

Mikroaktoren für die Optomechanik

042 Rolf Slatter,
Harmonic Drive AG, Limburg

Man kann technisch interessierten Abiturienten auf der Suche nach neuen, zukunftssicheren und lukrativen Jobs uneingeschränkt empfehlen, Mikrosystemtechnik (MST) zu studieren – das Bundesministerium für Bildung und Forschung (BMBF) prognostiziert, dass sich Studenten dieser Fachrichtung keine Sorge um ihre zukünftigen Arbeitsplätze werden machen müssen.

Mikrosystemtechnik bedeutet umfassende Miniaturisierung weit über die Mikroelektronik hinaus, z. B. in Mechanik, Fluidtechnik, Optik, Akustik, Chemie und Biotechnik. Die Mikrosystemtechnik ist eine Schlüsseltechnologie, die Wachstumsmärkte eröffnet – darüber sind sich die Experten einig. Bereits im Jahr 2002 wurde in Deutschland ein Absatzvolumen von rund 50 Mrd. € direkt oder indirekt von Mikrosystemtechnik beeinflusst. Einer Studie des VDE zufolge werden deutsche Unternehmen bei dieser Schlüsseltechnologie bis zum Jahr 2010 eine führende Rolle einnehmen.

Der vorliegende Beitrag zeigt auf, wie mit einem stark untersetzenden Mikrogetriebe neue Anwendungen mit hohen Präzisionsanforderungen unter anderem im Bereich der Optischen Technologien erschlossen werden können.

1 Einleitung

Vom Endverbraucher unbemerkt bringen filigrane Baugruppen Intelligenz, Präzision und Zuverlässigkeit in die Produkte des Maschinen- und Gerätebaus, der Kommunikations- und Medizintechnik, der chemischen oder der Automobilindustrie. Wenn sich im Auto der Airbag öffnet, das Antiblockiersystem einsetzt oder der nächste Servicetermin im Display angezeigt wird, sind dafür winzige Sensoren, Motoren und Getriebe verantwortlich. Mehr als 40 Mikrosysteme werden durchschnittlich im Auto verbaut.

Vorangetrieben von der Halbleitertechnik schreitet seit einiger Zeit auch im Maschinenbau die Miniaturisierung von Bauteilen voran. Beispiele für Mikrosysteme in der Antriebstechnik sind derzeit eher noch exotischer Natur, aber es gibt eine deutliche Nachfrage nach kleinen Geräten für die Herstellung, Handhabung und Prüfung kleiner Objekte. Diese wiederum benötigen kleine Antriebe für Positionierachsen.

2 Anforderungen an miniaturisierte Antriebe

Mikroantriebssysteme in diesen innovativen Anwendungen sollen nicht nur geringe Baugröße und Eigengewicht aufweisen, sondern vor allem präzise und spielfreie Bewegungsabläufe ermöglichen.



Bild 1: Größenvergleich zwischen dem Getriebe Micro Harmonic Drive (MHD) und Euro-Cents

Hohe Wiederholgenauigkeit und Präzision bei der Bewegungsübertragung stehen an oberster Stelle.

Mikrogetriebe an sich sind keine Neuheit. Mikro-Planetengetriebe oder Stirnradgetriebe werden bereits seit einigen Jahren entwickelt. Die bisherigen Lösungen weisen jedoch Nachteile auf, die eine Anwendung in Positionierachsen in Maschinen und Geräten ausschließen. Entweder sind diese Lösungen spielbehaftet, oder sie erlauben nur eine extrem niedrige zulässige Belastung. Gefordert sind daher Mikrogetriebe, die nicht nur klein sind und aus wenigen Bauteilen bestehen, sondern eine hohe Wiederholgenauigkeit, Spielfreiheit und eine hohe Übersetzung ins Langsame aufweisen (also eine hohe Untersetzung).

3 Mikrotechnische Umsetzung

Die o. g. Forderungen gaben Anstoß zur Entwicklung eines neuartigen Mikrogetriebes [1], des Micro Harmonic Drive (MHD, **Bild 1**). Dieses wurde im Jahr 2001 von der Micromotion GmbH¹ in Zusammenarbeit mit dem Institut für Mikrotechnik Mainz (IMM) entwickelt und gilt derzeit als weltkleinstes spielfreier Positionierantrieb.

Die Grundelemente dieses Getriebes werden aus dem Wave Generator und den drei Zahnradern Flexspline, Circular Spline, und Dynamic Spline gebildet (**Bild 2**). Der Wave Generator besteht aus einem Sonnenrad, das üblicherweise an der Motorwelle angebracht ist, sowie zwei elastisch verformbaren Planetenrädern. Die Verzäh-

¹ Die Micromotion GmbH in Mainz ist ein mit der Harmonic Drive AG in Limburg verbundenes Unternehmen.

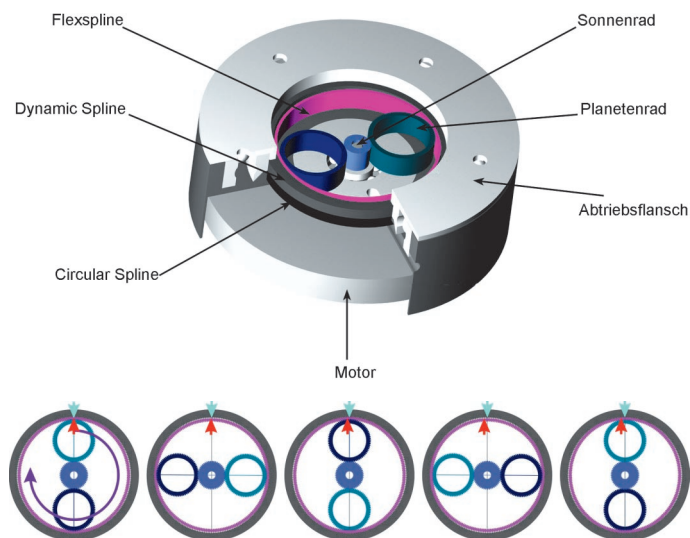


Bild 2: Bauteile und Funktionsprinzip des MHD, mit Wave Generator (hellblaues Sonnenrad und mittel- bzw. dunkelblaue Planetenräder), Flexspline (pink), Circular Spline und Dynamic Spline (zwei übereinander liegende halbhohle Hohlräder, mittel- und dunkelgrau)

nung der Planetenräder greift in die Innenverzahnung des Flexspline ein. Der Flexspline ist ein dünnwandiger, elastisch verformbarer Ring, der die Form des elliptischen Wave Generator annimmt. Die Außenverzahnung befindet sich im Eingriff mit den Innenverzahnungen sowohl des Circular Spline als auch des Dynamic Spline. Der Circular Spline ist ein innenverzahnendes Hohlrad und befindet sich im Bereich der großen Ellipsenachse des Wave Generator im Eingriff mit dem Flexspline. Der Dynamic Spline besitzt zwei Zähne mehr als der Flexspline. Der Dynamic Spline ist ein innenverzahnendes Hohlrad mit gleicher Zahnzahl wie der Flexspline. Dieses Bauteil rotiert in gleicher Drehrichtung und mit gleicher Drehzahl wie der Flexspline und wird im Untersetzungsbetrieb als Abtriebsselement benutzt. Das Funktionsprinzip des MHD ähnelt dem des „konventionellen“ Getriebes Harmonic Drive, jedoch mit dem Unterschied, dass der Wave Generator als Planetengetriebe ausgeführt wird. Dadurch

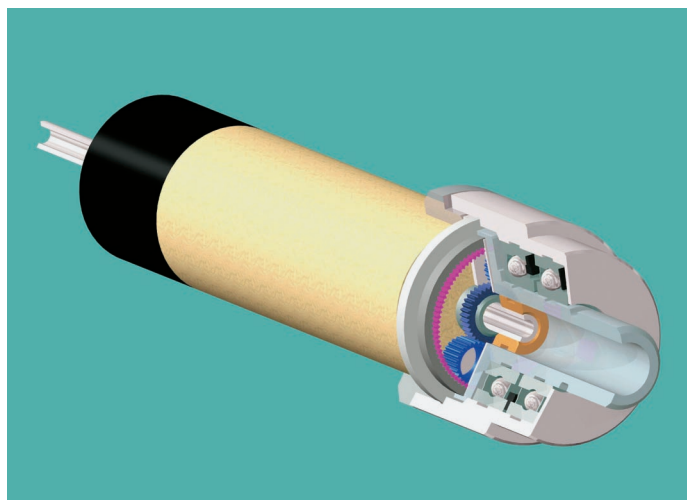


Bild 3: AC-Servoantrieb mit Hohlwelle, Gesamtlänge mit magnetischem Encoder 31,3 mm. Die Micro-Getriebebox ohne Motor misst 12,3 mm in axialer Länge und 8 mm im Außendurchmesser. Bei einer Standarduntersetzung von 160:1 wird eine abtriebsseitige Auflösung von 20 Winkelsekunden erreicht.

werden hohe Untersetzungsverhältnisse von 160:1 bis 1000:1 ermöglicht. Dies ist erforderlich, da die Mikromotoren eine sehr hohe Drehzahl haben – 50.000 1/min sind keine Seltenheit. Des Weiteren sind die Planetenräder elastisch verformbar, was eine Spielfreiheit in der Planetenstufe zur Folge hat.

Diese Lösung bietet somit eine Reihe von Vorteilen:

- Spielfreiheit bei miniaturisierter Baugröße
- Hohe Wiederholgenauigkeit für präzise Positionierung
- Hohe Drehmomentkapazität für dynamische Indexieranwendungen
- Hoher Wirkungsgrad, um Leistungsverluste zu minimieren
- Flache Bauweise
- Geringes Eigengewicht für Anwendungen in tragbaren Geräten
- Hohe Untersetzungen mit wenigen Bauteilen für die verlustarme Drehmomentvergrößerung von Mikromotoren.

4 Herstellung mittels LIGA-Technik

Konventionelle Verfahren zur Herstellung von Zahnrädern können – abhängig von der Zahngeometrie – bis zu einem minimalen Modul von 60 bis 100 μm eingesetzt werden. Allerdings müssen bei der Herstellung mit konventionellen Methoden Kompromisse hinsichtlich der Verzahnungsgeometrie akzeptiert werden. Zur Herstellung von Zahnrädern für Mikrogetriebe hat sich daher der Einsatz mikrotechnischer Verfahren bewährt, wie z.B. das LIGA-Verfahren (**L**ithographie + **G**alvanoformung + **A**bformung). Diese Technologien stammen aus der Halbleiterfertigung und basieren auf lithografischen Prozessen, d. h. 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 Millimetern Höhe und gleichzeitig Abweichungen geringer 1 μm zu erzeugen, muss hochenergetische und hochparallele Synchrotron-Strahlung verwendet werden.

Für die Herstellung des Micro Harmonic Drive wird ein Fertigungsverfahren eingesetzt, welches eine kostengünstige Serienproduktion metallischer Mikrozahnräder aus einer Nickel-Eisen-Legierung gestattet. Das galvanisch abgeschiedene Material besitzt eine Streckgrenze von 1 500 N/mm², einen niedrigen Elastizitätsmodul von 165 000 N/mm² und eine hohe Dauerfestigkeit. Es bietet somit exzellente Materialeigenschaften für hochbeanspruchbare Mikrozahnräder. Um gleichzeitig hohe Untersetzungen und geringe Abmessungen realisieren zu können, wird für die Zähne ein Modul von 34 μm verwendet, entsprechend etwa der Hälfte des Durchmessers eines menschlichen Haares.

In Zusammenarbeit mit der Maxon Motor AG ist zudem ein AC-Servoantrieb mit zentraler Hohlwelle entstanden (**Bild 3**). Dieser welt kleinste spielfreie Positionierantrieb besteht aus einem MHD-Getriebe und einem elektronisch kommutierten Maxon Motor Typ EC6 in einer Ausführung mit Hohlwelle. Der Bohrungsdurchmesser beträgt 0,65 mm – Platz genug für eine Luftversorgung, oder um Laserstrahlen oder optische Fasern hindurch zu führen.

5 Anwendungsbeispiel: hochauflösender Mikroantrieb für optomechanische Systeme

Die möglichen Anwendungsgebiete für Mikroantriebssysteme sind vielfältiger Natur. Erste Serienanwendungen sind in den Bereichen Medizintechnik, Halbleiterfertigung und Photonik zu nennen. Beim nachfolgend näher ausgeführten Beispiel handelt es sich um den Einsatz eines hochauflösenden Schrittmotors in einem Multimode-Faserschalter, der in der optischen Messtechnik beispielsweise als Multiplex-System (**Bild 4**) für die Spektroskopie oder in Belichtungssystemen seine Anwendung findet.

Das Grundkonzept des Schalters basiert auf der 1:1-Abbildung der

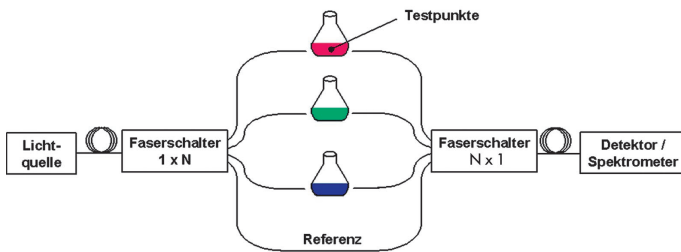


Bild 4: Faserschalter als Multiplex-System

Faserstirnfläche des Eingangskanals auf einen der N Ausgangskanäle. Durch den in der Zwischenbildebene befindlichen analogen Kippspiegel, dessen Adressierung das Umschalten zwischen den N Ausgänskanälen bewirkt, wird eine kompakte Bauform des Schalters realisiert (**Bild 5**). Der Vorteil des Konzeptes mit Spiegelkippen gegenüber herkömmlichen Schaltern, bei denen zum Beispiel die Fasern direkt zum Schalten bewegt werden, liegt in kürzeren Schaltzeiten (auch für größere Faserkerndurchmesser) und einer höheren Reproduzierbarkeit durch die fixe Position der Fasern.

Mit Hilfe einer Raytracing-Software wurde die Optik bezüglich der maximalen Koppeffizienz und des spektralen Verhaltens optimiert. Einen wesentlichen Einfluss auf die Auswahl der Optik-Komponenten hat die Spiegelgröße und der maximale Kippwinkel des Spiegels. Je größer die Auslenkung des Spiegels ist, desto mehr Ausgangskanäle N lassen sich adressieren. N hängt auch vom Kerndurchmesser der verwendeten Fasern im Bereich 50 bis 1000 μm ab. Des Weiteren wurden die theoretischen Positioniergenauigkeiten bestimmt, die für ein reproduzierbares Schaltverhalten von $< \pm 0,25\%$ gefordert werden. Die Anforderungen liegen im Bereich $< 0,5$ mrad, wodurch die Auswahl der Aktorik deutlich eingeschränkt wird.

Als Aktoren kommen unter anderem MEMS Silizium-Mikrospiegel [2] oder kommerzielle piezogetriebene Kippssysteme zum Einsatz (**Bild 6**). Beide sind in der Auslenkung auf einige Grad begrenzt. Der größere Nachteil besteht aber in den erforderlichen aufwendigen und teuren Steuerungen, die den Einsatz dieser Systeme erst ab einer relativ hohen Kanalzahl (N ca. 60) rentabel machen. Um das Marktsegment von Schaltern mit kleinerer Kanalzahl bedienen zu können, sind alternative Antriebsvarianten für Kippspiegel erforderlich. Bei hinreichender Auflösungssteigerung wird der Einsatz von Schrittmotoren möglich. Im Labor der Firma Pyramid Optics GmbH, Lederhose, einem Her-

steller hochwertiger optischer Schalter, wurde der Prototyp eines 1 x 2 Multimode-Faserschalters für Faserkerndurchmesser von 200 μm aufgebaut (**Bild 7**). Zum Kippen des Spiegels wurde ein Schrittmotor (Halfstep: 9°) mit einem Mikrogetriebe von 500:1 unteretzt, um die benötigten Positioniergenauigkeiten zu erreichen. Die Abtriebswelle wurde so konstruiert, dass die Drehachse mit der Spiegeloberfläche zusammenfällt. Die Koppeffizienz des realisierten Schalters liegt bei 85 %, die Schaltzeit zwischen zwei benachbarten Kanälen wurde zu < 20 ms bestimmt. Durch den Schrittmotor steht nur eine Kippachse zur Verfügung, diese aber mit nahezu 360° Stellwinkel. In diesem Fall begrenzt die Qualität der außeralialen Abbildung die Anzahl der Kanäle. Rechnungen haben gezeigt, dass für Faserkerndurchmesser von 1000 μm bis N = 12 Ausgangskanäle mit einer Koppeffizienz von $> 80\%$ bei einer Kanalinhomogenität $< 5\%$ adressiert werden kön-

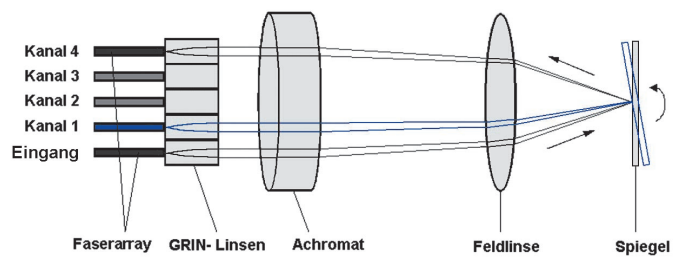


Bild 5: Schema des optischen Schalterkonzeptes (Quelle: Pyramid Optics GmbH; Lederhose)



Bild 6: Drei mögliche Aktorkonzepte für eine Spiegelkippen (Quelle: Pyramid Optics GmbH; Lederhose)

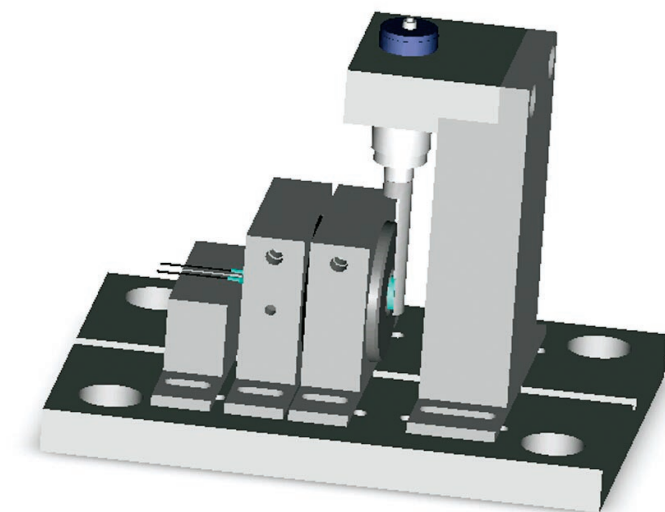
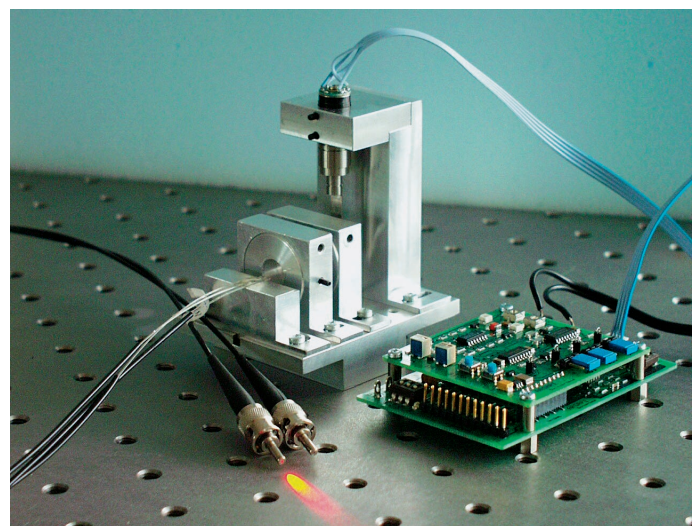


Bild 7: Laboraufbau eines 1 x 2 Multimode-Faserschalters mit drehbarem Spiegel (Quelle: Pyramid Optics GmbH; Lederhose)



nen. Durch die erfolgreiche Umsetzung von Multimode-Faserschaltern wurde gezeigt, dass Schrittmotoren mit hochauflösenden Mikrogetrieben für den Einsatz in optomechanischen Aufbauten in Frage kommen.

6 Schlussbemerkung

Die Mikrotechniken beginnen, den Kinderschuhen zu entwachsen und zu einem Innovationsmotor der Industrie zu werden: Mehr als die Hälfte aller technischen Neuerungen entstehen heute in der Mikro- und Nanowelt. Sie sind ein hervorragendes Beispiel für die Verzahnung von Forschung und Industrie. Weil Forschungsergebnisse zügig in die Tat umgesetzt werden sollen und weil es darauf ankommt, die vielfältigen Möglichkeiten der Mikroproduktionstechnik zu vermitteln, kommt dem Wissenstransfer eine entscheidende Bedeutung zu.

Literaturhinweise

- [1] Slatter E., „Präzise Miniatur-Servoantriebe erobern die Mikrowelt“, Photonik 5/2002, 74-76
- [2] Lausch C., Göring R., Wippermann F.: „Fiber optic switch concept with analog micromirror device“, SPIE 4983-39, 2003

Ansprechpartner:

Dr. Rolf Slatter
Vorstand Marketing und Vertrieb
Harmonic Drive AG
Hoenbergstraße 14
D-65555 Limburg a.d. Lahn
Tel. 06431/5008-21
Fax 06431/5008-18
eMail: slatter@harmonicdrive.de
Internet: www.harmonicdrive.de
www.mikrogetriebe.de



Kurzportrait

Dr. Rolf Slatter, Jahrgang 1962, hat am Imperial College of Science, Technology and Medicine in London studiert und im Fach Maschinenbau promoviert. Seit 1988 ist er bei der Firma Harmonic Drive AG in Limburg beschäftigt, wo er seit 2001 dem Vorstand angehört. Im gleichen Jahr wurde er Geschäftsführer der Micromotion GmbH. Er ist verheiratet und hat einen dreijährigen Sohn.

ANZEIGE(N)