

Weiterentwicklung eines Präzisionsgetriebes für die Robotik

Teil II: Höhere Drehmomente und weitere Übersetzungen

ROLF SLATTER

Seit Ende der Apollo-Mission hat das Getriebe der Harmonic-Drive-Bauart zahlreiche weitere Anwendungen wie zum Beispiel in Robotern und Werkzeugmaschinen errungen. Nachdem Teil I [1] zuerst einen Überblick über Grundlagen der Funktionsweise sowie über vielfältige Anwendungsgebiete dieses spielarmen Getriebes gab, stellt Teil II jetzt besondere Merkmale des weiterentwickelten Präzisionsgetriebes (Bild 1) vor. Hierzu zählen zwei Baureihen, welche die Erhöhung des Nenndrehmoments um 30 Prozent sowie die Erweiterung der Übersetzung ins Langsame von 50:1 auf 30:1 aufweisen.

1 Einleitung

In Teil I [1] dieses dreiteiligen Beitrags wurden im Januarheft zunächst die Funktionsweise und die Vorteile des Harmonic-Drive®-Getriebes im Überblick dargestellt. Hier in Teil II werden nun besondere Merkmale des Getriebes präsentiert. Es werden Weiterentwicklungen hinsichtlich einer erhöhten Drehmomentkapazität sowie einer Erweiterung des Übersetzungsbereichs detailliert vorgestellt. Der Teil II wird abgerundet durch einige aktuelle Anwendungsbeispiele.

Teil III wird in der Septemerausgabe erscheinen. Er berichtet abschließend über Neuentwicklungen im Bereich der Leichtbaugesetze sowie über hochintegrierte Servoantriebe.

2 Erhöhte Drehmomentkapazität bei Super-Getrieben

Sowohl bei Industrierobotern als auch bei Servicerobotern wird zur Zeit versucht, das Verhältnis zwischen Eigengewicht und Traglast zu minimieren. Diese Entwicklung war auf der Hannover-Messe 2000 deutlich



1: Präzisionsgetriebe „CSG Super Harmonic Drive“ mit besserem Drehmoment und längerer Lebensdauer

zu erkennen. Hier stellen führende Roboterhersteller zum ersten Mal neue Geräte vor, in denen Leichtbauwerkstoffe wie Kohlenfaser verstärkte Kunststoffe eingesetzt wurden. Bei diesem Entwicklungstrend spielen auch mechanische Übertragungselemente eine wesentliche Rolle, was zu einer deutlichen Marktforderung nach einer höheren Leistungsdichte führt. In anderen Worten: Es wird nach mehr Drehmoment pro Kilogramm Getriebegewicht gefragt.

Grundsätzlich bestehen verschiedene Möglichkeiten, diesen Marktforderungen nachzukommen. Eine Verkürzung der axialen Länge des Getriebes, um das Bauvolumen zu minimieren, wurde schon in Teil I beschrieben. Eine weitere Möglichkeit, nämlich Leichtbauwerkstoffe einzusetzen, wird in Teil III detailliert erklärt werden. In diesem Teil II wird eine dritte Möglichkeit dargestellt. Die Leistungsdichte lässt sich auch dadurch erhöhen, dass die Tragfähigkeit der einzelnen Getriebebauteile erhöht wird.

Wie in Teil I schon beschrieben, besteht das Harmonic-Drive-Getriebe lediglich aus drei konzentrischen Bauteilen, und bei allen drei werden sich jetzt neue Eigenschaften durch eine konstruktive Optimierung bzw. durch neue Herstellungsverfahren ergeben.

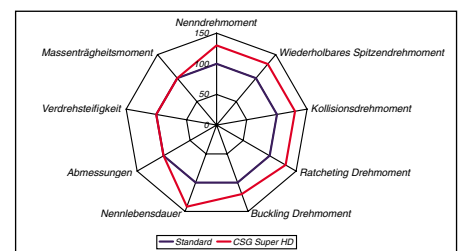
Seit rund zwei Jahren arbeiten die Ingenieure von Harmonic Drive an der Entwicklung des Getriebes „CSG Super Harmonic Drive“ (Bild 1). Diese neue Baureihe hat dieselben Abmessungen wie die „Standard“-HFUC-Baureihe, bietet aber folgende bemerkenswerten Vorteile:

- Das Nenndrehmoment ist um 30 % höher,
- das wiederholbare Spitzenmoment ist um 30 % höher,
- das übertragbare Kollisionsmoment ist um 30% höher und

- die Nennlebensdauer liegt um 42 % höher als bei der Standardbaureihe HFUC von Harmonic Drive. Diese Vorteile sind in Bild 2 dargestellt worden. In diesem Polardiagramm sind die Werte für die Standard-HFUC-Baureihe als 100%-Werte in Blau eingezeichnet worden. Die Vergleichswerte für die neue Baureihe, welche die Bezeichnung „CSG Super HD“ trägt, sind in Rot dargestellt.

Hier sieht man auch, dass die übertragbaren Drehmomente im Fall einer statischen Überlastung (Buckling-Drehmoment) und einer dynamischen Überlastung (Ratcheting-Drehmoment) ebenfalls um mindestens 30 % gestiegen sind. Wie angedeutet, sind diese nennenswerten Leistungssteigerungen auf eine Optimierung der einzelnen Bauteile zurückzuführen:

- Die Außenverzahnung des Flexspline ist bei der neuen Baureihe nitriert worden, um eine höhere Tragfähigkeit zu gewährleisten. Bisher war eine solche Behandlung bei dünnwandigen Bauteilen sehr schwierig; aber die Entwicklung von neuen Niedrigtemperatur-Nitrierverfahren, die eine verzugsfreie Behandlung ermöglichen, erlaubt die Anwendung dieser Technik.
- Eine erhöhte Tragfähigkeit der Flexspline-Außenverzahnung kann nur dann voll zur Geltung kommen, wenn auch die Circular-Spline-Innenverzahnung verstärkt wird. Bei der neuen Baureihe wird diese Verzahnung beschichtet, um auch hier eine höhere Tragfähigkeit zu gewährleisten.
- Neue Untersuchungen haben gezeigt, dass eine Abstimmung des Zahnprofils mit dem Ellipsenprofil des Wave Generators zu einer gleichmäßigeren Belastung des Wave-Generator-Lagers führen kann. Aus diesen Untersuchungen wurde eine neue Ellipsenform entwickelt und patentiert, die eine längere Lagerlebensdauer ermöglicht.
- Neue Entwicklungen im Bereich der Kugellagertechnik werden auch bei der neuen Baureihe umgesetzt. Mittels einer neuen Wärmebehandlung wird eine verschleißfes-



2: Vergleich der Standardbaureihe HFUC mit der weiterentwickelten Baureihe „CSG Super Harmonic Drive“

Dr.-Ing. Rolf Slatter ist als Leiter Marketing & Vertrieb bei der Harmonic Drive AG in 65555 Limburg tätig



3: Präzisionsgetriebe „HFUC Super Mini“ mit kleinerer Übersetzung dank optimierter Verzahnung

te Oberfläche am Wave-Generator-Lager gebildet, welche zu einer höheren Tragfähigkeit sowie zu einem verstärkten Widerstand gegen kontaminierten Schmierstoff führt.

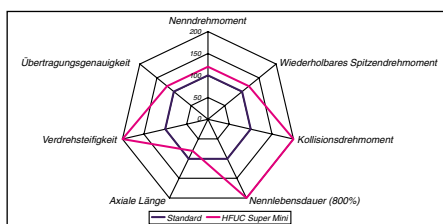
Zunächst wird die neue Baureihe „CSG Super HD“ in den Baugrößen 25, 30 und 40 im Markt eingeführt. Diese Getriebe decken Spitzendrehmomente bis 843 Nm bei einem Außendurchmesser von nur 135 mm ab. Die Baugrößen 20, 45, 50, 58 und 65 werden in der zweiten Hälfte des Jahres 2000 auf den Markt kommen.

3 Erweiterter Übersetzungsbereich bei Mini-Getrieben

In vielen Anwendungsbereichen wurde von Maschinenkonstruktoren gegenüber dem Unternehmen Harmonic Drive der Wunsch nach kleineren Übersetzungen geäußert. Man möchte die Vorteile der Harmonic-Drive-Getriebe, das heißt Spielfreiheit, kompakte Bauform und geringes Gewicht, auch in Anwendungen nutzen, die höhere Abtriebsdrehzahlen erfordern. Damit möchte man Planetengetriebe, Exzentergetriebe oder Stirnradgetriebe ersetzen.

Bisher war die Übersetzung 50:1 (ins Langsame) die niedrigste, die mit einem Harmonic-Drive-Getriebe erreicht werden konnte. Jetzt haben die Ingenieure von Harmonic Drive es geschafft, den Übersetzungsbereich auf 30:1 nach unten zu verbreitern.

Wie in Teil I schon erläutert, sind an beiden Enden der Hauptachse der Wave-Generator-Ellipse mehrere Zähne im Eingriff; über die kleine Ellipsenachsen sind die Zähne nicht im Eingriff. Die Übersetzung hängt von der Zähnezahl ab, wobei kleinere Übersetzungen (ins Langsame) weniger und damit größere Zähne benötigen. Dies erfordert wiederum einen Wave Generator mit einer stark ausgeprägten Ellipsenform, um die Zähne an der kleinen Ellipsenachse



4: Vergleich der Vorgängerbaureihe HDUC mit der weiterentwickelten Baureihe „HFUC Super Mini“

außer Eingriff zu bringen. Jedoch erhöht dies die Biegespannung am Flexspline durch die elliptische Verformung, so dass das übertragbare Abtriebsdrehmoment begrenzt werden würde, wenn keine Gegenmaßnahmen getroffen werden.

Den Entwicklungsingenieuren von Harmonic Drive ist es nun gelungen, anhand einer dreidimensionalen Simulation des Zahneingriffs ein neues Zahnprofil mit reduzierter Zahnhöhe zu entwerfen. Damit kann die stark ausgeprägte Ellipsenform wieder begrenzt werden. Weiterhin ist die Flexspline-Wandstärke anhand von FEM-Analysen derart optimiert worden, dass die Biegespannungen minimiert werden können. Last but not least, wird bei diesen neuen Getrieben des Namens „HFUC Super Mini“ (Bild 3) die patentierte IH-Verzahnung angewendet. Wie schon in Teil I beschrieben, ist der Anteil tragender Zähne wesentlich größer als bei Getrieben mit herkömmlicher Evolventenverzahnung. Bis zu 30%



5: Scara-Roboter der Firma Robert Bosch GmbH für Reinräume, ausgestattet mit Harmonic-Drive-Getrieben

der Zähne sind gleichzeitig im Eingriff, was die Verdrehsteifigkeit, die Nennlebensdauer und die Drehmomentkapazität der Getriebe erhöht. Die Vorteile der neuen HFUC-Super-Mini-Getriebe, verglichen mit den bisherigen HDUC-Mini-Getrieben, lauten wie folgt:

- Das Nenndrehmoment ist um 20% höher,
- das wiederholbare Spitzendrehmoment ist um 20% höher,
- das übertragbare Kollisionsmoment ist um 100% höher und
- die Nennlebensdauer liegt um das Achtfache höher.

Weiterhin weisen die neuen Getriebe von Harmonic Drive folgende Merkmale auf:

- eine um 20% kürzere axiale Länge,
- eine um 20% höhere Übertragungsgenauigkeit und
- eine um 50% größere Verdrehsteifigkeit.

Diese Vorteile sind in Bild 4 auch in Form eines Polardiagramms dargestellt worden. Die Werte der bisherigen Standard-HDUC-Baureihe sind als 100%-Werte gesetzt worden und in Blau dargestellt. Die Werte für die neue HFUC-Super-Mini-Baureihe sind in Magenta eingezeichnet worden.

Zunächst werden die Baugrößen 8, 11, 14 und 17 mit einem wiederholbaren Spitzendrehmoment bis 16 Nm, einer Übertragungsgenauigkeit von 1,5 Winkelminuten und einem Außendurchmesser bis 60 mm im Markt eingeführt. In der zweiten Jahreshälfte 2000 folgen die Baugrößen 20, 25 und 32 mit wiederholbaren Spitzendrehmomenten bis 200 Nm. Die Vorteile der neuen Baureihe gegenüber Planetengetrieben und Stirnradgetrieben sind erwähnenswert:

- Spielfreiheit,
- hohe Übertragungsgenauigkeit,
- kleine Abmessungen und
- geringes Gewicht.

Aufgrund dieser Vorteile bieten sich den Maschinenkonstruktoren neue Möglichkeiten, die Leistung ihrer Maschinen zu verbessern. Bisher waren in diesem Größenbereich lediglich spielbehaftete Getriebe verfügbar. Aufgrund der Vorteile ist es keine Überraschung, dass diese neue Baureihe sehr schnell vom Markt angenommen wurde, wie es im nächsten Abschnitt anhand aktueller Anwendungsbeispiele noch genauer beschrieben wird.

4 Zwei Anwendungsbeispiele

Die nennenswerten Vorteile der neuen Baureihe „CSG Super Harmonic Drive“ sind natürlich für die Hersteller von Industrierobotern besonders interessant. Die Merkmale der neuen Baureihe sind auch bei anderen Getriebebauformen verfügbar, und HFUS-Units (siehe auch Teil I) mit der neuen Wave-Generator-Ausführung sind schon in neuen Scara-Robotern der Firma Robert Bosch GmbH im Einsatz. Bild 5 zeigt die neueste Ausführung dieser Roboterbaureihe, nämlich eine Sonderausführung für den Einsatz im Reinräumen. Die neue Ausführung kann bis zur Reinraumklasse 1 eingesetzt werden. Dafür sind alle rotierenden Bauteile und Antriebs Elemente völlig gekapselt, und die Bewegungsabläufe des Roboters wurden modifiziert, um die Strömungsverhältnisse im Reinraum so wenig



6: Skelett eines Fingers für die künstliche Hand eines Leichtbauroboters der Firma DLR, ausgestattet mit Harmonic-Drive-Getrieben

wie möglich zu beeinflussen. Entscheidend für die Wahl des Harmonic-Drive-Getriebes war die hohe Positioniergenauigkeit, die hohe Drehmomentkapazität und die lange Lebensdauer.

Bei der Entwicklung von Leichtbaurobotern spielt das Deutsche Zentrum für Luft- und Raumfahrt e. V. (DLR) in Oberpfaffenhofen eine führende Rolle. Auf der Hannover-Messe 2000 wurde vom DLR ein Leichtbauroboter mit 7 kg Traglast ausgestellt, dessen Eigengewicht einschließlich Elektronik nur 18 kg beträgt. Bald soll dieser Roboter einen Greifer in Form einer künstli-

chen Hand erhalten. In jedem der vier Finger des Greifers werden drei neue Einbausätze der Getriebe „HFUC Super Mini“ mit der Übersetzung 30:1 eingesetzt. Bei dieser Anwendung ist eine kompakte Bauweise und ein sehr geringes Gewicht bei hoher Drehmomentkapazität entscheidend. **Bild 6** zeigt das Skelett eines Fingers ohne Abdeckung. Hier ist es klar ersichtlich, warum die kompakte Bauweise so wichtig ist. Denn schließlich müssen alle Antriebskomponenten einschließlich der Getriebe und Motoren in einem sehr begrenzten Bauraum untergebracht werden.

Literaturhinweis:

[1] Slatter, R.: Weiterentwicklung eines Präzisionsgetriebes für die Robotik. Teil I: Grundlagen und Überblick. *antriebstechnik 39* (2000), Nr. 1, S. 39–42

Anmerkung der Redaktion

Weitere Informationen über die beschriebenen spielarmen Getriebe können mit der folgenden Kennzahl von unseren Lesern angefordert werden, indem sie diese in ihre Leserdienstkarte am Heftende eintragen.

HARMONIC DRIVE

347