

Move.On

Schlussbericht

zum Vorhaben

Entwicklung eines hochzuverlässigen Aktuators basierend auf einer neuartigen Getriebetechnologie

im Rahmen des

Airbus geführten Förderverbundprojekts

MOVE.ON

LuFoIV-4-249-015

**MOVable dEsign, Optimisation and airframe
Noise reduction**

Zuwendungsempfänger: WITTENSTEIN aerospace&simulation GmbH, Igersheim

Förderkennzeichen: 20A1101G

Laufzeit des Vorhabens: 01.10.2012 – 31.10.2016

Erstellungsdatum: 13.12.2016

Berichtersteller:



Steffen Beetz

Inhaltsverzeichnis

1	Kurzdarstellung des Projektes.....	7
1.1	Aufgabenstellung	7
1.2	Voraussetzungen	10
1.3	Planung und Ablauf des Vorhabens	12
1.4	Stand der Wissenschaft und Technik.....	13
1.5	Zusammenarbeit mit anderen Stellen.....	13
2	Technische Ergebnisse	14
2.1	AP3200-AP01 Grundlagen- und Konzeptdefinition.....	14
2.1.1	Aufgabenstellung.....	14
2.1.2	Ergebnis	14
2.2	AP3200-AP02 Konzeptentwicklung	21
2.2.1	Aufgabenstellung.....	21
2.2.2	Ergebnis	21
2.3	AP3200-AP03 Detailentwicklung.....	31
2.3.1	Aufgabenstellung.....	31
2.3.2	Ergebnis	31
2.4	AP3200-AP04 Produktion/Test Prototyp	34
2.4.1	Aufgabenstellung.....	34
2.4.2	Ergebnis	34
2.5	AP3200-AP05 Zuverlässigkeitsanalyse.....	40
2.5.1	Aufgabenstellung.....	40
2.5.2	Ergebnis	40
2.6	AP3200-AP06 Konstruktionsanpassungen.....	41
2.6.1	Aufgabenstellung.....	41
2.6.2	Ergebnis	41
2.7	AP3200-AP07 Tribologieoptimierung	41
2.7.1	Aufgabenstellung.....	41
2.7.2	Ergebnis	41
2.8	AP3200-AP08 Verifikation.....	42
2.8.1	Aufgabenstellung.....	42

Schlussbericht zu FKZ: 20A1101G

Move.On

2.8.2	Ergebnis	42
2.9	Zusammenfassung	45
3	Nutzen und Verwertbarkeit	46
4	Fortschritt anderer Stellen	46
5	Veröffentlichungen	46
6	Anlage.....	46

Abbildungsverzeichnis

Abb. 1 Position des FS-GRA im Flugzeug	8
Abb. 2 Position des FS-GRA im Flügelquerschnitt.....	8
Abb. 3 Position des FS-GRA im Flügelquerschnitt.....	9
Abb. 4 HIT-Aktuator	10
Abb. 5 SDC-Aktuator	11
Abb. 6 Arbeitspaketstruktur des Verbundes respektive des Vorhabens MOVE.ON	12
Abb. 7 Prinzip der Galaxie Technologie	15
Abb. 8 Prinzip der Galaxie Technologie	15
Abb. 9 Fehlerfälle des GALAXIE-Getriebes	16
Abb. 10 Design-Konzepte	17
Abb. 11 Design-Konzepte 1.2 / 2.2	18
Abb. 12 Design Konzept 2.1	18
Abb. 13 Design Konzept 1.1 /1.1a	19
Abb. 14 Konzeptentscheidung	20
Abb. 15 CAD-Model FS-GRA.....	21
Abb. 16 Schnittstellenzeichnung	22
Abb. 17 Komponenten des GALAXIE-Getriebes.....	25
Abb. 18 Indicator Pin	26
Abb. 19 Steifigkeitsmessung GALAXIE-Getriebe.....	28
Abb. 20 Wirkungsgrade des GALAXIE-Getriebes bei Raumtemperatur	29
Abb. 21 Wirkungsgrad des GALAXIE-Getriebes bei -55°C (2000Nm / 1rpm)	30
Abb. 22 FEM-Simulation Gehäuse FS-GRA	32
Abb. 23 Prüfstands Aufbau GALAXIE-Getriebe	34
Abb. 24 Steifigkeitsmessung GALAXIE-Getriebe.....	35
Abb. 25 Gleichlauf- und Spielmessung GALAXIE-Getriebe	35
Abb. 26 Prüfstands Aufbau Torque Limiter und Bruchdetektor	36
Abb. 27 FS-GRA.....	36
Abb. 28 Abnahmeprüfstand FS-GRA - schematisch	37
Abb. 29 Abnahmeprüfstand FS-GRA.....	37
Abb. 30 Messergebnis Torque Limiter	39
Abb. 31 Messergebnis Torque Limiter mit Nachbesserungen.....	43

Schlussbericht zu FKZ: 20A1101G

Move.On

Abb. 32 Messergebnis Torque Limiter invertierter Aufbau	44
Abb. 33 Messergebnis FS-GRA mit modifiziertem Bruchdetektor	45

Tabellenverzeichnis

Tabelle 1: technische Daten GALAXIE RG110	26
Tabelle 2: Ergebnisse FMEA und Zuverlässigkeitsanalyse	40

Abkürzungsverzeichnis

AP	A rbeits p aket
CDR	C ritical D esign R eview
FH	F light H our
FS-GRA	F ail- S afe G eared R otary A ctuator
MTBF	M ain T ime B etween F ailure
Move.On	M OVable d Esign, O ptimisation and airframe N oise reduction
N/A	N ot A pplicable
PCU	P ower C ontrol U nit
PDR	P reliminary D esign R eview
TL	T orque L imiter
TRL	T echnology R eadiness L evel
UUT	U nit U nder T est
WA&S	W ITTENSTEIN aerospace & simulation GmbH

Schlussbericht zu FKZ: 20A1101G

Move.On

Das diesem Schlussbericht zugrundeliegende Forschungsvorhaben wurde mit Mitteln des Bundesministeriums für Wirtschaft und Energie (BMWi) unter dem Förderkennzeichen 20A1101G gefördert.

Die Form des Berichts entspricht den Nebenbestimmungen auf Kostenbasis des Bundesministeriums für Bildung und Forschung an Unternehmen der gewerblichen Wirtschaft für Forschungs- und Entwicklungsvorhaben (NKBF98).

Wir danken unserem Verbundführer, unseren Forschungspartnern und insbesondere dem Projektträger für die vertrauensvolle und kollegiale Zusammenarbeit.

Steffen Beetz

Projektleiter

1 Kurzdarstellung des Projektes

1.1 Aufgabenstellung

Eingebettet in das Verbundvorhaben Move.On (= MOVable dEsign, Optimisation and airframe Noise reduction) hatte die Firma WITTENSTEIN aerospace&simulation die Aufgabe, einen FailSafe Geared Rotary Actuator (FS-GRA) mit zwei Lastpfaden für ein Hochauftriebssystem auf Basis einer neuen Getriebetechnologie zu entwickeln, zu produzieren und zu testen.

Den Startpunkt im Projekt bildeten die Anforderungsanalyse sowie die Konzeptentwicklung auf Basis der analysierten und in einer Spezifikation erfassten Anforderungen.

Im Entwurf wurden verschiedene Konzepte hinsichtlich Zuverlässigkeit, Kosten, Realisierbarkeit und Gewicht untersucht:

- Entweder ein innovatives Konzept, was die Redundanz des Getriebestranges als solchen unnötig macht
- Oder eine innovative Getriebetechnologie, welche es ermöglicht, zwei Lastpfade abzubilden
- Oder eine Kombination aus den beiden vorher genannten Konzepten

Diese Konzepte wurden im Anschluss bewertet und es erfolgte die Auswahl des Konzeptes, welches als Prototyp umgesetzt werden sollte.

Um ein Design zu erarbeiten, wurde auf Basis der Spezifikation die Design Baseline erarbeitet, welche die Grundlage für die weiteren Auslegungen und Berechnungen darstellte. Das ausgewählte Konzept wurde somit bis zum CDR detailliert und komplette Bauunterlagen zur Fertigung von Prototypen erstellt.

Nach Freigabe der Bauunterlagen, wurden die Prototypen in Auftrag gegeben, welche im Anschluss Funktionstest unterzogen wurden.

Parallel zum Designprozess wurden Zuverlässigkeitsuntersuchen des Aktuators durchgeführt.

Der „Fail-Safe Geared Rotary Actuator“ (im folgenden FSGRA genannt) ist eine Schlüsseltechnologie, um mit dem Hochauftriebssystem zusätzliche Funktionen im Zusammenhang mit der differentiellen Verstellung der Klappen zu verwirklichen. Sie eliminieren die Notwendigkeit der mechanischen Kopplung der Landeklappen und bieten die Möglichkeit, Gewicht in der Flügelstruktur einzusparen. Zur Realisierung dieser Vorteile bedarf es innovativer Systemdesigns, die den Gewichtsaufwuchs beim System minimieren und die Systemanforderungen erfüllen.

Seit dem A350 wird das sog. „Differential Flap Setting“ im High-Lift System eingesetzt. Nachteil dieses Systems ist, dass in Verbindung mit einer Fowler-Kinematik mindestens ein weiterer Lastpfad notwendig ist, um bei Bruch eines Lastpfades das Abreißen der

Move.On

Klappe zu vermeiden. Vom Einsatz eines neuartigen FSGRA mit zwei Lastpfaden erwartet man ein verringertes Gewicht der Klappenstruktur. Des Weiteren kann auf den sog. „Interconnection strut“ verzichtet werden, was zu weiteren Gewichtseinsparungen führt.

Der FSGRA für den Flügel hilft den Forderungen (z.B. EU-Strategiepapier Vision2020) nach der Verringerung der Kosten im Luftverkehr (30%), dem Treibstoffverbrauch und der Emissionen (CO₂ um 50% und NO_x um 80%) nachzukommen und somit den Luftverkehr "grüner" zu machen.

Abb. 1 und **Abb. 2** zeigen die Position des zu entwickelnden FS-GRA im Flugzeug.

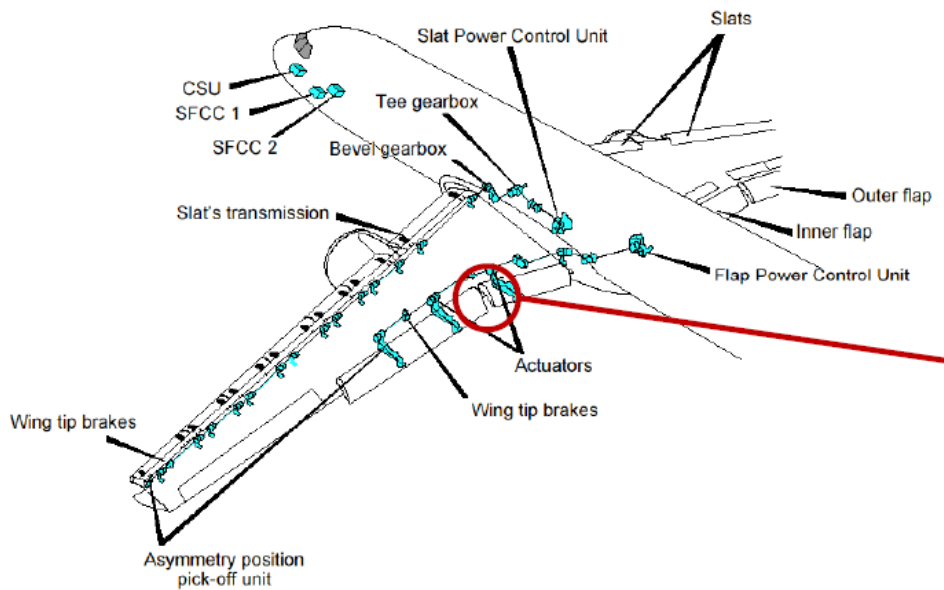


Abb. 1 Position des FS-GRA im Flugzeug

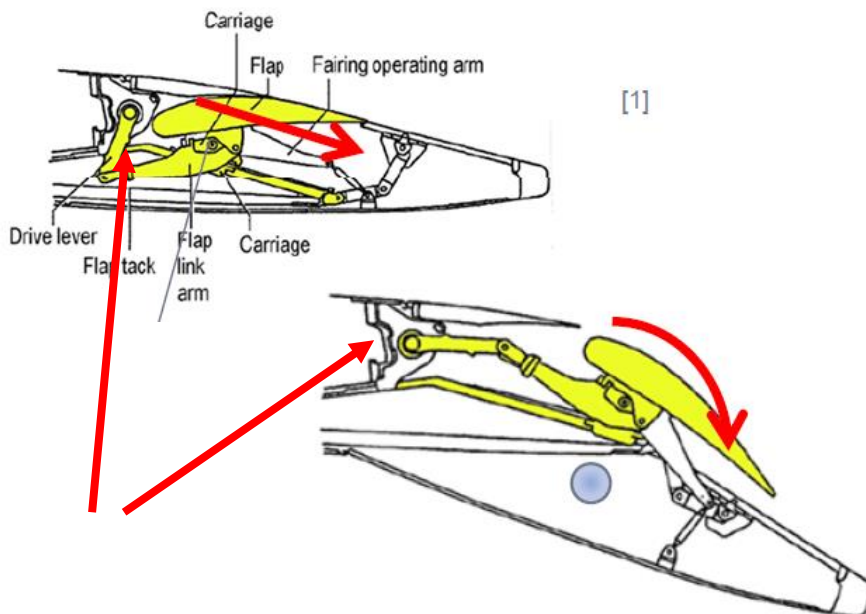


Abb. 2 Position des FS-GRA im Flügelquerschnitt

Move.On

Das Hochauftriebssystem (High Lift System) besteht aus dem Slat- (Flügelvorderkante) und Flapsystem (Flügelhinterkante).

Während der Start und Landephase des Flugzeugs wird durch diese Klappen der Auftrieb vergrößert um die Geschwindigkeit reduzieren zu können.

Beim A350 wird durch die Verstellung der inneren zur Äußeren hinteren Landeklappe die Trimmung des Flugzeugs realisiert.

Im Fehlerfall müssen die Klappen des High Lift System festgesetzt werden. Zu diesem Zweck sind an der Zentralwelle und in den Aktuatoren Bremsen/Verriegelungsmechanismen und Sensoren integriert, die im Fehlerfall blockieren.

Für den Fehlerfall, dass eine Anlenkung der Klappen nicht funktioniert, wird über den Interconnection Strut die innere mit der äußeren Klappe gekoppelt. Das Blockieren des Antriebs erfolgt über einen im Torque Limiter integrierten Verriegelungsmechanismus. Die Struktur muss dafür ausgelegt werden, dass sich die Landeklappe über die gesamte Länge verwindet.

Um die Trimmung mit dem Flapsystem realisieren zu können wird die Konstruktion des Interconnection Strut sehr aufwendig, dieser muss im Normalbetrieb die Relativbewegung zwischen innerer und äußerer Landeklappe ermöglichen und im Fehlerfall starr sein.

Bei der redundanten Anlenkung der Klappen kann auf den Interconnection Strut verzichtet werden. Des Weiteren braucht die starke Verwindung der Klappe durch den Ausfall eines Anlenkpunktes nicht mehr berücksichtigt werden. Durch diese Vorteile wird erwartet, dass das System weniger komplex und leichter wird als die aktuell im A350 realisierte Lösung.

Abb. 3 zeigt den Unterschied zwischen dem bestehenden und dem geplanten System.

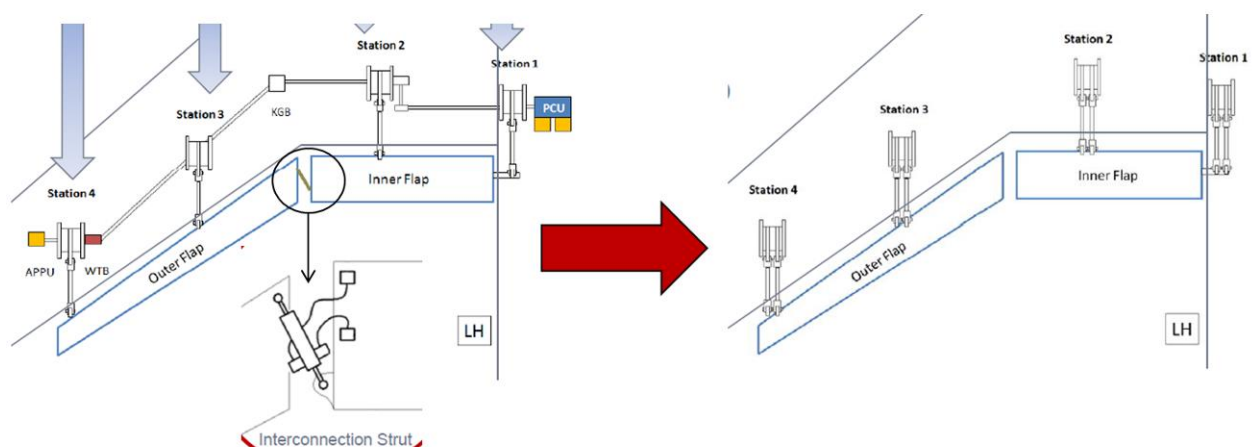


Abb. 3 Position des FS-GRA im Flügelquerschnitt

1.2 Voraussetzungen

Mit der grundlegenden Ausrichtung der WA&S auf intelligente Antriebssysteme und der Verschmelzung von Mikro- und Makrotechnologien werden das Kern-Know-how und die Kernkompetenzen sukzessive weiterentwickelt. bei der Integration und Miniaturisierung von Komponenten werden dabei frühzeitig Trends gesetzt, aber auch weiterentwickelt.

Die WITTENSTEIN aerospace & simulation GmbH hat sich bisher an folgenden Forschungsprojekten im Bereich der Hochauftriebssysteme beteiligt:

- HIT – Electrical Drive Concepts

Im Rahmen des Fördervorhabens „HIT – High-Lift Innovative Technologies“ wurde von WITTENSTEIN aerospace & simulation die Analyse, die Auslegung und die Realisierung eines elektromechanischen Zentralantriebes für das Hochauftriebssystem durchgeführt.

Für das Antriebssystem des Hochauftriebssystems sind im Rahmen des Fördervorhabens folgende Aufgaben definiert

- Anforderungen an elektrische Zentralantriebe für zwei verschiedene Leistungsklassen Long Range und Single Aisle
- Konzepte für Single Aisle
- Systemauslegung und Prototypenentwicklung für Single Aisle
- Labordemonstration unter realen Lastbedingungen für Single Aisle
- Testergebnisse incl. Technologiebewertung für Single Aisle

Diese Anforderungen an das Gesamtsystem teilen sich in Anforderungen an den elektromechanischen Antrieb (Motor+Getriebe+Bremse+Sensorik) und die Steuerelektronik des Antriebes.

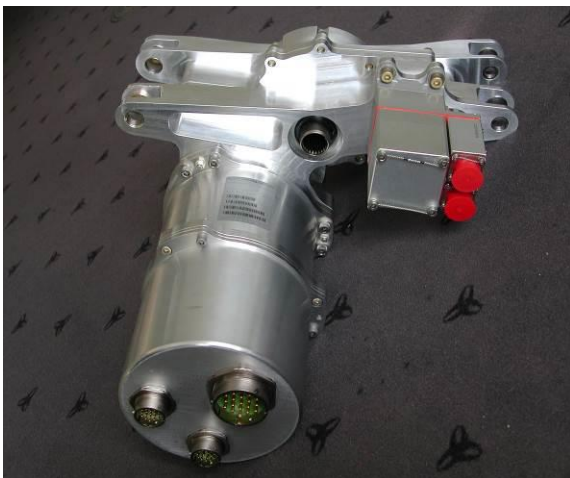


Abb. 4 HIT-Aktuator

Move.On

- SDC – Single Drive Concept

Im Rahmen des Vorhabens „SDC – Single Drive Concept“ wurde von WITTENSTEIN aerospace & simulation die Analyse, die Auslegung und die Realisierung eines elektromechanischen Einzelklappenantriebes für das Hochauftriebssystem durchgeführt.

Für das Antriebssystem des Hochauftriebssystems sind im Rahmen des Fördervorhabens folgende Aufgaben definiert

- Anforderungen an elektrischen Einzelklappenantriebe für Single Aisle Flugzeuge unter Berücksichtigung von zwei getrennten Lastpfaden für den gesamten Aktuator
- Unterschiedliche Redundanzkonzepte der Wicklung
- Redundante Positions- und Drehzahlsensorik
- Redundante Bremsentechnologie
- Systemauslegung und Prototypenentwicklung
- Labordemonstration unter realen Lastbedingungen
- Testergebnisse incl. Technologiebewertung

Für dieses innovative Konzept wurde die Fa. WITTENSTEIN aerospace & simulation GmbH mit dem regionalen Innovationspreis Main-Tauber im Jahr 2009 ausgezeichnet.

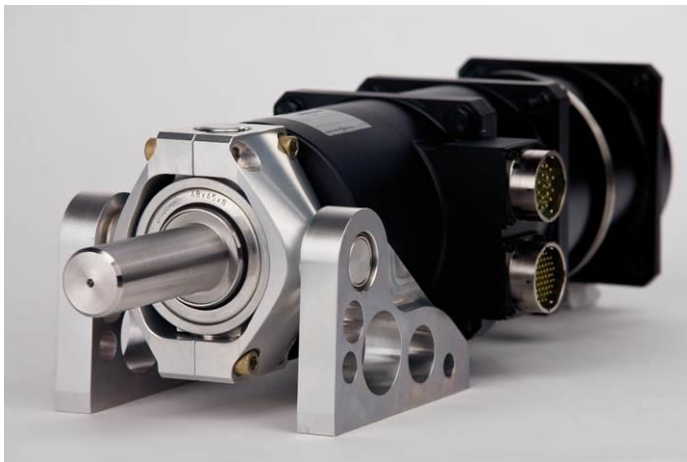


Abb. 5 SDC-Aktuator

1.3 Planung und Ablauf des Vorhabens

Das Vorhaben der WITTENSTEIN aerospace & simulation GmbH ist in die Arbeitspaketstruktur des Verbundführers unter dem Arbeitspunkt AP 3200 integriert. In der folgenden **Abb. 6** ist diese dargestellt.

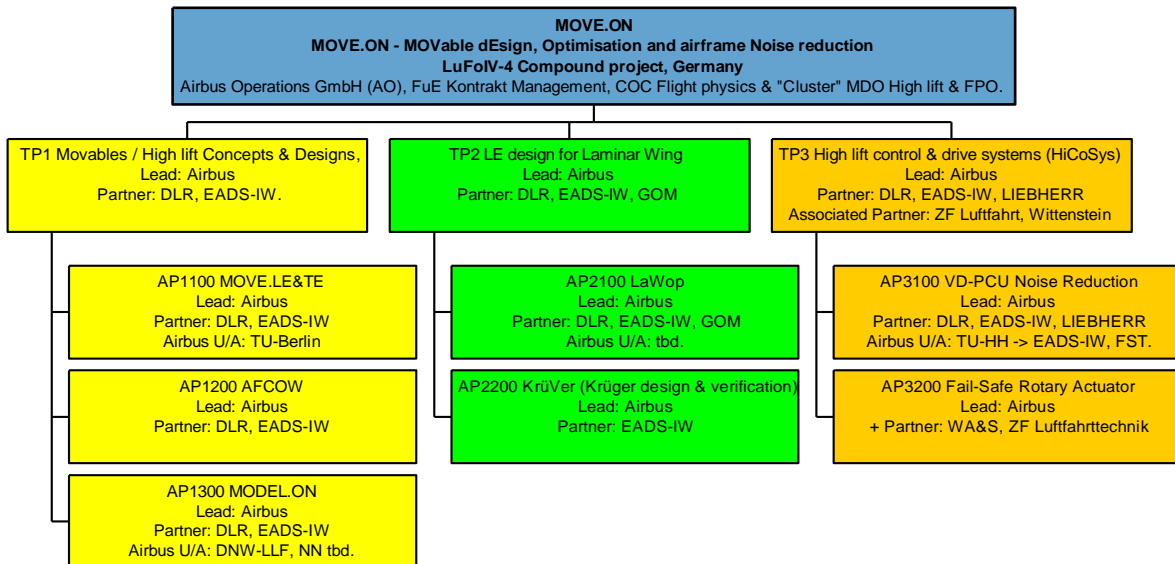


Abb. 6 Arbeitspaketstruktur des Verbundes respektive des Vorhabens MOVE.ON

Das Arbeitspaket AP3200 der WA&S beinhaltet folgende Teilarbeitspakete:

- AP3200-AP01: Grundlagen und Konzeptdefinition
- AP3200-AP02: Konzeptentwicklung
- AP3200-AP03: Detailentwicklung
- AP3200-AP04: Produktion/Test Prototyp
- AP3200-AP05: Zuverlässigkeitsanalyse

Im Laufe des Projekts wurden weitere Arbeitspakete mitaufgenommen:

- AP3200-AP06: Konstruktionsanpassung
- AP3200-AP07: Tribologieoptimierung
- AP3200-AP08: Verifikation

Hauptziel des Projektes war es, das Antriebskonzept eines FSGRA auf Basis einer neuartigen Getriebetechnologie für das High-Lift System zu entwickeln.

1.4 Stand der Wissenschaft und Technik

Getriebeaktuatoren werden an den Landeklappen werden seit mehreren Jahrzehnten im Hochauftriebssystem eingesetzt und wurden stetig weiterentwickelt. Dabei wird die Anbindung an die Landeklappe an den einzelnen Stationen über einen einfachen Lastpfad ausgeführt. Bei einem Bruch einer Anbindung wird die Klappe über die verbleibende Station sowie den interconnection strut (Verbindung zwischen innerer und äußerer Landeklappe) festgesetzt.

Die Entwicklung eines FS-GRA mit zwei Lastpfaden ermöglicht Gewichtseinsparungen auf Systemebene. Die im FS-GRA enthaltene fail-safe Funktionalität wird ausschließlich durch Einsatz mechanischer Komponenten erreicht. Ein vergleichbarer Ansatz ist nicht existent.

Zur Auslegung und Berechnung wurde folgende Fachliteratur verwendet:

Freilaufkupplungen, Stölzle/Hart, 1961 Springer-Verlag, ISBN 978-3-642-51094-6

1.5 Zusammenarbeit mit anderen Stellen

Im Zuge des Arbeitspaketes AP3200-AP05 wurden die Zuverlässigkeitsanalysen von der Firma AEMSI durchgeführt. Ergebnis sind die Berechnung von Zuverlässigkeitswerten für den FS-GRA, eine Fehlerbaumanalyse und die Berechnung von MTBF-Werten.

Unterstützung erhielt die WA&S des Weiteren bei der Auslegung des Torque Limiters durch die Ostbayerische Technische Hochschule (OTH) Regensburg. Die Arbeiten umfassten die Berechnung und Simulation des Torque Limiters.

2 Technische Ergebnisse

2.1 AP3200-AP01 Grundlagen- und Konzeptdefinition

2.1.1 Aufgabenstellung

In diesem Arbeitspaket sollten die Anforderungen für den Aktuator auf der Basis des aktuellen High-Lift Systems untersucht werden und daraus die Spezifikation für den Antrieb erstellt werden. Auf Basis dessen sollten ein oder mehrere Konzepte entwickelt werden, welche die Anforderungen aus der Spezifikation (v.a. hinsichtlich Redundanz/doppelter Last-Pfad) umsetzen. Das Arbeitspaket sollte mit einem Trade-Off enden, bei dem das weiterzuerfolgende Konzept ausgewählt wurde.

2.1.2 Ergebnis

Im Rahmen des AP3200-AP01 fanden mehrere Workshops statt, in denen die zugrunde gelegten Anforderungen definiert wurden. Insbesondere wurden die Anforderungen bzgl. der fail-safe Funktionalität definiert. Der Aktuator muss in der Lage sein, die beiden Fehlerfälle Blockade und Bruch (z.B. eines Verbindungselements) zu erkennen und mit einem sicheren Zustand zu reagieren.

Für die Abtriebsstufe des FS-GRA wurde eine neuartige Getriebetechnologie vorgesehen und diese auf ihre Eignung bzgl. der fail-safe Anforderungen analysiert.

Auf Basis dieses Getriebes wurden mehrere Konzepte für den FS-GRA erarbeitet. Die im Trade Off entstandenen und untersuchten Konzepte wurden beschrieben und mit Hilfe eines Entscheidungsbaumes bewertet und ausgewählt. Für die Auswahl war die Erfüllung aller Anforderungen ausschlaggebend, vor allem die Erfüllung der Systemantwort im Fehlerfall.

2.1.2.1 Konzeptansatz und Erläuterung Galaxie-Technologie

Für den FS-GRA ist eine fail-safe-Funktionalität der Abtriebsgetriebestufe nötig. Das neuartige GALAXIE-Getriebe von Wittenstein hat diese Funktion inhärent. Das Getriebe funktioniert nach einer neu entwickelten Kinematik, basierend auf radial verschiebbaren Einzelzähnen mit einer Verzahnungsgeometrie nach einer logarithmischen Spirale.

In den vergangenen Jahren hat die WITTENSTEIN SE diese neuartige Getriebekinematik von der ersten Konzeptstudie bis zur Validierung im industriellen Einsatz entwickelt und erprobt. Diese Kinematik basiert auf einem zentralen Exzenter (Polygon) zur Übersetzungsbildung. Einzelzähne werden durch diesen Exzenter radial verschoben und gleiten in einem Hohlrad ab. Diese Einzelzähne sind in einem Zahnträger geführt, der den Abtrieb des Systems darstellt. Das Prinzip der GALAXIE-Technologie ist in **Abb. 7** und **Abb. 8** dargestellt. Eine weitergehende Erläuterung ist im Kapitel 2.2.2.5 aufgeführt.

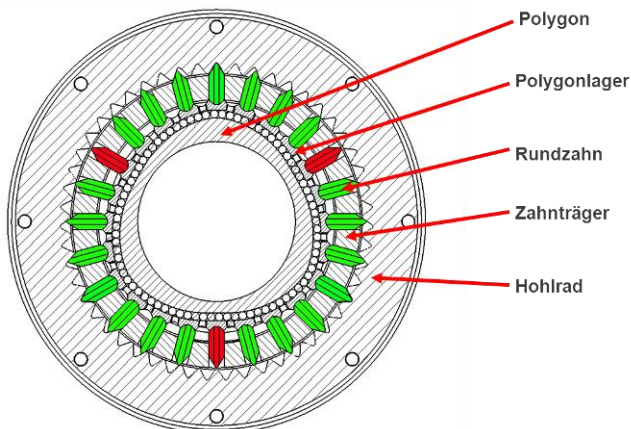


Abb. 7 Prinzip der Galaxie Technologie

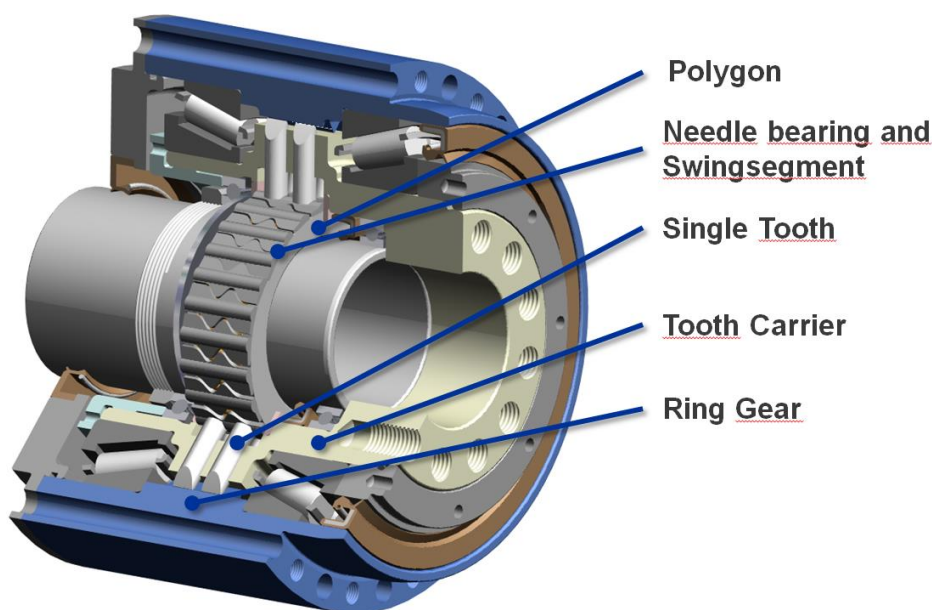


Abb. 8 Prinzip der Galaxie Technologie

Move.On

Die große Anzahl von Zahneingriffen (alle grün dargestellten Zähne in **Abb. 7**) führt zu einer im Vergleich zu herkömmlichen Planetengetrieben hohen Drehmomentdichte des Systems, gleichzeitig ermöglicht sie eine große Verdrehsteifigkeit und Überlastfähigkeit. Im Versuch konnten Wirkungsgrade von bis zu 90% trotz der hohen Gleitanteile bestätigt werden. Zurückzuführen ist dies auf die gezielte konstruktive Umsetzung von Schmier-spaltgeometrien, welche die Bildung eines (nahezu) hydrodynamischen Schmierzustands ermöglichen. Im Versagensfall führt jeder Getriebeschaden (bei einer einteiligen Antriebswelle) zu einem Blockieren des Getriebes. Diese Eigenschaft führt zu einer intrinsischen Sicherheit gegen das freie Durchdrehen einzelner Getriebekomponenten. Besonders in Hinblick auf die Klappenverstellung im Hochauftriebssystem wird dadurch eine Ausgestaltung des Systems, wie oben beschrieben möglich, das möglicherweise einen Verzicht auf Redundanzen zulässt.

Die Funktionale Struktur und die Fehlerfälle des GALAXIE-Getriebes werden in **Abb. 9** zusammengefasst.

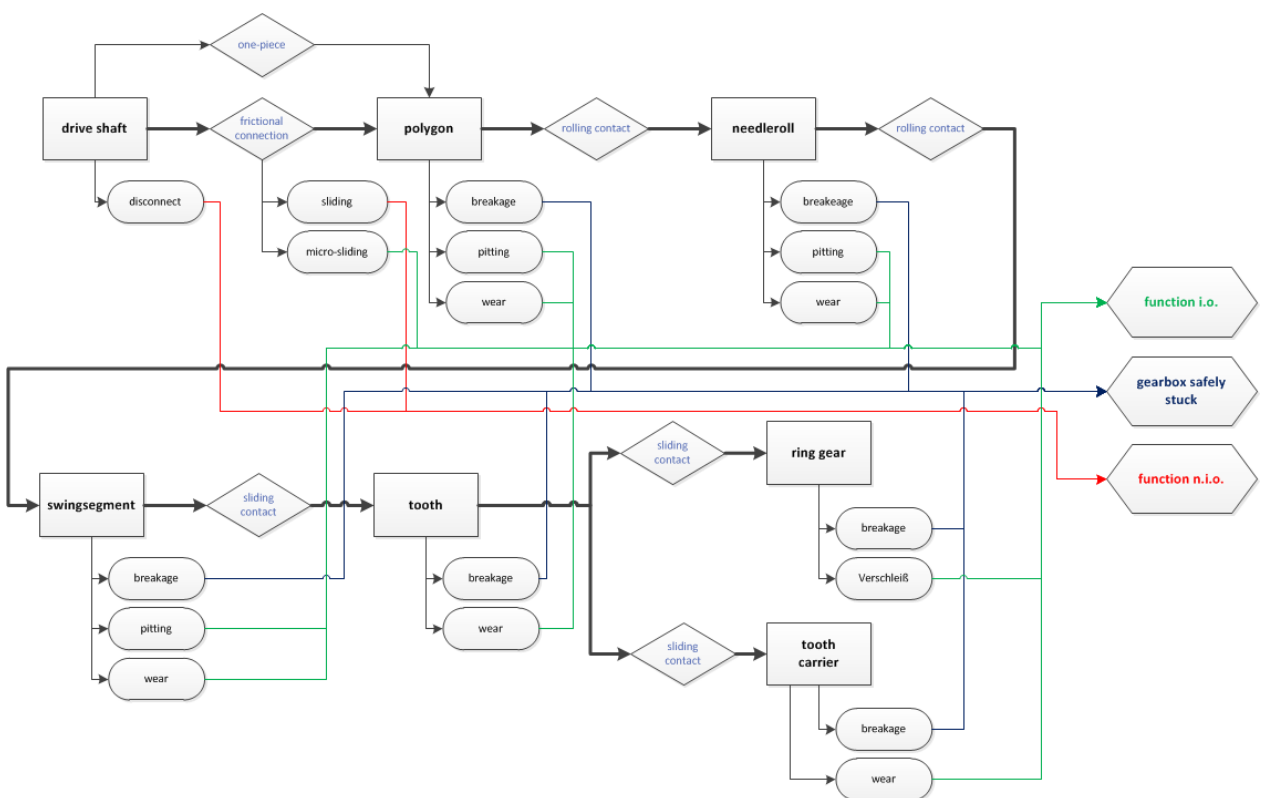


Abb. 9 Fehlerfälle des GALAXIE-Getriebes

Unter der Voraussetzung, dass die Antriebswelle und die Polygonwelle der GALAXIE-Getriebe einteilig ausgeführt werden, führen alle Fehlerfälle zu einem sicheren Blockadezustand. Dadurch ist das GALAXIE-Getriebe prädestiniert für den Einsatz in einer fail-safe-Anwendung.

2.1.2.2 Zusammenfassung der Design-Konzepte

Verschiedene Konzepte zur Erreichung der fail-safe-Funktionalität wurden untersucht und bewertet.

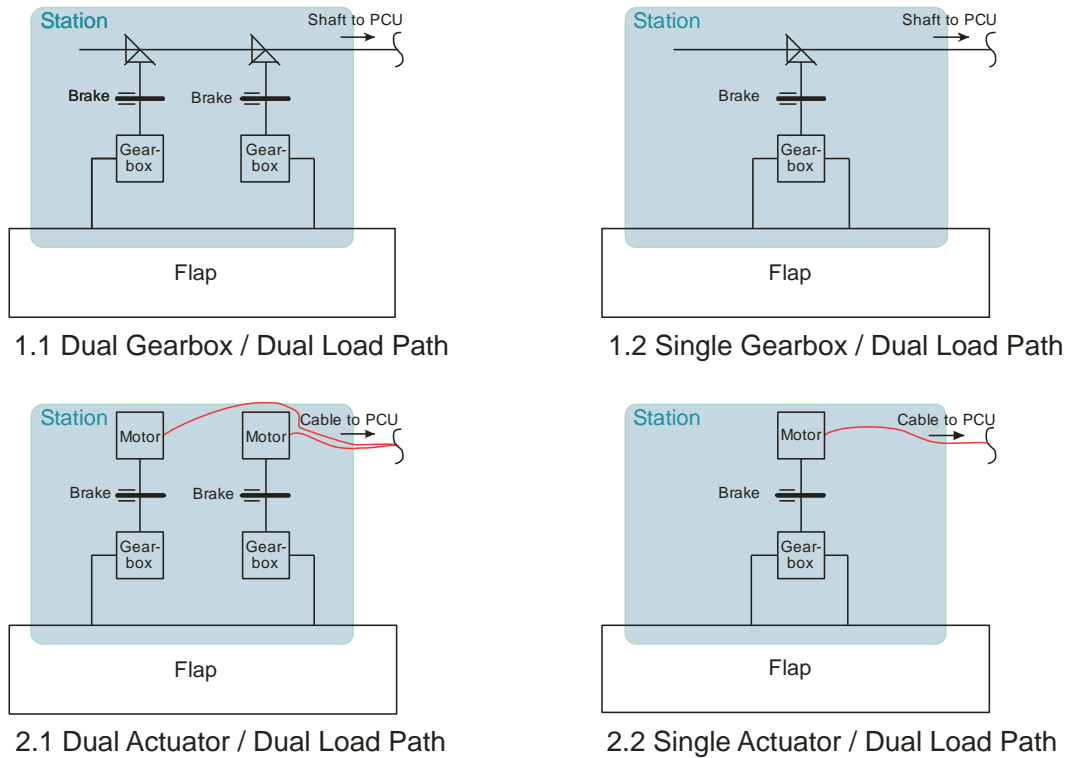
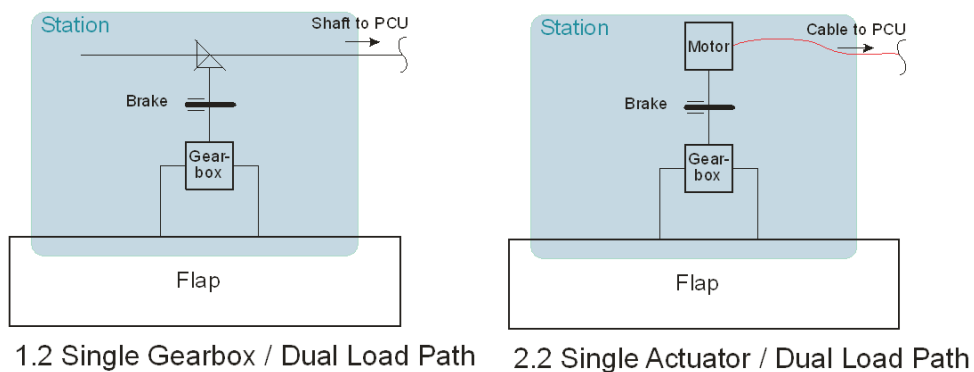


Abb. 10 Design-Konzepte

Die in **Abb. 10** gezeigten Konzepte werden nachfolgend eingehend erläutert und auf ihre Eignung bzgl. der Anforderungen überprüft.

2.1.2.3 Design-Konzept 1.2 / 2.2 – einfacher Lastpfad



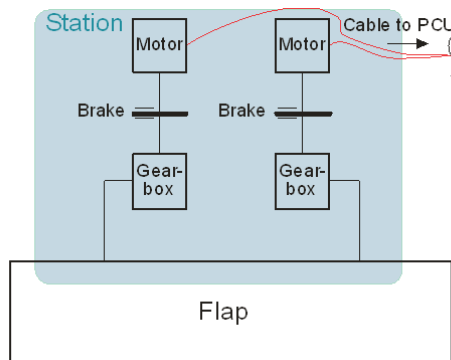
Move.On

Betätigung	mechanisch		elektromechanisch
actuation	mechanical		electro-mechanic
Anbindung an Königswelle	einfach		keine
link to torqueshaft	single		none
Anbindung ans Bordnetz	keine		einfach
link to power circuit	none		single
Anbindung an Klappe	redundant		redundant
link to flap	redundant		redundant

Abb. 11 Design-Konzepte 1.2 / 2.2

Die Haupteigenschaft beider Konzepte ist, dass die Redundanz im Getriebe (GRA) beginnt. Die Abzweigung von der Hauptwelle zu den GRA ist durch einen einfachen Lastpfad ausgeführt. Diese Konzepte führen zu einem geringeren Systemgewicht, erfüllen aber nicht alle Anforderungen an die fail-safe Funktionalität und wurden deshalb nicht weiter betrachtet.

2.1.2.4 Design Konzept 2.1 – redundanter Lastpfad



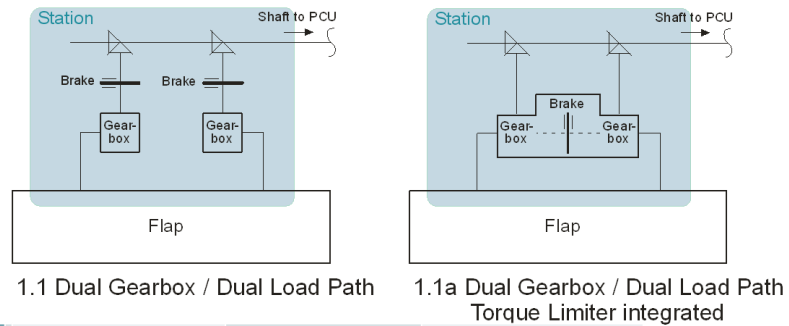
2.1 Dual Actuator / Dual Load Path

Betätigung	elektromechanisch
actuation	electro-mechanic
Anbindung an Königswelle	keine
link to torqueshaft	none
Anbindung ans Bordnetz	redundant
link to power circuit	redundant
Anbindung an Klappe	redundant
link to flap	redundant

Abb. 12 Design Konzept 2.1

Dieses Konzept erfüllt alle Anforderungen bzgl. der Redundanz. Ein elektrisches System ist zulässig, wird aber nicht bevorzugt. Der Fokus liegt auf der Entwicklung eines rein mechanischen Systems.

2.1.2.5 Design Konzept 1.1 / 1.1a – redundanter Lastpfad



Betätigung	mechanisch		mechanisch
actuation	mechanical		mechanical
Anbindung an Königswelle	redundant		redundant
link to torqueshaft	redundant		redundant
Anbindung ans Bordnetz	keine		keine
link to power circuit	none		none
Anbindung an Klappe	redundant		redundant
link to flap	redundant		redundant

Abb. 13 Design Konzept 1.1 /1.1a

Diese Konzepte erfüllen vollständig die Anforderungen. Die Version 1.1 ist ein vollständig geteiltes System. Beide Lastpfade haben separate Torque-Limiter. Das Konzept 1.1a kombiniert beide Torque Limiter zu einem integrierten System. Dieses Konzept führt zu dem geringsten Systemgewicht und stellt die Grundlage der weiteren Entwicklungen dar.

Move.On

Die Zusammenfassung der Konzeptauswahl ist in **Abb. 14** dargestellt. Die Entwicklung eines mechanischen Systems wurde der eines elektrischen (sensorbasierendem) System vorgezogen. Der Hauptgrund dafür war, dass für ein rein mechanisches System keine zusätzliche Verkabelung an einen Controller benötigt wird.

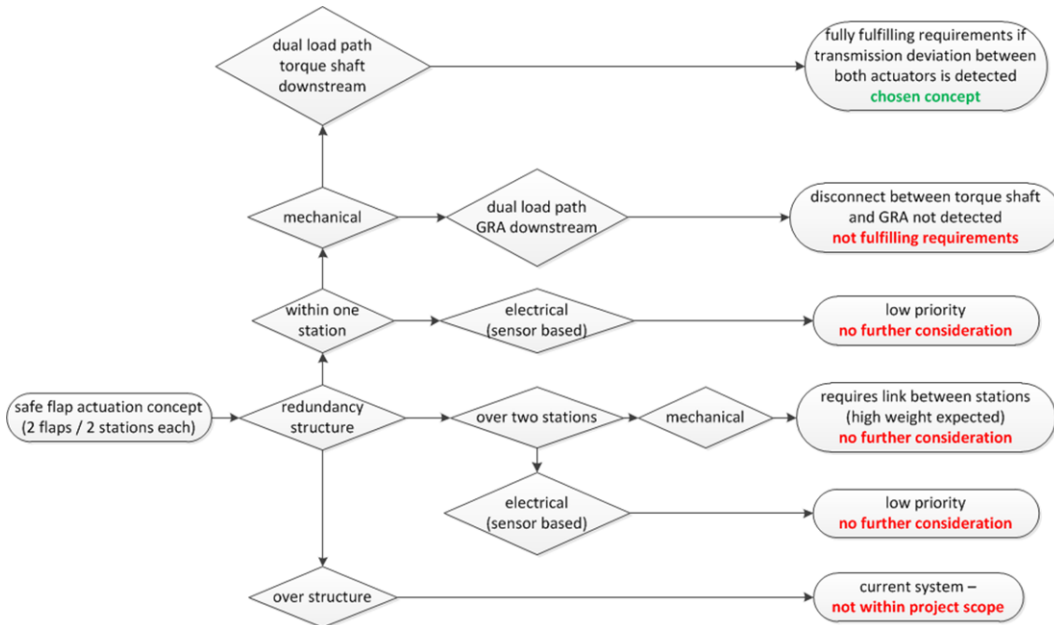


Abb. 14 Konzeptentscheidung

Um die Fehlerfälle “Blockade” und “Bruch einer Verbindung” innerhalb des FS-GRA abbilden zu können, wurde ein Konzept entwickelt, bei dem die Komponente Torque Limiter mit einer weiteren Funktionseinheit – im folgenden Bruchdetektor genannt - rein mechanisch zusammenwirken. Sowohl für diesen Systemansatz als auch für diese weitere Funktionseinheit befanden sich zum Zeitpunkt der Berichtserstellungen Schutzrechtsanmeldungen in Vorbereitung. Aus diesem Grund kann auf eine detaillierte Erläuterung des Systemansatzes und dieser Funktionseinheit nicht eingegangen werden.

2.2 AP3200-AP02 Konzeptentwicklung

2.2.1 Aufgabenstellung

In diesem Arbeitspaket sollte das ausgewählte Konzept weiter verfeinert und ausgelegt werden. Das Arbeitspaket sollte mit dem PDR mit der Freigabe des Konzeptes zur Konstruktion enden.

2.2.2 Ergebnis

2.2.2.1 Beschreibung des FS-GRA

Abb. 15 zeigt des FS-GRA mit den Hauptkomponenten. Die Komponenten sind im nachfolgend detailliert beschreiben.

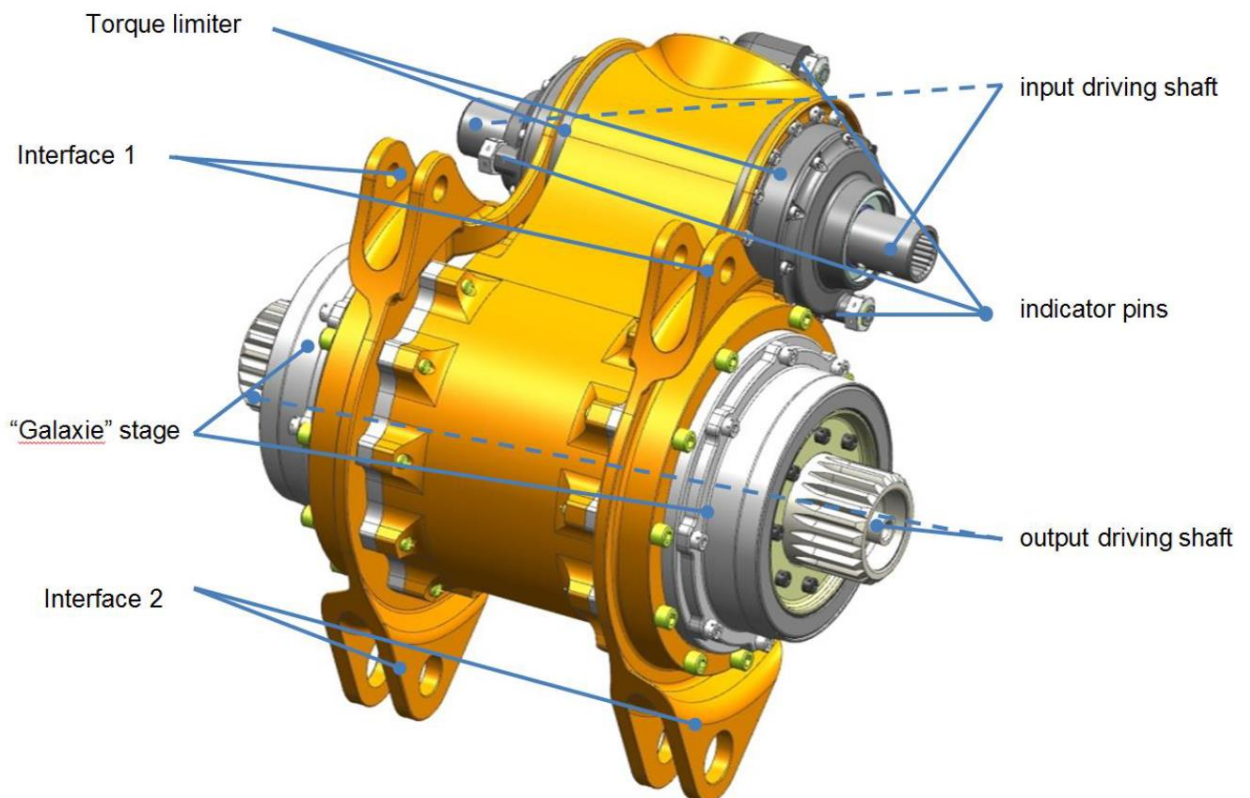


Abb. 15 CAD-Model FS-GRA

Schlussbericht zu FKZ: 20A1101G

Move.On

In **Abb. 16** ist eine Schnittstellenzeichnung abgebildet, die alle nötigen Einbaumaße und Toleranzen für die Installation im System enthält.

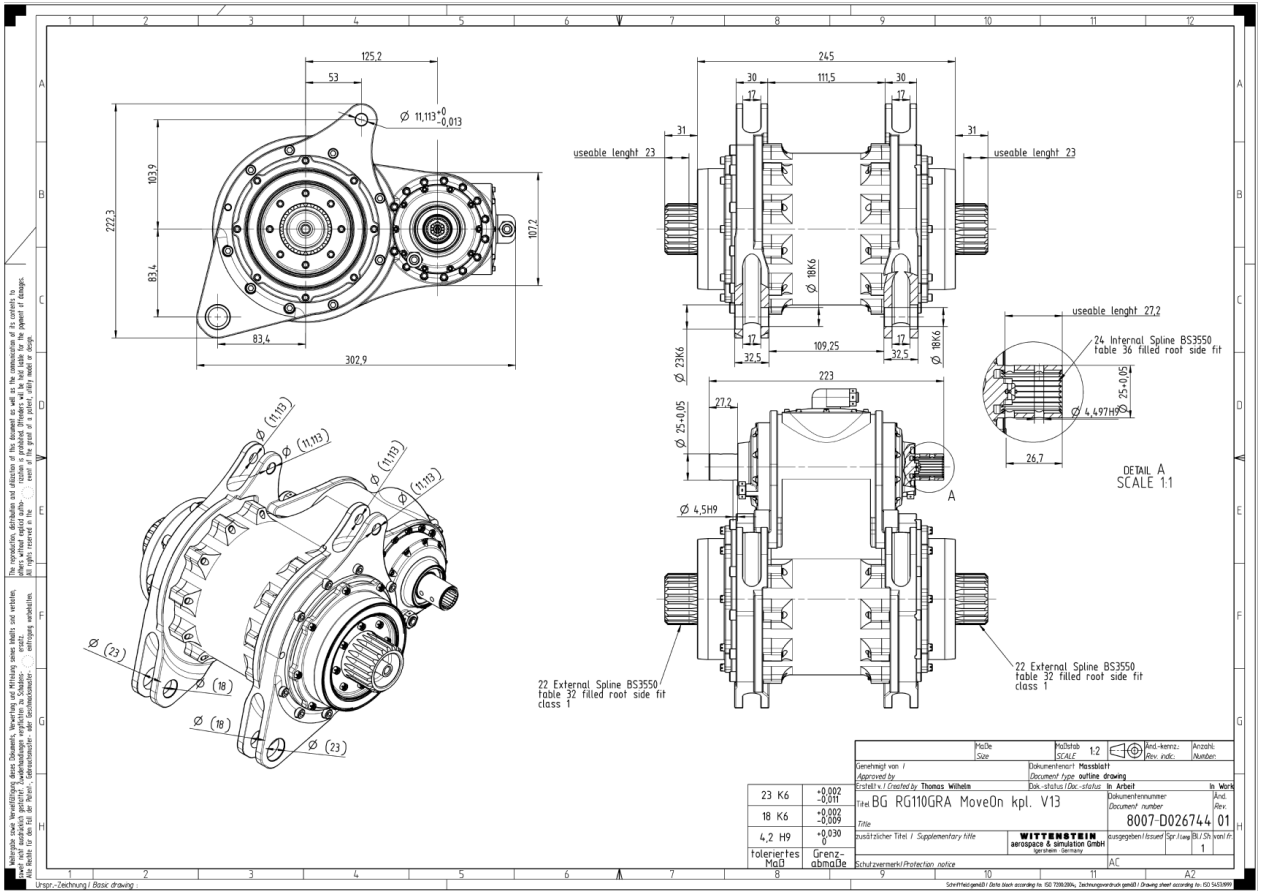


Abb. 16 Schnittstellenzeichnung

Die grundlegende Idee eines fail-safe Systems ist es, alle relevanten Komponenten doppelt auszuführen, um Redundanz zu gewährleisten. Die Eingangswelle verbleibt als einzig nicht redundantes Element. Die Redundanz dazu wird über die zweite Station an jeder Klappe realisiert. Die Herausforderung bestand darin, Komponenten zu entwickeln, die die Integrität des Systems überwachen, ohne auf Sensorik zurückzugreifen. Ziel war es, ein rein mechanisches System zu entwickeln.

Ein Überlastschutz wird durch je einen Torque Limiter in jedem Lastpfad erreicht. Sobald das Drehmoment einen definierten Wert übersteigt, rückt eine Kugelrampe axial aus und betätigt ein Bremslamellenpaket. Das Drehmoment wird in die Struktur abgeleitet. Dies führt schließlich zum Abschalten der Power Control Unit (PCU). Das Blockadesystem ist reversibel, um das System z.B. im Fall einer Blockade durch Eis wieder freizufahren.

Die Schlüsselkomponenten des FS-GRA sind das Eingangsgetriebe mit dem Torque-Limiter und dem Bruchdetektor, das Stirnradgetriebe und das GALAXIE-Getriebe.

Move.On

2.2.2.2 Eingangsgetriebe

Das Eingangsgetriebe besteht aus zwei Lastpfaden, um die fail-safe-Anforderungen zu erfüllen. Die Hauptaufgabe dieses Getriebes besteht darin, Leistung von der Transmissionswelle in den FS-GRA zu übertragen. Des Weiteren muss das System vor Überlast geschützt werden, weshalb beide Lastpfade über jeweils einen Torque-Limiter verfügen. Für die Erkennung eines Bruchs ist der Bruchdetektor zuständig. Das Stirnradgetriebe im FS-GRA hat die Aufgabe den Abstand der An- und Abtriebswelle zu überbrücken und das Drehmoment an das GALAXIE-Getriebe zu übertragen.

2.2.2.3 Torque Limiter

Die Aufgabe des Torque Limiters ist es, das System zu bremsen und festzusetzen, sobald in einem Lastpfad vor oder hinter dem Torque Limiter das Drehmoment einen definierten Wert übersteigt. Dadurch wird eine Überlastung aller Komponenten im FS-GRA vermieden. Um die Redundanz zu gewährleisten, enthält jeder Lastpfad jeweils einen Torque Limiter. Im normalen Betriebszustand wird das Drehmoment von der Antriebswelle über zwei Platten übertragen, zwischen denen sich gehärtete Kugeln befinden. Die beiden Platten werden über Federn aufeinandergepresst, sodass die Kugeln am untersten Punkt der in den Platten befindlichen Kugelrampen verharren. Sobald das Drehmoment einen definierten Wert übersteigt, wird aufgrund der Rampengeometrie die Vorspannkraft der Federn überwunden. Die beiden Platten bewegen sich in Umfangsrichtung relativ zueinander. Eine der Platte führt gleichzeitig eine axiale Bewegung aufgrund der Steigung in der Kugelrampe aus. Diese axiale Ausrückung bewirkt eine axiale Verschiebung der Reiblamellen im Lamellenpaket. Der Luftspalt wird geschlossen und das Bremslamellenpaket wird aufeinandergedrückt, sodass die Antriebswelle abgebremst und schließlich festgesetzt wird. Die Bremslamellen enthalten gesinterte Bremsbeläge und laufen gegen nitrierte Stahllamellen.

Das Bremsverhalten des Torque Limiters ist auf einen Trockenlauf der Reibbeläge ausgelegt. Das Eindringen von Schmierstoff bedeutet eine Reduzierung des Reibwertes. Bei gleicher axialer Kraft, würde das Bremsmoment erheblich reduziert werden (weniger als 50%). Aus diesem Grund ist es notwendig, den Torque Limiter vom restlichen schmierstoffbehafteten Getriebe zu separieren. Der Torque Limiter ist mittels Wellendichtringen vor dem Eindringen von Schmierstoff geschützt.

2.2.2.4 Stirnradgetriebe

Die Achsen der Transmissionswelle und die der GALAXIE-Getriebe sind parallel zueinander angeordnet und haben einen definierten, systembedingten Abstand. Um diesen Abstand zu überbrücken enthalten beide Lastpfade jeweils ein dreistufiges Stirnradgetriebe. Das erste Stirnrad überträgt das Drehmoment vom Torque Limiter auf das Zwischenrad. Das dritte Zahnrad ist der Antrieb für die Planetenrad-Vorstufe des GALAXIE-Getriebes. Die Übersetzung der ersten Stufe ist 2,3:1, die der zweiten 0,789:1. Durch diese Festlegung der Übersetzungen wird die geforderte Gesamtübersetzung von 315:1 erreicht.

Move.On

2.2.2.5 Bruchdetektor

Der Bruchdetektor hat die Aufgabe, einen Drehwegsunterschied zwischen den beiden Lastpfaden zu erkennen. Der Drehwegsunterschied kann entweder durch einen Bruch in einem Lastpfad oder einer ungleichen Lastverteilung zwischen beiden Lastpfaden entstehen. Die Funktionsweise des Bruchdetektors ist ähnlich zu der eines Planetengetriebes. Das Stirnrad der zweiten Stufe im linken Pfad enthält das Sonnenrad. Das parallele Stirnrad des rechten Pfades trägt die Planetenräder. Sonnenrad und Planetenräder befinden sich innerhalb eines Hohlrades. Der Unterschied zu einem gewöhnlichen Planetenradgetriebe liegt in der Ausführung der Planeten. Diese sind einseitig abgefräst und können keine vollständige Umdrehung um ihre eigene Achse innerhalb des Hohlrades durchführen. Die Planeten sind im Zahneingriff mit dem Ritzel. Im normalen Betrieb haben die Planeten keinen Kontakt zum Hohlrad. Solange Sonnenrad und Planetenradträger mit der gleichen Drehzahl rotieren, führen die Planeten keine Drehbewegung um ihre eigene Achse aus. Bei einem Drehwegsunterschied zwischen beiden Lastpfaden ist dies der Fall. Die Planeten kommen in Kontakt mit dem Hohlrad und das System beginnt zu blockieren. Aufgrund der Hebelverhältnisse funktioniert der Bruchdetektor nur, wenn das Sonnenrad voreilend ist und die Blockade der Planeten gegen das Hohlrad auslöst. Da der Fehler auf beiden Seiten auftreten kann, wurde der Mechanismus gespiegelt. Damit ist es unabhängig welche Seite voreilend ist, der Mechanismus wird stets durch das Sonnenrad ausgelöst

2.2.2.6 Abtriebs-Getriebestufe

Das GALAXIE-Getriebe überträgt das Drehmoment an die Landeklappe über einen Hebel und realisiert eine Gesamtübersetzung von 174:1. Aus Gründen der Redundanz ist auch jeweils ein GALAXIE-Getriebe in den beiden Lastpfaden enthalten. Das GALAXIE-Getriebe im FS-GRA ist zweistufig aufgebaut. Die erste, weniger belastete Stufe ist ein Planetengetriebe mit einer Übersetzung von $i=7$. Für die zweite, hoch belastete Stufe kommt das GALAXIE-Getriebe zum Einsatz. Das GALAXIE-Getriebe ist der Kategorie Einzelzahn-Radial-Schiebegetriebe zuzuordnen und hat in diesem Fall eine Übersetzung von 24. **Abb. 17** zeigt die Komponenten des GALAXIE-Getriebes.

Die grundlegende Idee des GALAXIE-Getriebes ist es, die Drehmomentübertragung durch einen Flächenkontakt zu realisieren. Berechnungen zeigen, dass dadurch die tragende Zahnfläche 6,5mal größer ist im Vergleich zu Standard-Evolventenverzahnungen, die auf einem Linienkontakt basieren.

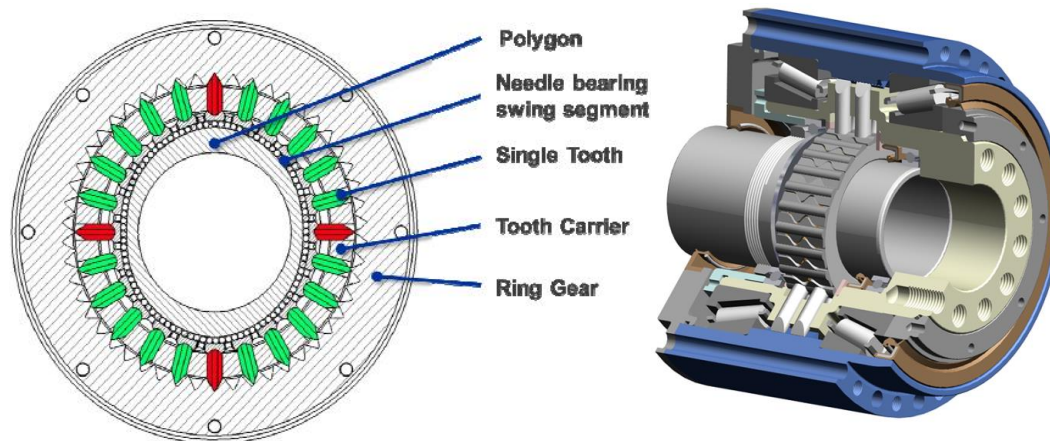


Abb. 17 Komponenten des GALAXIE-Getriebes

Eine Polygonwelle dient als Antrieb für das GALAXIE-Getriebe. Durch Drehen der Polygonwelle werden die Einzelzähne durch die Nadellagerung in die Verzahnung des Hohlrades geschoben. Durch die Schiebebewegung der Zähne im Hohlrad vollzieht der Zahnträger eine Relativbewegung. Der Zahnträger stellt die Abtriebswelle des Getriebes dar. Die Übersetzung des Getriebes wird durch die Form des Polygons bestimmt.

Move.On

Tabelle 1 zeigt die technischen Daten eines GALAXIE Getriebes RG 110. Diese Baugröße kommt bei der Entwicklung des FS-GRA zum Einsatz. Die Werte für Nenndrehmoment (rated torque) and Drehzahl beziehen sich auf eine Lebensdauer von 20.000 Stunden in einer Industrieanwendung.

Outer Diameter [mm]	max. Accel. Torque [Nm]	rated Torque [Nm]	Emerg. Stop Torque [Nm]	max. Speed [min-1]	rated Speed [min-1]	Tors. Stiffness [Nm/arcmin]	Backlash [arcmin] (option)	Weight [kg]	Efficiency [%] (best)
156	1.300	500	3.900	95	40	1.200	(0) ... 1	11	90

Tabelle 1: technische Daten GALAXIE RG110

2.2.2.7 Indicator Pin

Im FS-GRA sind drei sogenannte Indicator Pins verbaut, um evtl. aufgetretene Fehler dauerhaft anzuzeigen. Dadurch erhält das Service Personal bei einer Überprüfung Informationen, in welchem Zustand sich das System befindet und welche Fehler aufgetreten sind. Beide Lastpfade enthalten jeweils einen Indicator Pin für das Auslösen der Torque Limiter. Ein dritter Indicator Pin zeigt das Auslösen des Bruchdetektors an. Dadurch können die Fehlerfälle "Bruch" und "Blockade" differenziert angezeigt werden. **Abb. 18** zeigt eine Schnittdarstellung des Indicator Pins. Im Fall des Auslösens rückt der Pin um 5mm aus und stellt damit ein deutliches visuelles Signal dar. Zur Auslösung des Indicator Pins ist lediglich eine axiale Bewegung von 1,5mm nötig.

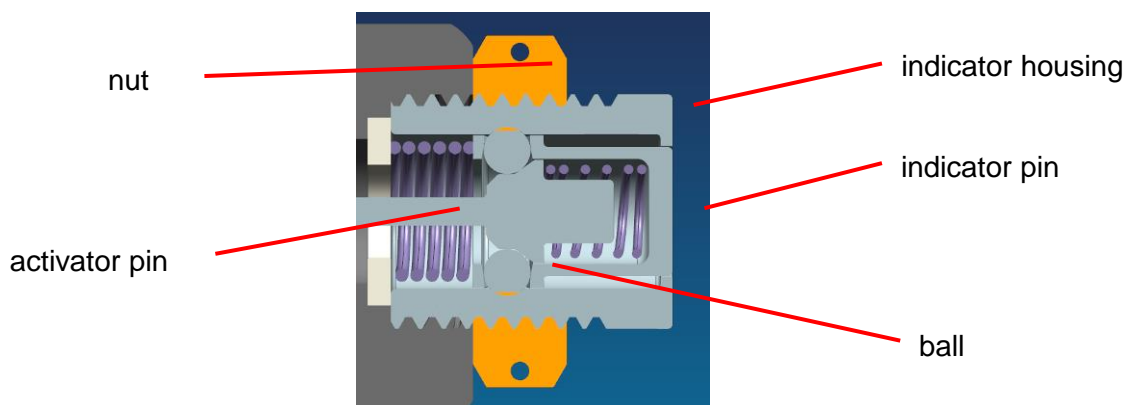


Abb. 18 Indicator Pin

Schlussbericht zu FKZ: 20A1101G

Move.On

2.2.2.8 Übersetzungsverhältnisse

Die Gesamtübersetzung des FS-GRA beträgt 315,95.

Die einzelnen Übersetzungen sind wie folgt:

Stirnradstufe I: 2,3:1 (69:30)

Stirnradstufe II: 0,789:1 (30:38)

Vorgelagertes Planetengetriebe: 7:1

GALAXIE Getriebe: 24:1

(Eine spezielle Kinematik zwischen vorgelagertem Planetengetriebe und GALAXIE-Getriebe resultiert in einer Gesamtübersetzung der beiden Getriebe von 174)

2.2.2.9 Trägheiten

Die Trägheiten bezogen auf die Antriebswelle ergeben (für jeden Lastpfad):

$0,785 \cdot 10^{-3} \text{ kg m}^2$

2.2.2.10 Performance

Die Anforderungen an den FS-GRA bzgl. Drehmoment und Drehzahl sind:

- Nenndrehmoment (pro Lastpfad) 1130 Nm
- Max. Drehmoment (pro Lastpfad) 2700 Nm
- Nenndrehzahl 0,93 rpm
- Lebensdauer (nominal): 60000 Flugzyklen (1000h)
- Lebensdauer (inkl. Scatter factor): 360000 Flugzyklen (6000h)
-

Der FS-GRA hat folgende Parameter:

- maximales Beschleunigungsmoment: 1300Nm
- Not-Aus Moment: 3900Nm
- Nenndrehzahl: 47rpm

Da das maximale Beschleunigungsmoment mit dem Nenndrehmoment gleichbedeutend ist, erfüllt das GALAXIE-Getriebe die Anforderungen.

Das Not-Aus-Moment kann von dem Getriebe 1000 Mal ohne Beschädigung ertragen werden. Die Häufigkeit des Auftretens des maximalen Drehmomentes muss noch überprüft werden um sicherzustellen, dass das Getriebe die Anforderungen diesbzgl. erfüllt.

2.2.2.11 Spiel und Steifigkeit

Die Hysteresekurve **Abb. 19** stellt die Steifigkeit eines GALAXIE-Getriebes der nächstgrößeren Baugruppe unter Belastung bei Raumtemperatur dar. Das vorhandene Spiel ist der vertikale Abstand beider Kurven bei sehr kleinen Belastungen.

Die Messung zeigt, dass mit der GALAXIE-Getriebetechnologie sehr kleines Spiel bis hin zur Spielfreiheit erreicht werden kann.

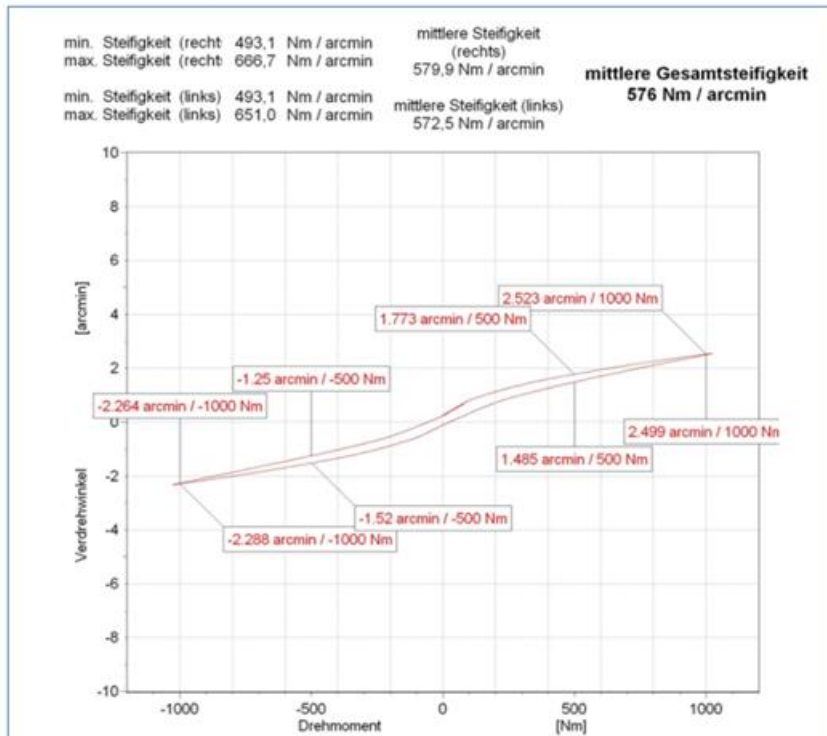


Abb. 19 Steifigkeitsmessung GALAXIE-Getriebe

Die Eigenschaften des GALAXIE-Getriebes bzgl. Steifigkeit und Spiel sind auch für extreme Hoch- und Tieftemperaturen gültig, sofern das Getriebe homogen durchtemperiert ist.

2.2.2.12 Wirkungsgrad

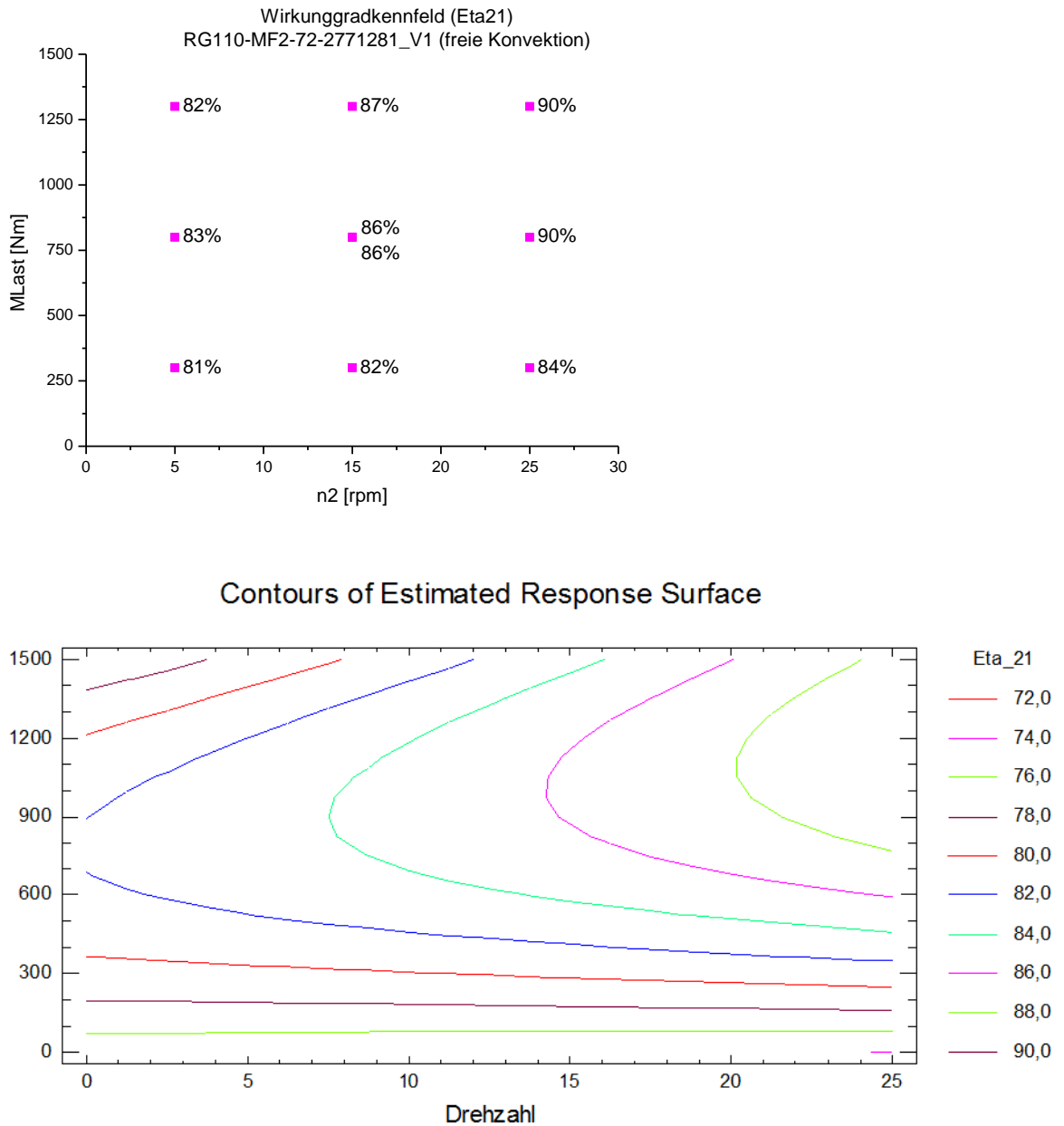


Abb. 20 Wirkungsgrade des GALAXIE-Getriebes bei Raumtemperatur

Die Diagramme in **Abb. 20** zeigen die Ergebnisse der Wirkungsgradmessung der GALAXIE-Baugröße, die im FS-GRA zum Einsatz kommt. Nachdem die Drehzahl des FS-GRA am Abtrieb unter 1rpm liegt, befindet sich der Wirkungsgrad ein einem Bereich von 78...82%.

Schlussbericht zu FKZ: 20A1101G

Move.On

Wirkungsgrad bei Tieftemperaturen:

Das GALAXIE-Prinzip beruht auf dem Aufbau einer hydrodynamischen Schmierung am Zahneingriff und der Zahnführung. Die Auswahl eines geeigneten Schmierstoffs ist hierbei essentiell. Da es zu diesem Zeitpunkt noch keine Erfahrungen bzgl. des Einsatzes des GALAXIE-Getriebes bei Tieftemperaturen um -55°C gab, wurde zu einem frühen Projektstadium eine umfangreiche Testkampagne durchgeführt.

Die Tests haben ergeben, dass der Standardschmierstoff, der für Industrieanwendungen zum Einsatz kommt, hierfür nicht geeignet ist. Der Wirkungsgrad lag deutlich unter 40% bei -40°C .

Weitere Tests mit einem speziell für Tieftemperaturen geeigneten Schmierstoff (Esso 2120A) zeigten wesentlich bessere Ergebnisse. Der Wirkungsgrad verbesserte sich auf ca. 55%. (**Abb. 21**)

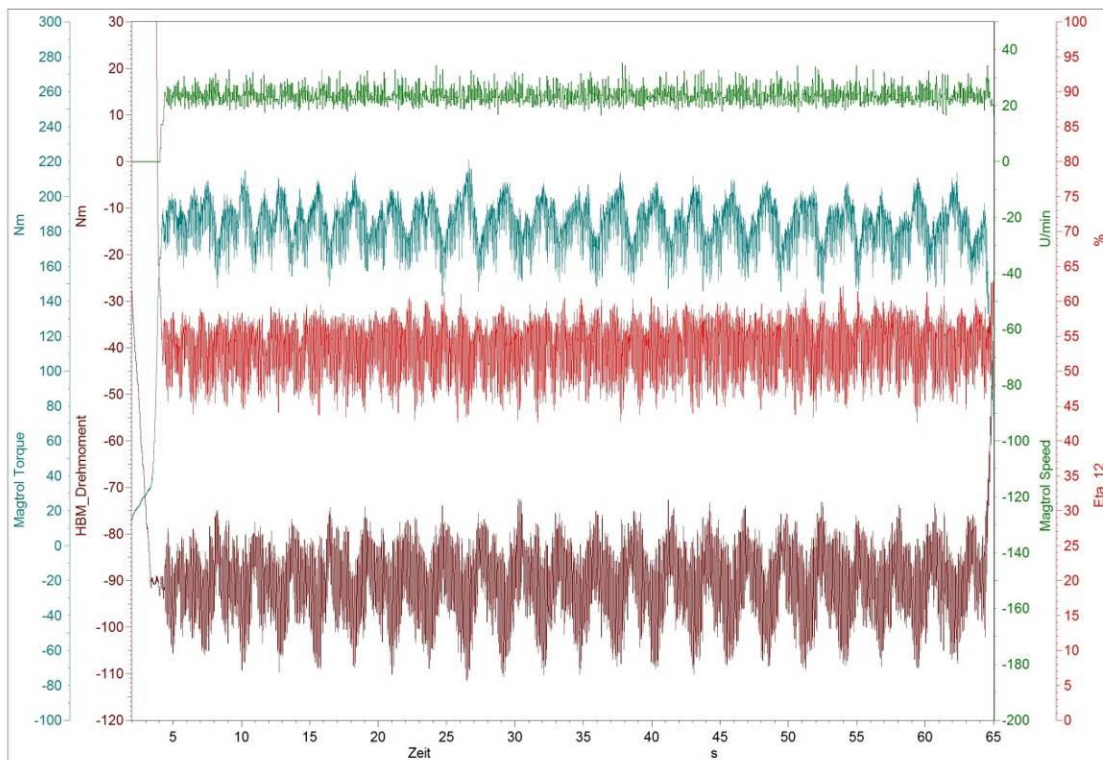


Abb. 21 Wirkungsgrad des GALAXIE-Getriebes bei -55°C (2000Nm / 1rpm)

2.3 AP3200-AP03 Detailentwicklung

2.3.1 Aufgabenstellung

In diesem Arbeitspaket sollte das in AP3200-AP02 freigegebene Konzept verfeinert und im Detail konstruiert werden. Es sollten alle zur Produktion eines Prototyps benötigten Bauunterlagen, Berechnungs- und Auslegungsdokumente entstehen. Das Arbeitspaket sollte mit dem CDR und somit mit der Freigabe der Entwicklung zur Produktion eines Prototyps enden.

2.3.2 Ergebnis

In diesem Arbeitspaket wurde das im AP3200-AP02 entwickelte Konzept (siehe Kapitel 2.2) weiterentwickelt und bis zur Bestell- und Produktionsreife ausgearbeitet. Dies umfasste auch die Auslegung und Berechnung sämtlicher Bauteile. Es fanden umfangreiche FEM-Simulationen zur Analyse der Strukturbauteile statt. Der FS-GRA ist an vier Anbindungspunkten mit der Flugzeugstruktur verbunden. An den Aktuator ist die Anforderung gerichtet, bei dem Wegfall einer dieser Anbindungen noch die volle Funktionalität aufrecht zu erhalten. Durch die FEM-Simulationen stellte sich heraus, dass bzgl. der Anforderung – Wegfall eines Anbindungspunktes - erhebliche Verformungen und Spannungen auftreten, welche die einwandfreie Funktion des Systems beeinflussen. In einem iterativen Prozess wurden die überlasteten Stellen nachgearbeitet, sodass der Aktuator nach der FEM-Analyse im Stande ist, die Belastungen zu ertragen. Die Ergebnisse müssen in einem späteren Belastungstest verifiziert werden.

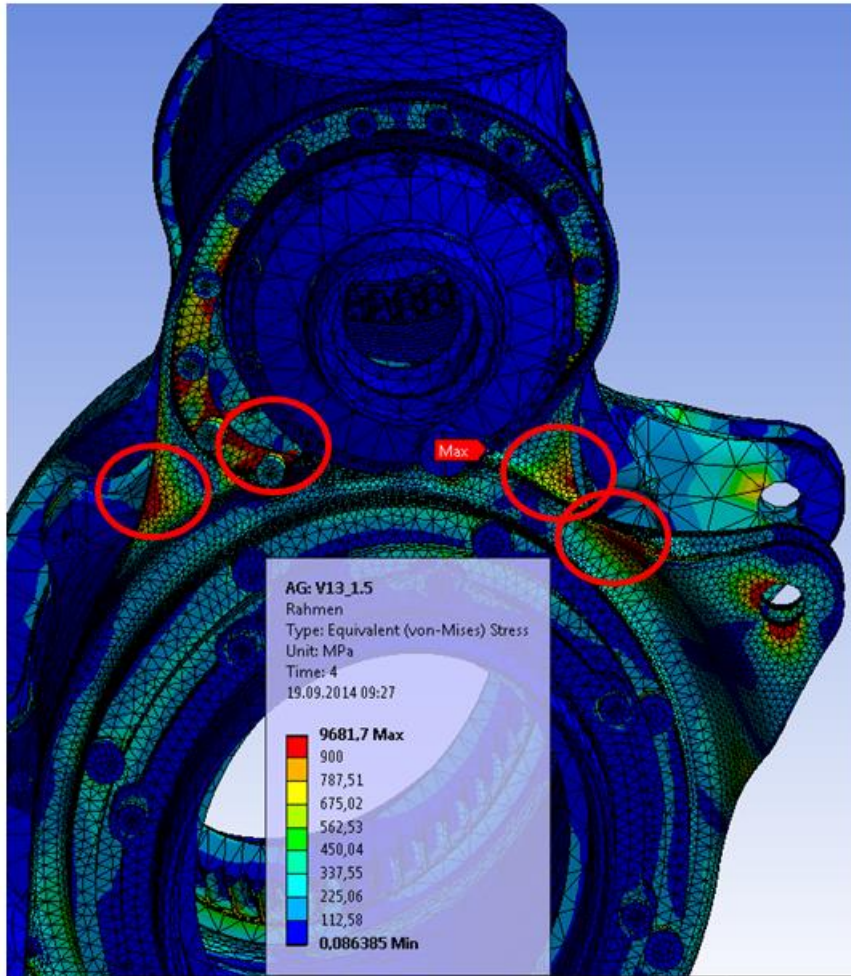


Abb. 22 FEM-Simulation Gehäuse FS-GRA

Des Weiteren wurde in diesem Arbeitspaket die Fertigungsplanung der Einzelteile durchgeführt und die notwendigen Prozesse definiert. Zum Abschluss des Arbeitspaketes standen alle Einzelteilzeichnungen für die Fertigung zur Verfügung. Des Weiteren wurde die Auswahl der Lieferanten für die Kaufteile getroffen. Potentielle Lieferanten wurden für eine Angebotsabgabe angefragt. Neben der Qualität standen vor allem die Kriterien Kosten und Lieferzeit im Vordergrund, um die Budgetziele und Meilensteine des Projekts einzuhalten.

Die Abnahmekriterien sowohl für das GALAXIE-Getriebe als auch für den gesamten FS-GRA wurden definiert und in der Acceptance Test Procedure dokumentiert. Im Zuge dessen wurden die notwendigen Testeinrichtungen geplant und benötigtes Messmittel und Vorrichtungen bestimmt.

Schlussbericht zu FKZ: 20A1101G

Move.On

Folgende Testeinrichtungen wurden zur Herstellung und Verifikation benötigt:

- Teststand zum Einschleifen der Bremslamellen im Torque Limiter
- Teststand zum Einlaufen des GALAXIE-Getriebes

Durch das Einlaufen wird erreicht, dass die fertigungsbedingten Rauheitsspitzen in sämtlichen Tribopaarungen geglättet werden. Mit dem anschließenden Ölwechsel kann sichergestellt werden, dass ein Großteil schädlicher Verschleißpartikel aus dem System entfernt werden können. Der Initialverschleiß ist wesentlich größer als der Verschleiß im späteren Einsatz.

- Abnahmeteststand GALAXIE-Getriebe
- Abnahmeteststand FS-GRA

Ein weiterer Arbeitsinhalt war die Planung der Montage mit Konstruktion der nötigen Montagevorrichtungen sowie der Erstellung einer Montageanleitung.

Das Arbeitspaket umfasste die Erstellung aller Dokumente, welche zur Produktion und Dokumentation des FS-GRA nötig sind. Nachfolgend sind die entsprechenden Dokumente aufgelistet:

- Acceptance Test Procedure
- Conceptual Design Description
- Design Baseline
- Hardware Design Description
- Interface Control Document
- Key Performance Data
- Potential Analysis
- Safety Report
- Stress Report
- Weight Report
- Assembly instruction

Das Arbeitspaket endete mit dem erfolgreichen Abschluss des CDR und der Freigabe zur Produktion.

2.4 AP3200-AP04 Produktion/Test Prototyp

2.4.1 Aufgabenstellung

In diesem Arbeitspaket sollte das in den Arbeitspaketen AP1-AP3 ausgewählte und detaillierte Konzept als Prototyp produziert, montiert und getestet werden. Die Tests beinhalten vorrangig Performance- und Belastungstests. Das Arbeitspaket sollte mit der Lieferung des Prototyps an den Verbundpartner Airbus enden.

2.4.2 Ergebnis

Die Produktion der Einzelteile und die Beschaffung der Kaufteile wurde angestoßen. In dieser Phase fanden intensive Abstimmungen mit den Lieferanten bzgl. den Fertigungsprozessen statt. Die Einzelteile wurden nach Anlieferung nach zuvor festgelegten Prüfplänen vermessen und somit die Qualität der Komponenten sichergestellt. Parallel zur Fertigung bzw. Beschaffung der Komponenten des FS-GRA wurden die benötigten Teile für die Testeinrichtungen sowie Montagevorrichtungen beschafft.

Nachdem alle Einzelteile zur Verfügung standen, wurde zunächst das GALAXIE-Getriebe montiert, welches als eigenständige Funktionseinheit mehrere Tage einlief, bevor es einem Abnahmetest unterzogen wurde. **Abb. 23** zeigt den Messaufbau zur Abnahme der GALAXIE-Getriebe.

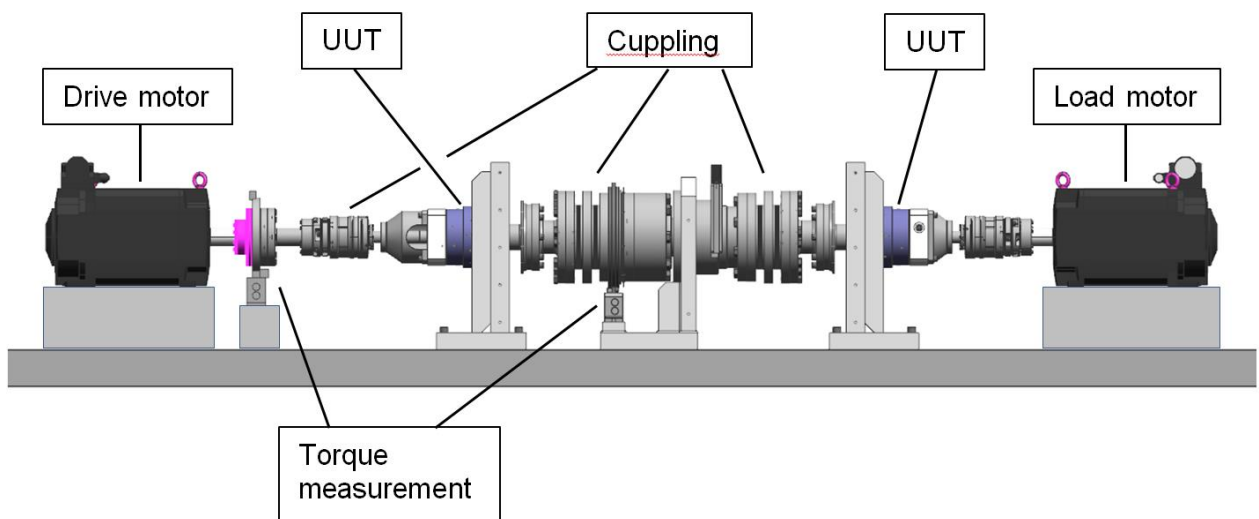


Abb. 23 Prüfaufbau GALAXIE-Getriebe

Schlussbericht zu FKZ: 20A1101G

Move.On

Bei dem Abnahmetest wurden die u.a. die Steifigkeit, der Gleichlauf und das Spiel der GALAXIE-Getriebe gemessen.

Abbildung **Abb. 24** und **Abb. 25** zeigen beispielhaft die Steifigkeitsmessung und den Gleichlauf / Spiel eines Getriebes. Das Verdrehspiel liegt unterhalb 2 arcmin.

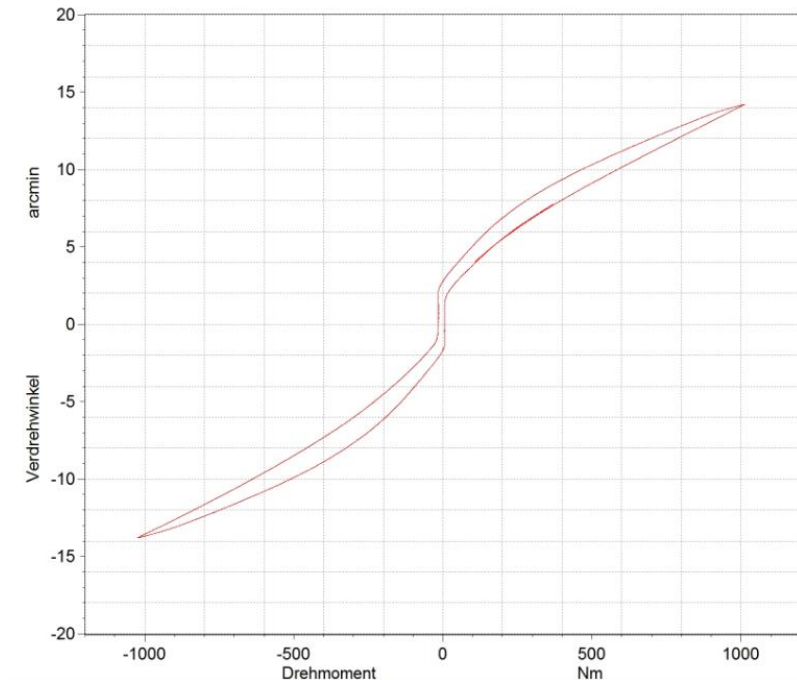


Abb. 24 Steifigkeitsmessung GALAXIE-Getriebe

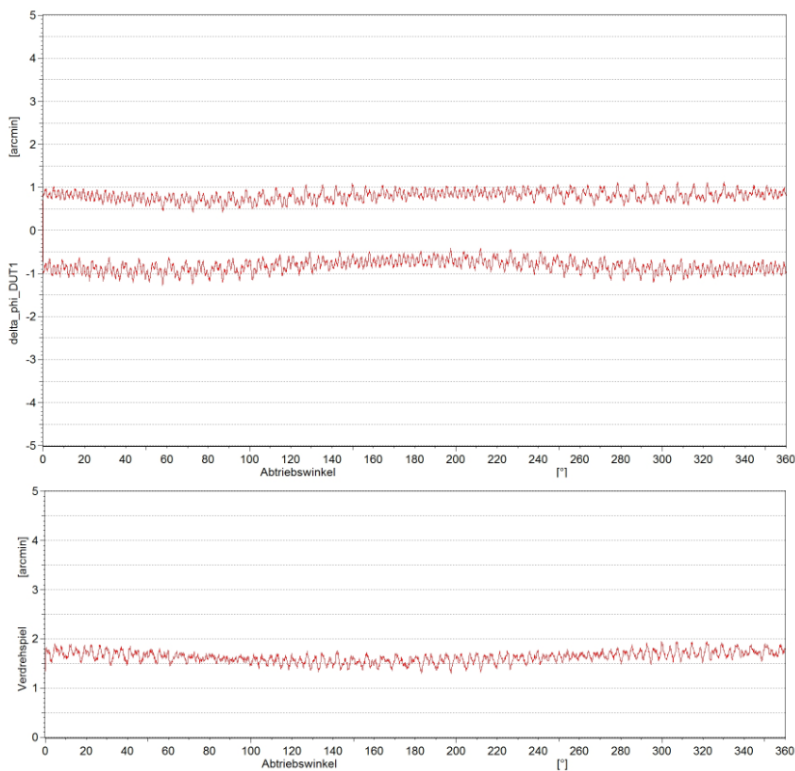


Abb. 25 Gleichlauf- und Spielmessung GALAXIE-Getriebe

Schlussbericht zu FKZ: 20A1101G

Move.On

Die weiteren Funktionseinheiten Bruchdetektor und Torque-Limiter wurden aufgebaut. Dem zuvor erfolgte das Einschleifen der Bremslamellen. Der Prüfstands Aufbau für Torque Limiter und Bruchdetektor ist in **Abb. 26** abgebildet.

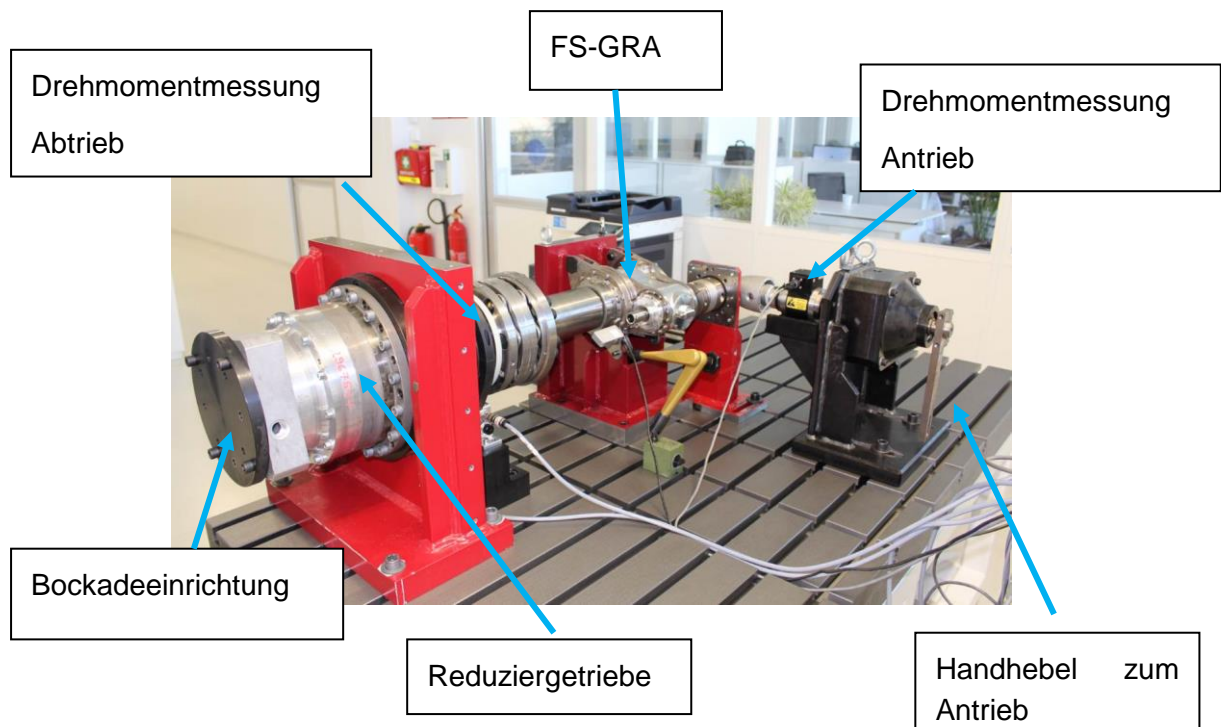


Abb. 26 Prüfstands Aufbau Torque Limiter und Bruchdetektor

Abb. 27 zeigt den komplett montierten FS-GRA.



Abb. 27 FS-GRA

Move.On

Parallel dazu erfolgten der Aufbau und die Inbetriebnahme des Abnahmeteststands des FS-GRA. (siehe

Abb. 28 und **Abb. 29**). Um die Belastung an beiden Ausgängen des FS-GRA simulieren zu können, wurde der gleiche Belastungsstrang auf jeder Seite des FS-GRA benötigt. Der Antrieb des Aktuators wurde über ein Kegelradgetriebe in einem 90°-Winkel zur Antriebswelle des FS-GRA angeordnet.

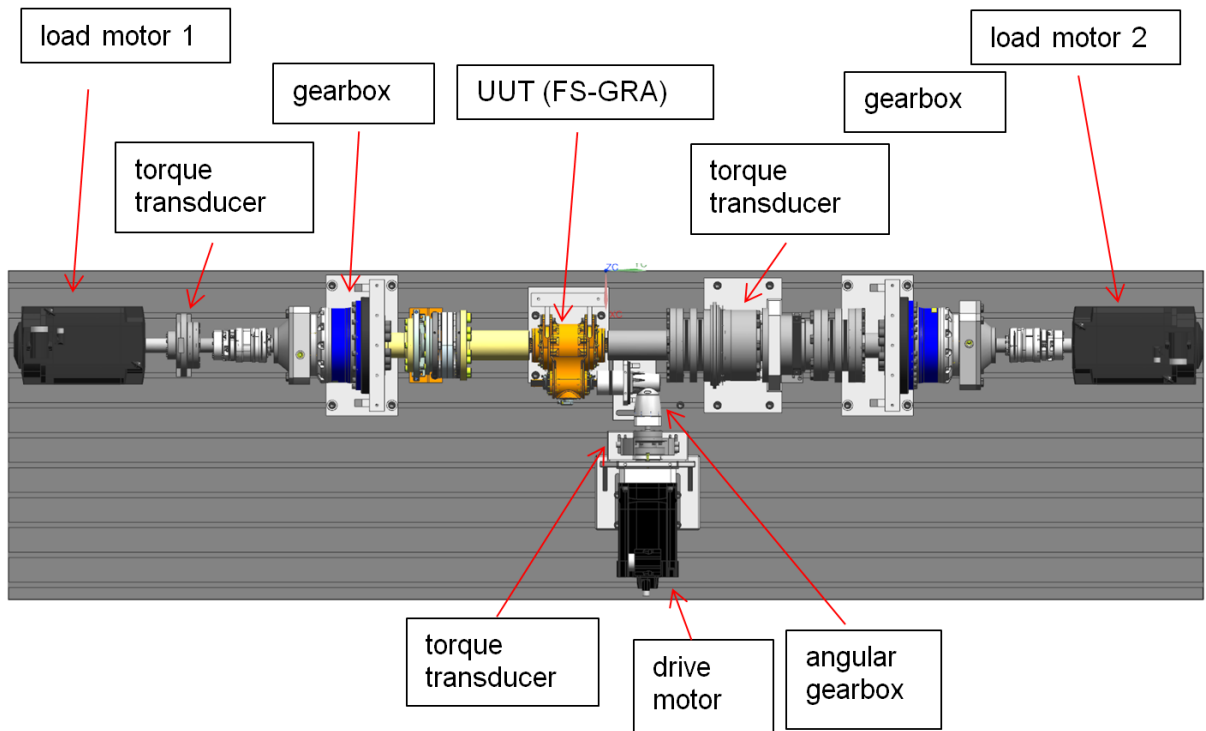


Abb. 28 Abnahmeprüfstand FS-GRA - schematisch



Abb. 29 Abnahmeprüfstand FS-GRA

Schlussbericht zu FKZ: 20A1101G

Move.On

Während der Verifikation stellte sich heraus, dass mehrere Funktionseinheiten die Anforderungen nicht in vollem Umfang erfüllen:

GALAXIE-Getriebe:

Durch die Verwendung des extrem niedrigviskosen Schmierstoffs ESSO 2120A kam es bei schnellen lastfreien Richtungswechseln zur Blockade des Getriebes. Die Verwendung dieses Schmierstoffs hatte bei Tieftemperatur gute Ergebnisse erzielt. Es ist anzunehmen, dass der Blockadeeffekt bei hohen Temperaturen noch verschärft wird.

Die Ursache hierfür ist, dass die Schmierfilmdicke des niedrigviskosen Öls nicht größer ist als die Summe der Rauheitsspitzen der in Kontakt tretenden Verzahnungsteile (Rundzähne und Hohlrad) und somit eine ausreichende Schmierung nicht mehr gewährleistet ist. Da ein niedrigviskoser Schmierstoff für den Einsatz bei Tieftemperatur unumgänglich ist, besteht die einzige Möglichkeit der Nachbesserung darin, die Oberflächenrauigkeit der Bauteile noch zu verbessern.

Torque-Limiter:

Durch ein geeignetes Setting der beiden Einstellgrößen (Anzahl Passscheiben und Anzahl Federn) konnte das Auslöseverhalten des TL exakt auf die Anforderungen eingestellt werden. Im Test stellte sich allerdings heraus, dass die erzielte Bremswirkung gemessen an den Anforderungen zu gering war. Die Abb. 30 zeigt, dass bei einem Antriebsmoment von 21 Nm das Abtriebsmoment auf über 4000Nm steigt, was gemäß den Anforderungen nicht zulässig ist. Eine Bremswirkung war nicht erkennbar. Die Ursache hierfür lag in der Geometrie der Kugelrampe. Eine Verbesserung des Bremsverhaltens ist durch eine Umgestaltung und erneute Auslegung der Rampengeometrie möglich.

Messprotokoll

Typ	Move.On1-380733_V4
Seriennummer	380733_V4
Schmierung	Omala S4GX220
Bearbeiter	Hofmann
Einbaulage	
Bemerkung	

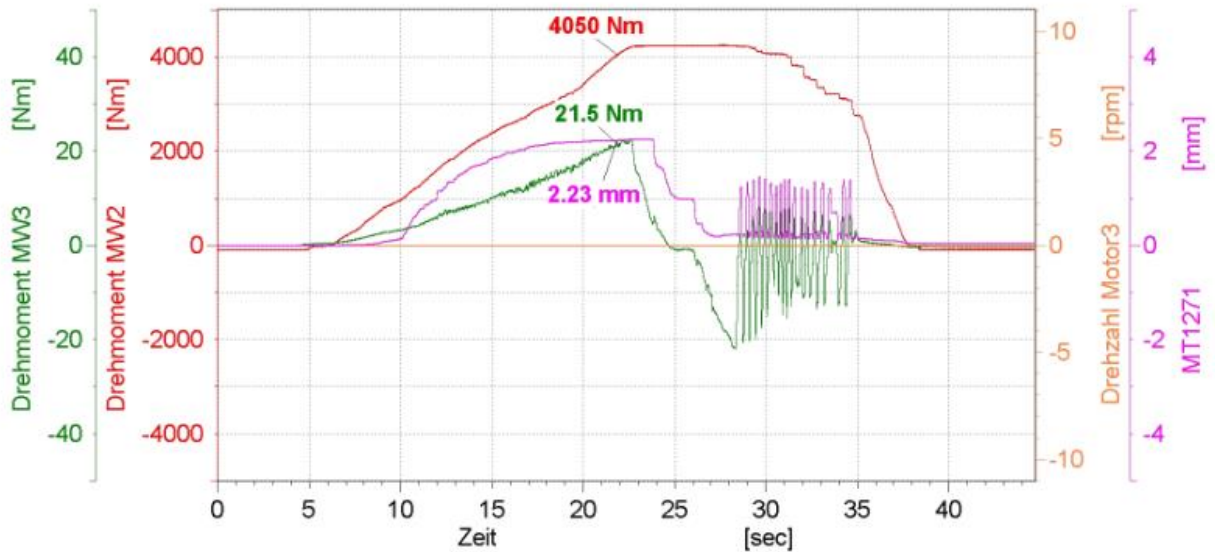


Abb. 30 Messergebnis Torque Limiter

Des Weiteren wurde festgestellt, dass der Bruchdetektor aufgrund seines Prinzips nur einen Bruch in einem der beiden Lastpfade erkennen kann. Des Weiteren entsprach das Ansprechverhalten des Bruchdetektors nicht vollständig den Anforderungen. Die Ansätze zur Verbesserung sind zum einen die Weiterentwicklung des bisherigen Prinzips, zum anderen erneute Konzeptüberlegungen von Grund auf.

Die Abnahmetests haben gezeigt, dass die einzelnen Funktionsbaugruppen zum Teil zufriedenstellende Ergebnisse erbracht haben, die gestellten Anforderungen aber nicht vollumfänglich erfüllt haben. Die Umsetzung der Nachbesserungen erfolgte in den zusätzlichen definierten Arbeitspaketen AP06 bis AP08.

2.5 AP3200-AP05 Zuverlässigkeitsanalyse

2.5.1 Aufgabenstellung

In diesem Arbeitspaket sollte die Durchführung von Zuverlässigkeitsanalysen der im neuen Aktuator-Konzept eingesetzten Hauptkomponenten erfolgen. Aufgrund der Tatsache, dass auch neue Technologien zum Einsatz kommen lagen bis dato wenig Zuverlässigkeitsergebnisse vor, so dass diese ggf. über die Ermittlung von Lambda-Werten für die Hauptkomponenten erarbeitet werden mussten. Weiterhin sollte in diesem Arbeitspaket eine Zuverlässigkeitsanalyse für den Antriebsstrang erstellt werden.

2.5.2 Ergebnis

Für die Erstellung der Zuverlässigkeitsanalyse wurde die Firma AEMSI beauftragt. Der Arbeitsauftrag bestand in der Durchführung einer FMEA sowie in dem Erbringen eines Nachweises, dass der FS-GRA die Anforderung bzgl. Sicherheit und Zuverlässigkeit erfüllt.

Die nachfolgende Tabelle 2 zeigt die Zusammenfassung der Ergebnisse:

Anforderung	Ergebnis Analyse
Die Fehlerrate bezogen auf einen FS-GRA bzgl. dem unbeabsichtigten Blockieren während dem Betrieb muss kleiner sein als $1.0E-05/FH$	Anforderung erfüllt Die Analyse zeigt eine Fehlerrate von $2.0E-05$ pro Flug. Das resultiert in einer Fehlerrate von $1.0E-05$ pro Flugstunde (durchschnittliche Flugzeit = 2h)
Die Fehlerrate bezogen auf einen FS-GRA bzgl. dem unbeabsichtigten Bruch im Lastpfad während dem Betrieb muss kleiner sein als $1.0E-05/FH$	Anforderung erfüllt Die Analyse zeigt eine Fehlerrate von $2.0E-05$ pro Flug. Das resultiert in einer Fehlerrate von $1.0E-05$ pro Flugstunde (durchschnittliche Flugzeit = 2h)
Die MTBF für den FS-GRA muss größer sein als 500.000 Flugstunden	Anforderung erfüllt $MTFB[FH]= 697.626$

Tabelle 2: Ergebnisse FMEA und Zuverlässigkeitsanalyse

2.6 AP3200-AP06 Konstruktionsanpassungen

2.6.1 Aufgabenstellung

In diesem Arbeitspaket sollten die Entwicklungsanpassungen der Fail Safe Antriebslösung, im speziellen der Drehmomentbegrenzung und des Bruchdetektors zur Erfüllung der Systemanforderungen und Erreichen des TRL5 durchgeführt werden. Das Arbeitspaket sollte mit der Fertigstellung der modifizierten Geräte enden.

2.6.2 Ergebnis

Die folgenden Maßnahmen wurden für die Nachbesserungen der einzelnen Funktionseinheiten durchgeführt.

Torque Limiter

Zur Überprüfung der Kraftverhältnisse im TL wurde die OTH Regensburg mit einer Mehrkörpersimulation des TL beauftragt. Dies sollte zum einen die theoretischen Überlegungen zum Kraftfluss im TL bestätigen, zum anderen Hilfestellungen bei der Auslegung der neuen Kugelrampengeometrie liefern. Die Kugelrampe wurde mit Hilfe der Mehrkörpersimulation neu ausgelegt und die betroffenen Teile für eine Neufertigung freigegeben.

Bruchdetektor

Das Konzept des Bruchdetektors wurde grundlegend neu überdacht. In Form eines Workshops wurden verschiedene alternative Konzepte erarbeitet. Die größten Erfolgchancen ergaben die Weiterentwicklung der bestehenden Lösung sowie eine alternative Lösung, welche auf dem Prinzip von Klemmrollen beruht. Beide Varianten wurden ausgelegt und die Produktion mit der Fertigung beauftragt.

2.7 AP3200-AP07 Tribologieoptimierung

2.7.1 Aufgabenstellung

In diesem Arbeitspaket sollte das ausgewählte Getriebekonzept mit dem neuartigen Holwellengetriebe einer Tribologieoptimierung unterzogen werden. Dabei lag der Schwerpunkt auf der Beschichtungsmethode der Einzelzähne sowie der Herstellung der Oberflächenbeschaffenheit. Die Nachbesserung hatte zum Ziel, die Oberflächenrauigkeiten der gepaarten Verzahnungsteile (Rundzähne und Hohlrad) zu verbessern.

2.7.2 Ergebnis

Eine Reduzierung der Oberflächenrauigkeit bei den Rundzähnen wurde erreicht, indem neue Zähne mit einer speziellen DLC-Beschichtung (diamond-like-carbon) gefertigt wurden. Diese Schicht ist extrem hart bei minimalen Rauigkeitswerten.

Schlussbericht zu FKZ: 20A1101G

Move.On

Die vorhandenen Hohlräder wurden einem Druckfließläpp-Prozess unterzogen. Hierbei werden die Rauigkeitsspitzen in der Hohlradverzahnung abgetragen. Dadurch konnte eine Verbesserung des Rauigkeitswertes von Ra0,3 auf Ra0,11 erreicht werden.

2.8 AP3200-AP08 Verifikation

2.8.1 Aufgabenstellung

In diesem Arbeitspaket sollte der in AP3200-AP06 montierte FSGRA auf dem Prüfstand einem reduzierten Lebensdauertest sowie einem Temperaturtest unterzogen werden, um die notwendigen Nachweise auf Geräteebeane für die Erreichung von TRL5 zu erhalten.

2.8.2 Ergebnis

Sobald alle Einzelteile mit den Nachbesserungen zur Verfügung standen, wurden die Baugruppen erneut aufgebaut und getestet.

Galaxie

Zum Zeitpunkt der Berichtserstellung konnte der Belastungstest des GALAXIE-Getriebes unter Hochtemperatur noch nicht durchgeführt werden. Ein subjektiver Test mittels Drehen des Getriebes von Hand zeigte allerdings deutliche Verbesserung des Laufverhaltens durch die Maßnahmen.

Torque Limiter

Abb. 31 zeigt den Messschrieb des Auslöse- und Bremsverhaltens des Torque Limiters. Deutlich zu erkennen ist, dass das Auslöseverhalten erneut bei 20Nm Antriebsmoment den Anforderungen konform eingestellt ist. Des Weiteren konnte das Bremsverhalten deutlich gegenüber der ersten Variante verbessert werden. Um 4000Nm am Abtrieb zu erreichen sind nun 130Nm am Antrieb nötig. Im ersten Test wurden die 4000Nm bereits bei 20Nm Antriebsmoment erreicht.

Move.On

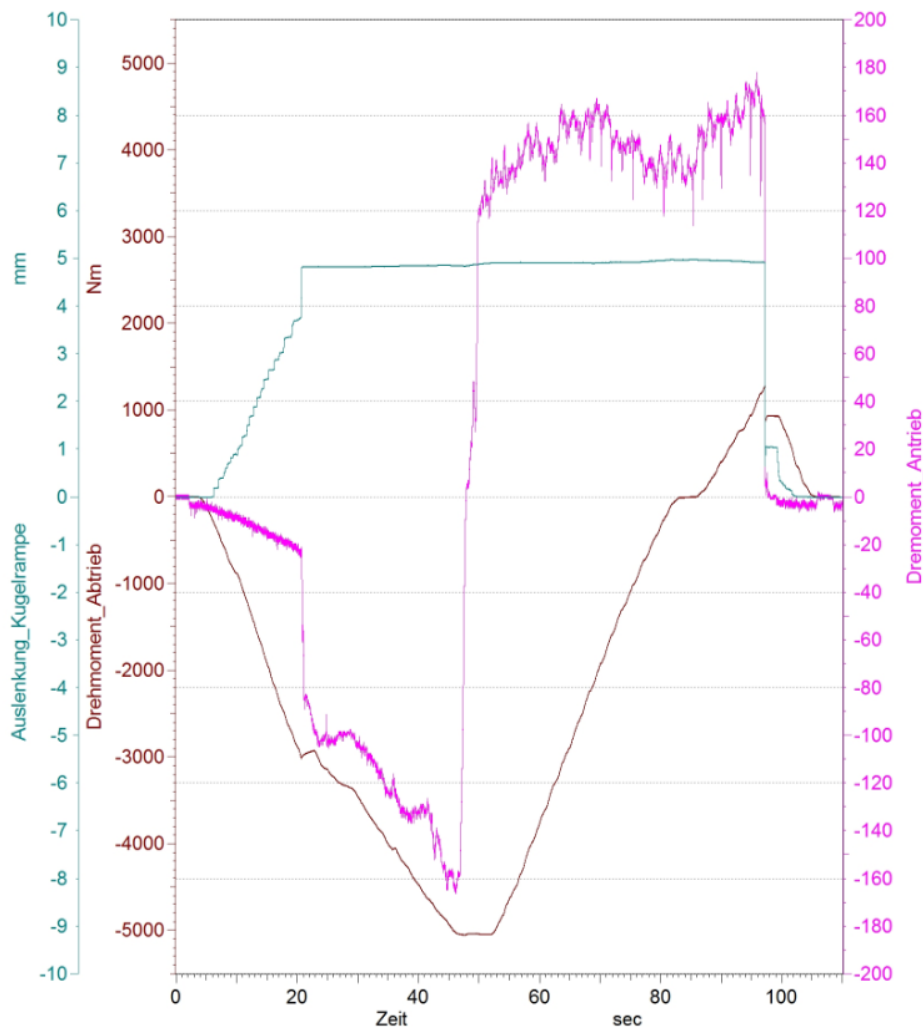


Abb. 31 Messergebnis Torque Limiter mit Nachbesserungen

Allerdings ist das Bremsverhalten noch immer nicht ausreichend, da das Abtriebsmoment mit dem Antriebsmoment kontinuierlich ansteigt und nicht in eine horizontale Linie oder einer Geraden mit sehr flacher Steigung übergeht. Dieses Verhalten kann mit weiteren Maßnahmen erreicht werden, die aber nicht mehr im Rahmen des Förderprojektes umgesetzt werden konnten. Zum einen gibt es Entwürfe zur weiteren Verbesserung der Rampengeometrie. Zum anderen wurden die Kräfteverhältnisse im TL untersucht und die Auswirkung einer konstruktiven Umstellung des TL betrachtet. Im aktuellen Design befindet sich das Bremspaket auf der Antriebsseite. Die konstruktive Umstellung sieht das Bremspaket auf der Abtriebsseite vor. Diese Variante wurde in einem Prototypenstatus aufgebaut und getestet. Der zugehörige Messschrieb in ist in **Abb. 32** dargestellt. Der Messschrieb lässt erkennen, dass das Abtriebsmoment bei Erreichen eines gewissen Wertes in ein Plateau übergeht und nicht mehr weiter mit dem Antriebsmoment ansteigt.

Move.On

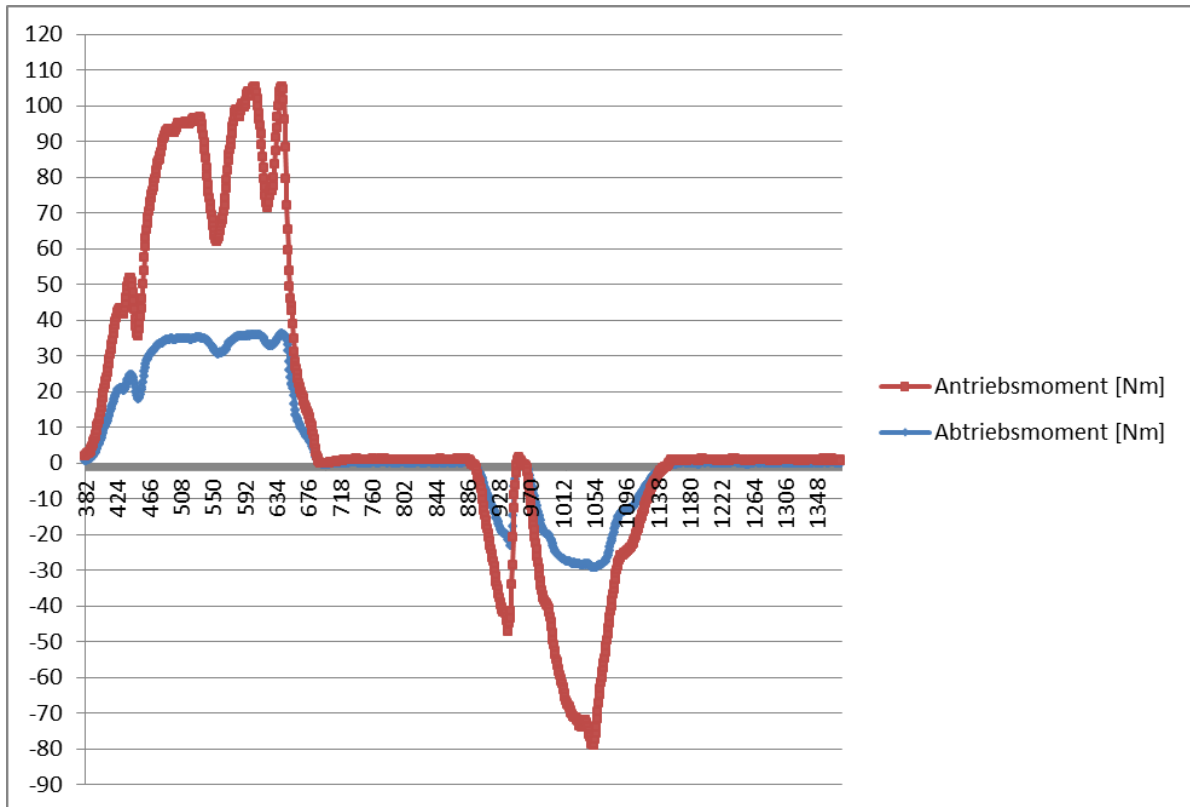


Abb. 32 Messergebnis Torque Limiter invertierter Aufbau

Bruchdetektor

Die beiden erarbeiteten Varianten des Bruchdetektors wurden erneut getestet. Dabei stellte sich heraus, dass die neu entwickelte Variante ein Gegenmoment benötigt um die Funktion ausüben zu können. Dieses Gegenmoment war im Test nicht in ausreichender Höhe vorhanden, da im Testaufbau nur ein Abtrieb belastet und der andere komplett unbelastet war, um an dieser Stelle einen Bruch im System zu simulieren. Dieser Fall ist aber auch im Einsatz denkbar.

Die zuerst entwickelte und nachgebesserte Variante zeigte bessere Ergebnisse und funktioniert bei deutlich weniger Gegenmoment. **Abb. 33** zeigt, dass ab einem Antriebsdrehmoment von ca. 9 Nm am Ausgang des FS-GRA keine Drehbewegung mehr stattfindet, da das System ab diesem Moment blockiert wird. Aus zeitlichen Gründen wurde auf ein Härteverfahren der Bauteile des Bruchdetektors verzichtet, sodass sich durch plastische Verformungen innerhalb dieser Komponente dieser nicht wieder zurückdrehen und somit lösen lies. Die Tests zeigten dennoch, dass die erste Variante des Bruchdetektors die Anforderung im Prinzip nahezu vollständig erfüllt. In einem weiteren Entwicklungsschritt ist der Bruchdetektor in seinem Auslöseverhalten zu optimieren und mit gehärteten Komponenten zu produzieren.

Move.On

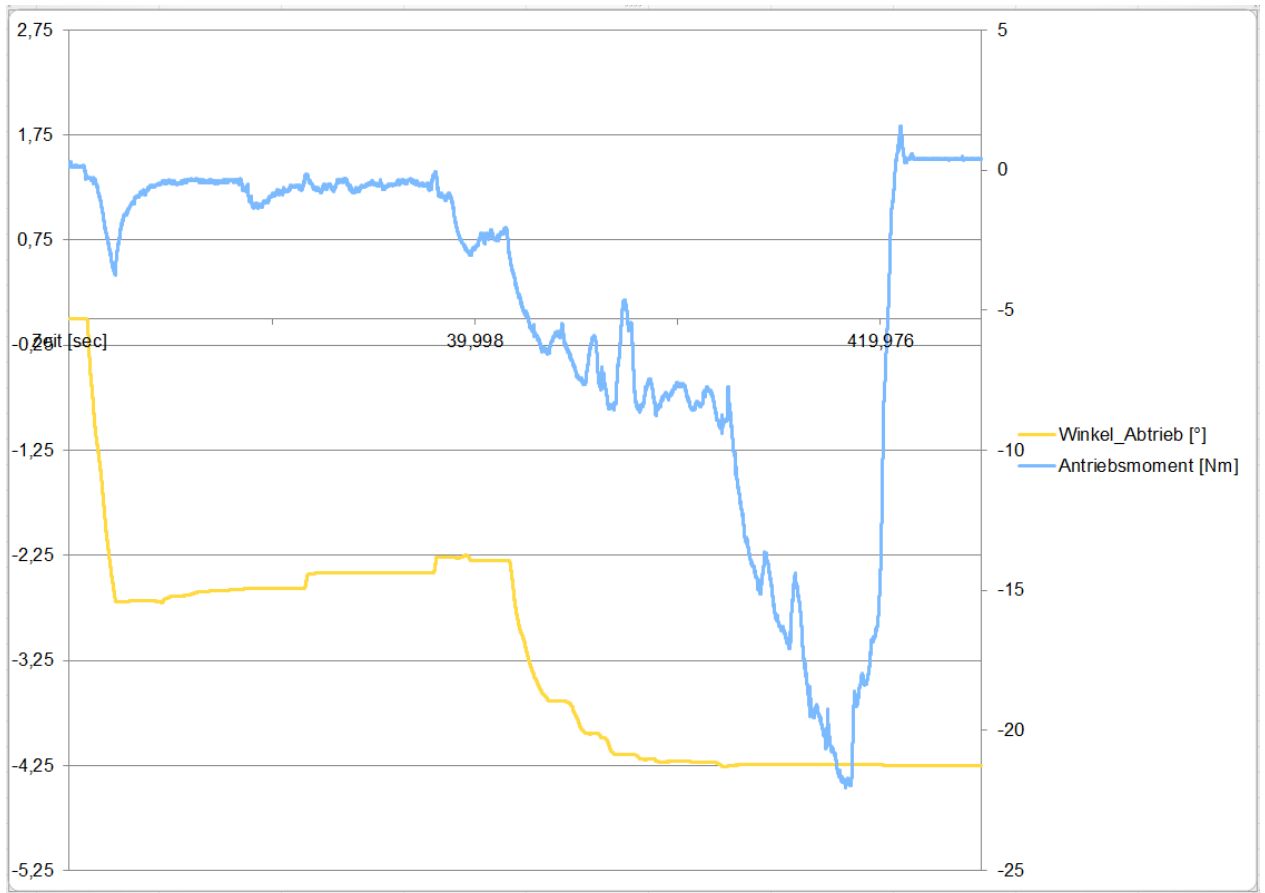


Abb. 33 Messergebnis FS-GRA mit modifiziertem Bruchdetektor

2.9 Zusammenfassung

Innerhalb des Forschungsvorhabens wurde das zuvor ausgewählte Konzept umgesetzt und getestet. Nach Einarbeiten der Nachbesserungen konnten die Schlüsselfunktionen des FS-GRA im Prinzip nachgewiesen werden. Die Ergebnisse aus dem Hochtemperaturtest des GALAXIE-Getriebes lagen zum Zeitpunkt der Berichtserstellung noch nicht vor. Im Bericht werden Optimierungen der einzelnen Komponenten aufgezeigt, die im Rahmen eines Anschlussprojekts umgesetzt werden könnten. Dieses Projekt sollte zum Ziel haben, die Interaktion der einzelnen Komponenten über die Last- und Temperaturprofile zu verifizieren. Im Rahmen der Projektlaufzeit konnte der Prototyp noch nicht an den Verbundführer Airbus ausgeliefert werden.

3 Nutzen und Verwertbarkeit

Die im Projekt entwickelten Funktionsbaugruppen, für welche auch Schutzrechtsanmeldungen getätigt wurden, können in anderen Luftfahrtapplikation zum Einsatz kommen. Es gibt aktuell am Markt keine vergleichbaren Konzepte. Nach Umsetzung der aufgezeigten Nachbesserungen kann das Konzept zu höchst-innovativen Neuentwicklungen im Bereich High-Lift Systeme führen.

Des Weiteren wurde erstmalig eine neuartige, von WITTENSTEIN entwickelte Getriebearbeit hinsichtlich der Luftfahrttauglichkeit überprüft. Diese Getriebetechnologie wurde beim Verbundführer Airbus und den Partner publik gemacht. Das sogenannte GALAXIE-Getriebe bietet zahlreiche Vorteile gegenüber aktuell eingesetzten Getrieben. Es ist denkbar, dass diese Getriebetechnologie in anderen Luftfahrtaktuatoren wie z.B. Fahrwerk- oder Frachttorantriebe zukünftig Verwendung findet.

4 Fortschritt anderer Stellen

N/A

5 Veröffentlichungen

N/A

6 Anlage

Berichtsblatt (Kurzfassung in Deutsch und Englisch)

Berichtsblatt

1. ISBN oder ISSN N/A	2. Berichtsart (Schlussbericht oder Veröffentlichung) Schlussbericht
3. Titel Entwicklung eines hochzuverlässigen Aktuators basierend auf einer neuartigen Getriebetechnologie.	
4. Autor(en) [Name(n), Vorname(n)] Beetz, Steffen	5. Abschlussdatum des Vorhabens 31.10.2016
	6. Veröffentlichungsdatum 13.09.2017
	7. Form der Publikation Schlussbericht
8. Durchführende Institution(en) (Name, Adresse) WITTENSTEIN aerospace & simulation GmbH Walter-Wittenstein-Straße 1 97999 Igersheim	9. Ber. Nr. Durchführende Institution 20A1101G_Schlussbericht_Move.On
	10. Förderkennzeichen 20A1101G
	11. Seitenzahl 46
12. Fördernde Institution (Name, Adresse) Bundesministerium für Wirtschaft und Energie (BMWi) 53107 Bonn	13. Literaturangaben 1
	14. Tabellen 2
	15. Abbildungen 35
16. Zusätzliche Angaben N/A	
17. Vorgelegt bei (Titel, Ort, Datum) N/A	
18. Kurzfassung <p>Im Rahmen des Verbundvorhabens Move.On entwickelte die Firma WA&S ein innovatives Antriebskonzept für einen failsafe-geared rotary actuator (FS-GRA) auf Basis einer neuartigen Getriebetechnologie für das High-Lift System des Airbus A320. Im Entwurf werden verschiedene Konzepte hinsichtlich Zuverlässigkeit, Kosten, Realisierbarkeit und Gewicht untersucht. Das Projekt endete mit der Fertigstellung von Prototypen des FS-GRA. Die Verifikationsphase zeigte auf, dass die Anforderungen größtenteils erfüllt wurden. Die notwendigen Nachbesserungen wurden aufgezeigt. Das Ergebnis des Forschungsvorhabens ist ein neuartiges Aktuatordesign, das bei der Entwicklung eines neuen Flugzeugprogramms Verwendung finden kann. Dieses Konzept ist geeignet zur Gewichtsreduktion und kann somit zu einer Verringerung des Treibstoffverbrauches und der Emissionen beitragen.</p> <p>Die Arbeitspakete umfassten</p> <ul style="list-style-type: none"> – AP3200-AP01: Grundlagen und Konzeptdefinition – AP3200-AP02: Konzeptentwicklung – AP3200-AP03: Detailentwicklung – AP3200-AP04: Produktion/Test Prototyp – AP3200-AP05: Zuverlässigkeitsanalyse – AP3200-AP06: Konstruktionsanpassung – AP3200-AP07: Tribologieoptimierung – AP3200-AP08: Verifikation 	
19. Schlagwörter Fail-safe Aktuator, doppelter Lastpfad, GALAXIE-Getriebe, High-Lift-System	
20. Verlag N/A	21. Preis N/A

Document Control Sheet

1. ISBN or ISSN N/A	2. type of document (e.g. report, publication) Final Report
3. title Development of a highly reliable actuator based on a novel drive technology.	
4. author(s) (family name, first name(s)) Beetz, Steffen	5. end of project 31.10.2016
	6. publication date 13.09.2017
	7. form of publication Final Report
8. performing organization(s) (name, address) WITTENSTEIN aerospace & simulation GmbH Walter-Wittenstein-Straße 1 97999 Igersheim	9. originator's report no. 20A1101G_Schlussbericht_Move.On
	10. reference no. 20A1101G
	11. no. of pages 46
12. sponsoring agency (name, address) Bundesministerium für Wirtschaft und Energie (BMWi) 53107 Bonn	13. no. of references 1
	14. no. of tables 2
	15. no. of figures 33
16. supplementary notes N/A	
17. presented at (title, place, date) N/A	
18. abstract As part of the Move.On joint venture, WA&S developed an innovative concept for a failsafe-g geared rotary actuator(FS-GRA) based on a new drive technology for the high-lift system of the Airbus 320. Various concepts were examined regarding reliability, cost, feasibility and weight. The project ended with the completion of the FS-GRA. The verification phase showed, that the requirements could mostly be fulfilled. The required improvements to fulfill all requirements were stated. The result of the research project is a novel actuator design that can be used in the development of a new aircraft program. This concept is suitable for weight reduction and can thus contribute to a reduction in fuel consumption and emissions. The work packages included: – AP3200-AP01: basic principles and concept definition – AP3200-AP02: concept development – AP3200-AP03: detailed development – AP3200-AP04: production / verification of prototypes – AP3200-AP05: reliability analysis – AP3200-AP06: design modification – AP3200-AP07: tribology optimization – AP3200-AP08: verification	
19. keywords Fail-safe actuator, redundant loadpath, GALAXIE-gearbox, High-Lift-System	
20. publisher N/A	21. price N/A