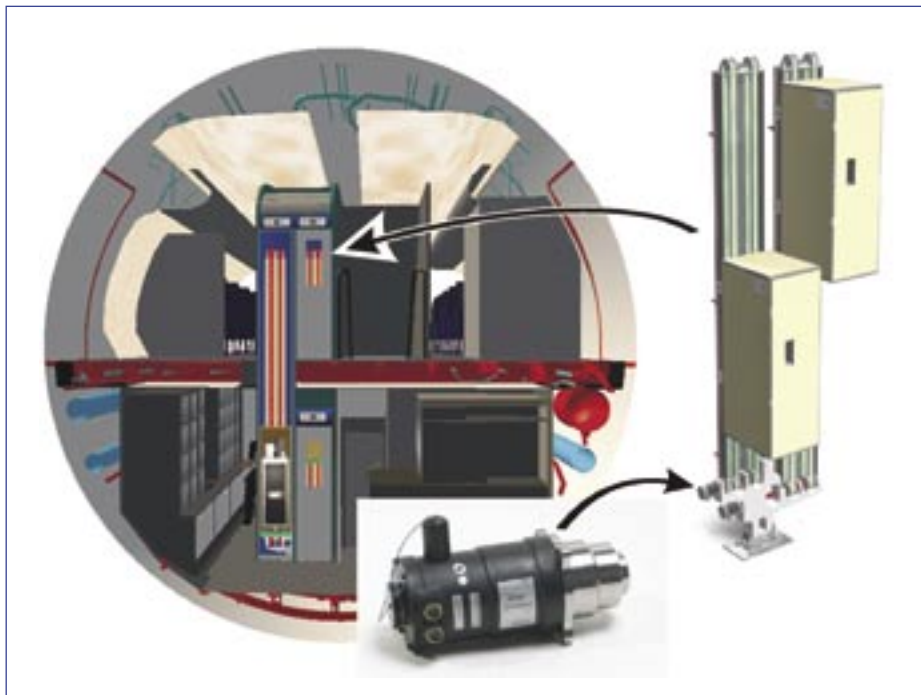


# Wenn Getriebe fliegen sollen

## Konstruktive Besonderheiten für die Anwendung in der Luftfahrt



Bildnachweis: EWS Exel System, Wedel

*An Maschinenelemente, die in der Luft- und Raumfahrt zum Einsatz kommen, werden besonders hohe Anforderungen gestellt. Das gilt natürlich auch für hier verwendete mechanische Getriebeeinheiten wie die Harmonic Drive Getriebe. Diese müssen besonders leicht sein, genau und zuverlässig funktionieren – und das möglichst wartungsfrei, mit größtmöglicher Sicherheit. Häufig entstehen über diese Vorgaben Weiterentwicklungen oder Verbesserungen, die auch dem allgemeinen Maschinenbau zugute kommen.*

Harmonic Drive Getriebe werden bereits seit Jahrzehnten in der Luftfahrt an den Stellen eingesetzt, bei denen ihre Haupteigenschaften optimal zur Anwendung kommen. Dies ist neben der bekannten Präzision auch das überragende Leistungsgewicht. Im Vergleich mit anderen Getriebetypen lassen sich mit Harmonic Drive Getrieben zwei- bis dreimal höhere Drehmomentendichten erreichen, wobei sich dieser Wert durch entsprechende Leichtbaumaßnahmen

### ■ Die Ausfallsicherheit steht an oberster Stelle ■

noch weiter steigern lässt. So konnten mit Sonderkonstruktionen in Edelstahl Gewichtsreduktionen um bis zu 40 % im Vergleich zur Standard-Unit erzielt werden. Unterstützt werden diese Bestrebungen durch die Verwendung von leichten Werkstoffen wie Aluminium und Titan, die diese Grenze noch weiter hinaus schieben wird.

### Besondere Getriebeeigenschaften

Damit erlauben Harmonic Drive Getriebe kompaktere Lösungen im Drehmomentenbereich von wenigen Nm bis hin zu ca. 10 kNm und bei Untersetzungen zwischen 30:1 bis hin zu 320:1. Begründet ist diese besondere Eigenschaft in

der Besonderheit des Zahnengriffs: Dadurch, dass der elliptische Wave Generator den Zahnengriff definiert, konnte durch Geometrieoptimierung erreicht werden, dass mit den aktuellen HFUC-Getrieben und daraus abgeleiteten Varianten ca. 30 % aller Zähne an der Drehmomentübertragung beteiligt sind. Dies ermöglicht eine bessere Nutzung, als es bei anderen Getriebetypen möglich ist, bei denen das Drehmoment nur über wenige Zahnpaare gleichzeitig übertragen werden kann. Weiterhin befindet sich der Zahnengriff bei den Harmonic Drive Getrieben auf der langsam drehenden Seite, wodurch die Gleitgeschwindigkeiten entsprechend niedrig sind (Bild 2). Dies liefert in Kombination mit den niedrigen Hertzischen Pressungen im Verzahnungsbereich eine langlebige und zuverlässige Konstruktion.

Für die Bestimmung der MTBF-Zahlen ist daher primär das Wave Generator Lager zu betrachten. Dieses verhält sich vergleichbar zu anderen Wälzlagern und kann daher recht genau mit einer entsprechenden Weibull-Verteilung beschrieben werden. Der elastisch verformte Flexspline wird demgegenüber im dauerhaftesten Bereich betrieben und ist daher für die Bestimmung der Ausfallraten nur von untergeordneter Bedeutung. Nur bei hoch belasteten Getrieben mit geringer Betriebsdauer werden hier genauere Betrachtungen erforderlich, die mit den verfügbaren Berechnungsmodellen hinreichend genau vorher gesagt werden können (Bild 3).

### Drei Anwendungen aus der Luftfahrt

Daher ist es möglich, Harmonic Drive Getriebe z. B. in Flugsteuerungsanlagen oder in anderen sicherheitskritischen Anwendungen einzusetzen. So wird z. B. in verschiedenen Airbus-Modellen ein sogenannter „Trolley Lift“ eingebaut, mit dem die Wagen mit der Bordverpflegung zwischen den verschiedenen Stockwerken hin und her bewegt werden (Bild 1). Auch wenn diese Anwendung auf den ersten Blick trivial wirkt, so kann ein Versagen des Antriebs mit angehängtem Trolley zu erheblichen Schäden an der Struktur des Flugzeugs führen, weshalb entsprechend umfangreiche Nachweise und Tests erforderlich wurden. Weiterhin war es notwendig, dass die Getriebe in einer geräuschoptimierten Bauweise hergestellt werden, da der Trolley Lift direkt im Passagierraum untergebracht ist.

Bei dieser Anwendung war die Präzision des Harmonic Drive Getriebes nur von untergeord-

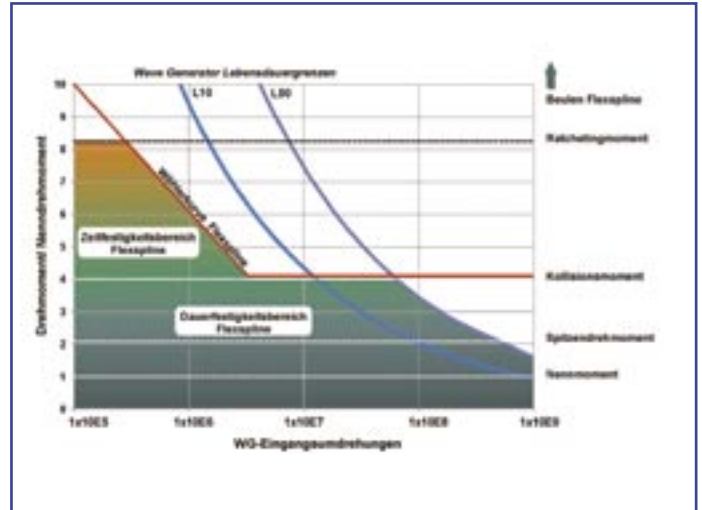
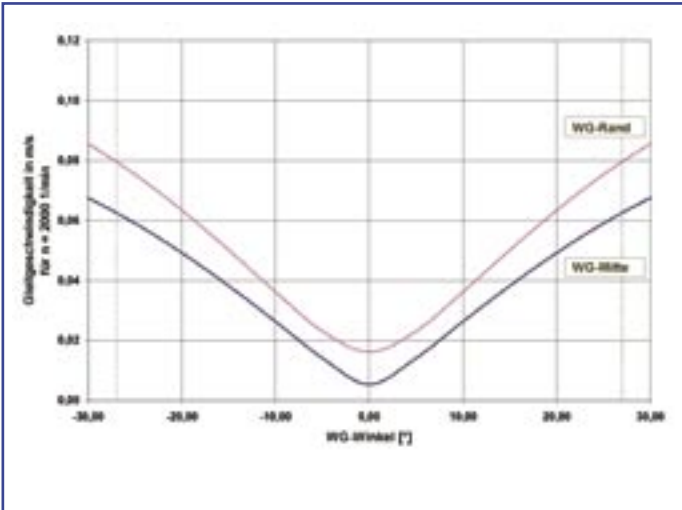


Bild 2: Gleitgeschwindigkeit im Zahneingriff eines Harmonic Drive Getriebes

Bild 3: Einsatzgrenzen des Harmonic Drive Getriebes

netter Bedeutung – ganz im Gegensatz zu der Anwendung in Flugsteuerungsanlagen: Harmonic Drive Getriebe werden hier zur Erzeugung eines „künstlichen Gefühls“ am Steuerknüppel des Piloten eingesetzt, um so die Wirkung seiner Steuereingaben auf das Flugzeug nachzubilden. Vorteil dieser Technologie ist eine bessere Situationseinschätzung durch den Piloten. Neben einer sehr feinfühligsten Ansteuerung und der extrem kompakten Bauweise besteht dabei auch die Forderung, das Harmonic Drive Getriebe rückwärts zu drehen, d. h. von der langsam laufenden in Richtung der schnell laufenden Seite. Auch hier konnte durch entsprechende Anpassungsmaßnahmen erreicht werden, dass die standardmäßigen Werte nahezu halbiert werden konnten.

Für die Luftfahrt werden die Harmonic Drive Getriebe üblicherweise mit einer Lebensdauer-schmierung ausgerüstet, um dadurch den Wartungsaufwand zu reduzieren. Der Fetttyp und die Fettmenge werden dabei in Abhängigkeit von der konkreten Anwendung festgelegt. So sind z. B. für Anwendungen im nicht klimatisierten Bereich Breitbandfette erforderlich, die auch bei  $-55^{\circ}\text{C}$  noch die Funktion und Zuverlässigkeit des Getriebes gewährleisten können. Dass dies auch in der Praxis tatsächlich erreicht wird, kann man an der Anwendung „PPU“ sehen, bei der Harmonic Drive Getriebe in einer Messeinrichtung am Außenflügel in der Nähe der Lan-

deklappen verwendet werden. Diese Getriebe sind inzwischen in mehr als 20000 Einheiten gefertigt worden, ohne dass es zu einem Ausfall gekommen ist - und dies, nachdem die ältesten Getriebe seit mehr als zwanzig Jahren im Einsatz sind.

### Wartungsfreiheit und Qualitätssicherung

Der Forderung nach geringsten Wartungskosten, die in den letzten Jahren verstärkt von Seiten der Hersteller gestellt wird, ist nicht nur bei der Schmierung, sondern auch bei anderen Konstruktionsaspekten von Harmonic Drive Getrieben für die Luftfahrt von Relevanz. So werden aus Gründen des Korrosionsschutzes bevorzugt hochwertige Edelstähle nach Luftfahrtnorm verwendet, die zu 100 % ultraschallgeprüft sind. Diese Stähle, die in ihren mechanischen Eigenschaften gezielt auf die Anwendung bei Harmonic Drive hin abgestimmt sind, liefern zum Teil sogar bessere Leistungsdaten als die industriell verwendeten Werkstoffe.

Auch die Auswahl der auf den ersten Blick sekundären Komponenten wie Dichtungen, Sicherungsringe und Verschraubungen muss unter dem Gesichtspunkt der Zuverlässigkeit und Wartungsfreiheit kritisch überprüft werden. So kommen vermehrt Dichtungen aus Sonder-Elastomeren oder PTFE zum Einsatz oder es werden

Lager mit Keramikwälzkörpern eingesetzt. Auch bei den Klebeverbindungen wird auf den Nachweis der Zuverlässigkeit dieser schwer inspizierbaren Fügeverfahren entsprechend Rücksicht genommen. Dies heißt z. B., dass mögliche zusätzliche Spannungen im Fügspalt durch die großen Temperaturschwankungen reduziert werden, indem Materialien mit annähernd gleichen Ausdehnungskoeffizienten verwendet werden. Da die komplette Entwicklung und Qualifikation eines speziell auf die Luftfahrterfordernisse angepassten Getriebes schnell mehrere Jahre in Anspruch nehmen können und dabei unterschiedliche Qualifikationsstufen durchlaufen werden müssen, sind die dabei erzeugten produktrelevanten Daten innerhalb des Konfigurationsmanagements bei Harmonic Drive organisiert und voll rückverfolgbar. Damit ist die lückenlose Dokumentation aller Rohteile, der zugehörigen Prozessschritte, Montagen und entsprechender Funktionstests gewährleistet.

### Nachweise und Tests

Ergänzt werden diese konstruktiven Details durch entsprechend umfangreiche Tests im Rahmen der Entwicklung und die dabei durchzuführenden Nachweise für Festigkeit und Standfestigkeit. Hierbei werden auch die modernen Verfahren der beschleunigten Lebensdauertests mit eingesetzt und über numerische Methoden ergänzt. Eine enge Abstimmung zwischen Test und Berechnung ist dabei unumgänglich.

Diese für die Luft- und Raumfahrt entwickelten und etablierten Prozesse, Technologien und Kenntnisse werden auch verstärkt in anderen Branchen eingesetzt, um den Kundenforderungen gerecht zu werden. So gesehen partizipieren alle Anwender von Harmonic Drive Getrieben von dem Engagement in dem anspruchsvollen Gebiet der Luftfahrt.

Ausführliche Informationen zu den Harmonic Drive Getrieben erhalten Sie über

HARMONIC DRIVE..... 309

### Innovationsmotor „Luftfahrt“

Die zivile Luftfahrt ist ein Sektor, der bisher schon über mehrere Jahrzehnte kontinuierlich mit 3 bis 5% jährlich gewachsen ist. Sowohl Boeing als auch Airbus gehen davon aus, dass dieser Trend mindestens bis 2020 anhält, wahrscheinlich aber noch darüber hinaus. Dabei sind sich alle Beteiligten (Hersteller, Betreiber und Behörden) darin einig, dass der Wettbewerbsdruck weiter zunehmen wird, dabei aber keine Kompromisse in der Sicherheit gemacht werden können. Vielmehr ist es das Ziel, die Unfallwahrscheinlichkeit weiter zu verringern. Damit steigen auch weiterhin die Anforderungen an hier eingesetzte Komponenten. Deren Entwicklung wird gleichzeitig vorangetrieben, wovon in vielen Fällen auch der Maschinenbau profitiert.