

Schlussbericht

zum Vorhaben



Design & Assembly Concepts of Next Generation of Moveables

Klappen-Schienen-Bremse (FTB)

Gefördert in dem Luftfahrtforschungsprogramm LuFoV-2
durch das BMWi der Deutschen Bundesregierung
aufgrund eines Beschlusses des Deutschen Bundestages

Gefördert durch:



Bundesministerium
für Wirtschaft
und Energie

aufgrund eines Beschlusses
des Deutschen Bundestages

TUHH

Technische Universität Hamburg

Diese Seite bleibt leer.

Inhaltsverzeichnis

1	Einleitung.....	5
2	Aufgabenstellung.....	5
3	Ablauf des Projekts.....	7
4	Wissenschaftlicher und technischer Stand.....	11
5	Erzielte Ergebnisse.....	13
5.1	Anforderungsanalyse.....	13
5.2	Konzeptentwicklung.....	18
5.3	Nutzwert- und Potentialanalyse.....	30
5.4	Prototyp- und Prüfstandentwicklung.....	32
5.5	System- und Struktur-Leistungstests.....	38
6	Fazit.....	41

Diese Seite bleibt leer.

1 Einleitung

Im Rahmen des Verbundes „Next-Move“ werden Hochauftriebssysteme durch eine gesamtheitliche Betrachtung von Struktur, System, Auslegung und Fertigung hinsichtlich einer Minimierung von Kosten und Gewicht untersucht. Um in der nächsten Verbesserungsstufe von Kurzstreckenflugzeugen Anwendung zu finden, soll ein modernes Hochauftriebskonzept im Kontext des existierenden Flügels entwickelt werden. Der Fokus wird dabei auf eine höhere Integration von Struktur- und Systemkomponenten gelegt.

Die Entwicklung einer neuartigen Bremse (engl.: *Flap-Track-Brake, FTB*) im Führungsmechanismus von Landeklappensystemen ermöglicht es, den Funktionsumfang im Vergleich zu konventionellen Landeklappensystemen zu erweitern. Die Integration einer FTB würde den Einsatz sogenannter Einzelklappensystemen ermöglichen, welche wiederum multifunktionale Landeklappensysteme mit innovativen zusätzlichen Funktionen ermöglichen. Diese Erweiterungen führen zu Verbesserungen in der Leistungsfähigkeit und Effizienz des Flugzeuges. So ist in diesem Zusammenhang mit einem reduzierten Gewicht des gesamten Systems zu rechnen. Weiterhin wären Gewichtseinsparungen in beteiligten Strukturbereichen möglich. Eine Verkleinerung des benötigten Einbauraums des Konzepts einer Bremse im Führungsmechanismus im Vergleich zu alternativen Konzepten von *dual-load-path*-Aktuatoren wäre ein weiterer Vorteil dieses Konzepts. Zusätzlich kann mit Verbesserung im Bereich der Installation und Wartung gerechnet werden. So würden vormontierte gekapselte Einzelklappens als *plug-and-fly*-Module den Aufwand in der Montage sowie Wartung reduzieren. Zusätzlich ermöglichen Einzelklappensysteme mit der Zusatzfunktion einer elektronischen Trimmung (engl.: *electronic-rigging*) eine Alternative zur bisherigen aufwändigeren mechanischen Einstellung.

2 Aufgabenstellung

Das Ziel des Projekts ist es einen Funktionsdemonstrator einer FTB zu entwickeln und zu testen. Zusammengefasst beinhaltet dieses Vorhaben die Erarbeitung erster Konzepte sowie im Rahmen einer Anforderungsanalyse, die Identifikation der kritischen Designelemente. Zur Demonstration eines geeigneten Konzepts müssen Prüfstände zum Funktions- und Leistungsnachweis realisiert werden. Weiterhin sind mit Hilfe der Testanlagen Untersuchungen unter auslegungsrelevanten Bedingungen sowie unter Störeinflüssen (Verunreinigung, Eisbildung) erforderlich. Im Zuge einer eingehenden Datenanalyse können Schlüsselparameter für modelbasierte Analysen der Gesamtsystemfunktionalität gewonnen werden.

Die Arbeitsinhalte der Technischen Universität Hamburg könne wie folgt zusammengefasst werden:

- Entwicklung der Konzepte,
- Arbeiten im Bereich einer geeigneten Simulationsumgebung,
- Konstruktion eines Funktionsdemonstrators,
- Entwicklung eines geeigneten Prüfstands inklusive Testinfrastruktur,
- Durchführung von Tests mit erstellten Funktionsdemonstrator auf Prüfstand und
- Erstellung Dokumentation.

3 Ablauf des Projekts

Die Auslegung einer FTB beginnt mit einer **Anforderungsanalyse**. In dieser werden die Anforderungsparameter definiert, welche die Bremse im Betrieb erfüllen muss. Zu erarbeitende Ergebnisse in diesem Zusammenhang sind im Folgenden zusammengefasst:

- Definition von Geometrie der Führungskinematik, Klappenstellung sowie Topologie der Anbindungspunkte zwischen Track, Schlitten und Klappenkörper. Dabei werden von Airbus die Rahmendbedingungen übermittelt.
- Definition der Design-Fehlerszenarien. Festlegung von Rand- und Umgebungsbedingungen zur Identifikation der dimensionierenden Fehlerfälle.
- Definition der dimensionierenden Aero-Lasten auf den Klappenkörper und Führungsmechanismus. Analyse und Aufteilung der Aero-Lasten des Klappenkörpers auf Führungsmechanismus mit dem Ziel der Definition der dimensionierenden abzubremsenden und zu haltenden Lasten einer Bremse im Führungsmechanismus. Dabei werden Daten bezüglich der aerodynamischen Kräfte von Airbus übermittelt.
- Definition von Anforderungen bezüglich Zugänglichkeit, Wartbarkeit.
- Analysen der Vorgaben für Sicherheit und Zuverlässigkeit auf System- sowie auf Komponentenebene.
- Definition weiterer Randbedingungen (mit Daten von Airbus) unter anderem: Bauraumbeschränkungen, Notwendigkeit eines Verriegelungsmechanismus, Detektionssystem zur Fehlererkennung, Vorgaben bzgl. einzuhaltender Geschwindigkeitstransienten und Grenzen der Fahrwege im Fehlerfall.

Mit den zuvor definierten Anforderungen kann im weiteren Verlauf in die **Konzeptentwicklung** übergegangen werden. Aufgabe dieser Phase ist es, verschiedene Konzepte zu entwickeln. Dabei werden neben verschiedenen Wirkmechanismen auch unterschiedliche Werkstoffpaarungen untersucht. Wesentlicher Punkt dieser Phase ist, dass simulationsbasiert gearbeitet wird. Die einzelnen Konzeptionen sollen mit geeigneten Simulationswerkzeugen nachgebildet werden. Hier soll insbesondere der neue AIRBUS ProtoSpace zum Einsatz kommen und die Konzeptarbeit in dieser Phase unterstützen. Wesentliche Punkte, welche im Rahmen der **Konzeptentwicklung** abgearbeitet werden müssen sind folgende:

- Konzept zur Integration des Brems-Mechanismus in bereits vorhandenen Schlitten des Ziel-Landeklappensystems (Integral- oder Differentialbauweise).

- Gestaltung und Entwurf des eigentlichen Brems-Mechanismus. Kraft- oder Formschlüssiges Verfahren. Konzept für Hebel-Mechanismus zur Krafterzeugung der Bremskrafteinwirkung.
- Gestaltung und Entwurf von Mechanismen zur Reibkrafterzeugung. Konzepte unterschiedlicher möglicher Werkstoff-Paarungen und/oder formschlüssiger Blockierungsmechanismen.
- Konzept für einen sicheren Verriegelungsmechanismus mit Option auf mechanische Indikation als Alternative für ein Sensor-basiertes Detektionssystem.
- Nachbildung der vielversprechendsten Konzepte in einem Simulationsmodell.

Am Ende der Konzeptentwicklung soll anhand von verschiedenen Bewertungskriterien das geeignetste Konzept im Rahmen einer **Nutzwertanalyse** ausgewählt werden. Des Weiteren sollen ausgewählte Konzepte im Rahmen von **Trade-Off-Studien** im Vergleich zu konkurrierenden Dual-Load-Path Designs bewertet werden. Zudem soll innerhalb der Konzeptentwicklung eine geeignete Modellierungsmethode bzw. mathematische Beschreibung der Bremse und ihrer Bestandteile gefunden werden, um, sofern möglich, die Konzepte im Rahmen von modellbasierten Analysen dem eigentlich V-Prozess vorgelagert testen zu können. Diese Voruntersuchung beinhaltet:

- Durchführung von Voruntersuchungen am Simulationsmodellen und Bewertung von Vor- und Nachteilen für ausgewähltes Konzept.
- Abschätzung von Belastungen am ausgewählten Konzept.
- Etwaige Verbesserungen an der ausgewählten Konzeption anpassen.

In der Phase der **Funktionsdemonstrator- und Prüfstandsentwicklung** wird das ausgewählte Konzept detailliert konstruiert und bis zu einem Funktionsdemonstrator entwickelt. Es wird zusätzlich ein Prüfstand entwickelt, um den Funktionsdemonstrator umfangreichen Untersuchungen zu unterziehen. Parallel zur physischen Erstellung des Funktionsdemonstrators bzw. Prüfstands wird ein Mehrkörpersimulationsmodell entworfen. Hybrides Testen ermöglicht einen Austausch zwischen realen Prüfstandsdaten und Simulationsergebnissen, wodurch eine intensivere Systemanalyse der FTB durchgeführt werden kann. Die einzelnen Arbeitsschritte sehen wie folgt aus:

- Konstruktion des Funktionsdemonstrators eines Bremsmechanismus, welcher die zuvor definierten Anforderungen erfüllt und unter Zuhilfenahme additiver Fertigungsverfahren zu fertigen ist.

- Überprüfung der Verwendung eines, von Airbus bereitgestellten, original Track.
- Erstellung eines CAD-Modells des Funktionsdemonstrators für die Fertigung und Weiterverwendung in Simulationsmodellen.
- Erstellung eines Simulationsmodells des Funktionsdemonstrators inklusive Führungsmechanismus (original Track).
- Durchführung von Voruntersuchungen am Simulationsmodell, um Belastungen am Funktionsdemonstrator zu ermitteln.
- Etwaige Verbesserungen an der Konstruktion durchführen.
- Konstruktion eines Prüfstandes, welcher die Betriebsbedingungen im Nominal- und Fehlerfall abbilden kann. An dem Prüfstand sollen die Betriebsbedingungen (Kräfte, Belastungen usw.) bestmöglich zur Realität abgebildet werden. Zudem sollen Umwelteinflüsse, wie Verschmutzungen und Eisbildung untersucht werden. Hierzu nötiger Materialeinsatz umfasst im Wesentlichen:
 - Prüfstandgestell,
 - Führungsmechanismus (Führungsschiene und Führungsschlitten),
 - Prüfling der FTB (Bremsen-Einheit, Reibbeläge),
 - Schaltschränke zur Ansteuerung,
 - Hydraulische Lasteinheit,
 - Sensorik und Auswerteeinheiten,
 - Verkabelung / Verrohrung.
- Erstellung eines Sensorkonzeptes für den Prüfstand zur Ermittlung von Kennwerten.
- Erstellung eines CAD-Modells des Prüfstands zur Fertigung der einzelnen Bestandteile und evtl. Weiterverwendung für Mehrkörpersimulationen.
- Aufbau des Prüfstandes und Integration des Funktionsdemonstrators.
- Erstellung eines Simulationsmodells des Prüfstandes, inklusive Schnittstellen zum Simulationsmodell des Funktionsdemonstrators.
- Erstellung eines Gesamt-Simulationsmodells als Grundlage des hybriden Testens.

Der Funktionsdemonstrator soll mit Hilfe des Prüfstands **System- und Komponententests** unterzogen werden. Dabei sollen die Systemeigenschaften im fehlerfreien

Zustand ermittelt werden. Anschließend wird eine Betrachtung des Verhaltens der FTB im Fehlerfall durchgeführt. Die beiden Untersuchungen finden sowohl am Prüfstand als auch am Mehrkörpersimulations-Modell statt. Durch einen Abgleich von Test- und Simulationsdaten soll eine Validierung des Simulationsmodells erfolgen. Mit einem validierten Simulationsmodell können nachfolgend Szenarien getestet werden, welche nicht vom Prüfstand dargestellt werden. Die Verwendung der Mehrkörpersimulation ist als paralleler Ast des aufsteigenden Zweiges eines V-Modells zu verstehen. Die einzelnen Arbeitsschritte sind wie folgt definiert:

- Erstellung von Testmethoden und Testabläufen, um die verschiedenen Betriebszustände abbilden zu können.
- Durchführung von Systemtest im fehlerfreien Systemzustand und Bestimmung von nominalen Kennwerten.
- Vergleich der Prüfstands-Daten mit den Ergebnissen der Mehrkörpersimulation und eventuelle Modifizierung des Mehrkörpermodells.
- Untersuchung des Systemverhalten in Fehlerfällen und Abgleich mit Simulationsergebnissen. Messung der Kennwerte im Fehlerfall.
- Mit Hilfe der Prüfstands-Daten wird ein valides Simulationsmodell erstellt, um weitere Fehlerszenarien zu untersuchen, welche vom Prüfstand nicht praktikabel abzudecken sind.

Die letzte Phase beinhaltet die **Auswertung der Testergebnisse, Aktualisierung der Nutzwertanalyse und die Erstellung des Abschlussberichtes.**

- Auswertung der Prüfstands- und Simulationsergebnisse mit anschließender Bewertung der Ergebnisse hinsichtlich z.B. Alltagstauglichkeit und Nutzwert.
- Durchführung einer aktualisierten Nutzwertanalyse mit dem endgültigen Konstruktionsdesign und Bewertung der Umsetzbarkeit der FTB.
- Erstellung eines Abschlussberichts mit dem Inhalt des Projekts.

4 Wissenschaftlicher und technischer Stand

Ein Teilsystem der sekundären Flugsteuerung stellen die Hochauftriebshilfen dar, mit denen in verschiedenen Flugphasen das Tragflügelprofil an die jeweilige Flugphase angepasst werden kann. Diese Anpassung erfolgt unter anderem mit Hilfe von Landeklappen (engl.: *Flaps*) an der Flügel-Hinterkante. Die Geometrieänderung durch die Hochauftriebssysteme erhöht die Flügelfläche und Profilwölbung, sodass ein größerer Auftrieb erzeugt wird (HÜNECKE, 2004). Heutige Verkehrsflugzeuge besitzen im Allgemeinen ein Landeklappensystem, welches von einer zentralen Antriebseinheit angetrieben wird und sich im Rumpf des Flugzeuges befindet. Von der Antriebseinheit geht eine Wellentransmission in beide Tragflügel und versorgt die sich darin befindlichen Abtriebsstationen der Landeklappen mit der entsprechenden Leistung. Bei heutigen konventionellen Landeklappensystemen wird ein synchrones Verfahren aller beteiligten Klappenflächen im Allgemeinen durch eine mechanische Kopplung (engl.: *Flap-Interconnect*, **FIC**) sichergestellt und durch Monitore bzw. Fehlererkennungseinrichtungen überwacht. Dies wird in Abbildung 4-1 dargestellt.

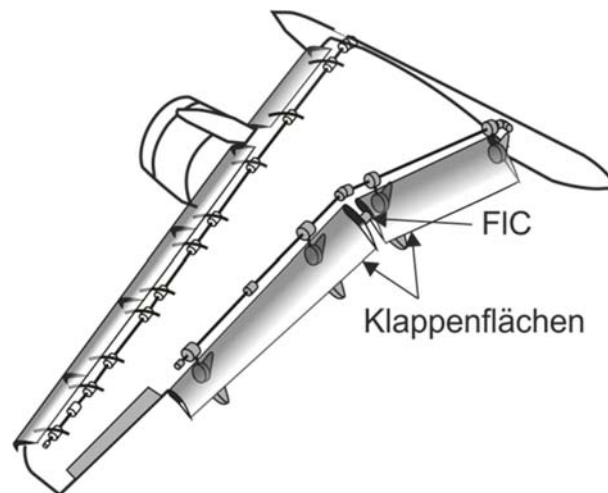


Abbildung 4-1: Klappenkopplung konventioneller Landeklappensysteme

Neue innovative Landeklappensysteme erfordern separat steuerbare Klappenflächen ohne mechanische Kopplung. Durch den neuen Systemaufbau müssen jedoch neuartige Fehlerszenarien berücksichtigt werden. Durch den verwendeten Führungsmechanismus (engl.: *Flap-Track*) des betrachteten Landeklappensystems kann ohne die mechanische Kopplung ein Schräglauf einer Klappe mit möglicherweise katastrophalen Auswirkungen auftreten. Der Führungsmechanismus ist hierzu in Abbildung 4-2 dargestellt.

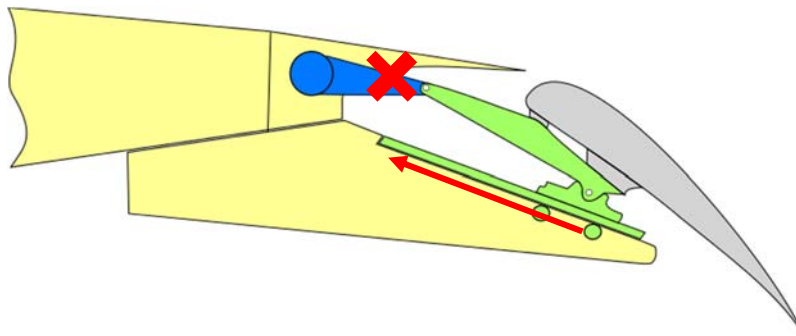


Abbildung 4-2: Führungsmechanismus (Flap-Track) des Landeklappensystems

Für den Fall eines Versagens einer Komponente zwischen Klappenfläche und Antriebssystem würde die Klappenfläche von den angreifenden Luftkräften zurückgetrieben werden. Durch den größer werdenden Schräglauf muss damit gerechnet werden, dass tragende Elemente über die Belastungsgrenze hinaus beansprucht werden und sich der Klappenkörper von der Struktur löst. Dies ist als katastrophales Ereignis anzusehen. Um ein Landeklappensystem mit einzeln verfahrbaren Klappenflächen zu realisieren, welches gegen dieses Ereignis abgesichert ist, sind prinzipiell drei Lösungen denkbar.

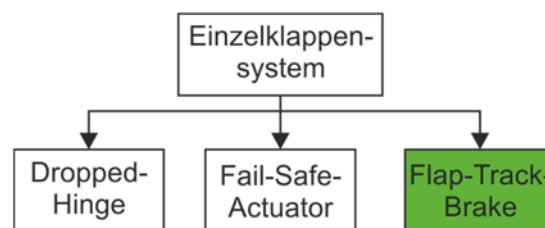


Abbildung 4-3: Lösungsansätze zur Umsetzung von Einzelklappensystemen

Die verschiedenen Lösungsansätze sollen im Folgenden kurz erläutert werden.

Die Verwendung eines anderen Führungsmechanismus, wie zum Beispiel eine Drehgelenks-Kinematik (engl.: *Dropped Hinge*), stellt eine umsetzbare Alternative dar und findet bereits beim A350-Programm Verwendung (LULLA, 2011). Für das Ziel-Landeklappensystem des A320 kann dies jedoch auf Grund von Randbedingungen bezüglich Struktur und Betätigungskräften ohne einen vollständigen Neuentwurf des Flügels als nicht zielführend angesehen werden.

- Ein Einsatz neuartiger Komponenten (*Dual-Load-Path-Actuators*), um den Fehlerfall konstruktiv auszuschließen, wird aktuell in verschiedenen Forschungsvorhaben untersucht. Es ist jedoch mit erheblichem zusätzlichem Gewicht der Komponenten der Fail-Safe-Actuators zu rechnen. Des Weiteren stellt der Bauraum des aktuellen Flügeldesigns eine Beschränkung für diesen

Lösungsansatz dar und es liegen noch Unsicherheiten gerade im Bereich der Machbarkeit von rotatorischen Aktuatoren vor.

- Der Einsatz einer FTB stellt für das zu untersuchende Ziel-Landeklappensystem mit hoher Wahrscheinlichkeit eine deutlich effizientere Lösung dar. Dies ist neben einem geringeren Systemgewicht vor allem dadurch begründet, dass die Flap-Track Kinematik (im Gegensatz zur Dropped-Hinge-Kinematik) eine Fowler-Bewegung mit erheblich verbesserten aerodynamischen Eigenschaften ermöglicht.

5 Erzielte Ergebnisse

Im Folgenden werden die erzielten Ergebnisse der einzelnen Arbeitsinhalte beschrieben.

5.1 Anforderungsanalyse

Zu Beginn des Projekts wurden die Anforderungen analysiert und die Randbedingungen definiert.

Analyse der Kinematik

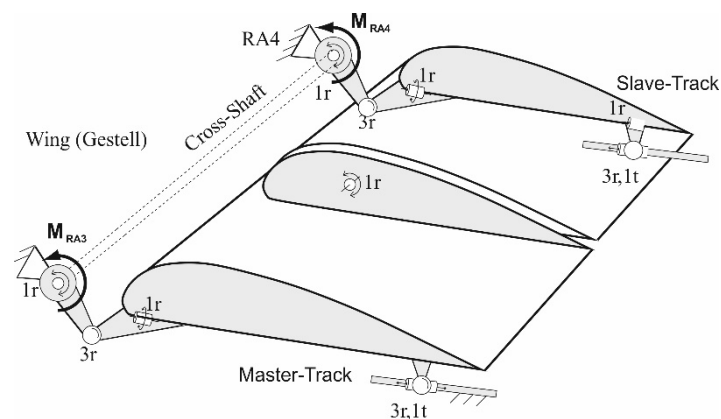


Abbildung 5-1: Darstellung der Gelenke mit entsprechenden Freiheitsgraden

Das in Abbildung 5-1 dargestellte System zeigt eine vorläufige Definition des Zielsystems bezüglich der verwendeten Gelenke und Freiheitsgrade. Für das Verständnis des Verhaltens eines Einzelklappensystems ist es wichtig zu verstehen, welche Freiheitsgrade das System im nominalen Zustand hat und wie sich diese im Fehlerfall verändern. Ein Klappenmechanismus mit zwei Führungsmechanismen ist durch Master- und Slave-Track zu lagern (siehe Abbildung 5-1) [3]. Der Slave-Track erlaubt

dem Flap eine zusätzliche Bewegung in spannweiger Richtung. Somit können Fertigungstoleranzen ausgeglichen werden und ein Blockieren des Systems verhindert werden.

Die Berechnung der Freiheitsgrade für das, in Abbildung 5-1 dargestellte, Beispielsystem ergibt:

$$n_{dof} = 6 \cdot (n_k - 1) - 6 \cdot g + \sum_1^g f$$

$$n_{dof} = 6 \cdot 7 - 6 \cdot 10 + 20 = 2$$

f – Anzahl der Freiheitsgrade
 g – Anzahl der Gelenke
 n – Anzahl der Körper

Das dargestellte System hat zwei Freiheitsgrade. Es ist hier zu beachten, dass der Klappenkörper als Annahme durch zwei Körper, die mit einem Drehgelenk verbunden sind, nachgebildet ist. Würde es sich um einen starren Klappenkörper handeln, hätte das Gesamtsystem einen Freiheitsgrad von eins. Es wäre theoretisch noch lauffähig, die Winkel der Antriebshebel wären jedoch voneinander abhängig. Bei Simulationen könnten geringe Abweichungen der Antriebshebel zum Abbruch der Simulation führen.

Im weiteren Projektverlauf ist vorgesehen, den Klappenkörper durch ein flexibles Balkenmodell mit realistischen Körpereigenschaften nachzubilden. Somit werden in diesem Fall weitere Freiheitsgrade in das System eingebracht und ein blockieren der Mechanik verhindert.

Luftlasten und Belastungen des Carriages

Zur Festlegung der auf den Klappenkörper wirkenden Luftlasten wurden, basierend auf interne Erfahrungen des Instituts für Flugzeug-Systemtechnik, sinnvolle Annahmen getroffen. Die Belastungswerte liegen sowohl für die innere als auch für die äußere Klappe vor und stehen in direkter Abhängigkeit zum Klappenwinkel.

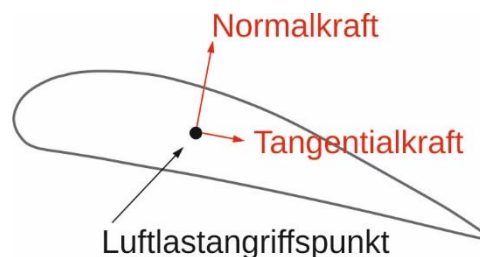


Abbildung 5-2: Prinzipielle Aufteilung der Luftlasten

Die Kräfte haben, bezogen auf den Klappenkörper, eine tangentielle und normale Wirkrichtung (siehe Abbildung 5-2).

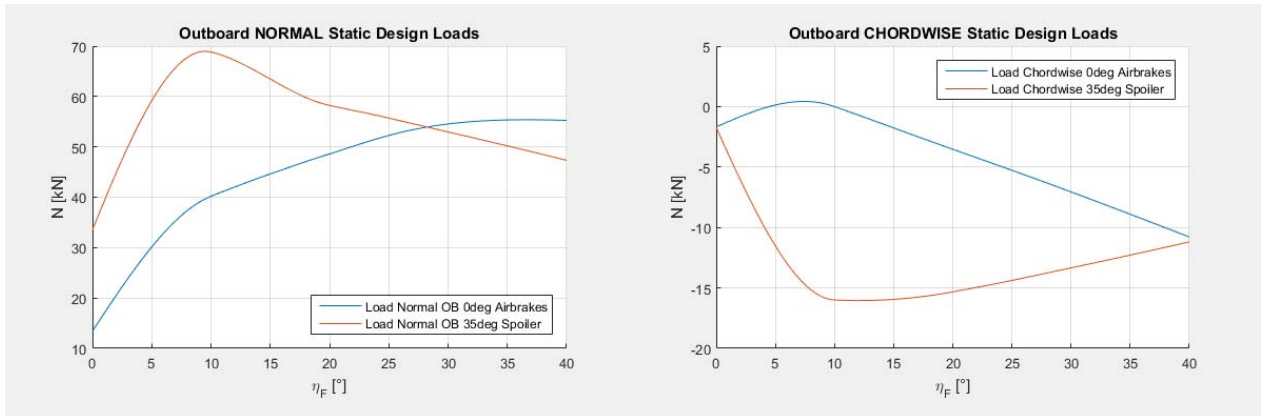


Abbildung 5-3: Normale und tangentielle Luftlasten über den Ausfahrwinkel in Abhängigkeit des Spoilerausschlag

Die Belastungswerte liegen digital vor und sind für die Verwendung in Simulationsmodellen vorbereitet (siehe Abbildung 5-3).

Belastung des Carriages

Die Belastungsgröße des Carriages hängt in einer ersten Näherung, neben den Luftlasten, unter anderem auch von der Steigung des Tracks ab.

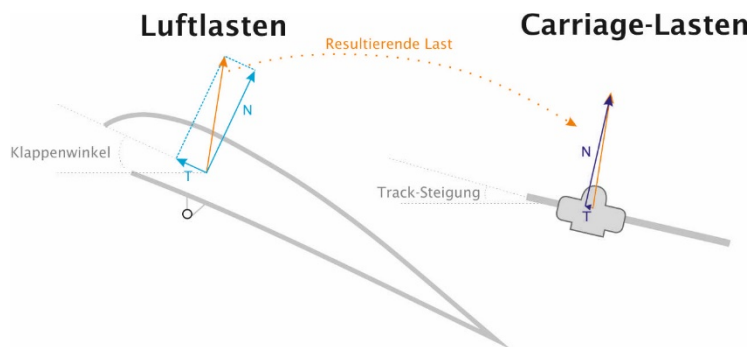


Abbildung 5-4: Umrechnung von Luftlasten zur Belastung des Carriages

Wie beispielhaft in Abbildung 5-4 gezeigt wird, führt die Steigung des Tracks dazu, dass die Luftlasten transformiert werden müssen, um in erster Näherung Rückschlüsse auf die Carriage-Belastung im Fehlerfall ziehen zu können. Für einen Bremsmechanismus ist dabei die tangentielle Belastung wichtig, da diese im Fehlerfall aufgenommen werden muss. Normale Lasten werden durch die Lagerrollen des Carriages aufgenommen.

Diese Überlegungen führten zu dem in Abbildung 5-5 dargestellten Belastungsverlauf in tangentialer Wirkrichtung. Dabei ergab sich eine maximale Last infolge von Luftlasten von **ca. 6.8 kN**. Es ist bei der Entwicklung einer FTB auch darauf zu achten, dass sich die Wirkrichtung der tangentialen Last bei einem Klappenwinkel von ca. 18° ändert.

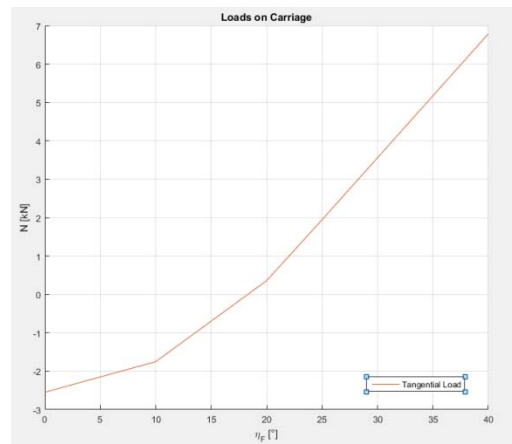


Abbildung 5-5: Vorläufige tangentielle Last aufgrund von Luftlasten auf den Mechanismus

Im weiteren Projektverlauf ist mit Hilfe der Mehrkörpersimulation eine genauere Aussage über die Belastungen des Carriages im Fehlerfall möglich.

Fehlerszenarien

Die FTB wäre ein wichtiger Bestandteil der Sicherheitskette eines Einzelklappensystems mit Track-Carriage Kinematik. Ein Verlust einer Landeklappe kann in der Regel nicht durch andere Steuerflächen ausgeglichen werden. Grundsätzlich darf ein einzelner mechanischer Fehler nicht zu einem Verlust einer Landeklappe führen. Es benötigt strukturelle Redundanzen, um einen einfachen mechanischen Fehler absichern zu können. Eine solche Redundanz kann auf drei Wegen realisiert werden:

- Aufbau von Strukturelement in **Differentialbauweise**, bei der das Bauteil selbst mehrere Lastpfade zur Verfügung stellt.
- **Redundante Lastpfade**, die nur im Fehlerfall aktiviert werden (z.B. Interconnection-Strut).
- **Sicherheitseinrichtungen**, welche nach einem Fehler aktiv eingreifen und die Systemintegrität wahren/wiederherstellen (z.B. Wing-Tip Brake).

Die Grundidee der FTB ist hier, abhängig von der Ausführung, in Kategorie zwei oder drei einzugliedern.

Je nach Ausführung des Transmissionsmodells können verschiedenen Fehler zu einem **Klappenschräglauf** oder einer **Asymmetrie** zwischen den Flügelhälften führen (siehe Abbildung 5-6). Im Allgemeinen zählen dazu alle Fehler, welche zu einer freilaufenden Abtriebsstation führen. Ursachen können sein:

- Ein **Bruch** der **Drive Strut** (Antriebsstrebe),
- Ein **Fehler im Aktuator** (z.B. Bruch der Planetenräder) oder
- Ein **Fehler/Bruch** in der **Transmission** (je nach Auslegung der Sicherheitseinrichtungen).

Die FTB muss in allen Fällen die maximal möglichen Lasten an der fehlerbehafteten Abtriebsstation aufnehmen können. Untersuchungen an Simulationsmodellen sollen dazu dienen, die maximalen Belastungen zu ermitteln, aus denen nachfolgend die Auslegungslasten abgeleitet werden.

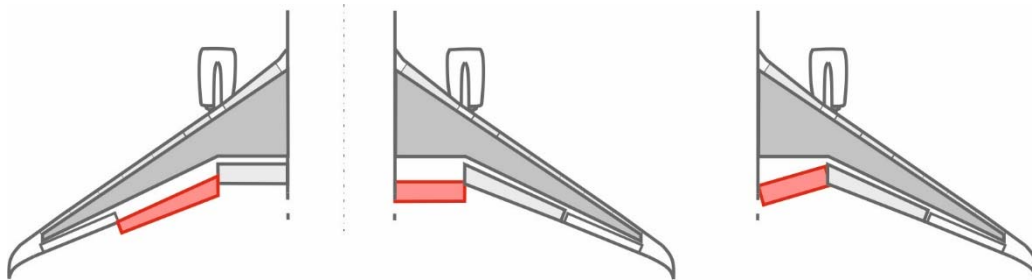


Abbildung 5-6: Mögliche Fehlerfälle von Einzelklappensystemen (links: Asymmetrie; rechts: Klappenschrägstellung)

Zuverlässigkeit

Es muss sichergestellt sein, dass die FTB nicht im fehlerfreien Systemzustand auslöst. Somit eintretende Beeinträchtigungen für die Sicherheit und operationelle Verfügbarkeit eines Flugzeuges müssen verhindert werden.

Jedoch muss im Fehlerfall ein sicherer Bremsvorgang unter allen denkbaren äußeren Umgebungsbedingungen gegeben sein. Umweltbedingungen in dem ein Flugzeug eingesetzt wird sind sehr extrem. Besonders Situationen in denen Vereisungen oder Verschmutzungen entstehen können, beeinträchtigen das Bremsverhalten. Sehr heiße Umgebungstemperaturen können im Gegensatz zu einem zu frühen aktivieren der FTB führen. Es muss somit ein Mechanismus entwickelt werden, welcher unabhängig von Temperatur und Verschmutzungen zuverlässig ist.

Detektion einer ausgelösten FTB

Im operativen Betrieb eines Flugzeuges ist es wichtig zu erkennen, wann und welche FTB ausgelöst wurde. Dabei können mithilfe von Simulationen im weiteren Projektverlauf verschiedenen Konzepte und Szenarien untersucht werden. Diese sind unter anderem:

- Ein **manueller Indikator**, welcher an der FTB anzeigt, dass diese aktiviert wurde oder
- Ein **elektrisches, auf Sensoren basiertes System**, welches es dem Piloten und Instandhaltungspersonal ermöglicht über eine Aktivierung informiert zu werden. Dabei ist noch zu klären, ob über die Detektion eines Klappenschräglauflaufes Rückschlüsse auf eine Aktivierung der FTB gezogen werden können oder ob Sensoren direkt an der FTB notwendig sind, welche die entsprechende Auslösung erkennen.
- Eine **indirekte Detektion** basiert auf der Erkennung eines Fehlers durch die Auswertung von Parametern anderer Systeme. So kann zum Beispiel durch ein erhöhtes Motormoment auf einen Klemmfall oder eine ausgelöste FTB geschlossen werden

5.2 Konzeptentwicklung

Nach der Ermittlung der Randbedingungen wurden verschiedene Konzepte zur technischen Realisierung entwickelt. Im Allgemeinen bestehen zwei Möglichkeiten zur Umsetzung. Der aktive Teil des Sicherungsmechanismus kann entweder in den Carriage oder in den Track integriert werden. Im Folgenden werden verschiedene Konzepte für beide Möglichkeiten aufgezeigt.

Konzept C1 – Zahnradarretierung

Das Konzept Zahnradführung (siehe Abbildung 5-7) basiert auf dem Wirkprinzip des Formschlusses. Der Carriage wird arretiert indem die Führungszahnräder, welche sich mit der Zahnführung am Carriage im Eingriff befinden, blockiert werden. Die Zahnräder der Zahnradführung sind durch lebensdauergeschmierte und beidseitig abgedichtete Rillenkugellager auf den Führungsachsen des Carriage gelagert und übertragen somit keine Torsionsmomente. Die Zahnräder befinden sich stets mit den, im Track montierten, Zahnstangen im Eingriff (siehe Abbildung 5-8). Im Nominalfall wird durch die Zahnradführung keine Kraft aufgenommen oder übertragen.

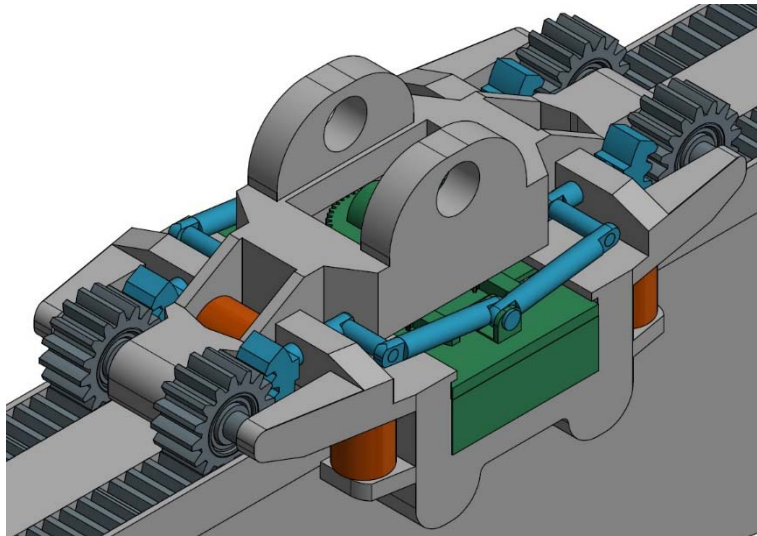


Abbildung 5-7: Konzept mit Zahnradarretierung

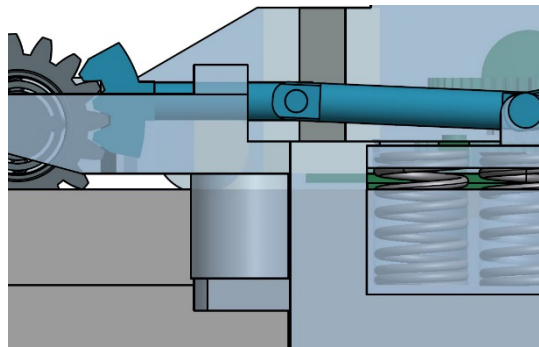
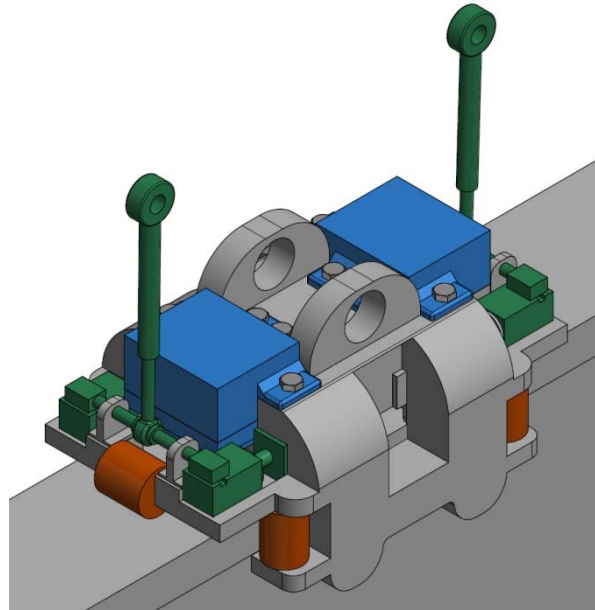


Abbildung 5-8: Funktion des Arretierungsmechanismus

Konzept C2 – Bremse

Das Konzept 2 (siehe Abbildung 5-9) basiert auf dem Wirkprinzip des Kraftschlusses. Durch Federpakete werden zwei Bremsklötze von oben auf den Track gepresst und arretieren diesen durch die auftretenden Reibkräfte.

**Abbildung 5-9: Konzept 2 – Bremse**

Bei diesem Konzept ist die Herausforderung die notwendige Reibkraft unter allen Umweltbedingungen zur Verfügung zu stellen. Als besonders kritisch dürften dabei Vereisungen und sonstige Einflüsse sein, welche den Reibbeiwert verringern. Erste grobe Überschlagsrechnungen zur benötigten Anpresskraft ergaben:

$$F_R = \mu_R \cdot F_N$$
$$F_N = \frac{F_R}{\mu_R} = \frac{6,8kN}{0,1} = \mathbf{68kN}$$

Eine Einordnung der Anpresskraft erfolgt weiter unten in diesem Kapitel.

Konzept C3 – Blockageklotz

Das Konzept 3 (siehe Abbildung 5-10) beruht auf dem Wirkprinzip des Formschlusses. Durch das Ausfahren des Blockageblocks wird ein Formschluss mit den am Track montierten Blockagestangen hergestellt. Dies verhindert die Verfahrbewegung des Carriage.

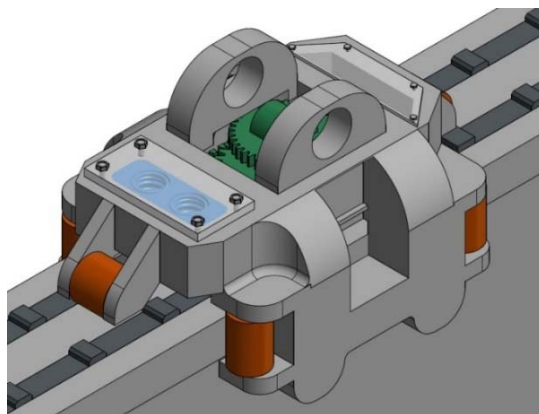


Abbildung 5-10: Konzept 3 - Blockage der Verfahrbewegung

Konzept T1 - Mechanische Haltebremse

Grundidee beim Konzept der mechanischen Haltebremse ist die Arretierung mittels Reibschluss. Dazu müssen Reibbeläge an eine Bremsplatte gedrückt werden. Abbildung 5-11 zeigt eine Darstellung der Konzeptidee.

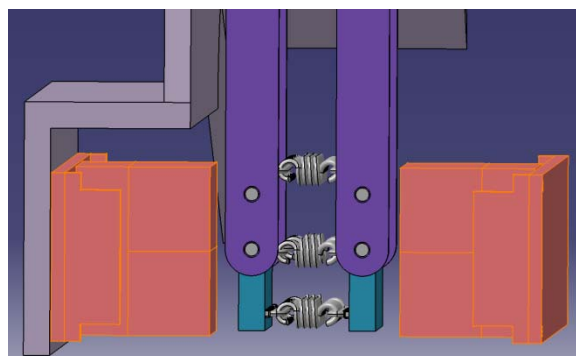
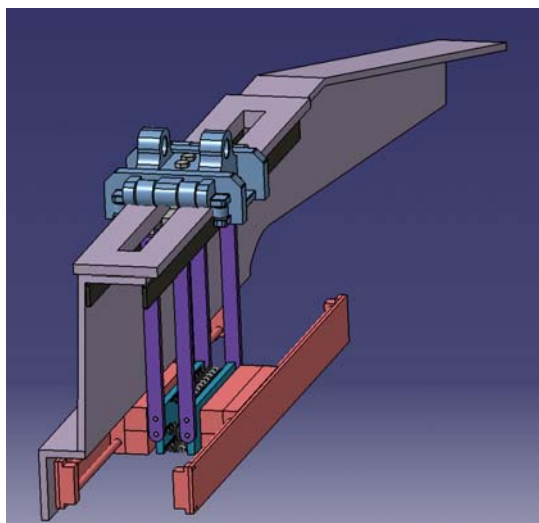


Abbildung 5-11: Konzept - Mechanische Haltebremse

Die Konzeptvariante Mechanische Haltebremse besteht im Wesentlichen aus den vier Elektromagneten, den zwei Bremsbelägen mit der dazugehörigen Bremsplatte und Zug- und Druckfedern. Im Nominalfall werden die Elektromagnete bestromt, sodass die ferromagnetische Platte an die Magnete gezogen wird und somit die Bremsbeläge von den Bremsplatten löst. Der Carriage kann frei auf dem Track verfahren.

Zur sicheren Bereitstellung der hohen Bremskräfte, auch bei reduziertem Reibkoeffizienten (z.B. Vereisung, Öl, usw.), muss eine Vielzahl von Druck- und Zugfedern verwendet werden. Zum Lösen der Bremse ist der Einsatz von Elektromagneten notwendig, welche mit steigen-

der Leistungsfähigkeit an Gewicht und Größe zunehmen. Diese müssen zudem über die gesamte Verfahrstrecke die Kräfte aufbringen, sodass der Einbau von Führungsschienen nötig ist. Dies führt dazu, dass der Bauraum nicht eingehalten werden kann.

Insgesamt ist ein großer systemtechnischer Aufwand notwendig, welcher zudem die Montierbarkeit komplex gestaltet.

Konzept T2 - Zahnriementrieb

Bei der Konzeptvariante Zahnriementrieb (siehe Abbildung 5-12) wird die lineare Bewegung des Carriage über den Zahnriementrieb in eine rotatorische Bewegung umgewandelt und treibt damit die Welle an. Zur Verringerung des dort anliegenden Drehmomentes wird eine Übersetzung benötigt um die benötigte Bremskraft zu reduzieren, da die Bremse sonst den verfügbaren Bauraum überschreitet. Die Bremse ist in einer *power-off* Bauweise ausgeführt, sodass sich diese erst durch Zuführung von elektrischer Energie verfahren lässt.

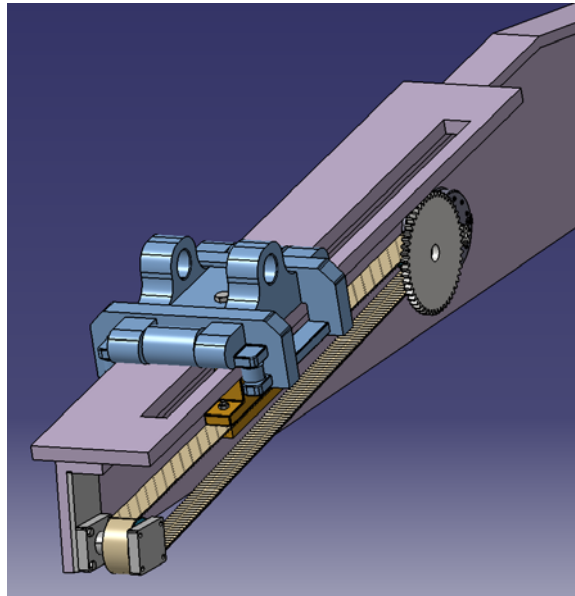


Abbildung 5-12: Konzeptvariante – Riementrieb

Für die Detektion der Bewegung des Carriage wird an der Zahnscheibe ein Sensor für Drehwinkel montiert. Die Sensorsignale können nach der Auswertung zur Aktivierung der Bremse genutzt werden.

Die Krafterzeugung innerhalb der Bremse ist einfach sicherzustellen, da es sich bei der Bremse an sich um ein gekapseltes System handelt, welches durch das Gehäuse von Umwelteinflüssen abgeschirmt ist. Getriebestufen sind notwendig, um das Bremsmoment zu reduzieren. Somit kann die Größe und das Gewicht der Bremse verringert werden. Jedoch führen die Zahnräder zu einer Steigerung der Systemkomplexität und Nachteilen in der Montage. Zudem muss der Zahnriemen über einen langen Zeitraum unter Spannung gehalten werden beziehungsweise nachgespannt werden. Dies kann zu Kosten in der Instandhaltung führen.

Konzept T3 – Spindel

Bei dieser Konzeptvariante wird die Linearbewegung des Carriage über eine Kugelgewindespindel in eine rotatorische Bewegung umgewandelt. Die Rotation der Spindel wird über eine elektromagnetische Haltebremse fixiert um den Carriage am Track zu stoppen.

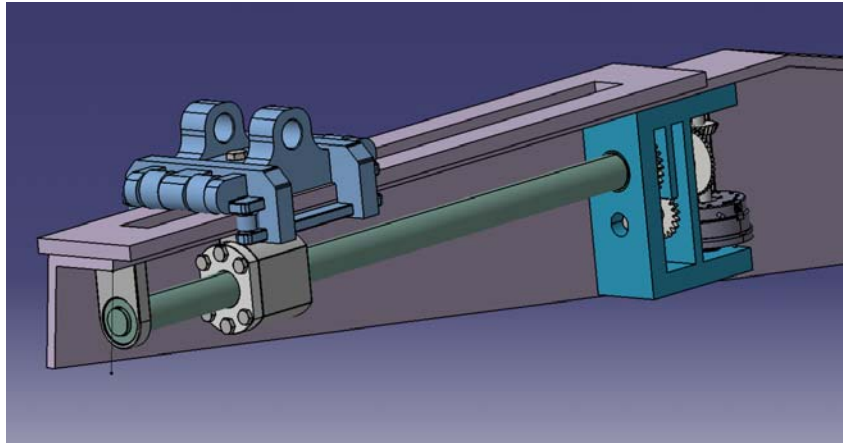


Abbildung 5-13: Konzeptvariante – Spindel

Für die Detektion der unkontrollierten Bewegung des Carriage wird am unteren Ende der Spindel ein Sensor für Drehwinkel montiert, dessen Signalwerte für die Aktivierung der Bremse genutzt werden können.

Bewertung der Konzeptvarianten

Die Bewertung erfolgt in Anlehnung an die VDI 2225. Die festgelegten Kriterien werden durch den Erfüllungsgrad e klassifiziert. Die Wertigkeiten werden als Punkte im Bereich von (0) bis (3) eingestuft (siehe Tabelle 5-1). Aufgrund der schwierigen Differenzierung wird der Wertungsbereich im Vergleich zur VDI 2225 um eine Wertigkeit reduziert. Für einige Kriterien kann es vorkommen, dass der Wertebereich weiter reduziert wird. Zum Beispiel, wenn nur zwei Zustände unterschieden werden können.

Tabelle 5-1: Bewertungsskala für den Erfüllungsgrad e

Wertigkeit	Bedeutung
0	ungenügend
1	schlecht
2	neutral
3	gut

Zur Bewertung der verschiedenen Konzepte wurden Bewertungskriterien identifiziert. Diese sind in Tabelle 5-2 dargestellt. Bei der Bewertung der Konzepte wurde zwischen dem Arretierungsmechanismus und dem Mechanismus zum Auslösen (bei mechanischer Auslösung) beziehungsweise zur Fehlerdetektion (bei sensorbasierter Auslösung) unterschieden.

Tabelle 5-2: Kriterien zur Bewertung der Konzeptvarianten

Arretierungsmechanismus		Auslösemechanismus/ Detektion	
AA	Fertigungsaufwand	BA	Komplexität/ Entwicklungsaufwand
AB	Wartungsaufwand/ -freundlichkeit (Test der Funktionsfähigkeit)	BB	Verfügbarkeit/ Zuverlässigkeit (Wahrscheinlichkeit des Fehlauslösens)
AC	Gewicht	BC	Bauraumbedarf
AD	Demontage nach Auslösen/ Wiederverwendbarkeit	BD	Gewicht
AE	Bauraumbedarf	BE	Wartungsaufwand/ -freundlichkeit (Test der Funktionsfähigkeit)
AF	Aufwand Krafterzeugung (z.B. modulare POB oder offene Reibbeläge)	BF	Mögl. Weitere Funktionalität ja (2) oder nein (0)--> in Gesamtpunktzahl miteinbeziehen! - Trennung Funktion Detektion/ Auslösen (aktiv/ passives setzen)
AG	Wahrscheinlichkeit Systembeschädigung durch Arretieren (gering 3 ; hoch 0)		

Die Gewichtung der einzelnen Kriterien erfolgt mittels Präferenzanalyse. Dabei werden über eine Gewichtungsmatrix die einzelnen Bewertungskriterien einander gegenübergestellt und im direkten Vergleich miteinander verglichen, um das dominierende Kriterium zu bestimmen. Die Anzahl jedes Kriteriums in der entsprechenden Zeile ergibt, im Verhältnis zur Gesamtsumme, den prozentualen Gewichtungsfaktor g des jeweiligen Kriteriums. Eine beispielhafte Präferenzanalyse ist in Tabelle 5-3 dargestellt. Dabei sind die Beispielkriterien der Einfachheit mit A bis C benannt.

Tabelle 5-3: Verdeutlichung Prinzip der Präferenzanalyse

	A	B	C	D	Anzahl	Gewicht in [%]
A	A	A	C	A	3	30
B	A	B	C	B	2	20
C	C	C	C	C	4	40
D	A	B	C	D	1	10

Die Präferenzanalyse wurde von verschiedenen Mitarbeitern des Inst. für Flugzeug-Systemtechnik durchgeführt. Im Anschluss wurden die verschiedenen Teilgewichtungen zu einer Gesamtgewichtung zusammengefasst. Das Ergebnis ist in Tabelle 5-4 abgebildet.

Tabelle 5-4: Gewichtung der Kriterien zur Konzeptbewertung

Kriterium	Gewicht [%]
AA	5,4
AB	19,6
AC	12,5
AD	10,7
AE	10,7
AF	17,9
AG	23,2
BA	7,1
BB	23,8
BC	14,3
BD	7,1
BE	26,2
BF	21,4

Die drei Kriterien, in absteigender Reihenfolge, mit der höchsten Gewichtung, in Bezug auf den Arretierungsmechanismus sind:

- Wahrscheinlichkeit der Systembeschädigung
- Wartungsaufwand/ -freundlichkeit
- Aufwand der Krafterzeugung

Die drei Kriterien, in absteigender Reihenfolge, mit der höchsten Gewichtung, in Bezug auf den Auslösemechanismus/ Detektion sind:

- Wartungsaufwand
- Verfügbarkeit/ Zuverlässigkeit
- Möglichkeit zur Nutzung einer erweiterten Funktionalität

Auf Grundlage der beschriebenen Erfüllungsgrade, Kriterien und Gewichtung wurden die sechs Konzepte global bewertet. Die Ergebnisse wurden in einer Bewertungsmatrix festgehalten. In Tabelle 5-5 sind die Ergebnisse der Konzeptevaluation als Auszug dargestellt. Dabei ist festzustellen, dass die Konzepte des Braking Carriage

insgesamt deutlich schlechter bewertet sind als Konzeptvarianten, welche eine Integration in den Track vorsehen. Hauptursache ist die Bereitstellung hoher Arretierungskräfte in einem sehr begrenzten Bauraum.

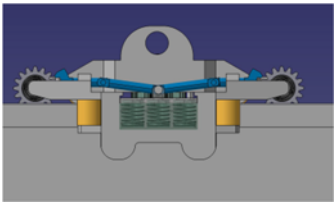
Eine Integration in den Track ermöglicht eine einfachere Versorgung des Systems mit Energie. So kann, im Gegensatz zum Braking Carriage, eine elektrische Energieversorgung bereitgestellt werden, welche den Einsatz einer elektro-mechanischen Bremse ermöglicht. Zudem ist es möglich Sensorik in den Track zu integrieren. Somit kann auf einen reinen mechanischen Auslösemechanismus verzichtet werden. Das Auslösen der Arretierung erfolgt nun über die Auswertung der Sensorsignale und ein nachgelagertes Control- und Monitoringverfahren. Dies ermöglicht es auch die FTB als reguläre, aktive Systembremse zu nutzen. Infolge dessen kann es unter Umständen zum Wegfall von Komponenten (Bremsen) im Transmissionssystem kommen.

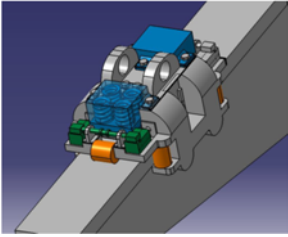
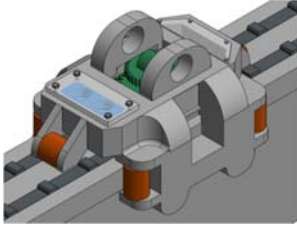
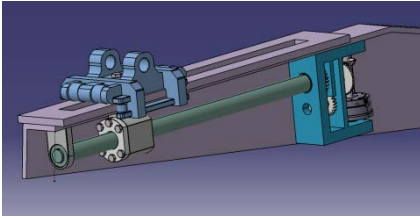
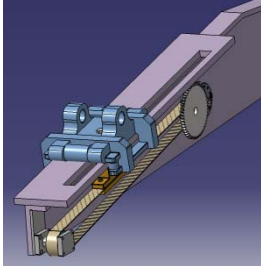
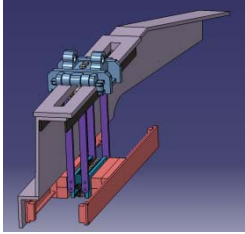
Als bestbewertetes Konzept ging die Variante mit einer in den Track integrierten Spindel hervor. Das Konzept hat verschiedene Vorteile. Unter anderem sind diese:

- Einfache Detektion, da die Bewegung der Spindel am Spindelende über die Rotation gemessen werden kann.
- Verringerung des benötigten Bremsmoments durch Spindelsteigung
- Bremse kann gekapselt, von der Umwelt abgeschlossen installiert werden
- Schnelle Bremszeit
- Das Verschleißverhalten von Kugelgewindetrieben ist gut untersucht und bekannt

Im weiteren Projektverlauf wird dieses Konzept weiter detailliert und untersucht. Dazu zählt eine modellbasierte Betrachtung der Randbedingungen, eine Analyse des Potentials einer FTB im Vergleich zur Dropped Hinge Kinematik und Dual-Loadpath Aktuatoren und eine Untersuchung des gesamten Konzepts am Prüfstand. In den folgenden Abschnitten wird auf diese Themen eingegangen.

Tabelle 5-5: Konzeptbewertung FTB

	Konzeptvariante	Bewertung
Braking Carriage	Konzept C1 – Zahnräder 	0,53

	Konzept C2 – Bremse		0,58
	Konzept C3 – Blockieren		0,54
Braking Track	Konzept T1 – Spindel		0,9
	Konzept T2 – Riemen		0,86
	Konzept T3 – Bremse		0,65

Simulationsmodell eines Einzelklappensystems mit Track-Linkage Kinematik

Ziel des Simulationsmodells soll ein tiefgehendes Verständnis eines Einzelklappensystems mit Track-Linkage Kinematik sowie die Bewertung des Einflusses der FTB auf Gesamtsystemebene sein. Als Referenzsystem wurde dabei ein Hinterkantensystem eines Airbus A320 gewählt. Die Geometrien orientieren sich an der äußeren Landeklappe, da diese die höchst belastete Landeklappe darstellt.

Mit dem daraus abgeleiteten Simulationsmodell können die Anforderungen und Belastungen des gesamten Systems, als auch an die FTB, genauer ermittelt werden. Um eine möglichst große Abbildungsgenauigkeit zu erreichen setzt sich das Simulationsmodell aus zwei Hauptkomponenten zusammen. Die gesamte Kinematik wird als Mehrkörpermodell in MSC.Adams modelliert. Das Transmissionssystem ist in MATLAB Simscape modelliert (siehe Abbildung 5-14). Für jedes Teilmodell ergeben sich somit verschiedene Anforderungen, welche auch in das Modell implementiert wurden.

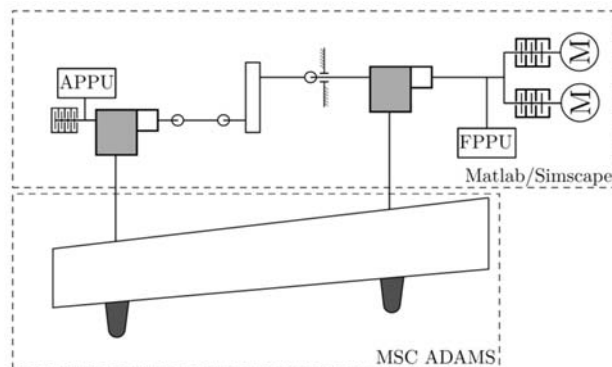


Abbildung 5-14: Darstellung der Grenzen zwischen den einzelnen Simulationswerkzeugen

Mehrkörpermodell:

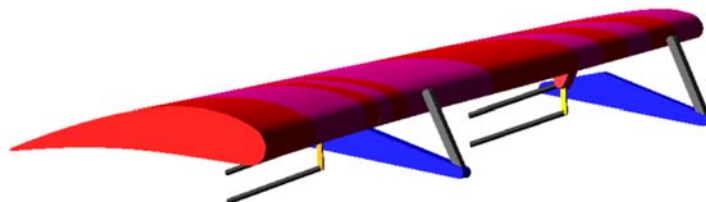


Abbildung 5-15: Mehrkörpermodell der Einzelklappe mit Track-Linkage Kinematik

- Bei dem Aufbau des Mehrkörpermodells ist auf einen kinematisch korrekten Aufbau zu achten.
- Der Klappenkörper soll flexibel modelliert werden. Dies ermöglicht eine genauere Abbildung der Fehlerfälle.

- Um ein korrektes Verhalten im Fehlerfall zu erzeugen, soll das Mehrkörpermodell mit Luftlasten eines Referenzflugzeuges beaufschlagt werden. Dabei sind die maximal auftretenden Luftlasten auszuwählen.

Wellentransmissionsmodell:

- Zur Abbildung wichtiger Effekt soll das Modell spiel- und reibungsbehaftete Elemente enthalten.
- Zudem sind Getriebe mit einer hohen, repräsentativen Übersetzung integriert.
- Der Antrieb der Wellentransmission soll über eine vereinfachte, elektrische und redundante Antriebseinheit erfolgen.

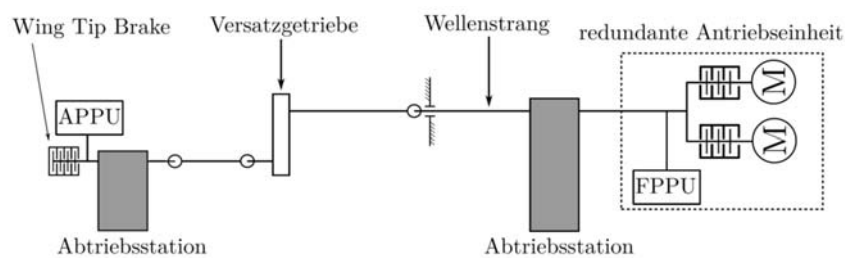


Abbildung 5-16: Schematische Darstellung der Wellentransmission des Einzelklappensystems

Beide Teilmodelle werden mittels Co-Simulation zu einem Gesamtmodell gekoppelt (siehe Abbildung 5-17).

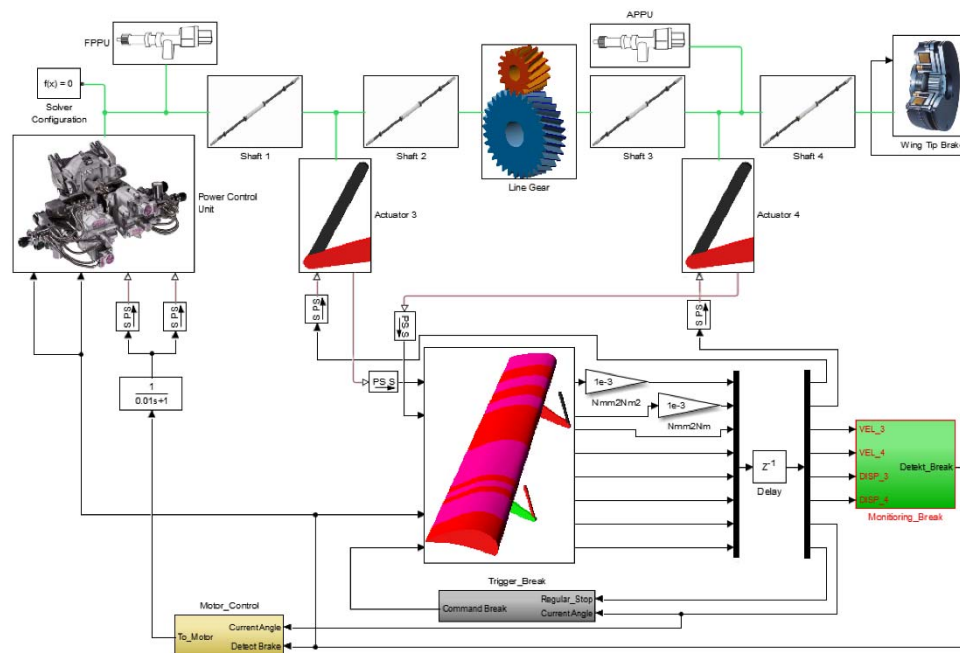


Abbildung 5-17: Gesamtmodell in MATLAB Simscape

5.3 Nutzwert- und Potentialanalyse

Ziel der Nutzwert- beziehungsweise Potentialanalyse war es, zu überprüfen ob ein Einzelklappensystem mit Track-Linkage Kinematik und integrierter Flap Track Brake gegenüber anderen Umsetzungsmöglichkeiten wettbewerbsfähig ist. Zu den betrachteten Umsetzungsmöglichkeiten eines Einzelklappensystems gehören, neben der FTB:

- Die Verwendung einer alternativen Kinematik, der sogenannten Dropped Hinge Kinematik. Diese Kinematik ist die Einzige, welche im Fehlerfall in ein bestimmtes System zurückfällt [3]. Sie wird unter anderem im Airbus A350 eingesetzt.
- Verwendung von Dual-Loadpath Aktuatoren und sonstigen Fail-Safe Komponenten.

Es wurde eine Bewertung in Anlehnung an die VDI 2225 durchgeführt. Die verschiedenen Bewertungskriterien und deren Gewichtung sind der Tabelle 5-6 zu entnehmen.

Tabelle 5-6: Ergebnisse der Präferenzanalyse der Potentialbewertung

Kriterium	Gewichtung
Masse des Gesamtsystems	24
Lasten auf Strukturanbindung	19
Verfügbarkeit	22
Erwartete Entwicklungskosten (C& M-Aufwand)	7
Einfluss der Aerodynamik auf Betriebskosten	14
Wartungsaufwand	14

Das Kriterium der Masse des Gesamtsystems ist am stärksten gewichtet. Dies deckt sich mit den allgemeinen Leichtbauanforderungen im Flugzeugbau. Das Sicherstellen einer ausreichenden Verfügbarkeit ist als zweitstärkstes Kriterium gewichtet worden. Das Kriterium mit der geringsten Gewichtung ist der erwartete Entwicklungsaufwand. Dies liegt darin begründet, dass komplexe Systeme zwar teuer in der Entwicklung sind und unter Umständen viel Control- & Monitoringaufwand nach sich ziehen, sich diese Mehrkosten jedoch durch ein leistungsfähiges System über ein Flugzeugleben positiv auf die Kostenbilanz auswirken. Dazu muss das System jedoch zuverlässig und wartungsarm funktionieren. Dies wird durch eine höhere Gewichtung entsprechend berücksichtigt.

Um die Masse des Gesamtsystems und die Lasten auf die Strukturanbindung besser bewerten zu können, wurde zusätzlich zu dem in Abschnitt 0beschriebenen Simulati-

onsmodell der Track-Linkage Kinematik, ein MKS-Modell eines Systems mit Dropped Hinge Kinematik erstellt (siehe Abbildung 5-18).

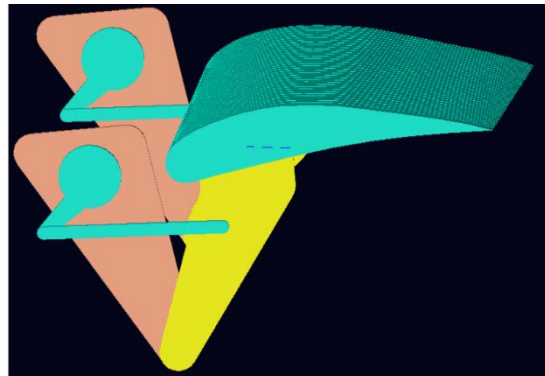


Abbildung 5-18: MKS-Modell mit Dropped Hinge Kinematik

Die, aus den beiden Simulationsmodellen identifizierten maximalen Stellasten wurden in ein FST-internes Werkzeug, dem *Rapid Design Analyzer*, übertragen. Der Rapid Design Analyzer ermittelt das Gesamtgewicht des Transmissionssystems. Das Transmissionssystem des EKS mit Dropped Hinge Kinematik ist aufgrund der deutlich höheren Stellasten schwerer als ein vergleichbares System mit Track-Linkage Kinematik. Ausgehend von den größeren Stellasten, muss die Verbindung vom Aktuator zum Flügel stärker ausgelegt sein. Dies kann zu einem schwereren Flügel führen.

Tabelle 5-7: Ergebnis der Potentialanalyse

	Dropped Hinge		Dual-Loadpath GRA		FTB		Gewichtung
	e	e*g	e	e*g	e	e*g	
Masse Gesamtsystem	2	48	0	0	2	48	24
Lasten auf Strukturanbindung/ Bauraum	2	38	3	57	3	57	19
Verfügbarkeit	2	43	3	64	2	43	21
Erw. Entwicklungskosten (C&M)/Herstellungskosten	3	21	1	7	2	14	7
Einfluss der Aerodynamik auf Betriebskostensteigerung	2	29	3	43	3	43	14
Wartungsaufwand	3	43	2	29	2	29	14
Ergebnis	0,74		0,67		0,78		

Aus Tabelle 5-7 ist das Ergebnis der Potentialanalyse zu entnehmen. Die FTB hat dabei 0,78 und die Dropped Hinge 0,74 Punkte erhalten. Eine Punktzahl von eins beschreibt die bestmögliche Bewertung. Die Potentialanalyse zeigt somit, dass die FTB im Vergleich zur DH-Kinematik wettbewerbsfähig ist. Ein System mit Fail-Safe

Komponenten, wie dem Dual-Loadpath GRA wäre, nach dieser Analyse, nicht wettbewerbsfähig. Hauptsächlich, da die Komponenten sehr komplex sind und, aufgrund der mechanischen Redundanz, ein hohes Gewicht aufweisen. Das Gesamtsystemgewicht für eine solche Konfiguration wäre fast um den Faktor zwei größer als bei dem FTB-Konzept.

5.4 Prototyp- und Prüfstandentwicklung

Ziel der Prototypen- und Prüfstandentwicklung war es, einerseits eine mögliche Realisierungsmöglichkeit des Carriages auf Basis des 3D-Drucks zu finden. Mithilfe des Prüfstands sollte das Konzept auf Komponentenebene (Spindel) auf seine Funktionstüchtigkeit überprüft werden.

Prototypenentwicklung

Durch das Ausscheiden von Airbus konnte kein physischer Prototyp entwickelt werden. Das Institut für Flugzeug-Systemtechnik hat mittels Topologieoptimierung einen virtuellen Carriage entwickelt, welcher für das beschriebene FTZB Konzept verwendet werden könnte. Dabei sollten die Anschlussmaße eines A320 Carriages nicht überschritten werden.

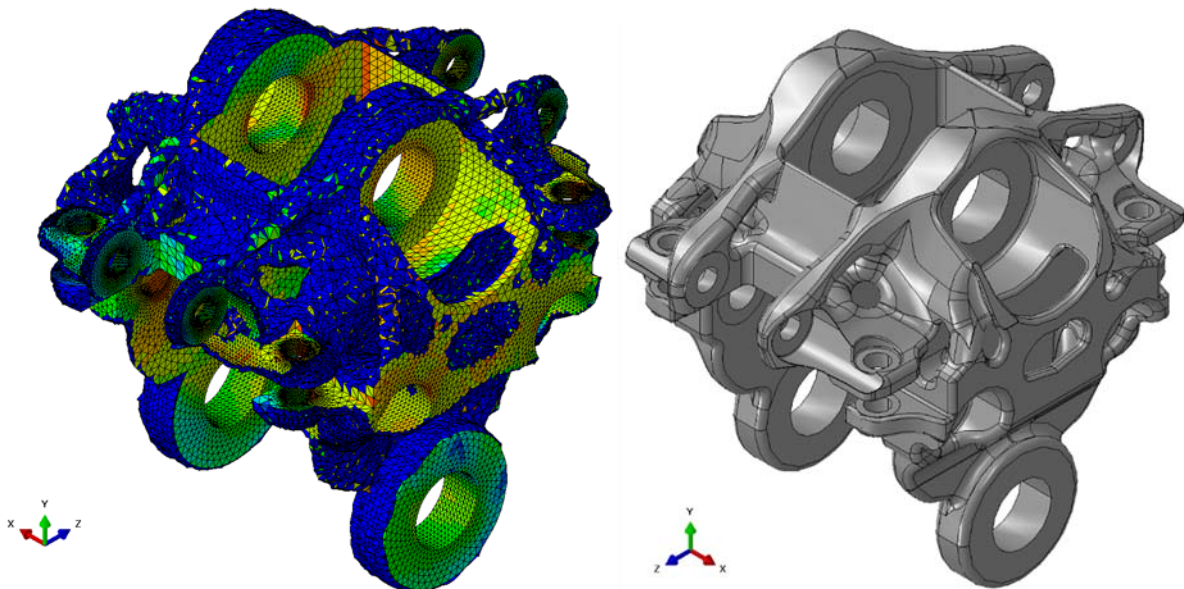


Abbildung 5-19: Modell eines topologieoptimierten Carriages

Der hier gezeigte Carriage hat ein Gewicht von 10,45 kg. Dies stellt ein erhöhtes Gewicht im Vergleich zum original Carriage (8,6 kg) dar. Jedoch muss der neuentwickelte Carriage deutlich größeren Lasten standhalten. Generell sind diese Werte nicht direkt zu vergleichen, da sowohl verschiedene Baugruppen, als auch verschiedene Carriage-Geometrien betrachtet werden. Dennoch kann beim Vergleich dieser Werte davon ausgegangen werden, dass der konstruierte Carriage eine annehmbare

Masse aufweist. Die Begründung für diese Annahme liegt in der neuartigen Funktionalität des Carriage und der dadurch veränderten Belastungssituation auf die Struktur. Aufgrund der neuartigen Belastungssituation muss der hier konstruierte Carriage zusätzlich anderen Belastungen standhalten, als der konventionelle Carriage. Trotz der viel größeren, neuen Belastungen auf den Carriage, ist die Masse des Carriage im Vergleich zur Masse des konventionellen Carriage nur wenig angestiegen. In der Topologieoptimierung hat sich gezeigt, dass zur Abstützung dieser Belastungen neue Strukturen im Bauraum des Carriage nötig sind, welche zusätzliche Masse im Bauraum bedeuten. Die zusätzlichen Schenkel für die Anbindung zur FTB sind Beispiele für entsprechende Strukturen.

Prüfstandentwicklung

Mit der Entwicklung und dem Aufbau des DSBE (*Drive-Strut Break Emulator*) Prüfstands sind folgende Untersuchungsziele verbunden:

1. **Überprüfung der prinzipiellen Funktionsfähigkeit des FTB-Konzeptes mit Spindel** – Mithilfe des Prüfstands soll das Verhalten und die Reaktionen des FTB-Konzeptes unter möglichst realen Lastbedingungen im Nominal- und Fehlerfall untersucht werden. Die sich ergebenden Ergebnisse sollen zeigen, ob das Konzept negative Eigenschaften und Verhaltensweisen aufweist, welche Einfluss auf den Einsatz hätten.
2. **Parameteridentifizierung** – Mit dem Prüfstand sollen Parameter für das Simulationsmodell identifiziert bzw. überprüft werden. Diese sind unter anderem:
 - Trägheit (einzelne Komponenten sowie Gesamtsystem),
 - Reibung,
 - Systemspiel und
 - Steifigkeit.

Die ermittelten Werte können dann in Punkt 3 integriert werden.

3. **Teil-/Validierung von Simulationsmodellen und deren Ergebnissen** - Neben der generellen Überprüfung der Funktionsweise des Konzeptes am Prüfstand besteht der zweite Teil des hybriden Testens in der Erstellung und Untersuchung von Simulationsmodellen. Das Verhalten des Systems und die Ergebnisse des Simulationsmodells müssen einer Validierung unterzogen werden. Diese kann mit Hilfe des Prüfstands und den generierten Messwerten erfolgen. Mit einem validierten Modell ist es möglich, Szenarien virtuell zu testen, welche am Prüfstand nicht möglich wären oder zu dessen Beschädigung führten (z.B. Erhöhte Reibung durch Schmutz, variierende Spindelsteigung).
4. **Hardware-in-the-Loop Kopplung mit oder ohne Spindel im Eingriff** – Unabhängig von der FTB kann der Prüfstand am FST zur Einbindung in das vir-

tuelle Forschungsflugzeug genutzt werden. Dies kann wie mit dem MEMAP-Prüfstand demonstriert erfolgen.

Testszenarien und Anforderungen

Um die verschiedenen Betriebsbedingungen einer FTB und die oben erwähnten Ziele untersuchen zu können, muss der Prüfstand die folgenden **Konfigurationsmöglichkeiten** bieten bzw. Anforderungen erfüllen:

- Geometrische Randbedingungen eines A320 Carriage/Track-Systems
- Einstellbare Ausfahrgeschwindigkeit und -richtungen
 - Messung der Wagenposition und Geschwindigkeit
- Variierendes Klappengewicht
 - Das Klappengewicht muss die Trägheit einer aktuellen A320 Klappe abbilden (Klappengesamtmasse 120 kg, etwa 60 kg für eine Abtriebsstation)
- Bruchemulation
 - Bruch muss bei verschiedenen Ausfahrwegen und Lasten emuliert werden können.
 - Verfügbarer Bruchweg muss mindestens 140 mm betragen.
 - Es müssen Luftlasten von 16 kN abgebildet werden können – durch die hochdynamischen Effekte treten beim Beschleunigen und Abbremsen deutlich höhere Lasten auf (etwa 35 kN).

Mit den oben erwähnten Konfigurationsmöglichkeiten sollen verschiedene Variationen von **Betriebs- bzw. Fehlerszenarien** untersucht werden. Allgemein lassen diese sich unterteilen in:

- Nominalfall,
- Bruch beim Ausfahren,
- Bruch beim Einfahren und
- (erhöhtes Schleppmoment der Spindel).

Mit den Konfigurationsmöglichkeiten kann das Systemkonzept der FTB mit Spindel intensiv getestet und überprüft werden. Zudem kann eine ausreichend große Datenbasis zur Teilvalidierung der Simulationsmodelle erstellt werden.

Konstruktion des Prüfstandes

Zur Konstruktion des DSBE-Prüfstands wurden aufgrund von Verfügbarkeiten und Kostenersparnis ausschließlich Industriekomponenten verwendet.

In Abbildung 5-20 ist das finale Konzept des DSBE-Prüfstandes abgebildet. Im Gegensatz zum Konzept im Jahresbericht 2017 wurde auf eine variable Schrägstellung des Tracks verzichtet. Dies erfolgte aus Kostengründen. Die Testergebnisse werden dadurch qualitativ nicht beeinflusst, da die Schrägstellung einen vernachlässig- und beherrschbar kleinen Einfluss auf die Systemreaktionen hat.

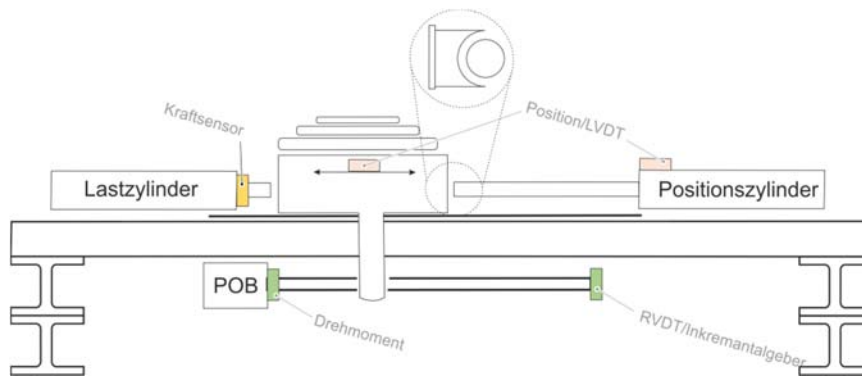


Abbildung 5-20: Finales Konzept des DSBE-Prüfstandes

Allgemeines Funktionsprinzip

Das Funktionsprinzip des DSBEs sieht vor, dass der Lastzylinder fest an dem auf zwei Schienen gelagerten Wagen befestigt ist. Der Positionszylinder ist nur im Kontakteingriff am Wagen (siehe Abbildung 5-20). Der Lastzylinder ist dabei kraftgeregelt und der Positionszylinder positionsgeregelt. Somit kann eine beliebige Belastung (entspricht dem tangentialen Anteil der Luftlast) des Wagens eingestellt werden. Im Falle einer Emulation einer freilaufenden Abtriebsstation fährt der Positionszylinder schlagartig mit maximaler Geschwindigkeit in seine Nullposition und entzieht somit dem belasteten Wagen die Kraftabstützung. Aufgrund der Kraftregelung wird der Wagen nachgeführt. Der Wagen ist mechanisch mit einer Spindel verbunden, welche wiederum an eine Bremse angeschlossen ist. Nach einer manuell einstellbaren Totzeit kann die Bremse aktiviert werden. Dadurch werden die Spindel und schlussendlich auch der Wagen arretiert. Eine ausreichend genaue Nachbildung eines Freilaufes und die darauffolgende Untersuchung der Reaktion des FTB-Systems ist somit gegeben.

Prinzipiell besteht der Prüfstand aus zwei Hauptbaugruppen:

1. **Mechanischer Aufbau** – Nachbildung des Carriage/Track Systems und Aufprägung der Nominal- und Fehlerlasten.
2. **Infrastruktur/Peripherie** – Hierzu zählt die lokale hydraulische Versorgung, welches die Lastzylinder versorgt und steuert sowie die verwendete Sensorik und Messwertauswertung

Mechanischer Aufbau

Hauptaugenmerk bei der Konstruktion des mechanischen Aufbaus war eine Geometrie zu entwerfen, welche eines Airbus A320 ähnlichen Carriage/Track-Systems ähnelt. In Abbildung 5-21 und Abbildung 5-22 sind verschiedene Ansichten des Prüf-

stands dargestellt. So ist zu erkennen, dass der Wagen auf zwei Schienen mittels vier Kugelwagen auf der Linearführung gelagert ist. Der Abstand der Schienen zueinander entspricht dem Abstand der äußeren Rollen eines A320 Carriages. In Längsrichtung entspricht der Abstand der Mittelpunkte der Kugelwagen dem Abstand der vorderen und hinteren Lagerrolle des A320 Carriages. Für die Linearführung wurden Industriekomponenten der Firma *Bosch-Rexroth* ausgewählt.

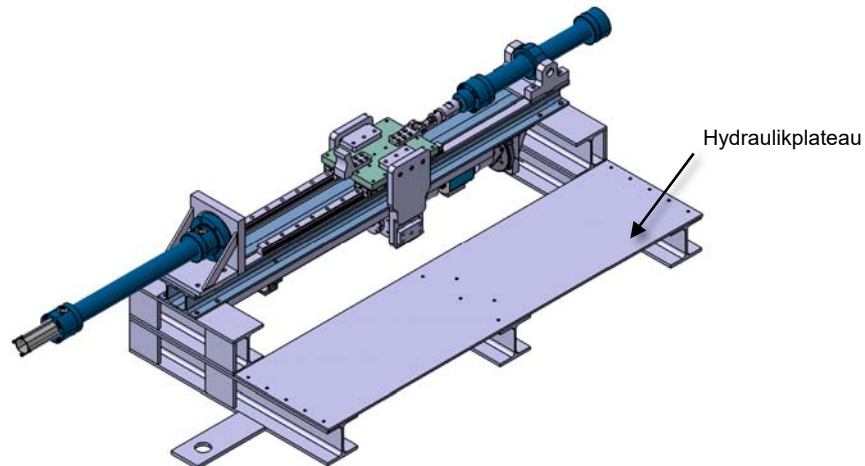


Abbildung 5-21: Gesamtübersicht DSBE Prüfstand

Wie in den Abbildungen zu erkennen ist, wurde der Carriage/Wagen nur prinzipiell, durch Verwendung von Metallplatten nachgebildet. Dies ist ausreichend um die definierten Analysen durchzuführen

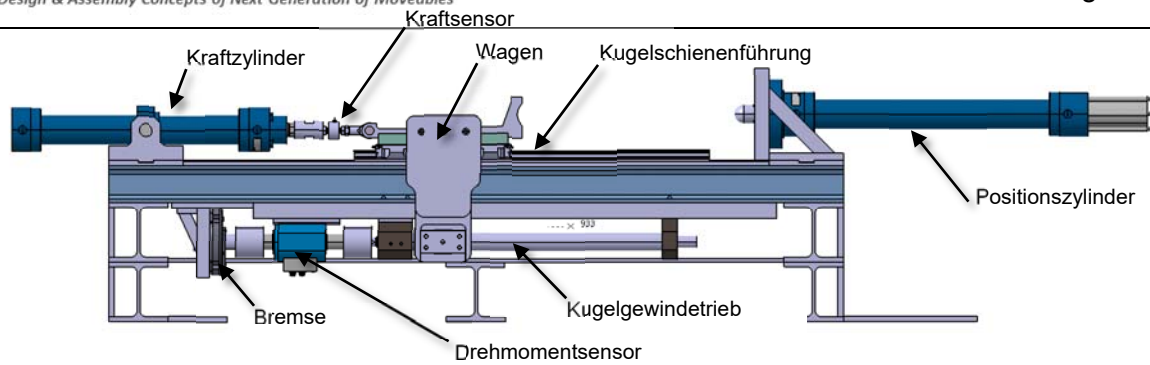


Abbildung 5-22: Seitenansicht DSBE Prüfstand

Bei der Bremse wurde auf ein Modell der Firma *Mayr* zurückgegriffen. Entgegen des theoretischen FTB-Konzepts handelt es sich hierbei nicht um eine sogenannte *power-off* Bremse (POB). Die gewählte Bremse wird bei Bestromung aktiviert (*power-on* Bremse). Die Bremse hat ein maximales Bremsmoment von 170 Nm. Aus Kostengründen konnte keine Bremse mit variablem Bremsmoment gewählt werden. Das geänderte Funktionsprinzip hat jedoch auf die Überprüfung der oben genannten Ziele keinen Einfluss. Vielmehr ist die Annahme einer POB Sicherheitsüberlegungen im realen Flugzeugeinsatz geschuldet.

Als Hauptbestandteil der FTB wurde eine Kugelumlaufspindel der Firma Bosch-Rexroth ausgewählt. Diese hat eine Gewindesteigung von $P=16$ mm/U.

In Abbildung 5-23 ist der am Institut für Flugzeug-Systemtechnik aufgebaute Prüfstand dargestellt.

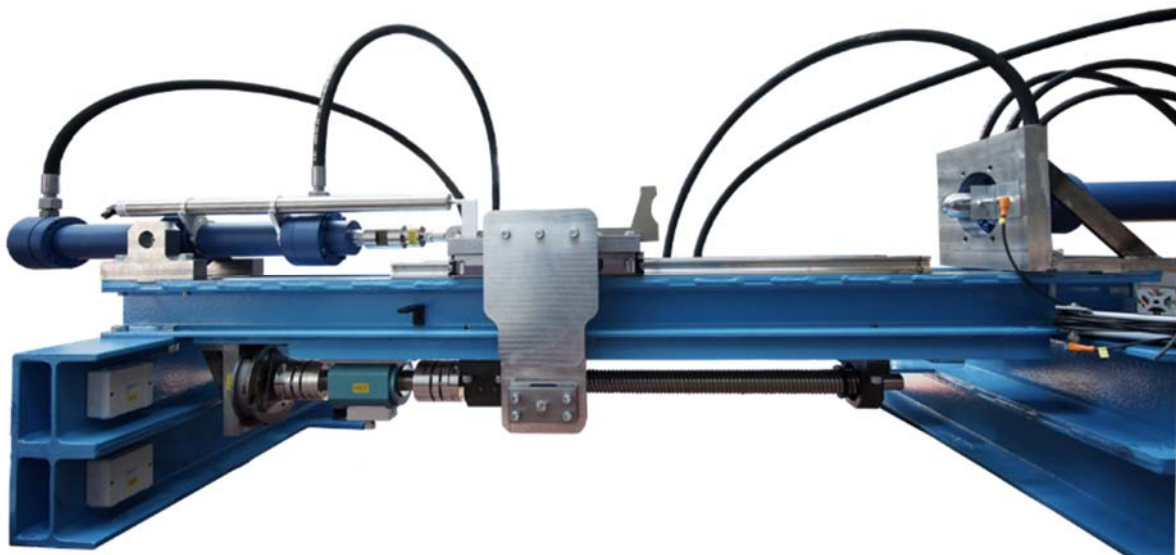


Abbildung 5-23: Aufgebauter Prüfstand

5.5 System- und Struktur-Leistungstests

Mit Hilfe des Prüfstands konnte das entwickelte Konzept zum einen auf prinzipielle Funktionstüchtigkeit (Proof-of-Concept) überprüft werden. Es stellte sich heraus, dass dieses Konzept es ermöglicht einen frei beweglichen Carriage innerhalb kurzer Reaktionswege und hohen äußeren Lasten zu fixieren. In den nachfolgenden Diagrammen sind die Ergebnisse verschiedener Tests visuell dargestellt. Dabei beschreibt die Achse *Geschwindigkeit* die Verfahrgeschwindigkeit des Carriages zum Zeitpunkt des Bruchs. Bei positiver Geschwindigkeit entspricht die Verfahrrichtung der Wirkrichtung der Luftlasten (Einfahren). Bei negativer Geschwindigkeit verhält es sich entsprechend anders (Ausfahren).

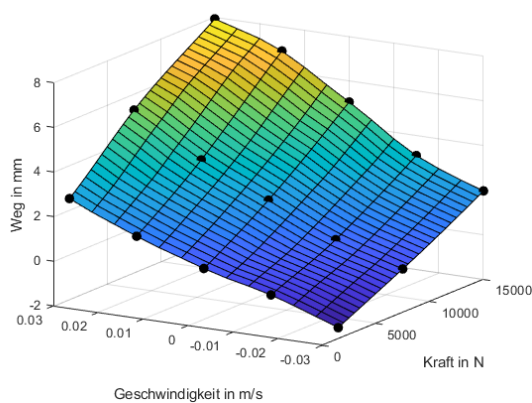


Abbildung 5-24: Messdaten für eine Bremsverzögerung von 0,01s

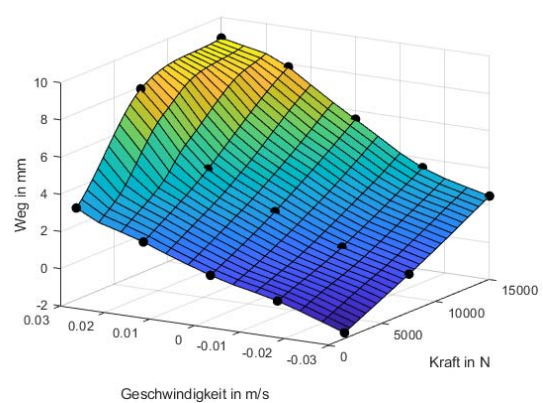


Abbildung 5-25: Messdaten für eine Bremsverzögerung von 0,02s

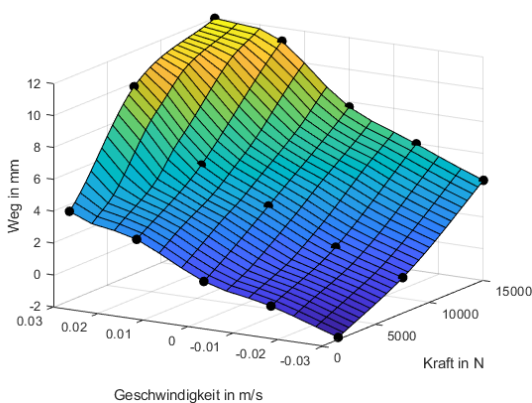


Abbildung 5-26: Messdaten für eine Bremsverzögerung von 0,04s

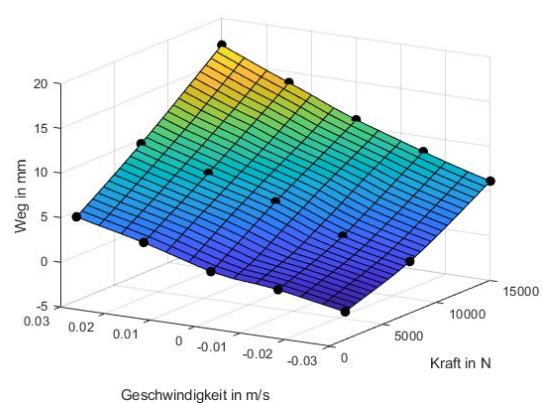


Abbildung 5-27: Messdaten für eine Bremsverzögerung von 0,06s

Die Achse *Kraft* gibt die aufgeprägte Luftlast an. Die Achse *Weg* beschreibt den vom Carriage zurückgelegten Weg vom Bruch bis zum Stillstand.

Das in den Diagrammen erkennbare Verhalten entspricht den erwarteten Ergebnissen, dass bei größerer Totzeit, Verfahrensgeschwindigkeit in Kraftwirkrichtung sowie Luftlast der zurückgelegte Carriage-Travel zunimmt. Wohingegen eine zunehmende Verfahrensgeschwindigkeit entgegen der Luftlast zu einem kleineren Carriage-Travel führt.

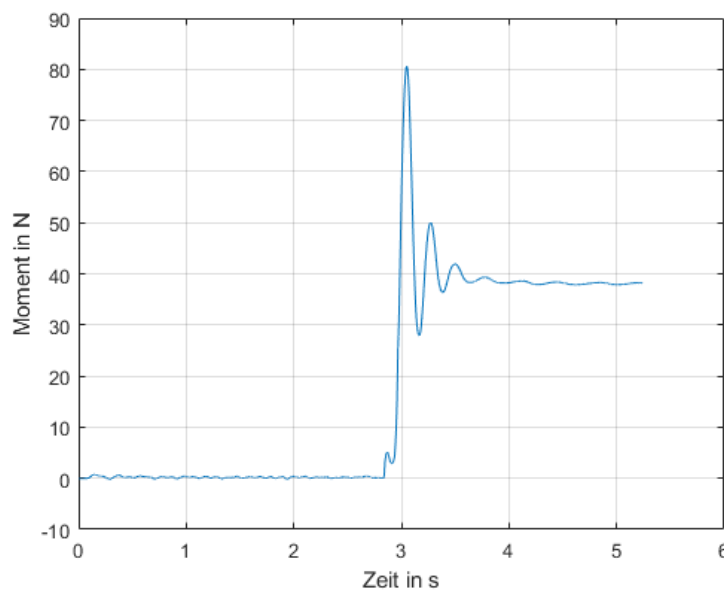


Abbildung 5-28: Verlauf maximales Bremsmoment bei einer Luftlast von 15kN

In Abbildung 5-28 ist der Verlauf des Bremsmoments bei einer Luftlast von 15kN dargestellt. Es ist zu erkennen, dass ein maximales Bremsmoment von 80 Nm benötigt wird. Nachdem der Carriage zum Stillstand gekommen ist, pendelt sich das Moment bei ca. 38 Nm ein. Somit können Rückschlüsse auf die Bremsdimensionierung gezogen werden.

$$\mu = \frac{2000 \cdot \pi \cdot M}{F \cdot P} = \frac{2000 \cdot \pi \cdot 38 \text{ Nm}}{15 \text{ kN} \cdot 16 \text{ mm}} = 0,99$$

Mit der oben gegebenen Formel kann eine Effizienz von 99% berechnet werden und für die entsprechende Simulation als Ausgangswert genutzt werden.

Simulationsbasierte Überprüfung des Einflusses der FTB auf das Antriebssystem

Mittels des oben erwähnten Simulationsmodells konnte der Einfluss der FTB auf das Transmissionssystem untersucht werden. In Abbildung 5-29 ist das Antriebsmoment der PCU für FTBs mit verschiedenen Gewindesteigungen abgebildet. Es ist zu erkennen, dass mit größerer Gewindesteigung das benötigte Antriebsmoment steigt, was auch zu erwarten war. Jedoch zeigt sich nur eine geringe Steigerung des benötigten Antriebsmoments, sodass keine signifikante Anpassung des Transmissionssystems aufgrund des Einsatzes der FTB notwendig ist.

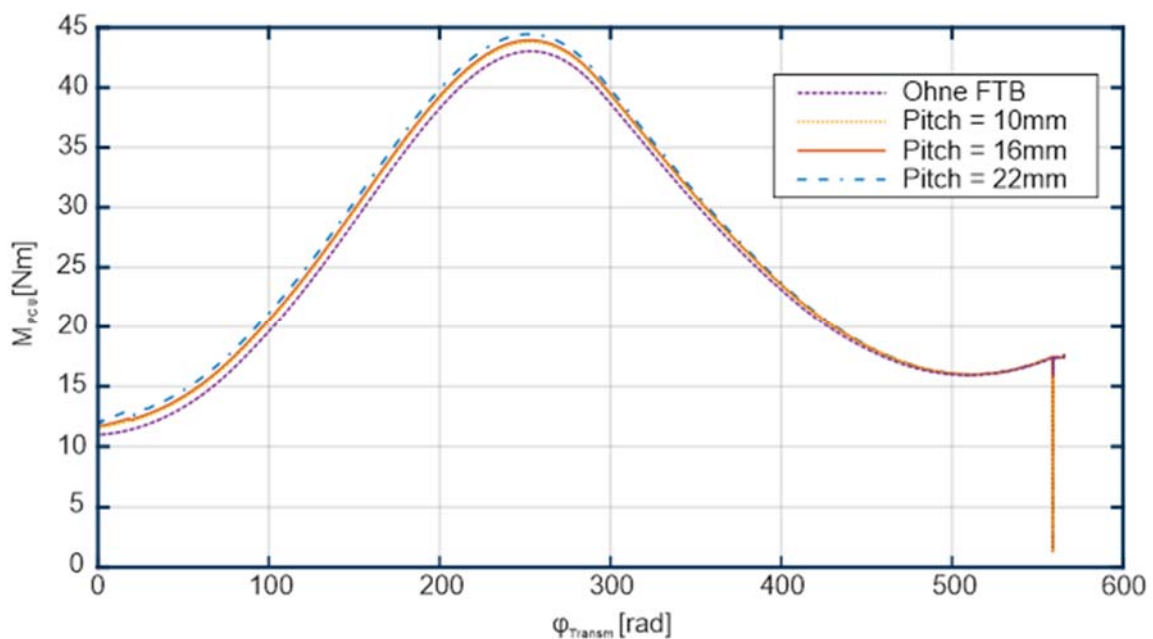


Abbildung 5-29: Moment der Antriebseinheit über einen kompletten Ausfahrvorgang ohne bzw. mit FTB (verschiedene Steigungen der Spindel)

Abbildung 5-30 zeigt für einen exemplarischen Fehlerfall das simulierte Bremsmoment sowie den Verlauf des Carriages auf dem Track. Im Vergleich zwischen dem gemessenen Bremsmoment (Abbildung 5-28) und dem simulierten Bremsmoment (Abbildung 5-30) fällt auf, dass der maximale Spitzenwert in der Simulation ca. 35Nm höher ist als der gemessene. Wohingegen das statische Bremsmoment in beiden Fällen gleich groß ist. Die Abweichung in den Spitzenwerten kann darin begründet sein, dass in der Simulation nicht alle realen Effekte der Bremse abgebildet sind. Des Weiteren ist der Aufbau des magnetischen Feldes, welches bei der Prüfstandsbremse den Reibschluss des Reibbelags herbeiführt, in der Simulation nicht abgebildet. Dieser Effekt führt auch zum Abdämpfen der Momentspitze.

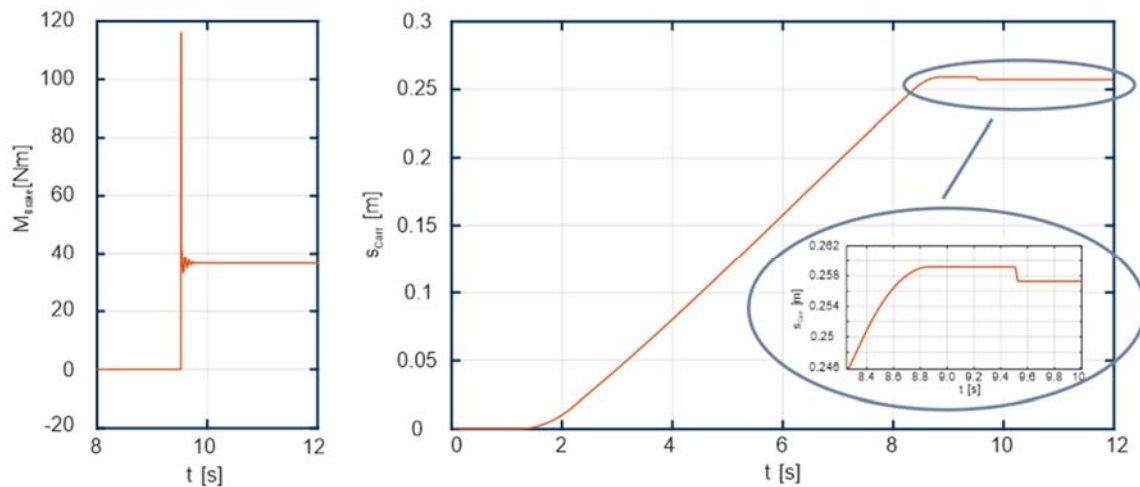


Abbildung 5-30: Bremsmoment und Carriage-Travel für einen Fehler bei maximalen Luftlasten

In der untenstehenden Tabelle kann der Carriage-Travel bei verschiedenen Bruchscenarien entnommen werden. Dabei sind Totzeiten aufgrund von Fehler-Confirmation bzw. Signalverarbeitung nicht betrachtet.

Verfahrgeschwindigkeit/-richtung beim Bruch	Carriage-Travel
Max. ausfahrend (0,03 m/s)	1,1 mm
Stillstand	1,9 mm
Max. einfahrend (-0,03 m/s)	2,2 mm

6 Fazit

Im Arbeitspaket 2100 des Projektes Next.Move wurde ein Konzept für einen Sicherungsmechanismus (FTB) erarbeitet, welcher in einem Einzelklappensystem mit Track-Linkage Kinematik eingesetzt werden kann um einen katastrophalen Klappenschräglauf zu verhindern. Es wurden verschiedene Konzepte erarbeitet und anschließend methodisch bewertet. Das finale Konzept basiert auf einem Kugelgewindetrieb (Spindel), der in den Track der Klappenlagerung integriert ist und mit dem Wagen der Kinematik verbunden ist.

Um die Eignung des Konzepts zu überprüfen wurde eine hybride Teststrategie ausgewählt. Diese sieht simulationsbasierte Gesamtsystemtests sowie prüfstandsbasierte Komponententests vor. Mithilfe dieser Tests konnte die prinzipielle Eignung des Konzepts nachgewiesen werden.

Somit wurde das Projekt erfolgreich abgeschlossen.