1 Aufbau des Getriebes

Das Getriebeprinzip eines Harmonic Drive[®] hebt sich gegenüber anderen Bauformen wie z.B. Stirnradstandgetrieben und Planetengetrieben durch seine präzisen und spielfreien Übertragungseigenschaften ab. Seine 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 unter Beweis [2]. Harmonic Drive[®] Getriebe lassen sich nach ihrer Ausführungsform in Topf- und Flachgetriebe einteilen (siehe Bild 2). Die Flachbauweise dieses Getriebepinzips bietet besonders im Hinblick auf Mikroantriebssysteme die folgenden Vorteile:

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

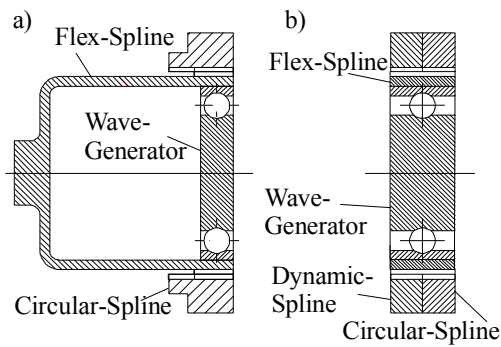


Bild 2 Getriebebauformen:
a) Topfgetriebe, b) Flachgetriebe

Die Basiselemente des Harmonic Drive® Getriebes in Flachbauweise setzen sich zusammen aus dem Wave Generator und den drei Zahnrädern

- Flex-Spline,
- Circular-Spline und
- Dynamic-Spline.

Der Wave-Generator verformt den Flex-Spline in jeweils zwei sich gegenüberliegenden Bereichen elliptisch nach außen. Dadurch hat der Flex-Spline des Getriebes in den zwei nach außen verformten Bereichen gleichzeitig Zahneingriff mit den beiden Hohlrädern Circular-Spline und Dynamic-Spline (siehe Bild 3). In den Bereichen der kleinen Halbachse des elliptisch verformten Flex-Spline existiert kein Zahneingriff.

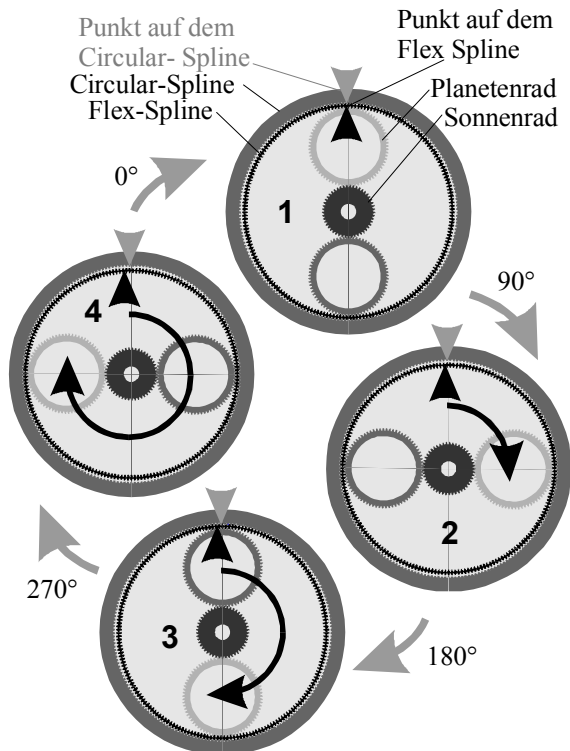


Bild 3 Funktionsprinzip des Micro Harmonic Drive®

Bei Drehung des Sonnenrades vom Wave-Generator wandern die Zahneingriffsbereiche des Flex-Spline mit der Winkelstellung des Planetenrades vom Wave-Generator. Aus dem Zähnezahlnunterschied von zwei zwischen Flex-Spline und Circular-Spline resultiert die Relativbewegung zwischen diesen Zahnrädern. Bei einem vollen Umlauf des Planetenrades des Wave-Generator verdreht sich der Flex-Spline gegenüber dem Circular-Spline um den Zähnezahlnunterschied dieser beiden Zahnräder. Der Dynamic-Spline dient bei der Flachbauweise als Abtriebsselement und besitzt die selbe Zähnezahl wie der Flex-Spline und daher auch die selbe Drehzahl und Drehrichtung.

Drei Lösungsvarianten für den Aufbau des Wave-Generators sind das elliptische Kugellager, das Planetengetriebe und zwei über einen Steg verbundene Rollen (siehe Bild 4).

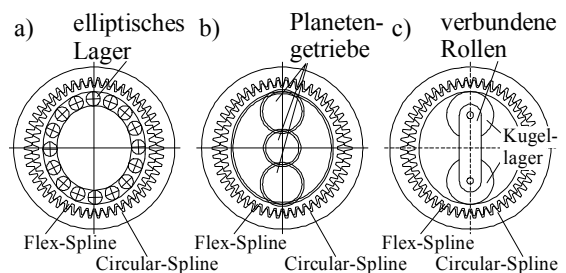


Bild 4 Bauformen des Wave-Generators:
a) elliptisches Kugellager, b) Planetengetriebe,
c) zwei über einen Steg verbundene Rollen

Die Verwendung eines Planetengetriebes als Wave-Generator bietet im Hinblick auf den angestrebten Miniaturisierungsgrad des Micro Harmonic Drive® folgende Vorteile:

- die Herstellung aller Getriebebauteile kann hochpräzise mit dem LIGA-Verfahren erfolgen,
- der Montageaufwand verringert sich, da der Wave-Generator nur aus drei Elementen besteht,
- die Gesamtübersetzung des Getriebes erhöht sich durch das Planetengetriebe. Dadurch kann das Getriebe in einer einzigen Stufe die sehr hohen Drehzahlen von Mikromotoren flexibel an die Erfordernisse anpassen,
- diese Variante des Wave-Generators besitzt eine geringe Massenträgheit und ermöglicht hochdynamische Positioniervorgänge.

Das als Wave-Generator eingesetzte Planetengetriebe kann die Gesamtübersetzung des Micro Harmonic Drive® in einem großen Bereich variieren. Allein durch die Verwendung unterschiedlicher Zähnezahlnverhältnisse 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 ei-

ner Stufe realisiert. Ohne Lagerung von An- und Abtrieb betragen die Abmessungen des Micro Harmonic Drive® in axialer Richtung 1 mm und im Durchmesser 8 mm (siehe Bild 5).

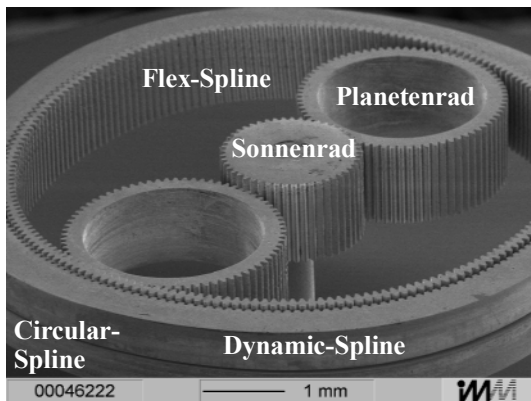


Bild 5 Komponenten des Micro Harmonic Drive®

Um gleichzeitig die erforderliche hohe Übersetzung und die geringen Abmessungen realisieren zu können, beträgt der Modul $34 \mu\text{m}$. Die einzelnen Zahnräder des Micro Harmonic Drive® bestehen aus einer galvanisch abgeschiedenen Nickel-Eisen-Legierung. Aufgrund der hohen Streckgrenze von 1.500 N/mm^2 , dem niedrigen Elastizitätsmodul von 165.000 N/mm^2 und seiner Dauerfestigkeit [3] bietet diese galvanisch abgeschiedene Legierung die benötigten Materialeigenschaften zur einwandfreien Funktion der flexibel arbeitenden Zahnräder dieses Mikrogetriebes.

2.2 Flexibel arbeitende Zahnräder

Das anspruchvollste Bauelement des Micro Harmonic Drive® stellt der Flex-Spline dar (siehe Bild 6).

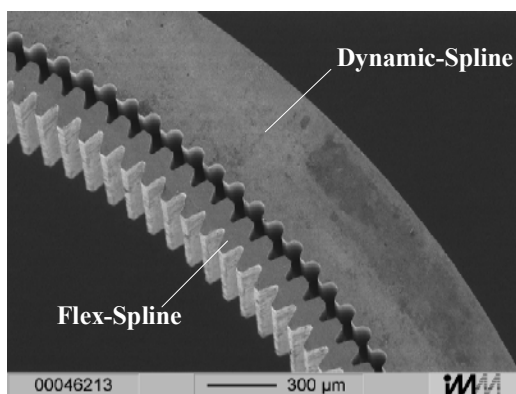


Bild 6 Innen- und Außenverzahnung des Flex-Spline

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 eine gleichzeitige Außen- und Innenverzahnung. Diese doppelte Verzahnung ist aufgrund der Verwendung eines Planetengetriebes als Wave-Generator notwen-

dig. Für einen störungsfreien Betrieb benötigt der Flex-Spline über seinen Umfang ein gleichförmiges Verformungsverhalten. Dies wird durch Verwendung der selben Zähnezah für die Außen- und Innenverzahnung erreicht. Die Herstellung der doppelten Verzahnung und die für eine spannungsarme Biege- wechselbeanspruchung benötigte Dünnwandigkeit des Flex-Spline wird durch den Einsatz des LIGA-Verfahrens [4] ermöglicht. Aufgrund dieses Verfahrens ist es möglich, bei einer Zahnbreite des Flex-Spline von $1000 \mu\text{m}$ eine Ringdicke im Zahnfuß von nur $40 \mu\text{m}$ zu realisieren.

Eine weitere Komponente, welche entscheidend zum spielfreien und präzisen Betriebsverhalten des Micro Harmonic Drive® beiträgt, stellt das Planetenrad des Wave-Generator 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. 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 ausnutzen. Das Planetenrad ist als Ring ausgeführt, der sowohl genügend Elastizität zur Kompensation von Fehlern besitzt als auch ein steifes Übertragungsverhalten bewirkt. Die in radialer Richtung federnden Planetenräder pressen den Flex-Spline gleichzeitig in den Circular-Spline und den Dynamic-Spline. Somit werden durch ihren Federweg Fehler und Störungen kompensiert (siehe Bild 7).

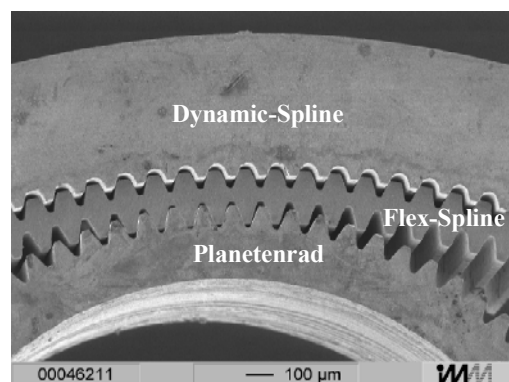


Bild 7 Spielfreiheit durch flexible Planetenräder

Hierdurch besitzen sowohl die Außen- als auch die Innenverzahnung des Flex-Spline gleichzeitig mit der Zahnvorder- und Zahnrückflanke Kontakt mit den kämmenden Zahnrädern. Durch diese von den Planetenrädern erzeugte Vorspannung im Getriebe ergibt sich für das Micro Harmonic Drive® ein spielfreies Übertragungsverhalten und eine hohe Präzision.

2.3 Simulation des Mikrogetriebes

Ein entscheidender Punkt der Getriebeauslegung stellt die Gestaltung der Zahnflankengeometrien der Zahnräder Flex-Spline, Circular-Spline und Dynamic-Spline dar. Im Gegensatz zu konventionellen Getrieben ist die Zahneingriffsbewegung bei diesen Zahnrädern keine abrollende Bewegung, sondern ähnelt den Bewegungsabläufen in einem Keilschubgetriebe. Um eine exakte Dimensionierung der Verzahnungskenngrößen und besonders der Zahnflankengeometrien durchführen zu können, müssen hierzu die Bewegungsbahnen der Zähne des Flex-Spline relativ zu den Zähnen des Circular-Spline und des Dynamic-Spline berechnet werden (siehe Bild 8).

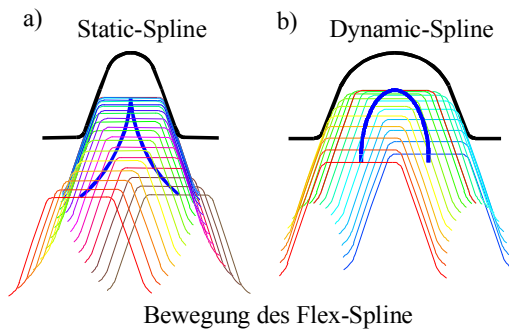


Bild 8 Zahnengriffsbewegung des Flex-Spline mit a) Circular-Spline und b) Dynamic-Spline

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.

Die Optimierung der geometrischen Abmessungen der flexibel arbeitenden Zahnräder des Micro Harmonic Drive® erfolgte durch Simulation mit Hilfe der FEM Analyse.

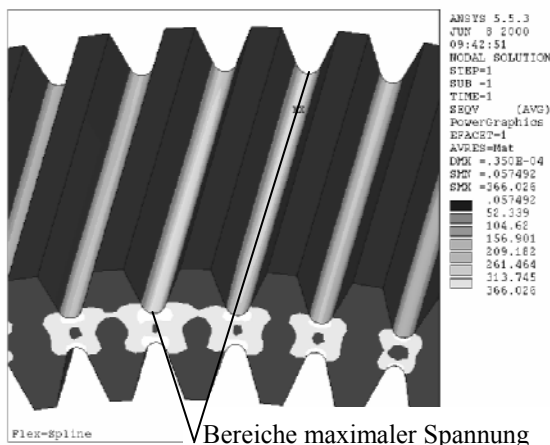


Bild 9 mechanische Spannungen unter Belastung

Die im Flex-Spline (siehe Bild 9) und den Planetenrädern aufgrund der Verformung durch den Wave-Generator und einer äußeren Belastung auftretenden mechanischen Spannungen lassen sich somit in Abhängigkeit von der Bauteilgeometrie exakt bestimmen. Aufgrund dieser Optimierung verkräftet das Getriebe Abtriebsmomente bis 35 mNm ohne die zulässige mechanische Biegewechselspannung für Dauerfestigkeit zu übersteigen.

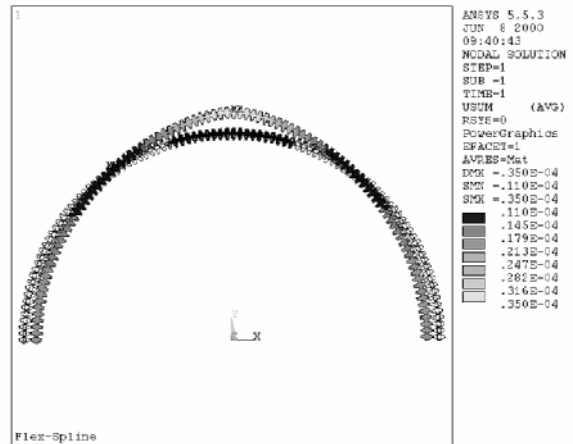


Bild 10 Verformungen des Flex-Spline

Zusätzlich ermöglicht die FEM-Simulation die exakte Bestimmung der Verformungen des Flex-Spline unter Belastung (siehe Bild 10).

2.4 experimentelle Untersuchungen und Kenndaten

Die sehr geringen Leerlaufverluste dieses spielfreien Mikrogetriebes resultieren aufgrund der exakten Auslegung der Zahnräder und der hohen erzielbaren Präzision bei der Zahnräderherstellung mit dem LIGA-Verfahrens. Trotz der für ein spielfreies Übertragungsverhalten benötigten Vorspannung durch die Planetenräder liegt das gemessene Verlustmoment des Antriebs bei 16 μNm (siehe Bild 11).

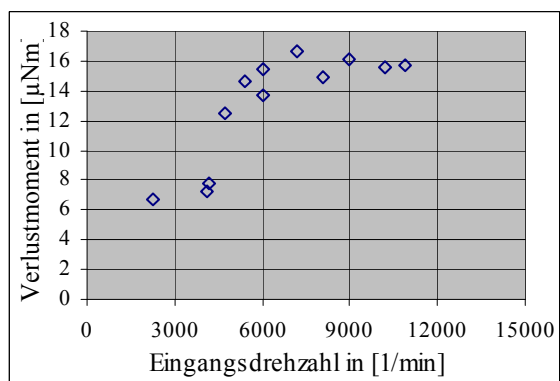


Bild 11 Zusammenhang zwischen Eingangsdrehzahl und Verlustmoment

Der gemessene maximale Wert des Wirkungsgrades des Micro Harmonic Drive® Getriebes beläuft sich bei einer Übersetzung von 500 auf 40% (siehe Bild 12).

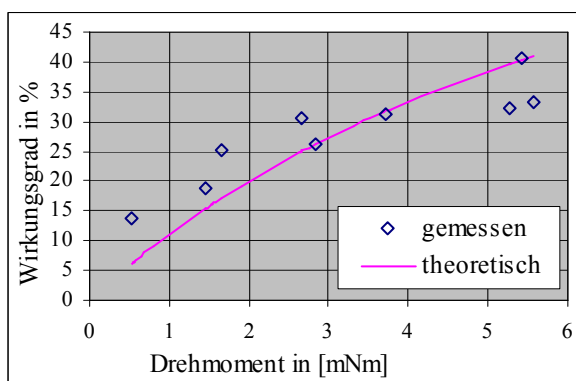


Bild 12 Zusammenhang zwischen Abgabemoment und Wirkungsgrad

Das in Bild 12 dargestellte Messergebnis zeigt eine stetige Zunahme des Wirkungsgrades über dem Abgabemoment. Aufgrund des sich hier abzeichnenden Trends der Messung und dem Verlauf der theoretischen Kurve lässt sich eine weitere Zunahme des Wirkungsgrades bei noch höheren Drehmomenten erwarten.

Neben dem geringen Verlustmoment und dem hohen Wirkungsgrad zeichnet sich das Micro Harmonic Drive® besonders gegenüber anderen Getrieben durch seine hervorragenden Übertragungsqualitäten aus. Für den Einsatz von spielfreien Getrieben in Positionieranwendungen eignen sich zur Beschreibung der Qualität des Übertragungsverhaltens besonders die Wiederholgenauigkeit, die Lost Motion und die Hysteresekurve. Die Hysteresekurve beschreibt die Auswirkungen einer Wechselbelastung des Getriebeabtriebs auf die Winkelstellung des Abtriebs und beschreibt gleichzeitig die Torsionssteifigkeit. Durch die Lost Motion wird der Winkelfehler beschrieben, der beim Anfahren der selben Position aus unterschiedlichen Richtungen entsteht.

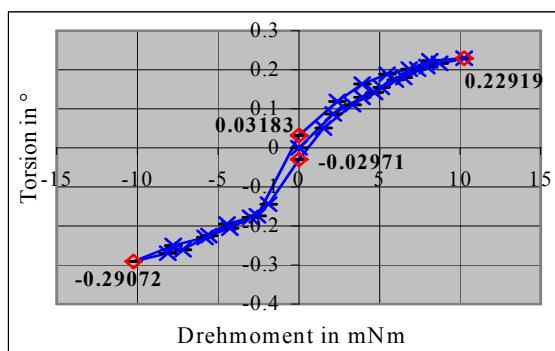


Bild 13 Hysteresekurve des Micro Harmonic Drive®

Die Qualität des Übertragungsverhaltens des spielfreien Micro Harmonic Drive® verdeutlicht sich durch

den engen Verlauf der Hysteresekurve und die damit verbundenen geringen Hystereseverluste kleiner $0,1^\circ$ (siehe Bild 13).

In Tabelle 1 sind die wichtigsten Kenndaten und Messwerte des realisierten Micro Harmonic Drive® zusammengestellt.

Tabelle 1: Getriebekenndaten

Abmessungen:	Durchmesser:	8 mm
	axiale Länge:	1 mm
Übersetzung:		500
		1032
Modul:		34 μm
Material:		Nickel-Eisen
Wirkungsgrad:		40 %
Abgabemoment:		10 mNm
Verlustmoment:		16 μNm
Wiederholgenauigkeit:		$\pm 10''$
Lost Motion:		$10''$
Hystereseverlust:		$0,1^\circ$
Verdrehsteifigkeit:		$2,6 \frac{\text{Nm}}{\text{rad}}$

Aufgrund seiner Eigenschaften, insbesondere seiner Wiederholgenauigkeit und Lost Motion geringer als $10''$ eignet sich das Micro Harmonic Drive® ideal für Applikationen in Mikroantriebssystemen für hochpräzise Positionieraufgaben. Die Micromotion GmbH, mit Sitz in Rheinland Pfalz, wird die Entwicklung und Herstellung des Micro Harmonic Drive® übernehmen.

3 Mikroantriebssysteme

Ein leistungsstarkes, aufeinander abgestimmtes Mikroantriebssystem stellt die Kombination von Micro Harmonic Drive® und dem am IMM entwickelten Penny-Motor [5] dar (siehe Bild 14).



Bild 14 Mikroantriebssystem

Der verwendete Scheibenläufermotor zeichnet sich durch seinen ebenfalls geringen Durchmesser von 12,8 mm und besonders die extrem flache Bauhöhe von 1,4 mm aus. Mit dem ultra flach bauenden Micro Harmonic Drive® und dem scheibenförmigen Penny-Motor lässt sich ein Mikroantriebssystem von nur 4,3 mm axialer Länge und 13,4 mm Durchmesser re-

alisieren. Dieses Mikroantriebssystem stellt bei einem Eigengewicht von gerade einmal 2,4 g ein Abtriebsmoment von bis zu 10 mNm und Abtriebsdrehzahlen bis 100 min^{-1} bereit. Der Penny-Motor wird mittlerweile von der Fa. MyMotors & Actuators mit Sitz in Wendelsheim produziert und vertrieben.

4 Anwendungen für Mikroantriebssysteme

Mikroantriebssystemen bieten zusätzlich zu ihren bauparenden Abmessungen Vorteile durch die geringe Masse, kleine Massenträgheit und ihren geringeren Energieverbrauch trotz hoher Dynamik. Innovative Anwendungen für Mikroantriebssysteme mit spielfreien Übertragungsverhalten und hoher Positioniergenauigkeit eröffnen sich beispielhaft für folgende unterschiedliche Einsatzgebiete:

- 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.

3 Literatur

- [1] F. Michel, W. Ehrfeld: 1999 International Symposium on Micromechatronics and Human Science MHS'99, Nagoya, Japan, Nov. 1999
- [2] R. Slatter: Weiterentwicklung eines Präzisionsgetriebes für die Robotik, Antriebstechnik, 2000
- [3] S. Abel: Charakterisierung von Materialien zur Fertigung elektromagnetischer Mikroaktoren in LIGA Technik, Diss. Universität Kaiserslautern, 1996
- [4] 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
- [5] 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