

Weiterentwicklung eines Präzisionsgetriebes für die Robotik

Teil I: Grundlagen und Überblick

SLATTER, ROLF

Vor mehr als 25 Jahren wurden die ersten Getriebe der Harmonic-Drive-Bauart mit der Apollo-Mission auf den Mond geschickt. Seitdem haben die Getriebe (Bild 1) zahlreiche weitere Anwendungen wie Roboter, Werkzeugmaschinen und Bestückungsautomaten gefunden. Dieser Beitrag stellt Weiterentwicklungen und Anwendungen dieser spielarmen Bauart vor, die nun hinsichtlich der Merkmale kleinere Übersetzungen und höhere Drehmomente (Teil II) sowie Leichtbau und Kompaktheit (Teil III) optimiert wurden. Teil I gibt zunächst einen Überblick über die Funktionsweise des Getriebes.

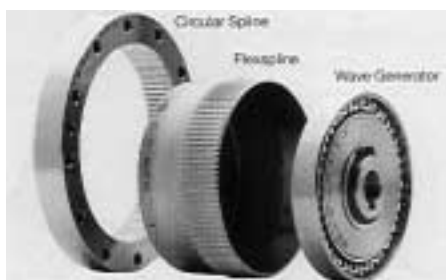
1 Einleitung

Die Bedeutung von Robotern nimmt stetig zu. So gibt es Roboter, die Chirurgen bei Operationen unterstützen, Autos betanken, Flugzeuge reinigen, Gebäude bauen oder Meteoriten suchen. Für diese neuen Anwendungen, die außerhalb der konventionellen Anwendungsbereiche für Roboter – wie beispielsweise in der Automobilindustrie – liegen, wird oft der Begriff Serviceroboter verwendet. Laut dem Fraunhofer-Institut für Produktionstechnik und Automatisierung (IPA) in Stuttgart ist „ein Serviceroboter eine frei programmierbare Bewegungseinrichtung, die teil- oder vollautomatisch Dienstleistungen verrichtet. Dienstleistungen sind dabei Tätigkeiten, die nicht der direkten industriellen Erzeugung von Sachgütern, sondern der Verrichtung von Leistungen für Menschen und Einrichtungen dienen“.

Fest steht, dass technische Fortschritte auf den Gebieten Sensor-, Steuerungs- und Antriebstechnik es jetzt möglich machen, dass Roboter mit künstlicher Intelligenz auch außerhalb der industriellen Fertigung, wo sie z. B. als Knickarmroboter Karosse-



1: Moderner Getriebeeinbausatz eines Harmonic-Drive-Getriebes



2: Das Getriebe kommt mit nur drei Bauteilen aus

rien zusammen schweißen, ihre neuen Anwendungsgebiete finden. Im Bereich der Antriebstechnik stellen Roboter so neue Forderungen an die Hersteller von Getrieben und Elektromotoren. Die neuen Anwendungen fordern Roboter, die mobil, leicht und besonders beweglich sind. Ohne Getriebe und Elektromotoren, die neue Maßstäbe in Bezug auf Leistungsdichte und Genauigkeit setzen, sind viele Serviceanwendungen nicht zu realisieren. In diesem dreiteiligen Beitrag werden die neuen Entwicklungen des so genannten Harmonic-Drive-Getriebes speziell für Anwendungen in diesem Bereich vorgestellt. Der vorliegende Teil I gibt zunächst einen Überblick und stellt das Funktionsprinzip vor. Die neuen Entwicklungen bieten auch Konstrukteuren von Robotern für „konventionelle“ Anwendungen im Bereich Bahnschweißen, Montage usw. eine Vielzahl von Möglichkeiten, die Leistung ihrer Geräte zu steigern. In zwei weiteren Beiträgen (Teile II und III im Laufe des Jahres 2000) werden die Fortschritte im Detail dargestellt.

nele“ Anwendungen im Bereich Bahnschweißen, Montage usw. eine Vielzahl von Möglichkeiten, die Leistung ihrer Geräte zu steigern. In zwei weiteren Beiträgen (Teile II und III im Laufe des Jahres 2000) werden die Fortschritte im Detail dargestellt.

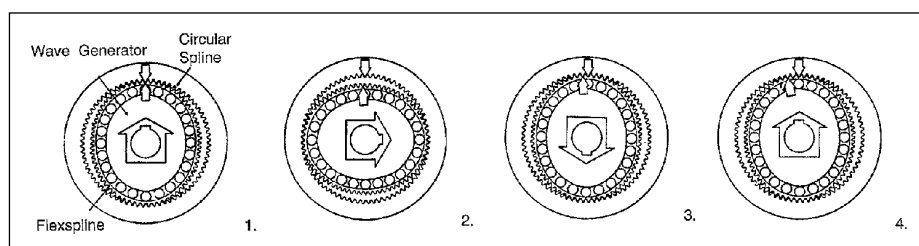
2 Funktionsprinzip und Vorteile

Das Harmonic-Drive-Getriebe mit seiner bemerkenswert hohen Übersetzung ins Langsame wurde vor über 30 Jahren erfunden und zunächst in der Luft- und Raumfahrt erprobt. Seither hat es sich in zahlreichen Anwendungen in Industrierobotern, Werkzeugmaschinen, Druckmaschinen und in feinwerktechnischen Geräten bewährt. Seit Dezember 1999 ist der Name „Harmonic Drive“ als eingetragenes Warenzeichen der Harmonic Drive AG geschützt. Das Funktionsprinzip dieser Getriebebauart ist mechanisch äußerst interessant und nicht mit herkömmlichen Stirnrad- oder Planetengetrieben zu vergleichen. Das Getriebe ist einmalig geeignet für die Übertragung von hohen Drehmomenten über nur ein flexibles Bauteil. Es besteht lediglich aus drei konzentrischen Bauteilen (Bild 2):

- dem Circular Spline, einem starren zylindrischen Ring mit Innenverzahnung,
- dem Flexspline, einer zylindrischen Stahlbuchse mit Außenverzahnung und
- dem Wave Generator, einer elliptischen Stahlscheibe mit zentrischer Nabe und aufgezogenem, elliptisch verformbaren Dünnringkugellager.

Diese drei konzentrischen Bauteile eines Harmonic-Drive-Getriebes arbeiten in vier Schritten wie folgt zusammen (Bild 3):

1. 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 im Eingriff befindet.
2. Mit Drehen des Wave Generators verlagert sich die große Ellipsenachse und damit der Zahneingriffsbereich.



3: Funktionsprinzip und Arbeitsweise in vier Schritten

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

3. Da der Flexspline zwei Zähne weniger als der Circular Spline besitzt, vollzieht sich nach einer halben Umdrehung des Wave Generator eine Relativbewegung zwischen Flexspline und Circular Spline um die Größe eines Zahns.

4. Nach einer vollen Umdrehung liegt eine Relativbewegung um die Größe zweier Zähne vor. Bei fixiertem Circular Spline dreht sich der Flexspline als Abtriebsselement entgegengesetzt zur Antriebsdrehrichtung.

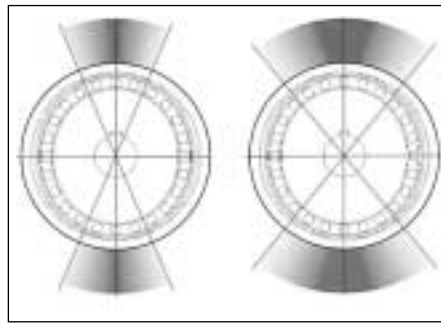
Im Vergleich mit herkömmlichen Getrieben bietet die beschriebene Getriebebauart dem Anwender zahlreiche Vorteile:

- Aufgrund des großen Zahneingriffsbereichs steht eine Drehmomentkapazität zur Verfügung, die mit konventionellen Antriebslösungen doppelten Bauraums und dreifachen Gewichts vergleichbar ist.
- Die Positioniergenauigkeit liegt unter einer Winkelminute, und die Wiederholgenauigkeit beträgt nur wenige Winkelsekunden.
- Aufgrund der funktionsbedingten Vorspannung und der radialen Zahnbewegung dieser Getriebebauart liegt so gut wie kein Spiel in der Verzahnung vor.
- Mit nur drei Bauteilen werden, je nach Baugröße, in einer Stufe Übersetzungen von 30:1 bis 320:1 bei Getriebeaußendurchmessern von nur 20 bis 330 mm erzielt. Die Spitzendrehmomente betragen 0,5 bis über 9000 Nm.
- Auch bei sehr geringen Abtriebsdrehzahlen werden Wirkungsgrade von bis zu 85% erreicht.
- Die Relativbewegungen der Zähne beschränken sich fast ausschließlich auf radiale Bewegungen, und die Gleitgeschwindigkeit zwischen den Zähnen ist auch bei hohen Drehzahlen sehr gering. Der Zahnverschleiß ist daher vernachlässigbar.

Die Kombination dieser Leistungsmerkmale begründet den Einsatz dieser Getriebebauart in nahezu allen Bereichen des modernen Maschinenbaus. Die langjährigen Erfahrungen mit diesen Getrieben in zahlreichen Anwendungen der Industrierobotik sowie der Luft- und Raumfahrt waren ideale Voraussetzungen für die Entwicklung von neuen Getrieben für den wachsenden Markt der Serviceroboter. Diese Weiterentwicklungen kombinieren die Präzision und die Drehmomentkapazität von Getrieben für Industrieroboter mit dem leichten Gewicht und der kompakten Bauform von Getrieben für die Luft- und Raumfahrt.

3 Weiterentwicklung des Harmonic-Drive-Getriebes

Wie schon angedeutet, ist die Beweglichkeit eines der Hauptmerkmale von vielen Servicerobotern. Entweder sind die Roboter auf mobilen Plattformen aufgebaut oder sie sind tragbar. Des Weiteren verfügen ei-



4: Vergleich der Traganteile einer herkömmlichen Evolventenverzahnung (a) und der modernen IH-Verzahnung (b)

Der Traganteil wird als schraffierter Winkelbereich dargestellt

nige Serviceroboter über eine Vielzahl von Achsen, um komplexe Handhabungsaufgaben ausführen zu können. Der gemeinsame Nenner sind auf Getrieben basierende Antriebe mit einer besonders hohen Leistungsdichte.

Grundsätzlich sind für die mobilen Geräte pneumatische, hydraulische oder elektrische Antriebe mit Mechanikkomponenten denkbar. Pneumatische Antriebe können nur relativ kleine Kräfte erzeugen, erfordern einen hohen Aufwand zur Druckluft-erzeugung und sind, insbesondere wenn die Druckluft-erzeugung auf dem Gerät selbst erfolgt, sehr schwer. Eine externe Versorgung benötigt eine Vielzahl von Leitungen für die Ansteuerung der Aktuatoren, wodurch diese Lösung oft unpraktikabel wird. Bei der Hydraulik sind die Verhältnisse günstiger, weil die von den Kolben erzeugbaren Kräfte sehr viel höher sind. Dennoch können diese Vorteile erst bei sehr großen und schweren Maschinen ausgenutzt werden, weil auch hier eine sehr schwere Versorgungseinheit benötigt wird. Diese Antriebsart kommt daher nur bei mobilen Systemen zum Einsatz, deren Eigengewicht sehr hoch ist.

Schlussendlich sind elektrische Antriebe die erste Wahl bei der Mehrheit der bisher realisierten Lösungen. Denn neben dem großen Verhältnis von Leistung zu Gewicht zeichnen sie sich im Allgemeinen durch eine gute Steuerbarkeit und Überlastbarkeit aus. Kombiniert man diese Vorteile mit denen eines Harmonic-Drive-Getriebes, erhält man einen nahezu optimalen elektromechanischen Antrieb. Aufgrund der geringen Anzahl von Bauteilen sowie der kompakten Bauform ist das Harmonic-Drive-Getriebe für alle Arten von Anwendungen prädestiniert, wo es auf Leichtbau und Hochleistung ankommt.

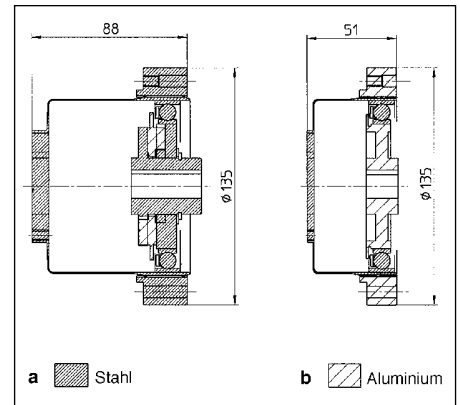
Dies wurde von den Konstrukteuren von Servicerobotern früh erkannt. Harmonic-Drive-Getriebe haben ihren großen Anteil an vielen Meilensteinen der Serviceroboterentwicklung. Als Beispiel seien hier nur genannt:

- der stereotaktische Manipulator von Carl Zeiss für die Unterstützung der Gehirnochirurgie,
- der Operationsroboter „Minerva“ von EPFL in der Schweiz,
- der Multifunktionsroboter von Daimler-Chrysler in Deutschland sowie
- der Humanoid-Roboter von Honda Engineering in Japan.

Bis jetzt lag der Schwerpunkt der Anwendungen jedoch bei „statischen“ Geräten, zunehmend ergeben sich aber auch Anwendungen in mobilen Robotern wie z. B in:

- Gelenken für die Arme und Beine von Laufmaschinen,
- Fingergelenken für künstliche Hände,
- Radantrieben für mobile Plattformen oder
- Schwenkachsen für Kameras als Teil von Vision-Systemen.

Die Weiterentwicklung des Harmonic-Drive-Getriebes reflektiert diese neuen Marktanforderungen. Als besonders wichtig für Anwendungen in autonomen mobilen Systemen bzw. Servicerobotern sind die folgenden Entwicklungsansätze zu sehen:



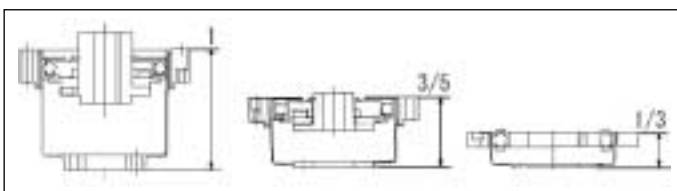
6: Vergleich eines Standard- mit einem Leichtbaugesetriebe
a: Standardgetriebe HDUC-40-160-BLR aus Stahl und Gusseisen,
b: Leichtbaugesetriebe HFUC-40-160-SP aus Aluminium

- Optimierung der Verzahnung, um die Drehmomentkapazität zu erhöhen,
- Erweiterung des Übersetzungsbereichs nach unten (von derzeit $i = 50:1$ auf dann 30:1),
- Veränderung der Bauform des Flexsplines hin zur Kompaktbauweise,
- Entwicklung hin zur Leichtbauweise,
- Integration als Hohlwellengetriebe oder -antrieb.

3.1 Optimierung der Verzahnung

Einen Entwicklungsschwerpunkt bildet die Optimierung der Verzahnung. Es wurde schon frühzeitig erkannt, dass viele Eigenschaften des Harmonic-Drive-Getriebes durch eine Optimierung des Zahnprofils verbessert werden konnten. Umfangreiche Berechnungen, Computersimulationen und Versuche bildeten die Grundlage für ein verbessertes Zahnprofil, die so genannte IH-Verzahnung, die im Jahr 1989 patentiert und seitdem ständig verfeinert wurde.

Bei der in Bild 4 dargestellten IH-Verzahnung ist der Anteil tragender Zähne wesentlich größer als bei dem Getriebe mit der herkömmlichen Evolventenverzahnung. Während bei der herkömmlichen



5: Die Verkürzung des Flexspline-Topfes führt zu kompakteren Abmessungen

Verzahnungsgeometrie rund 15 % der Zähne im Eingriff sind, wurde dieses Verhältnis bei der IH-Verzahnung auf etwa 30 % gesteigert. Dies ist in Bild 4 durch einen größeren schraffierten Winkelbereich dargestellt worden.

Diese Weiterentwicklung der Verzahnung 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 Traganteils zum ersten zu einer Verdoppelung der Verdrehsteifigkeit. Zum zweiten wird die Lebensdauer des Getriebes vom Kugellager des Wave Generators bestimmt. Der vergrößerte Traganteil führt zu einer gleichmäßigeren Lastverteilung auf das Wave-Generator-Kugellager, was zu einer mehr als doppelten Lebensdauer führt. Zum dritten bewirkt der größere Radius am Zahnfuß der IH-Verzahnung eine Verringerung der kritischen Spannungen im Flexspline und führt so zu einer höheren Drehmomentkapazität bei gleichen Außenabmessungen.

Eine weitere Leistungssteigerung wird in Form des neuen Getriebes „Super Harmonic Drive“ (Super-HD) dargestellt. Bei diesem neuen Getriebe wird die Tragfähigkeit der Verzahnung mittels Nitrierung des Flexsplines und Beschichtung des Circular Splines deutlich erhöht. Weiterhin wird das Wave-Generator-Kugellager carbonitriert und die elliptische Form der Wave-Generator-Scheibe modifiziert, um eine Optimierung der Lastverteilung des Lagers zu erreichen. Die Folgen dieser Verbesserungen lassen sich wie folgt zusammenfassen:

- Nennmoment um 30 % erhöht,
- wiederholbares Spitzendrehmoment um 30 % erhöht,
- Drehmomentkapazität um 30 % erhöht,
- Nennlebensdauer um 42 % erhöht.

3.2 Erweiterung des Übersetzungsbereichs

Nicht zuletzt spielt die Optimierung der Verzahnung auch eine wesentliche Rolle bei der Erweiterung des Übersetzungsbereichs nach unten. Bis vor kurzem war die Übersetzung $i = 50:1$ die niedrigste, welche mit einem Harmonic-Drive-Getriebe erreicht werden konnte. Bei kleinen Übersetzungen ist die Anzahl der Zähne kleiner als bei höheren Übersetzungen. Damit ist die Zahnhöhe größer und die Ellipse der Wave-Generator-Scheibe stärker ausgeprägt, um die Verzahnungen über die kleinere Achse der Ellipse außer Eingriff zu bringen. Die resultierenden Spannungen durch die elliptische Verformung des Flexsplines haben bisher das übertragbare Drehmoment begrenzt.

Jedoch wurde durch weitere FEM-Analysen des Flexspline-Topfes sowie der Flexsplineverzahnung eine Optimierung der Spannungsverteilung im Flexspline möglich. Damit konnte eine Erweiterung der Übersetzung nach unten, das heißt auf nun 30:1, erfolgen. So gibt es jetzt eine Alternative zu zweistufigen Planetengetrieben und Exzentergetrieben, die sonst für diesen Übersetzungsbereich eingesetzt werden. Gegenüber diesen bisherigen Lösungen bie-



7: Hohlwellen-Unit HFUC-2UH mit integrierter Abtriebslagerung

tet das Harmonic-Drive-Getriebe mit der Übersetzung 30:1 folgende Vorteile: Spielfreiheit, exzellente Wiederholgenauigkeit sowie kompakte und leichte Bauweise.

3.3 Veränderung der Bauform des Flexsplines

Ein weiterer wichtiger Entwicklungsansatz wurde durch die Verkürzung der axialen Baulänge des Flexspline-Topfes herbeigeführt. Wie aus Bild 5 ersichtlich wird, konnte die axiale Baulänge des ursprünglichen Getriebes HDUC bei der Einführung der Einbausatz-Baureihe HFUC auf rund Dreifünftel reduziert werden. Dabei wurde zudem eine Gewichtsersparnis von 20 % möglich. Trotz der verstärkten konischen Ausweitung des Topfes, was zu höheren Spannungen im Flexspline-Topf führt, war es möglich, verbesserte Leistungseigenschaften gegenüber dem herkömmlichen Getriebe mit langem Flexspline-Topf zu erreichen.

In vielen neuen Anwendungen sind hohe Verdrehsteifigkeit, kurze axiale Baulänge und ein großer Innendurchmesser der zentralen Hohlwelle die wichtigsten Auswahlkriterien für das Getriebe. Speziell für diese Anwendungen wurde der neue Einbausatz „Super-Flat Harmonic Drive“ entwickelt. Die axiale Baulänge der neuen Baureihe DS (vorläufige Produktbezeichnung) wurde weiter reduziert und beträgt nun nur noch



8: Hohlwellen-Servoantrieb FHA als integrierte Version

ein Drittel der Länge des HDUC-Einbausatzes (Bild 5). Aufgrund der verstärkten konischen Ausweitung des verkürzten Flexsplines ist die Drehmomentkapazität gleich der des HFUC-Einbausatzes der nächstkleineren Baugröße.

3.4 Leichtbauweise

Des Weiteren wurden beim Unternehmen Harmonic Drive neue Getriebe entwickelt, die eine noch höhere Leistungsdichte als die bisherigen erreichen. Um das Ziel eines Leichtbaugesetriebes zu erreichen, wurden drei Wege beschritten:

- Die einzelnen Getriebebauteile wurden modifiziert, um die Einbindung in den Roboterarm zu vereinfachen und damit das Gewicht zu minimieren.
- Planetengetriebe- oder Stirnradvorstufen wurden in das Harmonic-Drive-Getriebe integriert, um eine sehr hohe Gesamtübersetzung auf kleinstmöglichem Bauraum zu realisieren. Hohe Übersetzungen erlauben nun die Benutzung von sehr kleinen, schnell drehenden Motoren, um eine hohe Leistungsdichte des gesamten Antriebs zu erreichen.
- Für die einzelnen Getriebebauteile wurden neue Leichtbau-Werkstoffe verwendet, um das Eigengewicht des Getriebes zu minimieren.

Bild 6 zeigt die neueste Entwicklung hin zur Leichtbauweise. Sowohl der Circular Spline als auch die elliptische Scheibe des Wave Generators sind aus einer Aluminiumlegierung hergestellt. Die Zähne des Circular Splines sind mittels patentiertem Verfahren beschichtet, um die gleiche Tragfähigkeit wie die der Standardverzahnung zu gewährleisten. Bei diesen Getrieben ist es bereits gelungen, die Leistungsdaten des HDUC-Getriebes zu erreichen. Bei einer Gewichtsreduktion von 60 % wird das spezifische Drehmoment um 266 % gesteigert. Das neue Getriebe, das nun nur 0,79 kg wiegt, hat ein wiederholbares Spitzendrehmoment von 559 Nm, das heißt ein spezifisches Drehmoment von 708 Nm/kg, verglichen mit 260 Nm/kg bei einem Standardgetriebe.

3.5 Integration und Hohlwellenausführung

In der Vergangenheit wurden Entwickler und Hersteller von Robotern fast ausschließlich mit Getriebeeinbausätzen beliefert. Somit war es Aufgabe der Roboterkonstrukteure, die Antriebseinheit komplett mit allen Komponenten wie Getriebe, Lagerung, Motor und Bremse selbst auszulegen und in den Arm oder das Gehäuse einzubinden. Zunehmend wird jetzt aber nach Produkten gefragt, die den Konstruktionsaufwand und die Entwicklungszeiten minimieren, so dass Getriebehersteller Getriebeeinbausätze mit integrierter Abtriebslagerung oder komplette Servoantriebe, bestehend aus Getriebe, Servomotor und Lagemesssystem, ausliefern sollen.

Als hilfreich haben sich Getriebe mit zentraler Hohlwelle erwiesen. Zusätzlich zu den erwähnten Flexspline-Modifikationen wurde auch vor kurzem der so genannte „Silk Hat“-HFUS-Einbausatz entwi-



9: Schwenkarmroboter-Roboter mit Präzisionsgetriebe
Werkbild Robert Bosch GmbH

ckelt, wo sich der Boden des Flexspline-Topfes nach außen statt nach innen öffnet. Diese Ausführung ermöglicht eine größere zentrale Hohlwelle als beim HFUC-Einbausatz. So können Kabel zur Leistungs- und Datenübertragung bequem durch das Getriebe hindurch geführt werden. Abhängig von der Baugröße beträgt der Hohlwellendurchmesser bis zu 30% des Getriebeaußendurchmessers. Bei koaxialen Getrieben sind solche Verhältnisse nur mit Harmonic-Drive-Getrieben möglich. **Bild 7** zeigt hierzu eine Hohlwellen-Unit mit integrierter Abtriebslagerung des Typs HFUS-2UH.

Doch es gibt noch weitere integrierte Versionen mit Hohlwelle. **Bild 8** zeigt einen AC-Hohlwellenantrieb der FHA-Baureihe, wo Getriebe, Servomotor und Drehgeber in den Antrieb integriert wurden. Hier wurde auch der Wave Generator derart modifiziert, dass Platz für eine große zentrische Hohlwelle geschaffen wird. Der Abtrieb erfolgt über den Flexspline, der mit einem großzügig dimensionierten Abtriebslager gekoppelt ist. Dieses ist in der Lage, extrem hohe Kippmomente aufzunehmen, wodurch in vielen Konstruktionen eine zusätzliche Lagerung entfallen kann. Der Hohlwellenantrieb enthält einen bürstenlosen Wechselstrommotor. Die große zentrale Hohlwelle ermöglicht die Durchführung von Kabeln, Wellen oder Hilfsstoffen durch den Antrieb. Dadurch sind sehr elegante und preiswerte Konstruktionslösungen realisierbar. Im Bedarfsfall ist es möglich, die Hohlwelle nach hinten zu verlängern, um beispielsweise mittels Absolutencoder eine direkte Positionserfassung am Abtrieb durchzuführen oder um zusätzliche Endschalter anzubringen.

Auch bei diesen hochintegrierten Servoantrieben findet eine kontinuierliche Weiterentwicklung statt. Im zweiten Halbjahr wird die inzwischen dritte Generation der FHA-Baureihe am Markt eingeführt. Diese neuen FHA-C-Hohlwellenantriebe nutzen die Vorteile der „Super-Flat Harmonic Drive“-Getriebe sowie neue Motor- und Sensortechnik, um eine Erhöhung des Spitzen-

drehmoments von bis zu 40% bei einer Reduzierung der axialen Länge um bis zu 30% zu erreichen.

4 Anwendungsbeispiele

Wie bereits angedeutet, sind viele der erwähnten Entwicklungsschritte ebenfalls interessant für die Hersteller von Industrierobotern, wenn diese Montage-, Bahn-schweißaufgaben oder ähnliches erfüllen. Beispielhaft sind die neuen Turboscaraschwenkarmroboter SR6 und SR8 (**Bild 9**) der Firma Robert Bosch GmbH in Stuttgart. Im Vergleich mit bisherigen Robotern gelang es den Konstrukteuren, die typische Zykluszeit um mehr als die Hälfte zu reduzieren. Damit gehören diese neuen Roboter in ihrer Klasse zu den schnellsten der Welt. Die Schnelligkeit der Roboter basiert unter anderem auf einem optimierten Armdesign und verbesserten Beschleunigungsalgorithmen.

Eine wichtige Rolle spielen dabei auch neue Einbausätze mit integrierter Abtriebslagerung von Harmonic Drive. Diese Getriebe verfügen über mehrere positive Eigenschaften. Das um 40% reduzierte Massenträgheitsmoment des Wave Generators ermöglicht den Einsatz eines kleinen Elektromotors und eine höhere Einschaltdauer für die Primärachsen. In dieser Anwendung bedeutete die Verwendung des neuen carbonitrierten Wave-Generator-Lagers eine Lebensdauererweiterung des Getriebes von 7000 auf 203000 Stunden (L_{10} -Wert).

Speziell für Anwendungen in Servicerobotern wurde von der Berliner Firma Antec ein zukunftsweisendes Roboter-Baukastensystem entwickelt. Kern dieser Idee ist ein „intelligentes“ Gelenk, das so genannte „Power Cube“. Mit ihm lassen sich aus wenigen standardisierten Zusatzelementen beliebige Roboterkonfigurationen, wie beim Multifunktionsroboter (**Bild 10**) der Firma Daimler-Chrysler Raumfahrt Infrastruktur, realisieren. Die gekoppelten Gelenke werden für individuelle Aufgaben mit Modulen wie Handgelenk, Greifer und Linearmodul ausgestattet. Auch hier kommen Präzi-



10: Multifunktionsroboter mit Präzisionsgetriebe
Werkbild Daimler-Chrysler Raumfahrt Infrastruktur



11: Humanoidroboter mit Präzisionsgetrieben
Werkbild Honda Engineering

sionsgetriebe von Harmonic Drive zum Einsatz.

Zu den bekanntesten gehenden Robotern zählen die „Humanoid Robots“ von Honda Engineering in Japan. **Bild 11** zeigt die jüngste Ausführung P3. Wie bei der vorherigen P2-Ausführung werden alle rotatorischen Achsen mit Harmonic-Drive-Getrieben und Gleichstrom-Servomotoren bestückt. Der P2-Roboter verfügte über 30 Freiheitsgrade: 12 für beide Beine, 14 für beide Arme und je 2 für die Hände. Bei einem Gesamtgewicht von 210 kg konnte dieser Roboter zirka 15 Minuten lang bei einer Geschwindigkeit von bis zu 2 km/h gehen. Auch hier werden Präzisionsgetriebe von Harmonic Drive eingesetzt.

Anmerkung der Redaktion

Weitere Informationen über die beschriebenen Präzisionsgetriebe können von unseren Lesern angefordert werden, indem sie die folgende Kennzahl in ihre Leserdienstkarte eintragen.

HARMONIC DRIVE

324