

Entwicklung von Harmonic Drive® Getriebe für Raumfahrtantriebe

Franz Lageder
Harmonic Drive AG
Hoenbergstr. 14
65555 Limburg/ Lahn
Deutschland
Mail: franz.lageder@harmonicdrive.de

Zusammenfassung

Um den Energieverbrauch an Bord von Raumfahrzeugen möglichst gering zu halten, ist es unbedingt notwendig die mitzuführende Masse auf ein Minimum zu reduzieren. Bei einer Vielzahl von Raumfahrtanwendungen ist es zudem erforderlich, Mechanismen mit einer hohen Präzision spielfrei und wiederholgenau zu positionieren. Zu den Anwendungen zählen beispielsweise Nachführmechanismen von Sonnensegeln und Positioniermechanismen für Antennen oder für Schubdüsen von Raumfahrzeugen.

Wesentliche Eigenschaften von Harmonic Drive® Getriebe sind neben einer hohen Steifigkeit bei absoluter Spielfreiheit auch eine hohe Übertragungs- und Wiederholgenauigkeit. Gleichzeitig können Übersetzungen von bis zu 320:1 in einer einzigen Getriebestufe realisiert werden. Das wiederum ermöglicht den Einsatz von kleinen, leichten Elektromotoren. Zusammen mit einer hohen Drehmomentdichte und den oben genannten Eigenschaften eignen sich Harmonic Drive® Getriebe hervorragend für den Einsatz im All. Aus diesem Grund sind Harmonic Drive® Getriebe seit der ersten Mondlandung fester Bestandteil von zuverlässigen Präzisionsantrieben in der Raumfahrttechnik.

Neben den mechanischen Komponenten des Getriebes stellt die Schmierung einen zentralen Bestandteil eines zuverlässig funktionierenden Antriebssystems dar. Aufgrund der extremen Umgebungsbedingungen bestehen jedoch starke Einschränkungen bei der Auswahl eines raumfahrttauglichen Schmierstoffes, der insbesondere die Lebensdauer des Getriebes maßgeblich bestimmt. Um auch hier tiefgehende Kenntnisse aufzubauen, partizipiert die HDAG bereits seit mehreren Jahren an Entwicklungsprogrammen der ESA. Im Rahmen dieser Projekte wird ein intensives Testprogramm mit Getrieben vom Typ HFUC-20-160-SP durchgeführt. Ziel ist dabei die Qualifikation eines fettgeschmierten Einbausatzes für den Einsatz in Raumfahrtanwendungen. Parallel dazu laufen Entwicklungsprogramme im Bereich Trockenschmierung.

Vorge stellt werden neben einem kurzen Abriss über die Anforderungen an Raumfahrtgetriebe, die aktuellen Entwicklungsaktivitäten in den Bereichen Fettschmierung und Trockenschmierung von Harmonic Drive® Getrieben für den Einsatz im All. Dabei werden im Rahmen der Präsentation die aktuellen Testergebnisse aus dem ESA TAP (Tribology Application Programme) und aus dem ESA Forschungsprojekt Artes5 vorgestellt.

Außerdem wird der Entwicklungsstand im Bezug auf Materialien und Schmierkonzepte von Raumfahrt – Wellgetrieben dargestellt.

1. EINLEITUNG

Harmonic Drive® Getriebe werden schon seit Jahrzehnten in der Raumfahrt und Planetenerkundung eingesetzt. Insgesamt hat man nicht nur Mond und Mars besucht, sondern ist entweder schon auf den äußeren Planeten bzw. deren Monden gelandet oder an den großen Gasplaneten zumindest vorbei geflogen. Einige Harmonic Drive® Getriebe haben inzwischen sogar das Sonnensystem verlassen und werden erst in einigen tausend Jahren möglicherweise auf weitere Planeten stoßen.

Die spezifischen Eigenschaften der Harmonic Drive® Getriebe definieren nicht nur die prinzipielle Eignung der Antriebe für die betrachteten Bewegungsaufgaben, sondern entscheiden auch über Möglichkeit und Art der Einflussnahme auf das Systemverhalten durch mechatronische Elemente. Daher können die Konzepte mit einem Harmonic Drive® Getriebe nur eingeschränkt auf andere Getriebeprinzipien übertragen werden.

2. DAS FUNKTIONSPRINZIP DES HARMONIC DRIVE® GETRIEBES

Ein Harmonic Drive® Getriebe besteht aus lediglich drei Bauteilen (*Abbildung 1*). Der Circular Spline ist ein starrer, zylindrischer Ring mit Innenverzahnung, der Flexspline eine dünnwandige zylindrische Stahlbuchse mit Außenverzahnung und der Wave Generator einer elliptischen Stahlscheibe mit zentrischer Nabe und aufgezogenem, elliptisch verformbarem, elliptisch verformbaren Dünnringkugellager.

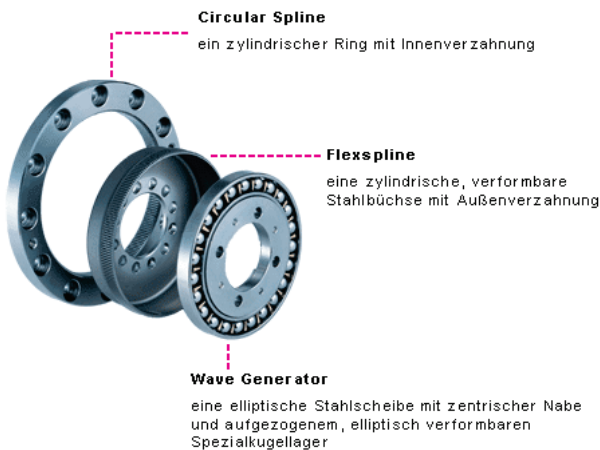


Abbildung 1 Aufbau eines Harmonic Drive® Getriebes

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. 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 einen Zahn und nach einer ganzen Umdrehung um zwei Zähne. Bei fixiertem Circular Spline dreht sich der Flexspline als Abtriebsselement entgegengesetzt zum Antrieb.

Durch Kombination des Getriebes mit einem bürstenlosen AC-Motor und einem für die Anwendung geeignetem Regler erhält man ein komplettes Servo-Antriebssystem. Dieses ist sowohl als Kompaktantrieb als auch als Hohlwellenantrieb verfügbar. Die Hohlwellenbauform ermöglicht dabei die Durchführung von Kabeln, Spindeln, Wellen oder Laserstrahlen.

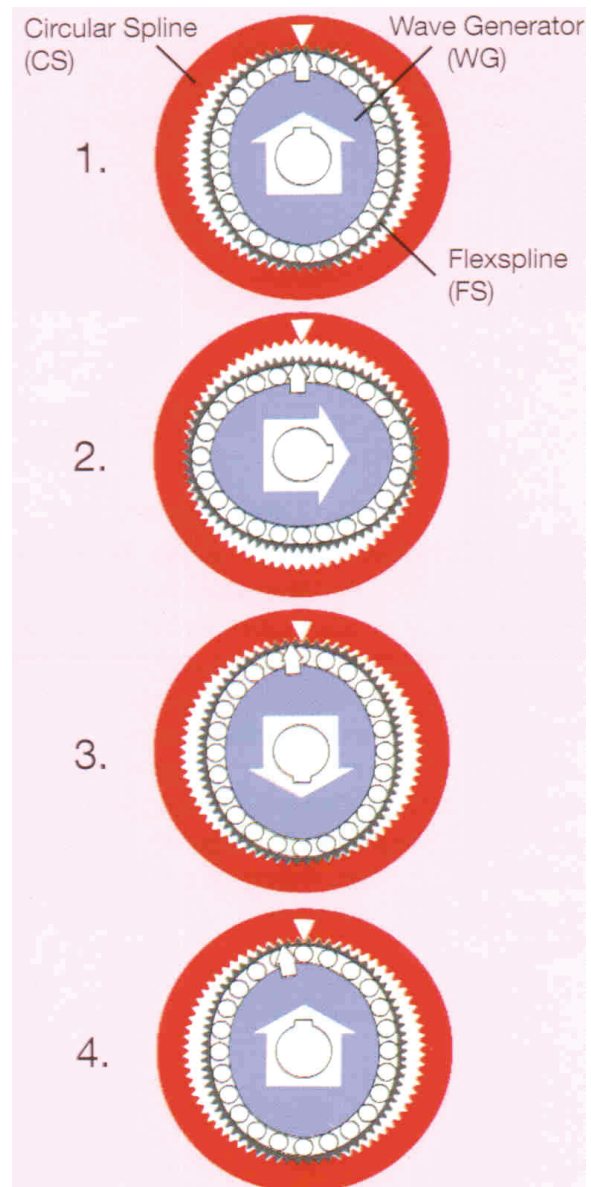


Abbildung 2 Funktionsprinzip des Harmonic Drive® Getriebes

3. ANFORDERUNGEN AN RAUMFAHRTGETRIEBE UND UNTERSCHIEDE ZU INDUSTRIEGETRIEBE

Die Anforderungen an Getriebe für den Einsatz in der Raumfahrt steigen stetig. Dies wäre nicht möglich ohne kontinuierliche Verbesserung der eingesetzten Technologie. Präzisionsgetriebe und Aktuatoren müssen eine Vielzahl von komplizierten Anforderungen erfüllen. Diese müssen eine hohe Übertragungsgenauigkeit bzw. eine hohe Wiederholgenauigkeit aufweisen. Eine möglichst große Drehmomentdichte und eine hohe Steifigkeit gehört ebenfalls zu den Anforderungen, außerdem müssen Antriebe kompakt und leicht sein, um den Energieverbrauch so gering wie möglich zu halten. Neben den Anforderungen an die Performance und die möglichst hohe Lebensdauer, müssen die Getriebe unter extremen Umweltbedingungen arbeiten.

Im Wesentlichen gibt es drei Punkte, in denen Standardgetriebe modifiziert werden um den Anforderungen in der Raumfahrt gerecht zu werden:

- Materialauswahl
- Mechanisches Design
- Schmierung

3.1. Materialauswahl

Harmonic Drive® Raumfahrtgetriebe werden typischerweise aus Korrosionsbeständigen Werkstoffen gefertigt. Diese Materialien haben neben einer besseren Korrosionsbeständigkeit, den Vorteil, dass die thermischen Längenausdehnungskoeffizienten gleichmäßiger sind als bei konventionellen Getriebematerialien. Tab. 1 zeigt eine Gegenüberstellung der unterschiedlichen Materialien, die typischerweise zum Einsatz kommen.

Edelstahlgetriebe haben im Lebensdauertest und in zahlreichen Performancetests gezeigt, dass sowohl erreichbare Spitzendrehmomente als auch erreichbare Lebensdauern mit denen, der Standardgetriebe vergleichbar sind.

3.2. Mechanisches Design

FE Analysen ermöglichen es Gewicht einzusparen und die Getriebegeometrie möglichst optimal und kundenspezifisch zu gestalten. Das Gewicht des Circular Spline kann beispielsweise reduziert werden, indem die Breite bzw. der Durchmesser verkleinert werden. Außerdem können Bohrungen gesetzt werden, um Gewicht einzusparen.

Der Flexspline kann verkürzt und die Masse des Wave Generator Plug ebenfalls reduziert werden, indem das Querschnittprofil optimiert wird und an unkritischen Stellen entsprechende Bohrungen angebracht werden.

3.3. Schmierung

Aufgrund der Temperaturschwankungen und des vorhandenen Hochvakuums in Raumfahrtanwendungen bestehen starke Einschränkungen bei der Auswahl eines tauglichen Schmierstoffes, der insbesondere die Lebensdauer maßgeblich bestimmt. Außerdem sind Wirkungsgrad und Lebensdauer des Getriebes stark abhängig von der Schmierstoffmenge. Tab. 2 zeigt unterschiedliche Schmierkonzepte für verschiedene Anwendungsbereiche.

Getriebekomponente		Materialien	
		Industriegetriebe	Raumfahrtgetriebe
Circular Spline		Gusswerkstoff	17-4PH cond. H1150
Flexspline		Vergütungsstahl	15-5PH cond. H1075
Wave Generator Bearing		Wälzlagerstahl	- SUS440C (JIS G 4303) - X30CrMoN 15 1 / Si3N4
Lagerkäfig		PA 66	- Phenolic mit Ölimprägnierung - Sintimid 15M
Wave Generator Plug		Vergütungsstahl	17-4PH cond. H1150

Tab. 1 Materialien für Industrie- und Raumfahrtgetriebe im Vergleich

Industrieanwendungen	Raumfahrtanwendungen	Kryogenanwendungen
<p>Speziell für die tribologischen Anforderungen entwickelte Schmierstoffe.</p> <p>z.B.:</p> <ul style="list-style-type: none"> - Flexolub A1 - SK-1A - 4BNo.2 <p>Temperaturbereich:</p> <ul style="list-style-type: none"> - -40°C bis 120°C <p>Schmierstoffmenge:</p> <ul style="list-style-type: none"> - Vollschmierung (~16g für Baugröße 20) 	<p>Die Schmierstoffauswahl wird maßgeblich von den Umgebungsbedingungen bestimmt. (hauptsächlich Vakuum)</p> <p>z.B.:</p> <ul style="list-style-type: none"> - Braycote 601EF - Fomblin Z25 <p>Temperaturbereich:</p> <ul style="list-style-type: none"> - -72°C bis +90°C <p>Schmierstoffmenge:</p> <ul style="list-style-type: none"> - Minimalmengenschmierung (~1g für Baugröße 20) 	<p>Aufgrund extrem tiefer Temperaturen ist der Einsatz von Schmierfetten nicht möglich. Daher werden tribologisch wirksame Beschichtungen eingesetzt.</p> <p>z.B.:</p> <ul style="list-style-type: none"> - MoS2 <p>Temperaturbereich:</p> <ul style="list-style-type: none"> - -269°C bis 427°C



Tab. 2 Schmierkonzepte bei Industrie- und Raumfahrtgetrieben im Vergleich

4. ENTWICKLUNGSAKTIVITÄTEN FÜR DEN EINSATZ VON HARMONIC DRIVE® GETRIEBEN IM ALL

Die Performance und die Lebensdauer von Harmonic Drive® Getrieben ist von einer Vielzahl von Parametern abhängig. Diese Parameter inkludieren Drehzahl, Drehmoment, Temperatur, Schmierkonzept, Schmierstofftyp und Schmierstoffmenge.

Im Rahmen von Grundlagenforschungen werden Materialien und deren Wärmebehandlung, Beschichtungen, Schmierstoffe usw. untersucht und getestet. Auf Basis der Ergebnisse aus den Untersuchungen werden Getriebekonfigurationen festgelegt.

Zudem ist die Performance eines Harmonic Drive® Getriebes, insbesondere die Steifigkeit, abhängig von der Paarung der Getriebekomponenten und von der daraus resultierenden Vorspannung in der Verzahnung.

Die Vielzahl von Einflussparametern und Abhängigkeiten machen eine Charakterisierung und eine detaillierte Vermessung der Testgetriebe erforderlich, um die Reproduzierbarkeit für den Einsatz im All zu gewährleisten.

Tests auf Getriebeebene, im Ultrahochvakuum und in Zusammenarbeit mit verschiedenen Instituten sowie die Auswertung der Ergebnisse und die

Dokumentation sind ebenfalls Bestandteile der Entwicklungsaktivitäten.

Die aktuell laufenden Entwicklungsaktivitäten lassen sich unterteilen in:

- Harmonic Drive® Getriebe mit Fettschmierung
- Harmonic Drive® Getriebe mit Trockenschmierung

4.1. Fettschmierung

Es ist bekannt, dass die Lebensdauer von Harmonic Drive® Getrieben in Luft wesentlich höher ist als die Lebensdauer im Vakuum.

Abbildung 3 zeigt den Coning Angle, der entsteht, wenn der Wave Generator in den Flexspline montiert wird. Durch das Montieren des Circular Spline wird der Winkel eliminiert und es entsteht eine permanente Vorspannung in der Verzahnung. Durch diesen so genannten „Coning Effect“ zwischen der Verzahnung im Circular Spline und der Verzahnung im Flexspline wird der Schmierstoff aus dem tribologischen Kontakt gepresst und verdrängt.

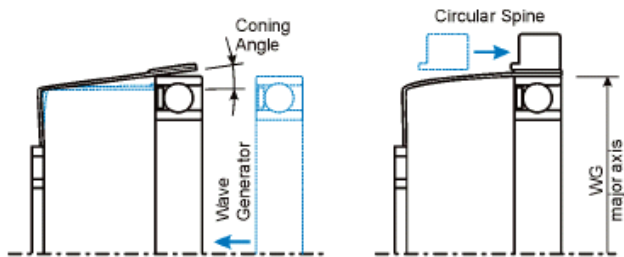


Abbildung 3 "Coning Effect" beim Harmonic Drive® Getriebe

Unter Umgebungsbedingungen mit einem gewissen Umgebungsdruck wird der Schmierstoff wieder in den tribologischen Kontakt gepresst.

Die reduzierte Lebensdauer im All ist darauf zurückzuführen, dass diese Schmierstoffrückführung im Vakuum nicht funktioniert und es dadurch zu Mangelschmierung zwischen Flexspline und Circular Spline kommen kann.

Im Vakuum erfolgt die Versorgung der Verzahnung mit Schmierstoff lediglich durch das Kriechen des Öls in den tribologischen Kontakt.

4.1.1. ESA TAP (Tribology Application Programme)

Im Rahmen des Tribology Application Programme wurden in den letzten Jahren mehrere Tests mit Fettschmierung an zwei verschiedenen Harmonic Drive® Getriebetypen durchgeführt. Das Forschungsprojekt wurde von ESA gefördert. Die Getriebe wurden von Harmonic Drive® AG bereitgestellt, sämtliche Tests im Ultrahochvakuum wurden bei ESTL durchgeführt.

- Testgetriebetyp 1: CSD-20-160
- Testgetriebetyp 2: HFUC-20-160

Abbildung 4 zeigt die beiden Getriebetypen. Wesentliche Unterschiede liegen in den Abmessungen und in der Performance. Das HFUC Getriebe hat ein Nenndrehmoment von 40Nm, während das Nenndrehmoment des CSD Getriebes bei 28Nm liegt. Das HFUC ist dafür um den Faktor 1.8 länger.

Die Fertigung der CSD Getriebe erfolgt ausschließlich in Japan, während die HFUC Getriebeeinbausätze auch in Deutschland entwickelt und produziert werden.

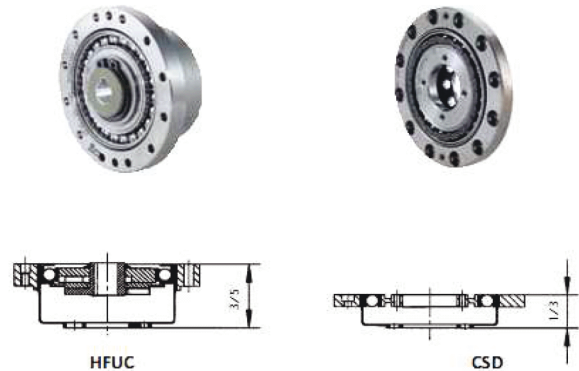


Abbildung 4 Vergleich zwischen HFUC-20-160 und CSD-20-160

4.1.1.1. Test mit Getriebetyp CSD

Das Getriebe wurde charakterisiert und anschließend einem Vakuum-Verschleißtest unterzogen. Ziel war es, das Verschleißverhalten in dem tribologischen Kontakt zwischen Kugellager und Flexspline zu analysieren und die Lebensdauer des Getriebes zu ermitteln. Das Ende der Lebensdauer war per Definition erreicht sobald der Wirkungsgrad um einen absoluten Wert von 20% abgenommen hat.

- Getriebekonfiguration

Getriebetyp: CSD-20-160-2A-GR-SP
 Circular Spline: 17-4PH cond. H1150, 322 Zähne
 Flexspline: 15-5PH cond. H1075, 320 Zähne
 WG Lager: SUS 440C, 23 Kugeln
 Lagerkäfig: Phenolic mit Ölprägnierung
 FomblinZ25
 Schmierung: Minimalmengenschmierung
 Maplub PF101a

- Getriebecharakterisierung

Im Rahmen der Getriebecharakterisierung wurden das lastfreie Laufmoment, das lastfreie Rücktreibmoment, die Torsionssteifigkeit und der Wirkungsgrad gemessen.

Die Tests wurden im Vakuum, bei Temperaturen zwischen -57°C und +90° durchgeführt. Die Drehzahl am Getriebeeingang lag zwischen 0.1 und 50 U/min, während das Ausgangsdrehmoment Werte zwischen 0.1Nm und 28Nm hatte.

- Lebensdauertest

Nach der Charakterisierung erfolgte der Vakuum-Verschleißtest. Dieser wurde im Ultrahochvakuum bei $>10^{-6}$ mbar und bei einer Temperatur von +90°C durchgeführt. Die Drehzahl am Getriebeeingang lag bei 50 U/min, während das Ausgangsdrehmoment einen konstanten Wert von 4Nm hatte.

- Ergebnis

Das Getriebe hat eine Lebensdauer von 10600 Umdrehungen am Abtrieb erreicht. Dann wurde der Test aufgrund des niedrigen Wirkungsgrades abgebrochen.

4.1.1.2. Test mit Getriebetyp HFUC

Die Getriebe wurden charakterisiert und anschließend einem Lebensdauertest unterzogen. Insgesamt sind bislang drei Tests gelaufen, diese wurden abschließend ausgewertet und die Ergebnisse wurden mit den Testergebnissen der CSD Getriebe verglichen (siehe 4.1.1.1).

Ziel war es, das Verschleißverhalten der Getriebekomponenten im Ultrahochvakuum und mit Minimalmengenschmierung zu analysieren und die Lebensdauer zu bestimmen. Außerdem wurde der Einfluss einer Einlaufprozedur auf die Lebensdauer untersucht.

Das Ende der Lebensdauer war per Definition ab einem Wirkungsgrad von kleiner als ca. 40% erreicht.

Der Getriebetyp der drei Testeinheiten ist identisch. Um eine Vergleichbarkeit der Ergebnisse zu erreichen waren die Lastzyklen und die Umgebungsbedingungen gleich.

Bei einem der drei Testgetriebe wurde eine Einlaufprozedur angewandt. Dabei wurde das Getriebe zuerst befettet und charakterisiert, danach erfolgte ein Lastzyklus mit ca. 4000 Abtriebsumdrehungen. Nach diesem Zyklus wurde das Getriebe gereinigt, erneut befettet und charakterisiert. Nach dieser Einlaufphase erfolgte der eigentliche Lebensdauertest.

- Getriebekonfiguration

Getriebetyp: HFUC-20-160-2A-GR-SP
Circular Spline: 17-4PH cond. H1150, 322 Zähne
Flexspline: 15-5PH cond. H1075, 320 Zähne
WG Lager: SUS 440C, 23 Kugeln
Lagerkäfig: Phenolic mit Ölimprägnierung
FomblinZ25
Schmierung: Minimalmengenschmierung Fomblin Z25/Braycote 601EF

- Getriebecharakterisierung

Im Rahmen der Getriebecharakterisierung wurden das lastfreie Laufmoment, das lastfreie Rücktreibmoment, die Torsionssteifigkeit und der Wirkungsgrad gemessen.

Die Tests wurden unter Labor-Umgebungsbedingungen durchgeführt.

- Lebensdauertest

Der Lebensdauertest wurde im Ultrahochvakuum bei 10^{-6} mbar und bei einer Temperatur von $+90^{\circ}\text{C}$

durchgeführt. Die Getriebe wurden mit einem konstanten Drehmoment von 4Nm bei einer Drehzahl von 50U/min belastet.

- Ergebnis

Das erste Testgetriebe hat eine Lebensdauer von 48800 Umdrehungen am Abtrieb erreicht. Danach ist der Wirkungsgrad auf ca. 40% abgesunken und der Test wurde abgebrochen. Die *Abbildung 5* zeigt den Verlauf des Wirkungsgrads über die Lebensdauer.

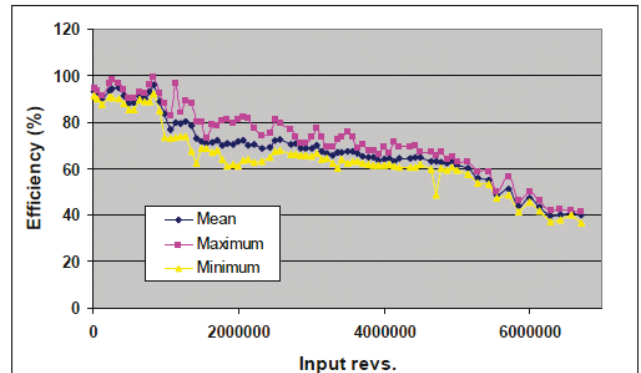


Abbildung 5 Wirkungsgrad in Abhängigkeit der Lebensdauer HFUC 1

Das zweite Testgetriebe hat eine Lebensdauer von 41070 Umdrehungen am Abtrieb erreicht. Danach ist der Wirkungsgrad auf 30% abgesunken und der Test wurde abgebrochen. Die *Abbildung 6* zeigt den Verlauf des Wirkungsgrads über die Lebensdauer.

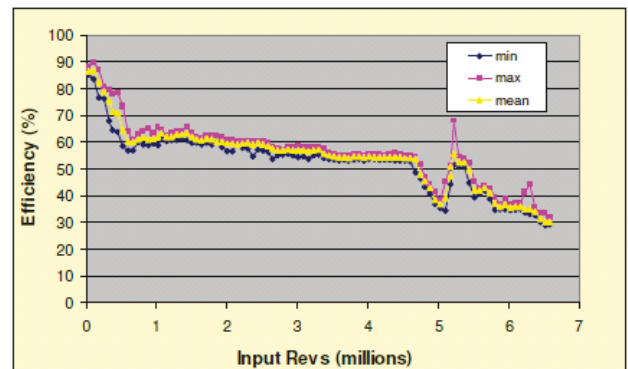


Abbildung 6 Wirkungsgrad in Abhängigkeit der Lebensdauer HFUC 2

Das dritte Getriebe hat mit Einlaufprozedur und 106000 Abtriebsumdrehungen eine wesentlich höhere Lebensdauer erreicht als die beiden anderen Testgetriebe, bevor der Wirkungsgrad das untere Limit erreicht hat. *Abbildung 7* zeigt den Verlauf des Wirkungsgrads über die Lebensdauer. Der Wirkungsgrad wurde punktuell auch bei -25°C

gemessen und ausgelesen. Der Verlauf ist ebenfalls in der Abbildung dargestellt.

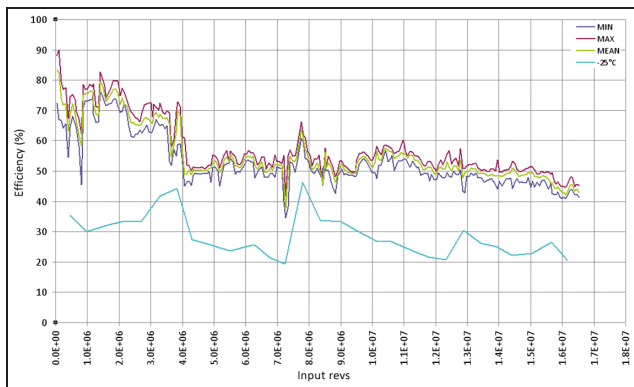


Abbildung 7 Wirkungsgrad in Abhängigkeit der Lebensdauer HFUC 3

4.1.2. ESA ARTES5

Artes5 ist ein ESA gefördertes Entwicklungsprojekt. Im Rahmen von Artes5 werden Harmonic Drive® Getriebe in Zusammenarbeit mit ESTL getestet.

Ziel ist es, Harmonic Drive® Getriebe mit europäischem Wave Generator Lager für Raumfahrtanwendungen zu qualifizieren und entsprechende Tests durchzuführen. Das Material des Kugellagers soll von SUS440C auf ein Hybridlager mit Cronidur® 30 Lagerringen und keramik- Wälzkörper umgestellt werden.

Außerdem soll die bereits vorhandene Datenbasis zu Tests mit Minimalmengenschmierung erweitert werden.

Im Rahmen des Projektes wurde bereits ein Getriebe getestet. Ein weiteres Getriebe befindet sich derzeit in der Testvorbereitung bei ESTL.

- Getriebekonfiguration

Getriebetyp: HFUC-20-160-2A-GR-SP
 Circular Spline: 17-4PH cond. H1150, 322 Zähne
 Flexspline: 15-5PH cond. H1075, 320 Zähne
 WG Lager: X30CrMoN 15 1 / Si3N4 Kugeln
 Lagerkäfig: Phenolic mit Ölimprägnierung FomblinZ25
 Schmierung: Minimalmengenschmierung Fomblin Z25/Braycote 601EF

- Getriebecharakterisierung

Im Rahmen der Getriebecharakterisierung wurden das lastfreie Laufmoment, das lastfreie Rücktreibmoment, die Torsionssteifigkeit und der Wirkungsgrad gemessen.

Die Tests wurden unter Labor-Umgebungsbedingungen durchgeführt.

- Lebensdauertest

Der Lebensdauertest wurde im Ultrahochvakuum bei 10^{-6} mbar und bei einer Temperatur von $+90^{\circ}\text{C}$ durchgeführt. Die Getriebe wurden mit einem konstanten Drehmoment von 4Nm bei einer Drehzahl von 50U/min belastet.

- Ergebnis

Das Testgetriebe mit Kugellager aus X30CrMoN 15 1 / Si3N4 und ohne Einlaufprozedur hat eine Lebensdauer von 74400 Umdrehungen am Abtrieb erreicht. Danach ist der Wirkungsgrad stark abgesunken und der Test wurde abgebrochen.

4.1.3. Resümee

Die Ergebnisse aus den Entwicklungsaktivitäten im Bereich der fettgeschmierten Harmonic Drive® Getriebe zeigen, dass sich ein Einlaufprozess günstig auf das Verschleißverhalten des Getriebes auswirkt. Bei dem HFUC Getriebetyp konnte die Lebensdauer dadurch mehr als verdoppelt werden.

Außerdem hat der Materialwechsel des Kugellagers von SUS440C auf ein Hybridlager mit Cronidur® 30 Lagerringen und keramik- Wälzkörper einen positiven Effekt auf das Verschleißverhalten des Getriebes. Die Lebensdauer im Test konnte dadurch um den Faktor 1,8 verlängert werden.

4.2. Trockenschmierung

Flüssigschmierstoffe haben bei sehr niedrigen Temperaturen den Nachteil, dass sie eine hohe Viskosität und damit einen schlechten Wirkungsgrad erreichen.

Bei extrem tiefen Temperaturen (-80°C bis -269°C) führt das dazu, dass sich die Schmierstoffe komplett verfestigen und dadurch die Schmierwirkung nicht mehr gegeben ist.

Im Ultrahochvakuum zeigen Schmierstoffe außerdem das Ausgasen von Komponenten. Dies führt zu einem dazu, dass beispielsweise in Testanlagen und in Maschinen das Vakuum bzw. optische Instrumente verschmutzt werden, zum anderen verliert das Fett Komponenten und das Schmierkonzept versagt.

Diese Eigenschaften und Umgebungsbedingungen können vor allem in der Raumfahrt dazu führen, dass man auf ein anderes Schmierkonzept wechseln muss: Die Trockenschmierung. Hier werden auf den Kontaktflächen tribologisch wirksame Beschichtungen aufgebracht, die ein Fressen und den vorzeitigen Verschleiß der Flächen vermeiden.

Seit Jahren werden für verschiedene Anwendungen im Tieftemperaturbereich (bis -269°C) Beschichtungen auf Harmonic Drive® Getriebe appliziert (siehe Kapitel 3.3).

Die erreichbare Lebensdauer mit diesen Getrieben ist jedoch relativ klein. Daher wurde das von der Europäischen Union geförderte Projekt harmLES ins Leben gerufen mit dem Ziel einen neuen Harmonic Drive® Getriebetyp für Trockenschmierung zu entwickeln.

4.2.1. HarmLES

HarmLES ist ein Förderprojekt der Europäischen Union welches im Rahmen von FP7 abgewickelt wird. Die Projektlaufzeit beträgt drei Jahre und der Projektfortschritt liegt derzeit bei ca. 50%, daher sind aktuell noch keine Entwicklungsergebnisse freigegeben und verfügbar.

Es werden im Wesentlichen zwei Ziele verfolgt:

- Entwicklung einer leistungsfähigen Oberflächenbeschichtung für das Harmonic Drive® Getriebe.
- Optimierung der Getriebekinematik um den Verschleiß in den tribologischen Kontakten bei Trockenschmierung zu minimieren.

Die angestrebte Lebensdauer beträgt 17000 Umdrehungen am Abtrieb bei einem Drehmoment von 4Nm. Außerdem wird die zu erreichende Lebensdauer bei höheren Drehmomenten (bis zu 16Nm) untersucht. Die Arbeitstemperatur des Getriebes beträgt -200°C bis $+150^{\circ}\text{C}$.

Die Übertragungsgenauigkeit soll wie bei den Standard Harmonic Drive® Getrieben unter 1arcmin liegen, die Wiederholungsgenauigkeit ist mit 3arcsec spezifiziert und die minimale Getriebesteifigkeit beträgt $1.1 \cdot 10^4 \text{ Nm/rad}$. Neben den quantitativen Anforderungen soll insbesondere die Spielfreiheit des Harmonic Drive® Getriebes, als Vorteil gegenüber anderen Getriebeprinzipien, beibehalten werden.

- Entwicklung einer leistungsfähigen Oberflächenbeschichtung

Um eine geeignete Oberflächenbeschichtung für die Harmonic Drive® Getriebe zu entwickeln, werden im ersten Schritt so genannte Pin-on-Disc Tests durchgeführt. Dadurch ist es möglich verschiedene Beschichtungsmaterialien sowohl qualitativ als auch quantitativ zu bewerten und Vergleiche anzustellen. Des Weiteren werden so genannte fretting Tests gemacht um die Beschichtungen hinsichtlich ihrer Leistungsfähigkeit bei kleinen oszillierenden

Bewegungen (0,05mm) zu bewerten. Mit diesem speziellen Verfahren können bis zu 10Millionen Umdrehungen in 3 Tagen simuliert werden.

- Optimierung der Getriebekinematik

Der Kontakt in der Verzahnung und zwischen Flexspline und Wave Generator Lager ist der Lebensdauer bestimmende tribologische Kontakt bei trockenlaufenden Harmonic Drive® Getrieben. Außerdem ist die Lebensdauer der Getriebe von der Vorspannung in der Verzahnung (siehe auch 4.1) abhängig.

Das Hauptaugenmerk in der Getriebe-neu-auslegung ist daher auf die Reduktion der Spannung in den oben genannten Kontakten und auf die Reduktion des Gleitweges gerichtet. Die Getriebeentwicklung erfolgt auf der Basis eines bereits existierenden Getriebetyps: CobaltLine-20-100.

Die Optimierung der Zahngeometrie um die Spannungen im Material zu minimieren erfolgt mittels der Methode Finiten Element. *Abbildung 8* zeigt das vereinfachte FE Modell eines Flexspline Zahns.

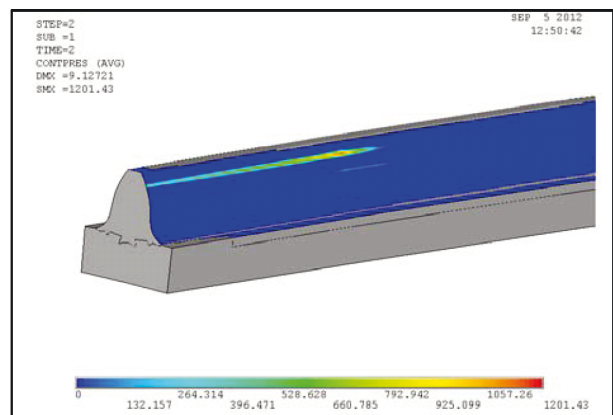


Abbildung 8 FE Modell eines Flexspline Zahns

Die Simulation des Zahneingriffs und die daraus resultierende Minimierung bzw. Optimierung des Gleitwegs erfolgt mit Hilfe eines Matlab® tools. *Abbildung 9* zeigt das Tool zur Simulation des Zahneingriffs.

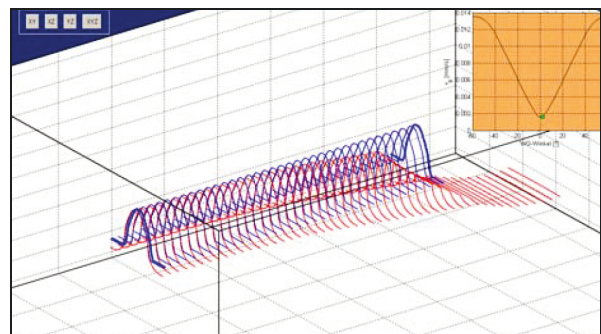


Abbildung 9 Tool zur Simulation des Zahneingriffs

5. AUSBLICK

Artes5.1 ist das Nachfolgeprojekt von Artes5. Im Rahmen dieses Forschungsvorhabens sollen die bis dahin gewonnen Erkenntnisse aus dem Bereich der Fettschmierung (TAP und Artes5) bzw. die bis dahin gewonnen Erkenntnisse aus dem Bereich der Trockenschmierung (HarmLES) genutzt werden um neue Getriebe zu bauen und zu testen.

Ziel ist es ein ZirconLine Getriebe aus HarmLES mit Fettschmierung zu testen. Außerdem werden HFUC Getriebe mit Beschichtungen, welche in HarmLES entwickelt wurden, im Ultrahochvakuum getestet.

6. DANKSAGUNG

Die dargestellten Vorhaben wurden im Rahmen des FP7- Programms durch die Europäische Union gefördert.

7. QUELLEN

- [1] Jansson, M., Koenen, H., Vivente, J.L., Tvaruzka, A., Merstallinger, A. (2013). Development of dry lubricated Harmonic Drives for space applications ("harmLES")
- [2] Tvaruzka, A. (2013). Development and test activities of Harmonic Drive gears under ESA programmes.
- [3] Ueura, K., Slatter, R. Development of Harmonic Drive Gear for space applications
- [4] Watters, R.B., Bridgeman, P., Roberts, E.W. (2011) ESA-ESTL-TM-0072 01- A TV assessment of a grease-lubricated HFUC harmonic drive HFUC 1
- [5] Bridgeman, P. (2012) ESA-ESTL-TM-0084 01- A TV assessment of grease lubricated harmonic drives (HFUC2)