



Weniger kann mehr sein

Kürzere Bauform und niedrigere Übersetzungen für spielfreie Getriebe

Rolf Slatter, Limburg/Lahn

Ein neues Zahnprofil führt nun zur Verdopplung der Drehmomentkapazität, höherer Verdrehsteifigkeit sowie längerer Lebensdauer. Eine andere Novität sind Minigetriebe, die eine Übersetzung von 30:1 ins Langsame statt bisher 50:1 ermöglichen. Damit eröffnen sich neue Anwendungsmöglichkeiten in hochdynamischen Kleinrobotern.

Der allgemeine Trend zur Miniaturisierung bei Geräten der Feinwerktechnik ist nicht zu übersehen. Sowohl die Geräte selbst als auch die Maschinen zu deren Herstellung erfordern kleinere und dynamischere Antriebe. Bei der Handhabung oder Bearbeitung von kleinen Werkstücken sind die Erwartungen in Bezug auf Genauigkeit und Dynamik merklich gestiegen, was zu einem steigenden Bedarf an hochpräzisen Getrieben oder Antrieben führt. Gerade bei hohen Anforderungen bewähren sich die Kleinstmotoren und Kleinstgetriebe der »Harmonic-Drive«-Serien.

Prinzip des Harmonic-Drive-Getriebes

Der Getriebetyp Harmonic Drive, auch als »Wellgetriebe« oder in Englisch als »Strain Wave Gear« bezeichnet, wird

heute als Standardbauelement in den verschiedensten Bereichen eingesetzt, angefangen bei Industrierobotern über Werkzeug- oder Druckmaschinen bis hin zur Mess- und Prüftechnik sowie in der Halbleiterproduktion. Das Har-

monic-Drive-Getriebe wurde 1959 von Walt Musser in den USA erfunden und zunächst in der Luft- und Raumfahrt erprobt. Hierbei waren die spezifischen Eigenschaften wie Zuverlässigkeit, geringes Gewicht und Kompaktheit von

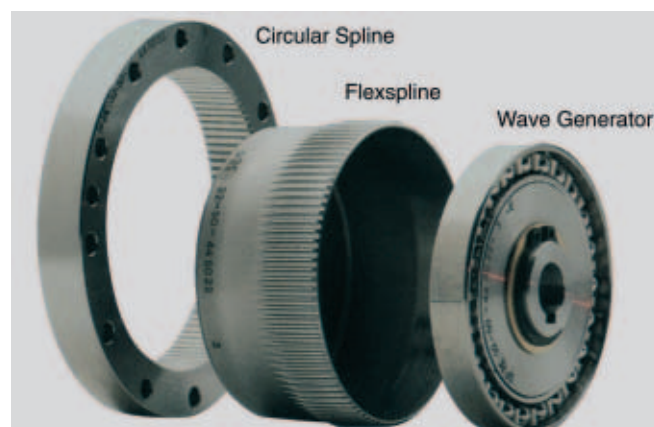


Bild 1. Harmonic-Drive-Getriebe bestehen im Wesentlichen aus drei Komponenten

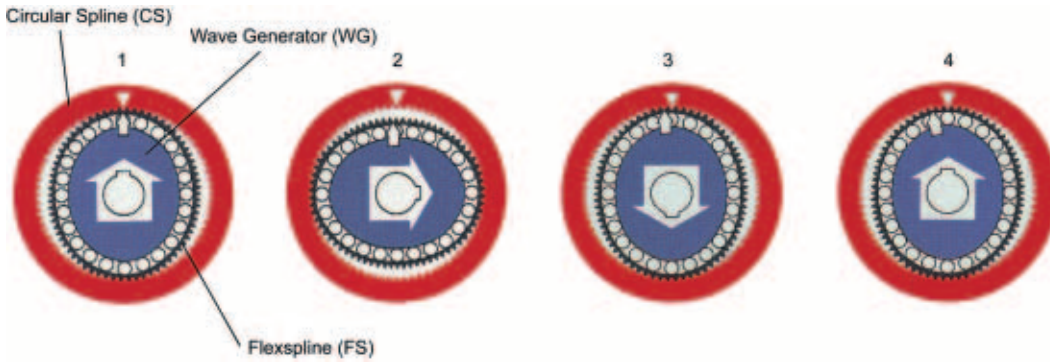


Bild 2. Funktionsprinzip: Der Wave Generator verformt den Flexspline, der in den Circular Spline greift

grundlegender Bedeutung. In diesen Anwendungsbereichen ist der Getriebetyp weiterhin nicht wegzudenken, wie eines der anschließenden Anwendungsbeispiele zeigen wird.

Das einzigartige Funktionsprinzip dieses Getriebes bietet den Anwendern Vorteile neben der hohen einstufigen Übersetzung ins Langsame, wie Spielfreiheit, hohe Verdrehsteifigkeit, kompakte Bauform sowie geringes Gewicht – Kriterien, die für den Einsatz in neuen Maschinengenerationen von zunehmender Bedeutung sind.

Das Harmonic-Drive-Getriebe ist einmalig in der Übertragung von hohen Drehmomenten über ein flexibles Bauteil. Es besteht lediglich aus drei konzentrischen Komponenten (Bild 1): dem Circular Spline (CS), einem starren zylindrischen Ring mit Innenverzahnung; dem Flexspline (FS), einer zylindrischen Stahlbüchse mit Außenverzahnung; dem Wave Generator (WG), einer elliptischen Stahlscheibe mit zentrischer Nabe und aufgezogenem, elliptisch verformbarem Dünnringkugellager.

Diese drei Bauteile arbeiten wie folgt (Bild 2):

- ▶ Der elliptische Wave Generator als angetriebenes Teil verformt über das Kugellager den Flexspline, der sich in den gegenüberliegenden Bereichen der großen Ellipsenachse mit dem innenverzahnten, fixierten Circular Spline (CS) im Eingriff befindet.
- ▶ Mit Drehen des Wave Generators verlagert sich die große Ellipsenachse und damit der Zahneingriffsbereich. Da der Flexspline zwei Zähne weniger als der CS besitzt, vollzieht sich nach einer halben Umdrehung des Wave Generators eine Relativbewegung zwischen Flex- und Circular Spline um die Größe eines Zahns. Nach einer vollen Umdrehung hat diese Relativbewegung die Größe zweier Zähne.

Bei fixiertem CS dreht sich der FS als Abtriebsselement entgegengesetzt zum Antrieb.

Auf Grund dieses Funktionsprinzips werden mit nur drei Bauteilen, je nach Baugröße, bei Getriebeaußendurchmessern von nur 20 bis 330 mm Übersetzungsverhältnisse von 30:1 bis 320:1 erzielt. Die übertragbaren wiederholbaren Spitzenmomente betragen 0,5 bis über 9000 Nm. Die Vorteile dieses Getriebeprinzips:

- ▶ hervorragende Positioniergenauigkeit von weniger als einer Winkelminute und eine Wiederholgenauigkeit von nur wenigen Winkelsekunden,
- ▶ sehr hohe Drehmomentkapazität, da die Kraftübertragung über einen großen Zahneingriffsbereich erfolgt,
- ▶ Spielfreiheit,
- ▶ keine Selbsthemmung, dadurch sowohl im Untersetzungs- als auch im Übersetzungsbetrieb einsetzbar,
- ▶ hohe Torsionssteifigkeit über den gesamten Drehmomentbereich mit nahezu linearer Hysterese,
- ▶ bei Nennbetriebsbedingungen hohe Wirkungsgrade bis zu 85 Prozent,
- ▶ minimaler Verschleiß und lange Lebensdauer durch eine geringe Gleitgeschwindigkeit auch bei hohen Eingangsdrehzahlen.

Dieses Funktionsprinzip ist auch bei Getrieben mit extrem geringen Abmessungen erfolgreich anwendbar. Das zur Zeit kleinste Harmonic-Drive-Getriebe der Baugröße 5 hat einen Außendurchmesser von nur 20 mm, jedoch ein wiederholbares Spitzenmoment von 0,45 Nm. Dieses Getriebe ist inzwi-

schen verfügbar mit den Untersetzungen 50, 80 und 100:1.

Leistungssteigerung bei kompakteren Bauformen

Wie erwähnt, ist ein deutlicher Trend zu höheren Genauigkeiten und höherer Dynamik bei Präzisionsmaschinen der Feinwerktechnik zu spüren. Es gibt bei dem Harmonic-Drive-Getriebe zwei Neuentwicklungen, die diese Anforderungen erfüllen: ein neues Zahnprofil für erhebliche Leistungssteigerung bei gleichzeitiger Reduzierung des Bauvolumens und ein neues Miniaturgetriebe mit erheblich erweitertem Übersetzungsbereich.

Dieses neue Zahnprofil ermöglicht weiterhin eine Erweiterung des Übersetzungsbereichs auf 30:1.

Bei der Weiterentwicklung des Harmonic-Drive-Getriebes bildet die Entwicklung der Verzahnung einen Schwerpunkt. Es wurde schon frühzeitig erkannt, dass viele Eigenschaften des Ge-

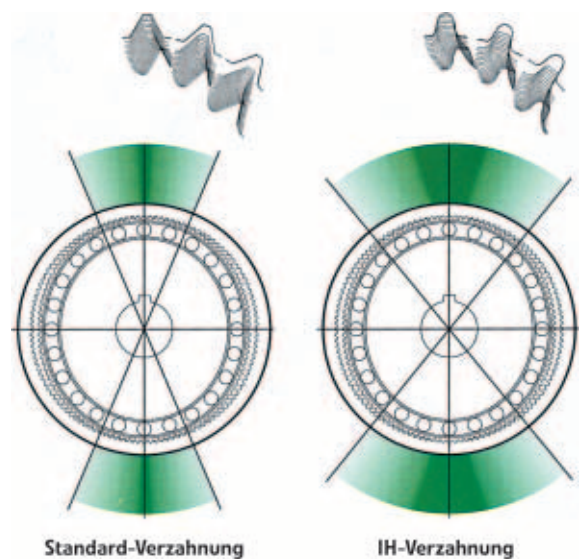


Bild 3. Bei der neuen IH-Verzahnung (rechts) ist der Zahneingriffsbereich im Vergleich zur Evolventenverzahnung vergrößert

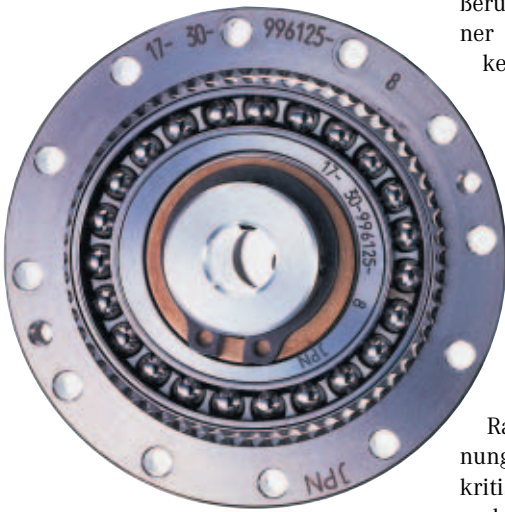


Bild 4. HFUC-Super-Mini-Getriebe mit einer Übersetzung von 30:1 ins Langsame

triebes durch eine Optimierung des Zahnprofils verbessert werden können. Umfangreiche Berechnungen, Computersimulationen und Tests bilden die Grundlage für ein verbessertes Zahnprofil, die IH-Verzahnung, die 1989 patentiert und seitdem ständig verfeinert wurde.

Bei der in Bild 3 dargestellten IH-Verzahnung ist der Zahneingriffsbereich wesentlich größer als bei einem Getriebe mit der üblichen Evolventenverzahnung. Während bei der herkömmlichen Verzahnungsgeometrie etwa 15 Prozent der Zähne im Eingriff sind, wurde dieses Verhältnis bei der IH-Verzahnung auf rund 30 Prozent gesteigert.

Diese Entwicklung bringt drei wesentliche Vorteile. Die Verdrehsteifigkeit des Harmonic-Drive-Getriebes wird hauptsächlich durch die Anzahl der sich in Kontakt befindenden Zähne bestimmt. Bei der IH-Verzahnung führt die Vergrößerung des Zahneingriffsbereichs zu einer Verdoppelung der Verdrehsteifigkeit.

Die Lebensdauer des Getriebes wiederum wird vom Kugellager des Wave Generators bestimmt (die Verzahnung ist dauerhaft ausgelegt). Der vergrößerte Zahneingriffsbereich führt auch zu einer gleichmäßigeren Lastverteilung auf dieses Kugellager, was eine mehr als doppelt so lange Lebensdauer bewirkt.

Der dritte Faktor ist der größere Radius am Zahnfuß der IH-Verzahnung: Er bewirkt eine Verringerung der kritischen Spannungen im Flexspline und führt so zu einer höheren Drehmomentkapazität bei gleichen Außenabmessungen.

Zunächst wurde diese neue Verzahnung bei größeren Getriebebaugrößen eingesetzt, wird aber seit kurzem auch bei Minigetrieben der Baugrößen 8, 11, 14 und 17 angewandt. Diese Getriebebaugrößen mit Außendurchmessern von 30 bis 60 mm übertragen Spitzendrehmomente von 1,8 bis 54 Nm.

Ein weiterer wichtiger Entwicklungsansatz betrifft die Verkürzung der axialen Baulänge des Flexspline-Topfs. Bei der Einführung der HFUC-Super-Mini-Einbausätze (Bild 4) konnte die axiale Länge des bisherigen HDUC-Getriebes um rund 40 Prozent reduziert werden. Zugleich fällt das Gewicht um etwa 20 Prozent geringer aus.

Erweiterung des Übersetzungsbereichs

Für viele Anwendungsbereiche äußerten Maschinenkonstrukteure den Wunsch nach kleineren Übersetzungen. Man möchte die Vorteile der Harmonic-Drive-Getriebe in Anwendungen nutzen, die höhere Abtriebsdrehzahlen erfordern, um Planetengetriebe, Exzentergetriebe oder Stirnradgetriebe ersetzen zu können.

Bisher war die Übersetzung 50:1 ins Langsame die niedrigste, die mit einem Harmonic-Drive-Getriebe zu erzielen war. Jetzt haben die Ingenieure es geschafft, den Übersetzungsbereich auf 30:1 zu erweitern. Wie schon erläutert, sind bei beiden Enden der Hauptachse der Wave-Generator-Ellipse mehrere Zähne im Eingriff; über die kleine Ellip-

senachse sind die Zähne nicht im Eingriff. Die Übersetzung hängt von der Zähneanzahl ab, wobei kleinere Übersetzungen weniger und größere Zähne benötigen. Das erfordert wiederum einen Wave Generator mit einer stark ausgeprägten Ellipsenform, um die Zähne an der kleinen Ellipsenachse außer Eingriff zu bringen. Dies erhöht jedoch die Biegespannung am Flexspline durch die elliptische Verformung, so dass das übertragbare Abtriebsdrehmoment begrenzt sein würde, wenn es keine Gegenmaßnahmen gäbe.

Den Entwicklungsingenieuren ist es gelungen, anhand einer dreidimensionalen Simulation des Zahneingriffs ein neues Zahnprofil mit reduzierter Zahnhöhe zu entwerfen. Damit lässt sich die



Bild 6. Dieser Roboterarm soll im Jahr 2003 Proben auf dem Mars sammeln

Ausprägung der Ellipse begrenzen. Weiterhin wurde die Flexspline-Wandstärke anhand einer FEM-Analyse derart optimiert, dass die Biegespannungen jetzt geringer sind. Last but not least wurde bei diesen neuen Getrieben die patentierte IH-Verzahnung angewandt.

Die Vorteile gegenüber Planetengetrieben und Stirnradgetrieben sind Spielfreiheit, hohe Übertragungsgenauigkeit, geringe Abmessungen und niedriges Gewicht. Auf Grund dieser Vorteile bieten sich den Maschinenkonstrukteuren neue Möglichkeiten, die Leistung ihrer Maschinen zu verbessern. Bisher waren in diesem Größen- und Übersetzungsbereich lediglich spielbehaftete Getriebe verfügbar. Wegen dieser Vorteile ist es keine Überraschung, dass diese neue Getriebebaureihe sehr schnell im Markt aufgenommen wurde, wie aktuelle Anwendungsbeispiele zeigen.

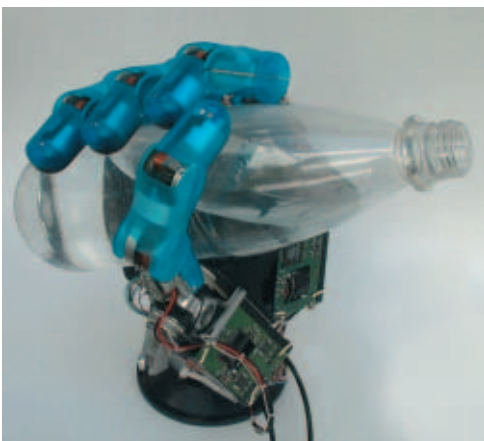


Bild 5. Jeder Finger dieser Roboterhand, entwickelt von der DLR, enthält drei Super-Mini-Getriebe

Anwendungsbeispiele

Die Super-Mini-Getriebe der Baureihe HFUC sind besonders interessant für die Hersteller von Scara-Robotern, Montageautomaten, Servicerobotern, Bestückungsautomaten, Mess- und Prüfmaschinen sowie von optischen Geräten. Darüber hinaus ermöglichen die neuen Getriebe die Realisierung von ganz neuen Anwendungen.

Bei der Entwicklung von Leichtbaurobotern zum Beispiel spielt das Deutsche Zentrum für Luft- und Raumfahrt (DLR) in Oberpfaffenhofen eine führende Rolle. Auf der letzten Hannover Messe wurde ein Roboter mit 7 kg Traglast ausgestellt, dessen Eigengewicht, einschließlich Elektronik, nur 18 kg beträgt. Inzwischen hat dieser Roboter einen Greifer in Form einer künstlichen Hand erhalten, die mit vier Fingern ausgestattet ist (Bild 5). In jedem Finger werden drei der neuen Super-Mini-Getriebe eingesetzt. Bei dieser Anwendung sind kompakte Bauweise und sehr geringes Ge-

wicht bei hoher Drehmomentkapazität entscheidend, da alle Antriebselemente, einschließlich der Getriebe und Motoren, in einem sehr begrenzten Bauraum untergebracht werden müssen.

Diese Eigenschaften sind auch in der Luft- und Raumfahrt gefragt. Bild 6 zeigt einen fünffachsigen Roboterarm der britischen Firma Astrium, der im Beagle-2-Programm entwickelt wurde. Sechs Monate nach dem Start im Juni 2003 soll Beagle 2 auf der Oberfläche des Mars auftreffen. Der Roboter soll dort Steine untersuchen und Proben sammeln zwecks Analyse auf dem Landegerät. Das Eigengewicht des Arms beträgt lediglich 2,4 kg. In allen fünf Gelenken werden HFUC-Super-Mini-Getriebe in einer speziellen Ausführung, bestehend aus korrosionsbeständigen Werkstoffen für die Raumfahrt, eingesetzt.

Autor

Dr. Rolf Slatter ist Leiter Marketing und Vertrieb bei Harmonic Drive in Limburg/Lahn.

Dualer Motor-Treiber

Mit dem ›L6219DS‹ von Allegro bietet Insight, Unterhaching, einen Motortreiber zur Ansteuerung beider Windungen eines bipolaren Zweiphasen-Schrittmotors oder zur bidirektionalen Steuerung zweier DC-Motoren an (www.insight.dememec.com).

Jede der zwei internen H-Brücken ist für einen Ausgangsstrom von ± 750 mA und eine Spannung von maximal 45 V ausgelegt. Die Ausgänge wurden auf eine minimale Sättigungsspannung hin optimiert. Der maximale Ausgangsstrom wird über eine einstellbare Referenzspannung und die Wahl des Strommesswiderstands bestimmt. Über zwei Logik-Eingänge kann der Ausgangsstrom auf 0, 33, 67 oder 100 Prozent des Maximalstroms limitiert werden. Ein zusätzlicher Phaseingang legt die Stromrichtung für jede der beiden Brücken fest. Der L6219DS besitzt einen thermischen Shutdown und einen Crossover-Current-Schutz.