

# Leichtbaugetriebe für Roboter in der Raumfahrt

ROLF SLATTER

Es ist inzwischen mehr als 30 Jahre her seitdem die ersten Harmonic Drive-Getriebe während der Apollo 15 Mission ins All geschickt wurden. In der Zwischenzeit hat sich dieses Getriebeprinzip in Raumfahrtanwendungen etabliert, bei denen eine sehr gute Positioniergenauigkeit oder eine sehr hohe Leistungsdichte benötigt wird (Bild 1). Die spielfreien Getriebe nutzen ein elastisch verformbares Bauteil, um ein hohes Übersetzungsverhältnis ins Langsame mit nur drei Getriebebauteilen zu erreichen. Im folgenden Beitrag werden die neuesten Entwicklungen bei diesem Getriebe-typ vorgestellt.

## 1 Rückblick

Die Leistungserwartungen an Raumfahrtvehikel steigen ständig. Ohne die laufende Weiterentwicklung der eingesetzten Getriebe- und Antriebstechnologie wäre diese Steigerung nicht möglich, gerade in einer Zeit, wo Budgets für die Raumfahrtforschung knapp gehalten werden. An Präzisionsgetriebe und -antriebe werden dabei eine Reihe von Forderungen gestellt, so müssen sie z. B. eine ausgezeichnete Positionier- und Wiederholgenauigkeit, hohe Drehmomentkapazität, hohe Verdrehsteifigkeit sowie eine kompakte und leichte Konstruktion aufweisen.

Diese Forderungen haben zu einer bemerkenswerten Weiterentwicklung des Harmonic Drive-Getriebes geführt. Dieser Getriebetyp, auch als „Wellgetriebe“ oder im Englischen als „Strain Wave Gear“ bezeichnet, wird heute als Standard-Bauelement in den verschiedensten Bereichen eingesetzt, wie z. B. in Industrierobotern, Werkzeug- oder Druckmaschinen, der Mess- und Prüftechnik sowie in der Halbleitertechnologie. Das Harmonic Drive-Getriebe wurde 1959 von Walt Musser in den USA



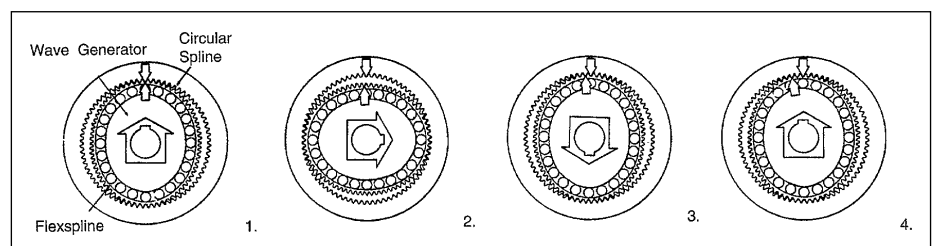
1: Auch im Beagle 2, der im Dezember 2003 auf dem Mars landen soll, kommen Harmonic Drive-Getriebe zum Einsatz

erfunden und zunächst in der Luft- und Raumfahrt erprobt. Hierbei waren die spezifischen Eigenschaften wie Zuverlässigkeit, geringes Gewicht und Kompaktheit von grundlegender Bedeutung. Während der 70er und 80er Jahre erweiterte sich der Anwendungsbereich auf Industrieroboter und Werkzeugmaschinen, wo dieses Getriebe insbesondere für präzise Positionieranwendungen eingesetzt wird. In den 90er Jahren gab es einen weiteren Entwicklungsschub durch den Bedarf an hochpräzisen Getrieben in ganz neuen Anwendungen, z. B. in Robotern für chirurgische Eingriffe, in CD/DVD-Herstellungsmaschinen oder in Maschinen für die Halbleiterfertigung.

In der Luft- und Raumfahrt wird das Harmonic-Drive-Getriebe in einer großen Zahl



2: Aufbau des Harmonic Drive-Getriebes



3: Funktionsprinzip des Harmonic Drive-Getriebes

von Anwendungen eingesetzt. Die erste wichtige Raumfahrtanwendung war 1971, wo das Getriebe als Teil der Einzelradantriebe des Lunar Rovers der Apollo 15-Mission verwendet wurde. Diese Anwendung machte das Getriebeprinzip zum ersten Mal in der Öffentlichkeit bekannt. Bald darauf wurden Harmonic Drive-Getriebeeinbauten im Teleskopantrieb eines bildgebenden Photopolarimeters der interplanetarischen Sonde Pioneer 10 der NASA eingesetzt. Im März 1972 gestartet, funktionierte das Getriebe auch 1984 noch einwandfrei, als die Sonde als erstes von Menschenhand geschaffenes Objekt die Grenzen des Solar-systems verließ. Damals war die hermetische Abdichtung, die bei den Getrieben möglich ist, ein wichtiger Vorteil, um Probleme mit dem hohen Dampfdruck und Wandereigenschaften der damaligen Silikon-basierten Schmierstoffe zu vermeiden. In der Zwischenzeit hat sich das Getriebe als die bevorzugte Lösung für kompakte Positionierantriebe durchgesetzt und verfügt über eine lange Liste an Referenzprojekten, einschließlich des Hubble Space-Teleskopes und der Mars Pathfinder-Mission.

## 2 Funktionsprinzip

Das Getriebeprinzip zeichnet sich durch die Übertragung von hohen Drehmomenten über ein flexibles Bauteil aus. Das Getriebe besteht lediglich aus drei konzentrischen Komponenten (Bild 2):

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

Diese drei Bauteile arbeiten wie folgt (Bild 3): Der elliptische Wave Generator als angetriebenes Teil verformt über das Kugellager den Flexspline, der sich in den ge-



genüberliegenden Bereichen der großen Ellipsenachse mit dem innenverzahnten, fixierten Circular Spline 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 Circular Spline besitzt vollzieht sich nach einer halben Umdrehung des Wave Generators eine Relativbewegung zwischen Flexspline und Circular Spline um die Größe eines Zahnes und nach einer vollen Umdrehung um die Größe zweier Zähne. Bei fixiertem Circular Spline dreht sich der Flexspline als Abtriebsselement entgegengesetzt zum Antrieb.

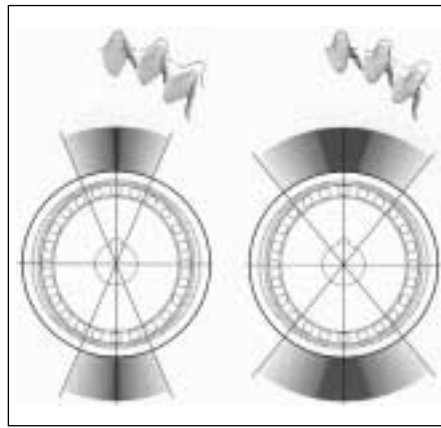
Das Übersetzungsverhältnis ist daher nicht abhängig von der relativen Größe der verzahnten Bauteile, wie bei Stirnradgetrieben oder Planetengetrieben, sondern nur von der Zahnzahl. Aufgrund dieses Funktionsprinzips werden mit nur drei Bauteilen bei Getriebeaußendurchmessern von nur 20 bis 330 mm Übersetzungsverhältnisse von 30:1 bis 320:1 erzielt. Die übertragbaren wiederholbaren Spitzendrehmomente betragen 0,5 bis über 9000 Nm. Die Vorteile dieses Getriebeprinzips sind dabei:

- die sehr gute Positioniergenauigkeit von weniger als einer Winkelminute und eine Wiederholgenauigkeit von nur wenigen Winkelsekunden,
- die sehr hohe Drehmomentkapazität, da die Kraftübertragung über einen großen Zahneingriffsbereich erfolgt,
- die Spielfreiheit,
- die hohe Torsionssteifigkeit über den gesamten Drehmomentbereich mit nahezu linearer Hysterese
- die bei Nennbetriebsbedingungen hohen erreichbaren Wirkungsgrade bis zu 85 %,
- das nicht selbsthemmende Getriebeprinzip, daher kann dasselbe Getriebe sowohl ins Langsame als auch ins Schnelle übersetzen sowie
- der minimale Verschleiß und die lange Lebensdauer durch eine geringe Gleitgeschwindigkeit auch bei hohen Eingangsdrehzahlen.

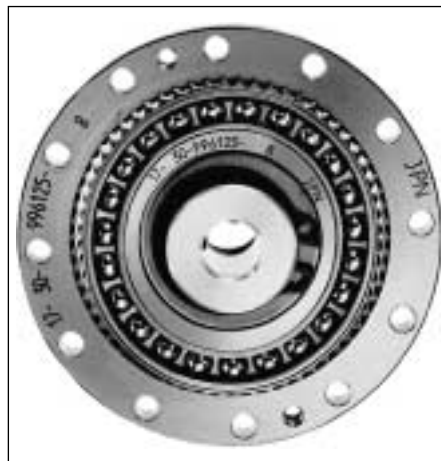
Dieses Funktionsprinzip kann auch bei Getrieben mit sehr kleinen Abmessungen erfolgreich angewandt werden. Das zurzeit kleinste konventionell hergestellte Harmonic Drive-Getriebe der Baugröße 5 hat einen Außendurchmesser von nur 20 mm, bietet jedoch ein wiederholbares Spitzenmoment von 0,6 Nm. Dieses Getriebe ist inzwischen verfügbar in den Übersetzungen 50, 80 und 100:1.

### 3 Entwicklungstendenzen

Wie bereits erwähnt steigen die Forderungen ständig in Bezug auf Leistungsdichte und Genauigkeit. Es gibt bei dem Harmonic Drive-Getriebe daher eine Reihe von Ent-



4: Vergleich zwischen Standard- (links) und IH-Verzahnung



5: Das Getriebe des Typs HFUC Super Mini bietet eine Übersetzung von 30:1 ins Langsame

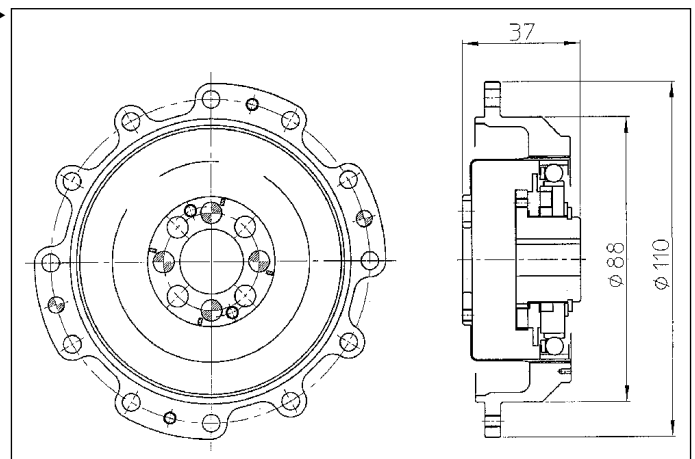
wicklungszielen, die verfolgt werden, um diese neuen Anforderungen zu erfüllen. So zielen aktuelle Forschungen auf die Reduzierung der Getriebeabmessungen und des Gewichts sowie auf die Erhöhung der Verdrehsteifigkeit und die Erweiterung des Übersetzungsbereiches ab.

### 3.1 Optimierung des Zahnprofils

Bei der Weiterentwicklung des Harmonic Drive-Getriebes bildet die Entwicklung der Verzahnung einen Schwerpunkt. Es wurde schon frühzeitig erkannt, dass viele Eigenschaften des Getriebes durch eine Optimierung des Zahnprofils verbessert werden können. Umfangreiche Berechnungen, Computersimulationen und Tests bilden die

7: Getriebeeinbausatz mit modifiziertem Circular Spline

6: Vergleich zwischen HDUC-, HFUC- und CSD-Getriebeeinbausätzen (von links nach rechts)



Grundlage für die 1989 patentierte IH-Verzahnung, die seitdem ständig verbessert wurde.

Bei der in Bild 4 dargestellten IH-Verzahnung ist der Zahneingriffsbereich wesentlich größer als bei dem Getriebe mit der herkömmlichen Evolventenverzahnung. Während bei der herkömmlichen Verzahnungsgeometrie zirka 15 % der Zähne im Eingriff sind, wurde dieses Verhältnis bei der IH-Verzahnung auf zirka 30 % gesteigert. Diese Entwicklung bringt drei wesentliche Vorteile:

1. Die Verdrehsteifigkeit des Harmonic Drive-Getriebes wird hauptsächlich durch die Anzahl der sich in Kontakt befindlichen Zähne bestimmt. Durch die IH-Verzahnung wird eine Vergrößerung des Zahneingriffsbereiches und somit eine hohe Verdrehsteifigkeit erzielt.
2. Die Lebensdauer des Getriebes wird vom Wave Generator-Kugellager bestimmt (die Verzahnung wird dauerfest ausgelegt). Der vergrößerte Zahneingriffsbereich führt auch zu einer gleichmäßigeren Lastverteilung auf das Wave Generator-Kugellager, was zu einer sehr hohen Lebensdauer führt.
3. Der größere Radius am Zahnfuß der IH-Verzahnung bewirkt eine Verringerung der kritischen Spannungen im Flexspline und führt so zu einer höheren Drehmomentkapazität bei gleichen Außenabmessungen.

### 3.2 Erweiterung des Übersetzungsbereiches

In vielen Anwendungsbereichen wurde von Maschinenkonstruktoren der Wunsch nach kleinen Übersetzungen ins Langsame geäußert, um die Vorteile der Getriebe, also Spielfreiheit, kompakte Bauform und geringes Gewicht, in Anwendungen nutzen zu können, 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. Inzwischen haben die Ingenieure von Harmonic Drive es geschafft, den Übersetzungsbereich auf 30:1 zu erweitern (Bild 5). Dabei musste folgendes Problem gelöst werden: Bei beiden Enden der Hauptachse der Wave Generator-Ellipse sind mehrere Zähne im Eingriff, über der kleinen Ellipsenachse dürfen die Zähne

aber nicht im Eingriff sein. Die Übersetzung hängt dabei wie erläutert von der Zähnezahl ab, wobei kleinere Übersetzungen weniger, aber größere Zähne benötigen. Dies fordert wiederum einen Wave Generator mit einer stark ausgeprägten Ellipsenform, um die Zähne an der kleinen Ellipsenachse außer Eingriff zu bringen. Hierdurch wird jedoch die Biegespannung am Flexspline durch die elliptische Verformung erhöht, 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 kann die Ausprägung der Ellipse begrenzt werden. Weiterhin wurde die Flexspline-Wandstärke anhand einer FEM-Analyse derart optimiert, dass die Biegespannungen minimiert werden konnten. Last but not least, wurde bei diesen neuen Getrieben die IH-Verzahnung angewandt.

Vorteile gegenüber Planeten- und Stirnradgetrieben sind die Spielfreiheit, die hohe Übertragungsgenauigkeit, kleine Abmessungen sowie das geringe Gewicht. Aufgrund dieser Vorteile bieten sich den Maschinenkonstruktoren neue Möglichkeiten, die Leistung der Maschinen zu verbessern, da in diesem Größen- und Übersetzungsbereich bisher lediglich spielbehaftete Getriebe verfügbar waren.

### 3.3 Verkürzung der axialen Baulänge

Eine weitere Entwicklungsrichtung betrifft die Verkürzung der axialen Baulänge. Wie in **Bild 6** dargestellt, konnte schon eine Verkürzung der axialen Baulänge des Getriebes um 40 % durch die Einführung der HFUC-Baureihe erreicht werden. Diese Verkürzung wurde von einer Gewichtsreduzierung um 20 % bei derselben Drehmomentkapazität begleitet. Die FEM-Analyse, die als Grundlage für diese Entwicklung diente, ist ständig verfeinert worden. Im letzten Jahr wurde die neue Baureihe CSD Super-Flat im Markt eingeführt. Die axiale Länge des Flexsplines konnte wieder verkürzt werden auf jetzt nur 50 % der Länge des HFUC-Getriebes. Durch die höhere konische Aufweitung des Flexsplines ist die Drehmomentkapazität etwas niedriger als bei der HFUC-Baureihe, dagegen sind durch das stark reduzierte Volumen sowie das geringere Eigengewicht die spezifischen Eigenschaften der neuen Getriebe in Bezug auf das Gewicht sehr vorteilhaft.

### 3.4 Leichtbaugetriebeentwicklung

Besonders im Bereich der Raumfahrtrobotik ist eine hohe Leistungsdichte außerordentlich wichtig. Da diese Maschinen oft über eine Vielzahl von Gelenken verfügen, ist jede Gewichtsersparnis bei den eingesetzten Getrieben von Vorteil. Es gibt drei grundsätzliche Ansätze, um das Gewicht des Getriebes und/oder deren Umgebung zu reduzieren:

1. Modifikation der einzelnen Bauteile, um deren Integration zu vereinfachen und damit das Gewicht der umgebenden Bauteile zu minimieren.

2. Integration von Stirnrad- oder Planetenvorstufen in das Harmonic Drive-Getriebe. Hierdurch können besonders hohe Übersetzungen ins Langsame bei kleinem Bauraum realisiert werden. Der Anwender kann kleine, schnelldrehende Motoren einsetzen und damit die Leistungsdichte des kompletten Antriebs steigern.

3. Neue Werkstoffe, wie z. B. Leichtmetalle, können für einzelne Getriebebauteile eingesetzt werden, um das Eigengewicht des Getriebes zu minimieren.

**Bild 7** zeigt eine Sonderausführung, wo der Circular Spline stark modifiziert wurde, um die Integration des Getriebes in das Gelenk eines telerobotischen Manipulators zu vereinfachen. **Bild 8** zeigt eine Planetenvorstufe, die innerhalb des elliptischen Wave Plugs integriert wurde. Diese Ausführung nutzt den verfügbaren Bauraum innerhalb des Flexsplines, um ein Übersetzungsverhältnis von 800:1 in einem sehr kleinen Bauraum zu erreichen. Bei dem Getriebe wurde auch der Circular Spline modifiziert, um die Integration im Gelenk eines tragbaren Serviceroboters zu optimieren. **Bild 9** zeigt die neueste Entwicklung für die Raumfahrtindustrie: Sowohl Circular Spline als auch Wave Plug werden aus einer speziellen Aluminiumlegierung hergestellt. Diese Legierung besitzt ei-

nen thermischen Ausdehnungskoeffizient ähnlich wie Stahl. Die Verzahnung des Circular Splines wird beschichtet, um eine ähnliche Tragfähigkeit wie bei einem Standardgetriebe zu erreichen. Wie aus **Tabelle 1** zu entnehmen ist, kann das Gewicht des Getriebes so um 60 % reduziert werden, was wiederum zu einer Steigerung des spezifischen Spitzendrehmomentes um 266 % führt.

#### 4 Besondere Maßnahmen für Raumfahrtanwendungen

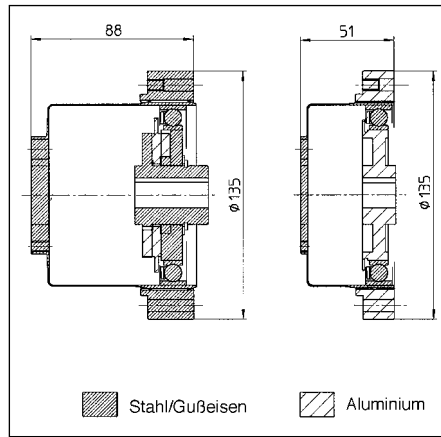
Vor allem in den Bereichen Werkstoffauswahl, mechanische Konstruktion und Schmierung muss die Ausführung von Standardgetrieben modifiziert werden, um den Anforderungen der Raumfahrtindustrie gerecht zu werden.

##### 4.1 Werkstoffauswahl

Für Raumfahrtanwendungen werden die Getriebeeinbausätze aus rostfreiem Stahl hergestellt (**Tabelle 2**). Dieser Werkstoff hat – verglichen mit den Standardwerkstoffen – eine weitaus höhere Korrosionsbeständigkeit sowie ähnliche Eigenschaften in Bezug auf Festigkeit, Härte und thermischem Ausdehnungskoeffizient. Die Getriebe aus rostfreiem Stahl sind ausführlich getestet worden. Dauertests zeigen, dass bezüglich Drehmomentkapazität und Verschleißbeständigkeit eine Leistung vergleichbar mit Standardgetrieben erreicht werden kann.

##### 4.2 Mechanische Konstruktion

Wie schon erwähnt, hilft eine FEM-Analyse dabei, eine Optimierung aller Bauteile bezüglich des Gewichts zu erreichen. Das Gewicht des Circular Splines kann durch das Wegfräsen von Material reduziert werden. Weiterhin ist es möglich, bei einigen Anwendungen die Zahnbreite zu reduzieren. Das Gewicht des Flexsplines kann durch eine Verringerung der Dicke des Flexspline-Flansches reduziert werden. Das Gewicht des Wave Generators kann vermindert wer-



**9: Vergleich zwischen konventionellem Getriebe HDUC-40-160-BLR (links) und Leichtbaugesetze HFUC-40-160-SP**

den durch den Wegfall der standarmäßig integrierten Oldham-Kupplung sowie durch eine Optimierung des Querschnittes des Wave Plugs.

##### 4.3 Schmierung

In Verbindung mit Harmonic Drive-Getrieben sind verschiedene Schmierstoffe erfolgreich in Raumfahrtanwendungen be-



**10: Die Antriebe des Typs Septa 31 Solar Array werden in Mini-Satelliten für die Ausrichtung der Solarzellenträger eingesetzt**

Werkbild: Snecma Moteurs

nutzt worden. Dabei können unterschiedliche Schmierstoffe für das Wave Generator-Lager und die -Verzahnung benutzt werden. Für das Lager wird typischerweise perfluoriertes Öl, z. B. Fomblin Z25 oder Brayco 815Z, eingesetzt. Der Phenolharz-Lagerkäfig wird unter Vakuum mit diesem Öl imprägniert. Die Verzahnung wird typischerweise mit raumfahrttauglichen Fett

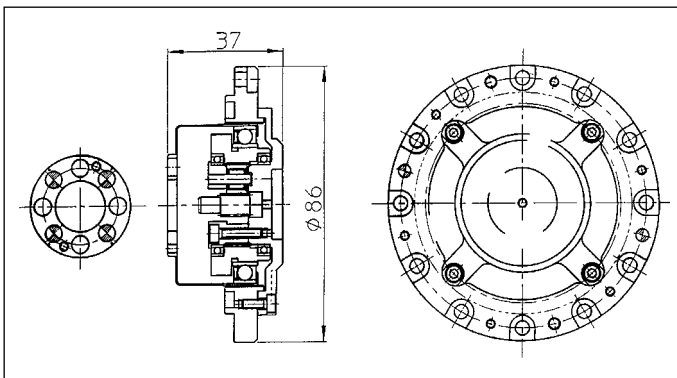


**11: Roboterarm des Beagle 2**

geschmiert, z. B. Braycote 601. Eine Goldbeschichtung wurde ebenfalls schon eingesetzt, um die Fettschmierung zu unterstützen. Weiterhin kam eine Silberionenbeschichtung der Lagerinnen- und -außenringe sowie der Lagerkugeln zum Einsatz. Erste Experimente mit gesputtertem oder spritzbeschichtetem MoS<sub>2</sub> als Trockenschmierung waren noch nicht von Erfolg gekrönt. Es laufen aber weitere Tests.

#### 5 Anwendungsbeispiele

Es werden inzwischen eine Vielzahl von Harmonic Drive-Getrieben in der Raumfahrt eingesetzt. Die Mehrzahl kommt dabei in Positionieranwendungen für die Ausrichtung von Solarzellenträgern, Antennen, Spiegeln, Instrumenten oder Kameras zum Einsatz. Beispielhaft ist die Anwendung in den neuen Septa 31-Antrieben für Solarzellenträger der Firma Snecma Moteurs – Division Propulsion et Equipments de Satellites in Frankreich (**Bild 10**). Mit diesen Antrieben werden Mini-Satelliten mit einem Gewicht bis 500 kg, die in mittleren oder niedrigen Laufbahnen zum Einsatz kommen, ausgestattet, um die Ausrichtung der panel-ähnlichen Solarzellenträger sehr präzise durchzuführen. Die geforderte Drehgeschwindigkeit ist extrem langsam – eine Umdrehung dauert 100 Minuten. Hierfür sind hohe einstufige Übersetzungen ins Langsame und ein stick-slip-freies Laufverhalten Voraussetzungen. Der Antrieb muss sehr hohe Belastungen sowohl während der



**8: Getriebeeinbausatz mit Planetenvorstufe**

Kenngroße	Standardgetriebe HDUC-40-160-BLR	Leichtbaugesetze HFUC 40-160-SP	Trend
Nenn Drehmoment [Nm]	294	294	gleich bleibend
Spitzendrehmoment [Nm]	559	559	gleich bleibend
Massenträgheitsmoment [kgm <sup>2</sup> ]	3,98 · 10 <sup>-4</sup>	1,60 · 10 <sup>-4</sup>	-60 %
Gewicht [kg]	2,10	0,79	-60 %
Spezifisches Spitzenmoment [Nm/kg]	266	708	+266 %

**Tabelle 1: Vergleich zwischen konventionellem und Leichtbaugesetze**

**Tabelle 2: Getriebewerkstoffe für Standard- und Raumfahrtanwendungen**

Getriebeteil	Standardausführung	Raumfahrtausführung
Circular Spline	FCD 80 Kugelgraphitgusseisen	SUS 630 rostfreier Stahl
Flexspline	SNCM 439 Stahlegierung	SU S 304L oder 15-5PH rostfreier Stahl
Wave Bearing	SUJ 2 Lagerstahl	SUS 440C rostfreier Stahl
Wave Plug	S 45 C Stahl	SUS 630 oder 304L rostfreier Stahl
Lagerkäfig	Nylon 66 mit Glasfaserverstärkung	Phenolharz

Startphase als auch bei der Entfaltung der Solarzellenträger aushalten, wofür eine hohe Drehmomentkapazität als auch eine hohe Verdrehsteifigkeit benötigt werden. Wie in Bild 10 ersichtlich, spielt auch die Hohlwelle eine wichtige Rolle – die Versorgungsleitungen werden durch den Antrieb hindurch geführt. Aufgrund der Vielfalt dieser Forderungen fiel die Wahl auf einen Getriebeeinbausatz der neuen CSD-Baureihe.

Ein weiteres sehr aktuelles Beispiel bezieht sich auf eines der ehrgeizigsten Raumfahrtprojekte der Gegenwart. Im Dezember 2003, nach einem sechsmonatigen Flug, soll der Beagle 2 Lander auf der Marsoberfläche landen (Bild 1). Bei einem Landegewicht von nur 30 kg ist der Lander mit einem fünffachsigen Roboterarm ausgestattet (Bild 11), welcher Steine untersuchen und Proben zwecks Analyse auf dem Lander sammeln soll. Das Eigengewicht des Armes beträgt lediglich 2,4 kg. In allen fünf Gelenken werden Getriebe des Typs HFUC Super-Mini eingesetzt. Die Forderungen an

diese Getrieben sind hoch: Nicht nur, dass die Werkstoffe mit der „normalen“ Raumfahrtumgebung zurecht kommen müssen (Vakuumbeständigkeit, Strahlungsbeständigkeit, niedrige Ausgasung sowie niedriges Gewicht), sie müssen auch die Strapazen einer Sterilisierung aushalten. Diese wird durchgeführt, um eine Verunreinigung der Mars-Umgebung zu vermeiden. Aus diesem Grunde kommen spezielle rostfreie Stähle für den Getriebeeinbausatz zum Einsatz.

#### **Anmerkung der Redaktion**

Weitere Informationen über die beschriebenen Getriebe fordern unsere Leser mittels der folgenden Kennzahl an.

HARMONIC DRIVE

**330**