



## BACHELORARBEIT

---

# Konzeptionelle Entwicklung eines Schwerkraftkompensationssystems für die Anbindung an eine Bodenentfaltungstestanlage

---

*Autor:*  
Kai TEMMEN

*Betreuer:*  
Prof. Dr. -Ing. Jochen EWALD  
M.Eng. Siebo REERSHEMIUS

24. Februar 2015



# Abstract

Eine Bodenentfaltungstestanlage für entfaltbare Raumfahrtstrukturen soll das Entfaltungsverhalten der getesteten Strukturen in völliger Schwerelosigkeit simulieren. Dazu muss ein speziell angepasster Schwerkraftkompensationsmechanismus entwickelt werden, der in eine solche Testanlage integriert werden kann. Die Konzeptionierung und Entwicklung eines solchen Mechanismus ist Thema der nachstehenden Bachelorarbeit.

Grundlage für die Entwicklung ist die vorangegangene Literaturrecherche zum Thema Schwerkraftkompensationsmechanismen. Sie gibt mögliche Herangehensweisen an die Entwicklung solcher Mechanismen an und zeigt generelle Anforderungen auf. Weiterhin wird die Recherche genutzt, um den derzeitigen Stand der Technik anzugeben.

Die Anforderungen aus der Literaturrecherche werden durch Projektanforderungen ergänzt. Dazu werden die mechanischen Daten der zu testenden Struktur aus Dokumenten und Analysen entnommen und spezifische Kennwerte und Eigenschaften des Systems erarbeitet.

Nach diesen Angaben wird ein Mechanismus konzeptioniert und entwickelt, der die Struktur während ihrer Entfaltung begleitet und die dauerhaft wirkende Gravitationskraft dynamisch kompensiert. Dabei dient ein Ablaufplan des VDI zum generellen Vorgehen beim Entwickeln und Konstruieren als Leitfaden.

Der Ausgangspunkt für die Auslegung des Systems ist die Annahme, durch den Mechanismus eine Schwingung in der Eigenfrequenz des Testsystems zu realisieren, wie sie sich ohne Einfluss der irdischen Gravitation ergeben würde.

Nachdem die Anforderungen bestimmt sind, werden Lösungskonzepte erarbeitet und bewertet. Ein ausgearbeitetes und in seinen Funktionen dargestelltes Konzept steht, diese Arbeit abschließend, der weiteren Realisierung zur Verfügung.



# Inhaltsverzeichnis

<b>Abstract</b>	<b>III</b>
<b>Abbildungsverzeichnis</b>	<b>VIII</b>
<b>Tabellenverzeichnis</b>	<b>IX</b>
<b>Abkürzungsverzeichnis</b>	<b>XI</b>
<b>1. Einleitung</b>	<b>1</b>
1.1. Hintergrund . . . . .	1
1.2. Vorhaben . . . . .	2
1.3. Referenzmission . . . . .	3
<b>2. Testbedingungen, Definitionen und Problemstellungen</b>	<b>7</b>
2.1. Teststandaufbau . . . . .	7
2.2. Definition der äußeren Testumgebung . . . . .	9
2.2.1. Weltraumsimulationsanlage . . . . .	10
2.2.2. Sonnensimulationsanlage . . . . .	11
2.3. Koordinatensystem . . . . .	12
2.4. Eigenschaften des Testsystems . . . . .	13
2.4.1. Eigenschaften der BSDU . . . . .	13
2.4.2. Eigenschaften des Booms . . . . .	14
2.5. Schwingungsverhalten des Systems . . . . .	19
<b>3. Stand der Technik</b>	<b>23</b>
3.1. Mechanische Schwerkraftkompensation . . . . .	23
3.2. Ergebnisse der Recherche . . . . .	24
3.2.1. Funktionsstrukturen und Lösungsprinzipien . . . . .	24
3.2.2. Beschreibung der Hauptfunktionen . . . . .	27
<b>4. Konzeptentwicklung</b>	<b>29</b>
4.1. Klären und präzisieren der Aufgabenstellung . . . . .	30
4.2. Anforderungsliste . . . . .	32
4.3. Ermitteln von Funktionen und Strukturen . . . . .	36
4.4. Lösungsprinzipien und deren Strukturen . . . . .	37
4.4.1. Konzept 1 . . . . .	39
4.4.2. Konzept 2 . . . . .	40
4.4.3. Konzept 3 . . . . .	41
4.5. Bewertung der Konzepte . . . . .	42

<b>5. Konzeptionelle Lösung</b>	<b>45</b>
5.1. Schwerkraftkompensationsmechanismus . . . . .	45
5.2. Gliederung in realisierbare Module . . . . .	46
<b>6. Gestaltung der maßgeblichen Module</b>	<b>47</b>
6.1. Gesamtentwurf . . . . .	47
6.2. Gestell . . . . .	48
6.3. Kraftmessung . . . . .	50
6.4. Gyroskopische Lagerung . . . . .	52
6.5. Linearmotor und Seilsystem . . . . .	54
6.5.1. Seilsystem . . . . .	54
6.5.2. Linearmotor . . . . .	55
6.5.3. Auslegung des Motors . . . . .	56
6.6. Sicherheitssystem . . . . .	57
6.7. Amplitudenmessung . . . . .	58
<b>7. Fazit</b>	<b>59</b>
<b>Literaturverzeichnis</b>	<b>XV</b>
<b>Anhang</b>	<b>XIX</b>
<b>A. Herleitung</b>	<b>XIX</b>
<b>B. Morphologischer Kasten</b>	<b>XXI</b>
<b>C. Stückliste</b>	<b>XXV</b>
<b>D. CD</b>	<b>XXXI</b>

# Abbildungsverzeichnis

1.1.	Aus [1]: GOSSAMER-1 Demonstrator, artistic impression: Animierte Gesamtdarstellung des entfalteten Demonstrators . . . . .	3
1.2.	Zentraleinheit mit Boomkreuz (links); Boom in Lagerung (rechts) . . .	4
1.3.	Schematische Ansicht des aufgetrennten Booms . . . . .	4
1.4.	Aus [1]: Flattened and coiled up boom: Flachgedrückter und aufgewickelter Boom . . . . .	4
1.5.	Aus [1]: BSDU side view: BSDU in Seitenansicht (schematisch) . . . . .	5
1.6.	GOSSAMER in gefalteter Konfiguration (links); GOSSAMER entfaltet mit BSDU's (rechts) . . . . .	5
2.1.	Schematischer Testaufbau in Draufsicht mit bezeichneten Achsen . . . . .	7
2.2.	Teststandaufbau im DLR-Bremen mit entfaltetem Demonstrator . . . . .	8
2.3.	Fotografie der Weltraumsimulationsanlage . . . . .	10
2.4.	Fotografie der Sonnensimulationsanlage . . . . .	11
2.5.	Koordinatensystem mit Ursprung im Zentrum der Entfaltung . . . . .	12
2.6.	BSDU-festes Koordinatensystem . . . . .	12
2.7.	BSDU mit bemaßter Außengeometrie [mm] . . . . .	13
2.8.	Boom Querschnitt . . . . .	14
2.9.	Geometrisches Verhalten des Booms bei Auslenkung . . . . .	18
2.10.	System in Modellvorstellung (a); Ersatzsystem (b); freigeschnittenes System (c) . . . . .	21
3.1.	Funktionsstruktur Ebene 1 . . . . .	24
3.2.	Funktionsstruktur Ebene 2 . . . . .	25
3.3.	Morphologischer Kasten der Hauptfunktionen . . . . .	26
4.1.	Aus [5]: Generelles Vorgehen beim Entwickeln und Konstruieren . . . . .	29
4.2.	Anforderungsliste Seite 1 von 3 . . . . .	33
4.3.	Anforderungsliste Seite 2 von 3 . . . . .	34
4.4.	Anforderungsliste Seite 3 von 3 . . . . .	35
4.5.	Funktionsstruktur Ebene 1 . . . . .	36
4.6.	Funktionsstruktur Ebene 2 . . . . .	37
4.7.	Morphologischer Kasten zur Übersicht prinzipieller Lösungen der Anforderungen des SKM . . . . .	38
4.8.	Konzept-1 Skizze . . . . .	39
4.9.	Konzept-2 Skizze . . . . .	40
4.10.	Konzept-3 Skizze . . . . .	41
4.11.	Bewertungsmatrix . . . . .	43

6.1. SKM . . . . .	47
6.2. Profil 40x40-T8 (links), Automatik-Verbindungssatz (rechts) . . . . .	48
6.3. Gestell in Hauptansichten . . . . .	49
6.4. Verlauf der auf die KMD wirkenden Kraft . . . . .	50
6.5. KMD Skizze mit Anschlussmaßen . . . . .	51
6.6. Prinzip des Parallelogramms: In Nullstellung (links); um den Winkel $\alpha$ verdreht (rechts) . . . . .	52
6.7. Prinzip der Lagerung: In Nullstellung (links); um die x-Achse verdreht (rechts) . . . . .	52
6.8. Mittelachse der Lagerung in Schnittansicht . . . . .	53
6.9. Verdeutlichung des Kippwinkels: In Nullstellung (links); um die y-Achse verdreht (rechts) . . . . .	53
6.10. Prinzip der Befestigung (links); Drehbolzen im Schnitt (rechts) . . . . .	54
6.11. Prinzip der Umlenkrollenanbringung . . . . .	54
6.12. Verbindung Seil und Läufer . . . . .	55
6.13. Verbindungsprinzip am unteren Läuferende . . . . .	55
6.14. Verbindungsprinzip des Linearmotors . . . . .	55
6.15. Seilzugsensor Anordnungsprinzip . . . . .	57
6.16. Amplitudenmesssystem Befestigung . . . . .	58
6.17. Amplitudenmesssystem mit Scheibe . . . . .	58
B.1. Morphologischer Kasten zur Erstellung eines SKM-Konzeptes . . . . .	XXIII
C.1. Stückliste Seite 1 von 3 . . . . .	XXVII
C.2. Stückliste Seite 2 von 3 . . . . .	XXVIII
C.3. Stückliste Seite 3 von 3 . . . . .	XXIX



# Tabellenverzeichnis

2.1. Spezifische Werte des Booms . . . . .	14
2.2. Testergebnisse aus Braunschweig . . . . .	16
2.3. Boomsteifigkeit für verschiedenen Boomlängen . . . . .	16
2.4. Maximale Auslenkung für verschiedenen Boomlängen . . . . .	17
2.5. Schwankungen der Masse . . . . .	18
2.6. Masse der BSDU in Abhängigkeit der Boomlängen . . . . .	19
2.7. Systemfrequenzen . . . . .	20
2.8. Maximalwerte der Systemverläufe . . . . .	22
4.1. Aus [5]: Werteskala für Nutzwertanalyse und Richtlinie VDI 2225 . . .	42
6.1. Massenübersicht . . . . .	56



# Abkürzungsverzeichnis

<b>BSDU</b>	Boom and Sail Deployment Unit
<b>BSI</b>	Boom Spacecraft Interface
<b>CBSU</b>	Central Boom and Sail Unit
<b>CFK</b>	Carbonfaserverstärkter Kunststoff
<b>DGL</b>	Differentialgleichung
<b>DLR</b>	Deutsches Zentrum für Luft- und Raumfahrt
<b>ESA</b>	European Space Agency
<b>KMD</b>	Kraftmessdose
<b>LEO</b>	Low Earth Orbit
<b>SK</b>	Schwerkraftkompensation
<b>SKM</b>	Schwerkraftkompensationsmechanismus
<b>SP</b>	Suspensionspunkt
<b>SSA</b>	Sonnensimulationsanlage
<b>SSM</b>	Sail Spool Mechanism
<b>WSA</b>	Weltraumsimulationsanlage



# 1. Einleitung

## 1.1. Hintergrund

Für die Entwicklung und Umsetzung moderner Raumfahrtmissionen spielen sehr viele Auslegungskriterien eine wichtige Rolle. Nach der gegebenen Funktionalität ist die Reduzierung des Gewichtes einer Struktur besonders wichtig, da die Kosten für die Beförderung jeglicher Nutzlasten in einen Low Earth Orbit (LEO) derzeit bei ca. 5000 - 10000 Us-Dollar pro Kilo liegen. Eine weitere Optimierungsgröße ist das Volumen einer Nutzlast, da es für den Transport auf einer Trägerrakete ebenfalls wichtig ist, einen möglichst kleinen und kompakten Raum einzunehmen. Aus diesen Gründen wird großer Wert auf die Entfaltbarkeit von Strukturen gelegt.

Entfaltbare Strukturen sind in der Lage ihre äußere Form zu verändern. Sie wechseln durch Auslösen bestimmter Mechanismen von einer kleinen zusammengeklappten, zu einer großen entfalteten Form. So können diese Strukturen für den Transport in einer Trägerrakete eine kleine und kompakte Form einnehmen und nach ihrer Separation in ihrem eigentlichen Einsatzgebiet vollständig entfaltet und in voller Größe agieren. Diese Technik wird zum Beispiel für Solarpanele genutzt, die über eine große Oberfläche Solarenergie in Strom wandeln. Weitere Beispiele sind Drag Sails oder Solar Sails, die durch bestimmte Mechanismen zusammengefaltete Folien zu großen Segelflächen aufspannen. Satelliten nutzen die große Oberfläche der Drag Sails nach Ablauf ihrer Nutzungsdauer zum Abbremsen ihrer Geschwindigkeit. Durch die verringerte Umlaufgeschwindigkeit der Satelliten werden sie zur Erde gezogen und somit deorbitiert. Im Gegensatz zu den Drag Sails werden Solar Sails als Antrieb für Satelliten genutzt. Ähnlich wie ein Segelschiff den Wind, kann ein Satellit durch ein Sonnensegel die Sonnenstrahlung zur Fortbewegung nutzen, da diese, wenn sie auf eine Segelfläche trifft, einen Druck erzeugt, aus dem ein Kraftvektor in eine bestimmte Richtung resultiert.

Die Optimierung des Gewichtes dieser Strukturen erfreut sich an deren Einsatzgebiet, das meist im Schwerelosigkeits-, oder Mikrogravitationsbereich liegt. Dadurch muss der Einfluss der Erdgravitation meist gar nicht, oder nur zu einem geringen Teil berücksichtigt werden. Das führt in jedem Fall dazu, dass die Strukturen, würden sie sich unter der Einwirkung der Erdgravitation entfalten, in ihrer Funktion versagen.

Da für die Gewissheit der Funktionsfähigkeit der Strukturen allerdings nicht auf Bodenentfaltungstests verzichtet werden kann, bei denen der Versagensfall durch Erdgravitation eintreten würde, muss die Einwirkung der Gravitation hierbei kompensiert werden. Generell müssen bei Bodenentfaltungstests die realen Einsatzbedingungen, die für die Entfaltung der Struktur gelten, möglichst genau wiedergegeben werden.

Die Entwicklung eines Konzeptes für die Kompensation des Gravitationseinflusses und die damit einhergehende Ermöglichung der Bodenentfaltungstests ist Thema der nachstehenden Arbeit.

## 1.2. Vorhaben

Im Rahmen dieser Bachelorarbeit wird ein System entwickelt, das die räumliche Bewegung einer Struktur unterstützt und gleichzeitig die Schwerkraft, die auf dieses System einwirkt, kompensiert. Somit wird die freie Bewegung der Struktur ermöglicht, diese spiegelt ihr Verhalten in völliger Schwerelosigkeit wieder.

Ein solches System besteht aus einem Mechanismus, der äußerlich an eine Struktur angebunden wird, die gewollte Bewegung der Struktur begleitet und eventuell entstehende Kräfte aufzeichnet.

Zur Entwicklung und Auslegung eines solchen Mechanismus steht eine Raumfahrtstruktur als Referenzmission zur Verfügung. Diese beinhaltet ein System, das im Wesentlichen aus einer massebehafteten Struktur, gekoppelt mit einer Balkenfeder besteht. Die Referenzmission wird im Folgenden näher beschrieben.

Das System wird hinsichtlich seines Schwingungsverhaltens analysiert, um einen Überblick über die Leistungsanforderungen zu gewinnen, die an den Mechanismus gestellt sind. Dabei wird die erste Eigenschwingung des Systems untersucht. Es wird davon ausgegangen, dass die weiteren Eigenschwingungen nicht erreicht werden. Der Mechanismus soll in der Lage sein, die Eigenschwingung des Systems, bei einer Anfangsauslenkung ungleich Null, zu begleiten und dabei die Gewichtskraft der Struktur kompensieren. Dies hat Einfluss auf die Ruhelage, um die das System schwingt.

Der Schwerkraftkompensationsmechanismus wird hinsichtlich aller Einflussgrößen, konzeptionell ausgelegt und in seinen entscheidenden Bereichen gestaltet.

### 1.3. Referenzmission

Als Referenzmission dient die Demonstrationsmission GOSSAMER. Abbildung 1.1 zeigt die Entfaltete GOSSAMER-Struktur auf einer animierten Graphik.

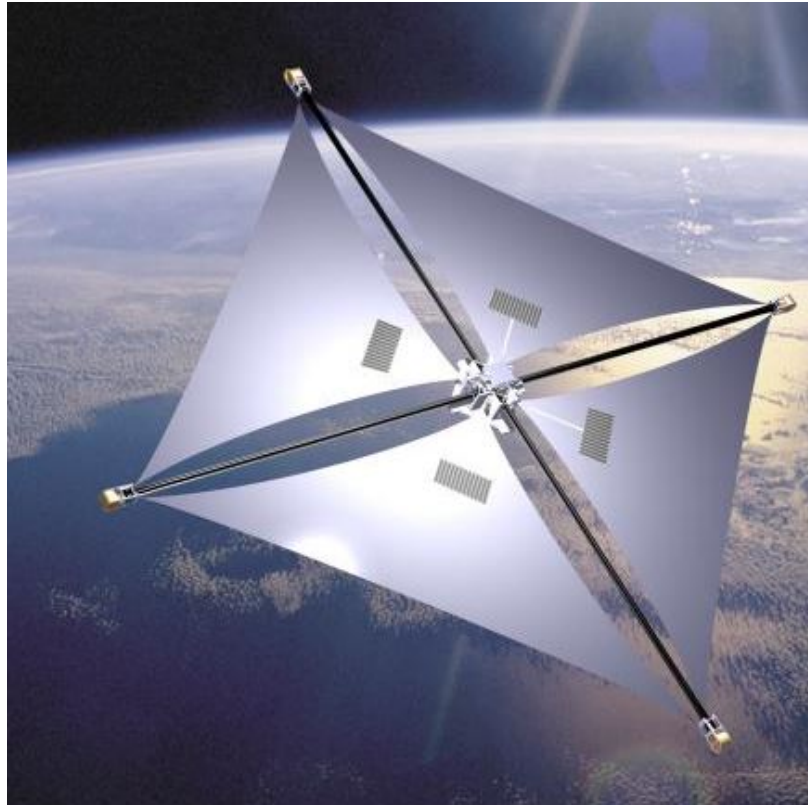


Abbildung 1.1.: Aus [1]: GOSSAMER-1 Demonstrator, artistic impression: Animierte Gesamtdarstellung des entfalteten Demonstrators

GOSSAMER ist ein Gemeinschaftsprojekt der European Space Agency (ESA) und dem Deutschen Zentrum für Luft- und Raumfahrt (DLR). Der entwickelte Schwerkraftkompensationsmechanismus soll in erster Linie auf die Interaktion mit einem Teilsystem dieser Mission ausgerichtet sein.

Das Projekt GOSSAMER dient der Demonstration einer Sonnensegelfaltung in einem erdnahen Orbit. Es soll ein quadratisches Sonnensegel mit einer Kantenlänge von 5 m, durch die Nutzung biegesteifer und faltbarer Träger, entfaltet werden.

Das System besteht aus einer zentralen Einheit (Central Boom and Sail Unit (CB-SU)), zwei tragenden linsenförmigen Auslegern die nachfolgend als „Booms“ bezeichnet werden, einer Boomlagerung (Boom Spacecraft Interface (BSI)), vier dreieckig geformten Segelflächen aus  $7\ \mu\text{m}$  starker Polyimidfolie mit einer beidseitigen Aluminiumbeschichtung und vier mechanischen Entfaltungsboxen (Boom and Sail Deployment Unit (BSDU)), in denen die Booms und die Segel bis zur Entfaltung verstaut sind. Dabei sind die Booms zusammen mit einem Entfaltungsmechanismus im Inneren der BSDU's verstaut und die Segel befinden sich auf Spulen (Sail Spool Mechanism (SSM)), gefaltet und aufgerollt, außenseitig an den BSDU's.

Die Booms sind auf der Zentraleinheit mittig gelagert und gekreuzt angeordnet, siehe Abbildung 1.2. Sie bestehen aus jeweils zwei CFK-Platten mit einer Stärke von 0,14 mm. Die Platten sind speziell vorgespannt und an den beiden Seitenflächen flächig miteinander verklebt, siehe Abbildung 1.3. Durch die Vorspannung erhält der Boom eine linsenförmige und biegesteife Form. Werden die CFK-Platten gegen ihre Vorspannungsrichtung aneinander gedrückt, verliert der Boom seine Biegesteifigkeit in der Ebene und lässt sich aufrollen. Abbildung 1.4 verdeutlicht dieses Prinzip.

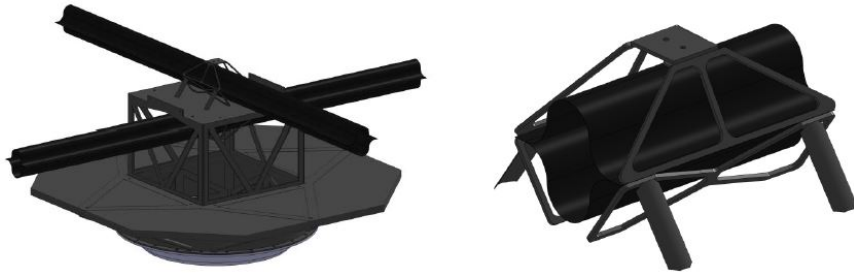


Abbildung 1.2.: Zentraleinheit mit Boomkreuz (links); Boom in Lagerung (rechts)

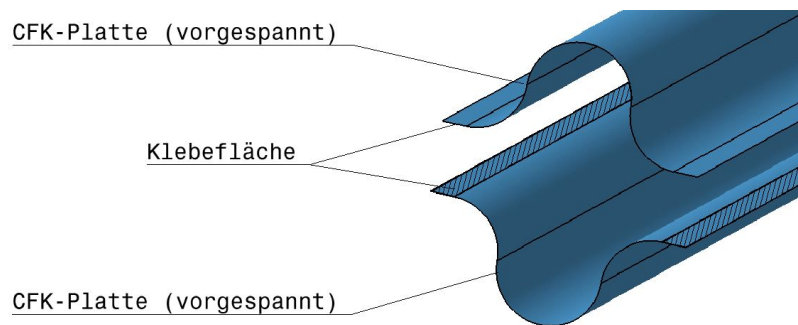


Abbildung 1.3.: Schematische Ansicht des aufgetrennten Booms

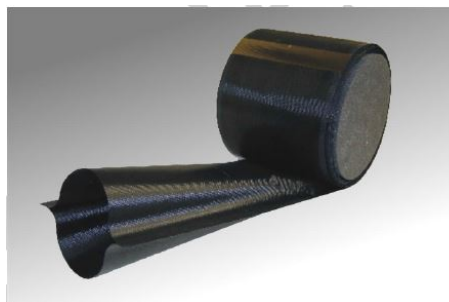


Abbildung 1.4.: Aus [1]: Flattened and coiled up boom: Flachgedrückter und aufgewickelter Boom



Abbildung 1.5 zeigt den inneren Aufbau der BSDU und die Anordnung der Komponenten. Der Boom ist in der zusammengefalteten Form des Satelliten vollständig auf die Spule gewickelt und wird beim Entfaltungsvorgang aus der BSDU geschoben, dadurch entfernt sich diese von der Zentraleinheit. Durch das gleichzeitige Entfernen der vier BSDU's werden die Segelflächen aufgespannt. Nach vollständiger Entfaltung der Segelflächen werden die Enden der Segel von den Kontaktpunkten an den BSDU's gelöst und mit den Boomspitzen verbunden. Die BSDU's werden fortan nicht mehr benötigt und von dem Satelliten abgeworfen.

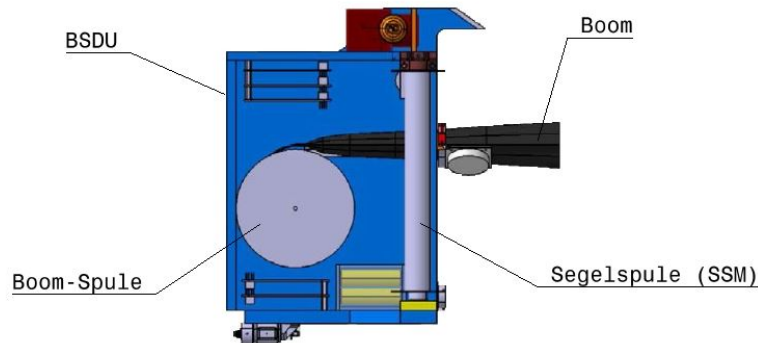


Abbildung 1.5.: Aus [1]: BSDU side view: BSDU in Seitenansicht (schematisch)

Abbildung 1.6 zeigt das System in zusammengefalteter und entfalteter Konfiguration.

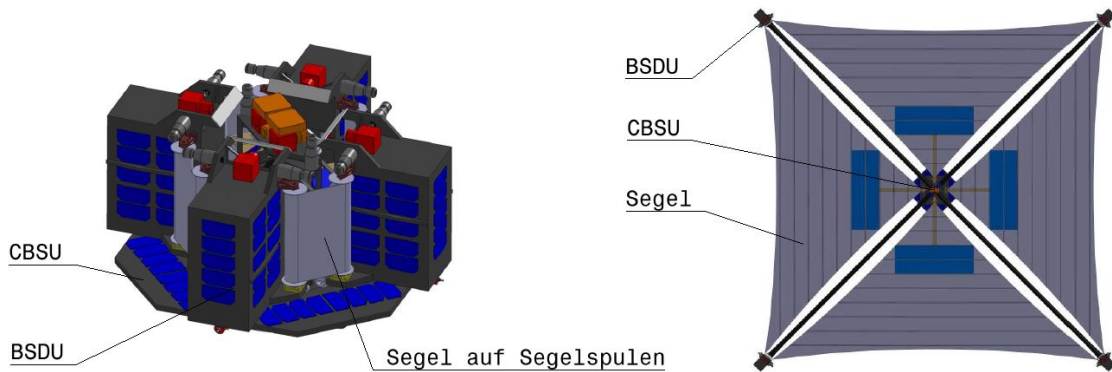


Abbildung 1.6.: GOSSAMER in gefalteter Konfiguration (links); GOSSAMER entfaltet mit BSDU's (rechts)

Die Abbildung links zeigt deutlich die Anbindung der Segelspulen an den jeweiligen BSDU's und die Anordnung aller Komponenten auf der CBSU. Die Abbildung rechts zeigt den aufgespannten Satelliten und verdeutlicht die Kontaktpunkte der Segelflächen.



## 2. Testbedingungen, Definitionen und Problemstellungen

### 2.1. Teststandaufbau

In einem Labor im Institut für Raumfahrtssysteme<sup>1</sup>, befindet sich bereits ein Teststand für die Bodenentfaltungstests von GOSSAMER, in dem eine Entfaltung durchgeführt werden kann. Durch die Ausnutzung der Symmetrieeigenschaften des Satelliten wird die Entfaltung auf zwei Segelflächen beschränkt. Abbildung 2.1 zeigt den Versuchsaufbau in einer schematischen Draufsicht.

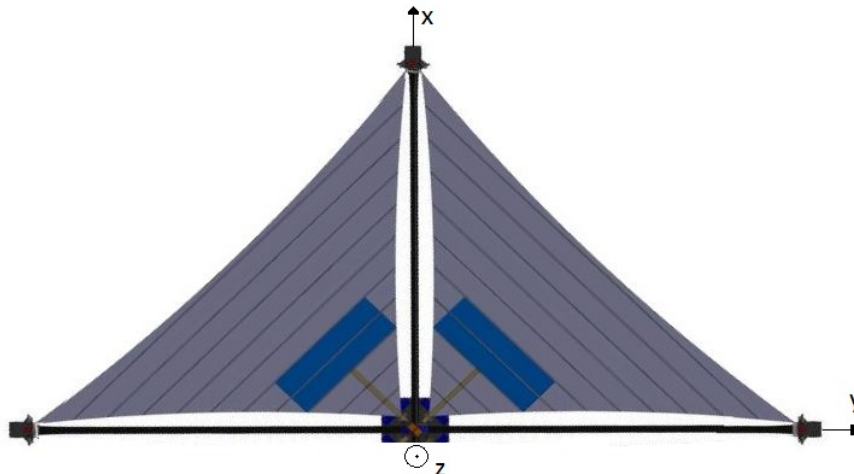


Abbildung 2.1.: Schematischer Testaufbau in Draufsicht mit bezeichneten Achsen

Bei der Entfaltung wird eine aktive BSDU verwendet, die beide Segel in x-Richtung aufspannt. Die Aufspannung der Segel in y-Richtung wird von zwei manuell gesteuerten Lineareinheiten übernommen. Ein Boom wird daher nur in x-Richtung für die Funktion der BSDU benötigt. Der Teststandaufbau sorgt dabei für eine stabile Positionierung der Lineareinheiten und eine geeignete Unterstützung der BSDU während der Entfaltung.

Die BSDU wird von einem Transportgestell unterstützt, das sie während der Entfaltung begleitet. Spezielle Luftlager an der Unterseite des Gestells minimieren die Reibung zwischen den Gestellfüßen und dem Boden. Nur um das Gewicht und die Trägheit des Gestells bei Bewegung auszugleichen, muss die Bewegung manuell unterstützt werden. Die BSDU selbst ist um ihre Mittelachse, parallel zur y-Achse, drehbar gelagert.

<sup>1</sup>Institut des DLR am Standort Bremen.

Das tragende Gestell kompensiert das Gewicht der BSDU durch die feste Einspannung während der gesamten Entfaltung mit konstanter Kraft. Diese Lagerung ermöglicht einerseits die Entfaltung ohne ein Abknicken des Booms, behindert allerdings die BSDU in ihrer freien Bewegung<sup>2</sup>.

Der Boom ist im zentralen Punkt der Entfaltung, genau wie in der Originalkonfiguration, in einem BSI gelagert und dort starr fixiert.

Abbildung 2.2 zeigt den Versuchsaufbau im DLR-Gebäude inklusive entfalteter Struktur. Der Teststand misst ca. 8 m in der Länge, 4 m in der Breite und 1,5 m in der Höhe.

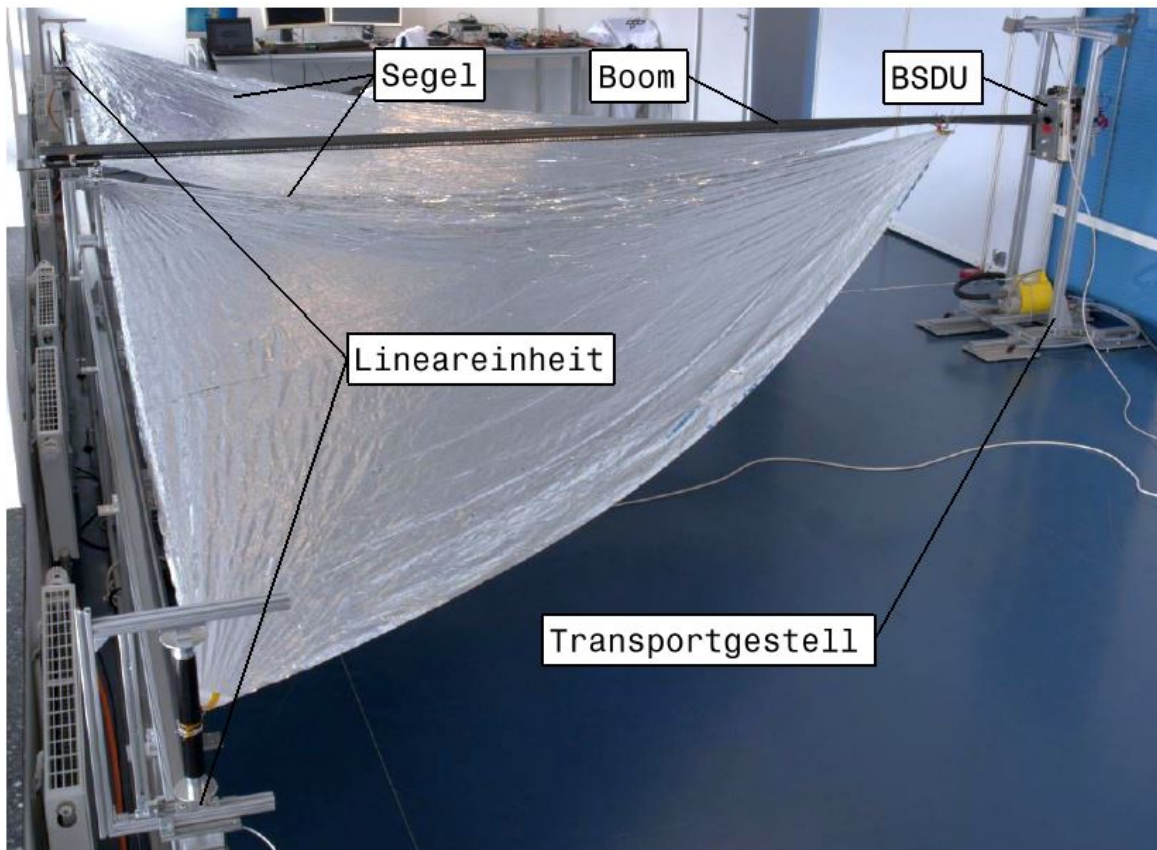


Abbildung 2.2.: Teststandaufbau im DLR-Bremen mit entfaltetem Demonstrator

---

<sup>2</sup>Die freie Bewegung einer Struktur bezeichnet ihr Verhalten in völliger Schwerelosigkeit.

## 2.2. Definition der äußeren Testumgebung

Die Schwingung des Systems ist unter Atmosphäre stark davon abhängig, ob das Gesamtsystem inklusive Segelflächen oder nur die Boom-BSDU Konfiguration getestet wird. Bei alleiniger Betrachtung der Boom-BSDU Konfiguration lässt sich die Schwingung im Allgemeinen durch die in Kapitel 2.5 angegebenen Gleichungen beschreiben. Durch die Integration der Segel in das Testsystem, spielt der Luftreibungswiderstand eine beträchtliche Rolle. Die große Oberfläche der Segel, im Vergleich zu ihrem geringen Gewicht, beeinträchtigen die Geschwindigkeit der Schwingung, während die Dämpfung des Systems zunimmt.

Um den Einfluss der Luftreibung auf die Segel zu kompensieren, soll das System zusätzlich im Vakuum getestet werden. Durch den Vergleich verschiedener Testkonfigurationen und Testumgebungen kann festgestellt werden, ob eine Kompensation der Luftreibung auch durch andere Maßnahmen gleichwertig erreicht werden kann. Mögliche Maßnahmen zur Kompensation der Luftreibung sind zum Beispiel die Ersetzung der Segelflächen durch luftdurchlässige Netze oder Seile.

Diese Besonderheit und die geplanten Vakuumversuche machen es notwendig, die Auslegung des Kompensationssystems vakuumtauglich zu gestalten. Im Institut für Raumfahrtssysteme gibt es verschiedene Möglichkeiten Vakuumtests durchzuführen. Im Folgenden werden zwei Testanlagen, die in Frage kommen, vorgestellt. Bei der Auslegung und Umsetzung des Kompensationssystems ist darauf zu achten, dass ein Testdurchlauf vollständig, oder in einem reduziertem Modell in einer dieser Anlagen durchgeführt werden kann.

### 2.2.1. Weltraumsimulationsanlage

Die Weltraumsimulationsanlage (WSA) dient in erster Linie der Einflussanalyse des freien Weltraums auf Raumfahrtssysteme. Instrumente, Systeme und Subsysteme werden in der WSA auf ihre Tauglichkeit für die entsprechenden Umweltbedingungen überprüft. Dies ist ein wichtiger Schritt während des Entwicklungsprozesses.

Die Vakuumkammer der WSA beinhaltet zu diesem Zweck eine Kaltwand, durch die die Testanlage einen Temperaturbereich von 90 ... 400 K abdecken kann. Außerdem beinhaltet die Anlage einen Strahler, der 0,4- 1,4 kW/m<sup>2</sup> auf 1000 mm Durchmesser aufweist. Dadurch wird der Einfluss der Sonnenwärme auf bestimmte Bereiche des Testsystems simuliert. Es kann ein Vakuum im Bereich von 10<sup>-4</sup> Pa realisiert werden.

Die WSA verfügt, bei einem Volumen von 17 m<sup>3</sup>, über ein Nutzvolumen von 12 m<sup>3</sup>, dies entspricht einem 3,4 m langem Zylinder von 2,15 m im Durchmesser.



Abbildung 2.3.: Fotografie der Weltraumsimulationsanlage

## 2.2.2. Sonnensimulationsanlage

In der Sonnensimulationsanlage (SSA) wird der Einfluss des freien Weltraums und der Sonne auf verschiedene Instrumente, Systeme und Materialien untersucht. Dazu werden die Testobjekte, meist in niedrig skalierten Modellen dem Vakuum, extremen Temperaturen und einem Solarsimulator ausgesetzt und auf Funktion und Eigenschaften geprüft.

Durch die Temperierung mit flüssigem Stickstoff wird dabei eine Temperatur von ca. 100 K erzeugt. Es kann ein Vakuum im Bereich von  $1,33 \cdot 10^{-3}$  Pa realisiert werden. Zur Simulation der Sonneneinwirkung verfügt die SSA über einen Sonnensimulator, der  $0,4 - 1,4 \text{ kW/m}^2$  auf 100 mm Durchmesser aufweist. Der Simulator erreicht ein Spektrum von  $0,2 \dots 2,5 \mu\text{m}$ .

Dabei besitzt die SSA ein Volumen von  $0,45 \text{ m}^3$ . Der Nutzbare Raum beträgt 800 mm in Länge und Breite und 730 mm in der Höhe.

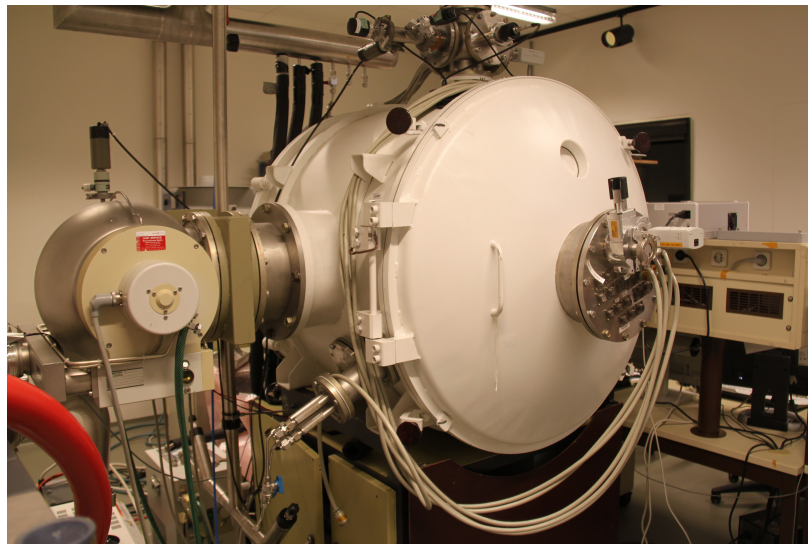


Abbildung 2.4.: Fotografie der Sonnensimulationsanlage

## 2.3. Koordinatensystem

Für eine einheitliche Modellvorstellung des Systems ist an dieser Stelle die Einführung von Koordinatensystemen, zur Verdeutlichung von Beziehungen, notwendig. Wie in Abbildung 2.1 unter Kapitel 2.1 bereits zu erkennen ist, sind die Hauptauszugsachsen der Entfaltung als x-, y-, und z-Achse bezeichnet. Der Koordinatenursprung des Entfaltungskordinatensystems liegt im Zentrum der Entfaltung. Die Auszugsrichtung der aktiven BSDU liegt in der x-Achse des Systems, die manuell gesteuerten Lineareinheiten bewegen sich entlang der y-Achse und die z-Achse liegt parallel zur Gravitation. Die Rotationswinkel um die Achsen sind entsprechend bezeichnet (siehe Abbildung 2.5).

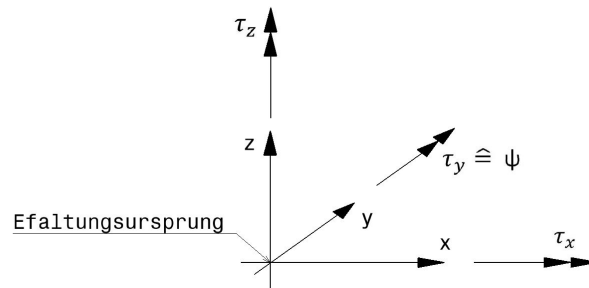


Abbildung 2.5.: Koordinatensystem mit Ursprung im Zentrum der Entfaltung

Der Rotationsfreiheitsgrad  $\tau_y$  entspricht dem Winkel  $\psi$ , der bei einer Auslenkung der BSDU zwischen der x-Achse und dem Boom entsteht.

Neben dem Koordinatensystem im Entfaltungsursprung wird noch ein weiteres BSDU-festes Koordinatensystem benötigt, da sich die BSDU bei Auslenkung verschiebt und gleichzeitig eigene Rotationsfreiheitsgrade besitzt. Abbildung 2.6 verdeutlicht das BSDU-feste Koordinatensystem, mit dem Index „s“.

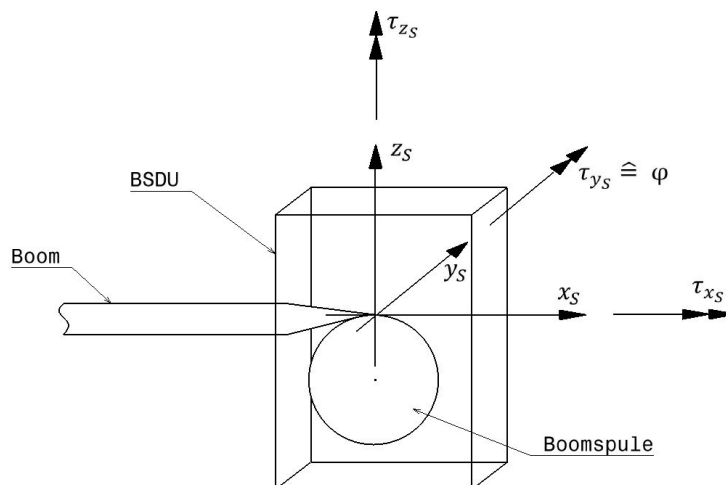


Abbildung 2.6.: BSDU-festes Koordinatensystem

Der Rotationsfreiheitsgrad  $\tau_{y_s}$  entspricht dem Winkel  $\varphi$ , der bei einer Auslenkung der BSDU entsteht,  $\varphi =$  Kippwinkel.



## 2.4. Eigenschaften des Testsystems

Die Eigenschaften des Systems sind der GOSSAMER Design Description [1] und archivierten Unterlagen entnommen, oder aus Geometriebedingungen und der Interpretation mechanisch-dynamischer Eigenschaften hergeleitet.

### 2.4.1. Eigenschaften der BSDU

Die BSDU stellt eine Teilbaugruppe des Gesamtsystems GOSSAMER dar. Sie dient nur dem Transport von Boom und Segel und soll die Entfaltung des Systems, durch Abrollen des Booms, vorantreiben. Abbildung 2.7 zeigt die BSDU schematisch und ohne Darstellung von Details zur Verdeutlichung ihrer äußeren Abmessungen. Alle Längenangaben sind in mm.

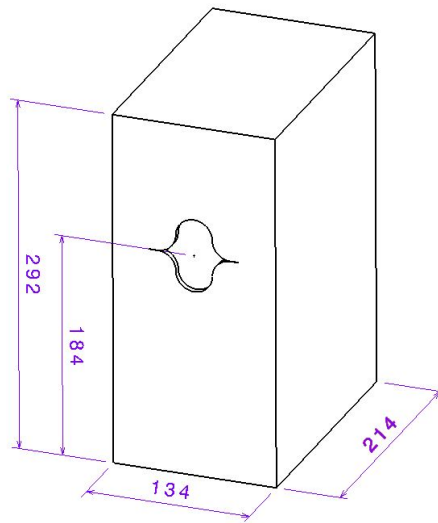


Abbildung 2.7.: BSDU mit bemaßter Außengeometrie [mm]

Die Rohmasse der BSDU ( $m_{BSDU}$ ) beträgt nach einer realistischen Schätzung 2 kg. Sie wird, für die Betrachtung der Schwingung, als Punktmasse an der Boomspitze angesehen, da die Rotationsbeschleunigungen der BSDU in erster Näherung vernachlässigt werden können.

Mit dem Fortschritt der Entfaltung nimmt die Masse der BSDU ab, da der in ihr aufgewickelte Boom ausgefahren wird ( $\hat{m}_{BSDU}(l)$ ):

$$\hat{m}_{BSDU}(l) = m_{BSDU} - (m_{Boom\,prom} \cdot l) \quad (2.1)$$

Unter Gravitation wirkt das Gewicht des ausgefahrenen Booms zu gleichen Teilen auf die CBSU und auf die BSDU. Dadurch ergibt sich für das momentane Gewicht der BSDU ( $m_{BSDU}(l)$ ) während der Entfaltung die Gleichung 2.2:

$$m_{BSDU}(l) = m_{BSDU} - \left( \frac{m_{Boom\,prom} \cdot l}{2} \right) \quad (2.2)$$

Beispielhaft ist die Masse der BSDU, in Kapitel 2.5, einigen Boomlängen gegenübergestellt. Die Boomlängen repräsentieren verschiedene Stadien der Entfaltung.

## 2.4.2. Eigenschaften des Booms

### Mechanische Eigenschaften

Wie schon in Kapitel 1.3 angedeutet, besteht der zu betrachtende Boom aus einem Verbund zweier CFK-Platten mit einer Stärke von jeweils 0,14 mm. Die Fasern des Werkstoffes verlaufen parallel zur Boomauszugsrichtung<sup>3</sup> und im Gewebe um 90° versetzt<sup>4</sup>. Abbildung 2.8 zeigt den Querschnitt des Booms mit allen notwendigen Maßen in mm.

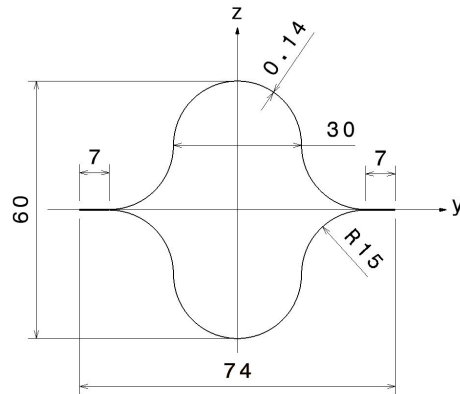


Abbildung 2.8.: Boom Querschnitt

Eigenschaften und Kennwerte des Booms sind in folgender Tabelle dargestellt.

Bezeichnung	Symbol	Wert/	Einheit	Bemerkung
Dichte	$\rho_{CFK}$	1241	$\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$	
$E - Modul_1$	$E_1$	66786	MPa	0°
$E - Modul_2$	$E_2$	66786	MPa	90°
Querschnittsfläche	$A_{Boom}$	3,29E-06	$\text{m}^2$	
Masse pro Meter	$m_{Boom\ pro\ m}$	40,917	$\text{g} \cdot \text{m}^{-1}$	
Flächenmoment 2. Grades	$I_{y-y}$	8,90E-09	$\text{m}^4$	CATIA V5
Flächenmoment 2. Grades	$I_{z-z}$	1,17E-08	$\text{m}^4$	CATIA V5

Tabelle 2.1.: Spezifische Werte des Booms

<sup>3</sup>Werkstoffkenndaten, bezogen auf die 0°-Stellung zur Längsachse, mit Index „1“.

<sup>4</sup>Werkstoffkenndaten, bezogen auf die 90°-Stellung zur Längsachse, mit Index „2“.

## Dynamische Eigenschaften

Der Boom wird für dynamische Berechnungen wie ein einseitig eingespannter Balkenträger behandelt. Durch die Auslenkung der BSDU in z-Richtung tritt Balkenbiegung auf. Für die Betrachtung der Schwingung kann die Masse des Booms gegenüber der Masse der BSDU vernachlässigt werden. Ein Loslassen der ausgelenkten BSDU führt zur Schwingung des Systems. Es werden nur kleine Schwingungen betrachtet<sup>5</sup>.

Die Belastung des Booms mit einer Einzellast führt zur Durchbiegung  $f_z$  der Boomspitze, die durch Gleichung 2.3 [2] beschrieben wird:

$$f_z = \frac{F \cdot l^3}{3 \cdot E \cdot I} \quad (2.3)$$

$F$  ist die belastende Kraft an der Boomspitze und  $l$  bezeichnet die ausgefahrene Länge des Booms.

Für die resultierende Kraft, die durch die Biegung entsteht, gilt die allgemeine Gleichung zur Beschreibung von Federrückstellkräften, mit  $f_z$  als den Weganteil der Kraft:

$$F = c \cdot f_z \quad (2.4)$$

Aus Gleichung 2.3 und 2.4 ergibt sich folglich die theoretische Definition der Boomsteifigkeit  $c$ :

$$c = \frac{3 \cdot E \cdot I_{y-y}}{l^3} \quad (2.5)$$

Hier wird deutlich, dass die Steifigkeit des Booms stark von der ausgefahrenen Länge abhängig ist. Dies beeinflusst die Eigenschwingung des Systems in Abhängigkeit vom Fortschritt der Entfaltung.

Die theoretisch errechnete Steifigkeit  $c_{Boom}$  des Booms, für eine Länge von 4,3 m, ergibt sich folglich zu  $c_{Boom}(4,3,m)=22,428 \text{ kg}\cdot\text{s}^{-2}$ . Diese Boomlänge bezieht sich auf die maximal betrachtete Boomlänge.

Zur Stützung der errechneten Werte wurden externe Referenzen aus dem DLR Institut in Braunschweig herangezogen. Dort wurde der Boom in Richtung der konvexen Seite<sup>6</sup> unter einem Angriffswinkel von  $90^\circ$  ausgelenkt, um die maximale Auslenkung der Boomspitze und die dabei wirkende Kraft, vor dem Eintreten eines Versagensfalles, zu dokumentieren. Die relevanten Testergebnisse sind in Tabelle 2.2 zusammengestellt. Die dort angegebenen Steifigkeiten wurden unter Verwendung von Gleichung 2.4 eigenständig hinzugefügt.

---

<sup>5</sup>Winkel zwischen Boom und der Horizontalen ( $\psi$ )  $\leq 2^\circ$ .

<sup>6</sup>Vom Institut in Braunschweig verwendete Bezeichnung für eine Boomauslenkung in z-Richtung.

Bezeichnung	Getestete Seite	Versagenskraft Fk	Auslenkung der Boomschulter bei Versagen	Errechnete Boom Steifigkeit
Test 1	Konvexe Seite 1	1,7 N	132,6 mm	12,82 kg·s <sup>-2</sup>
Test 2	Konvexe Seite 2	3,1 N	132,6 mm	23,38 kg·s <sup>-2</sup>

Tabelle 2.2.: Testergebnisse aus Braunschweig

Die Testergebnisse beziehen sich ebenfalls auf einen 4,3 m langen Boom.

Der Vergleich mit der errechneten Steifigkeit für diese Boomlänge  $c_{Boom}(4,3\text{ m})$  zeigt, dass die errechneten Werte in einem akzeptablen Bereich liegen und dass die Testergebnisse für weitere Berechnungen herangezogen werden können.

Dazu wird der Wert  $c$ , aus den Testergebnissen von Test 2, in die umgestellte Gleichung 2.5 eingesetzt, um einen konstanten Steifigkeitswert „EI“ zu erhalten, der unter Verwendung mit Gleichung 2.5 die Steifigkeiten für verschiedene Boomlängen liefert.

Die Ergebnisse aus Test 1 werden hier nicht weiter berücksichtigt, da sie für eine Betrachtung der Extremwerte unerheblich sind.

$$EI = \frac{c \cdot l^3}{3} = \frac{23,378 \text{ kg} \cdot (4,3 \text{ m})^3}{\text{s}^2 \cdot 3} = 619,572 \frac{\text{kg} \cdot \text{m}^3}{\text{s}^2} \quad (2.6)$$

Die Boomsteifigkeiten sind für verschiedene Boomlängen in Tabelle 2.3 vergleichsweise dargestellt. Dabei wurden die Boomlängen beispielhaft, in 0,5 m Schritten gewählt, um das Steifigkeitsverhalten des Booms darzustellen.

Für die Schwingung kann minimal eine Boomlänge von 30 cm betrachtet werden, da sich die BSDU erst vollständig von der CBSU lösen muss, bevor eine Auslenkung möglich ist. Eine sinnvolle Betrachtung ist ab einer ausgefahrenen Boomlänge von 50 cm möglich.

Nr.:	Boomlänge	$l$	Boomsteifigkeit	$c_{Boom}$	Boomsteifigkeit	$c_{Test2}$
1	0,5000	m	14265,4896	kg·s <sup>-2</sup>	14870,4000	kg·s <sup>-2</sup>
2	1,0000	m	1783,1862	kg·s <sup>-2</sup>	1858,8000	kg·s <sup>-2</sup>
3	1,5000	m	528,3515	kg·s <sup>-2</sup>	550,7556	kg·s <sup>-2</sup>
4	2,0000	m	222,8983	kg·s <sup>-2</sup>	232,3500	kg·s <sup>-2</sup>
5	2,5000	m	114,1239	kg·s <sup>-2</sup>	118,9632	kg·s <sup>-2</sup>
6	3,0000	m	66,0439	kg·s <sup>-2</sup>	68,8444	kg·s <sup>-2</sup>
7	3,5000	m	41,5903	kg·s <sup>-2</sup>	43,3539	kg·s <sup>-2</sup>
8	4,0000	m	27,8623	kg·s <sup>-2</sup>	29,0438	kg·s <sup>-2</sup>
9	4,3000	m	22,4280	kg·s <sup>-2</sup>	23,3780	kg·s <sup>-2</sup>

Tabelle 2.3.: Boomsteifigkeit für verschiedenen Boomlängen

Die maximal mögliche Auslenkung der Boomspitze in den verschiedenen Stadien der Entfaltung wird durch die elastische Linie des ausgelenkten Booms aus Test 2 bestimmt. Ausgangspunkt für die Berechnung ist die Grundgleichung der elastischen Linie aus [9], für den Verschiebungsverlauf  $v(x)$ <sup>7</sup>:

$$v(x) = \frac{F \cdot l^3}{E \cdot I} \cdot \left( \frac{1}{6} \left( \frac{x}{l} \right)^3 - \frac{1}{2} \frac{x}{l} + \frac{1}{3} \right) \quad (2.7)$$

In dieser Gleichung verläuft  $x$  von der Boomspitze bei  $l=4,3$  m, aufsteigend zum Entfaltungsursprung, daher wird zur Bestimmung der maximalen Auslenkungen im Punkt  $l_i$  mit Gleichung 2.8 gerechnet. Der Index  $i$  kommt aus der Nummerierung der Tabelle 2.3.

$$x = 4,3 \text{ m} - l_i \quad (2.8)$$

Tabelle 2.4 stellt die maximale Auslenkung der Boomspitzen den Boomlängen aus Tabelle 2.3 gegenüber.

Nr.:	Boomlänge	$l$	Auslenkung	$z_{max}$
1	0,5000	m	0,0025	m
2	1,0000	m	0,0099	m
3	1,5000	m	0,0214	m
4	2,0000	m	0,0364	m
5	2,5000	m	0,0542	m
6	3,0000	m	0,0743	m
7	3,5000	m	0,0960	m
8	4,0000	m	0,1188	m
9	4,3000	m	0,1326	m

Tabelle 2.4.: Maximale Auslenkung für verschiedenen Boomlängen

Die Werte aus Tabelle 2.4 beziehen sich auf eine Auslenkung in fester Einspannung des Booms, die für eine Schwingungsbetrachtung des Systems verwendet wird. Unter Verwendung des BSI kann sich eine maximale Auslenkung von 300 mm ergeben. Diese muss durch den Mechanismus mindestens ermöglicht werden.

Die Werte aus Tabelle 2.4 bilden die Anfangbedingungen für die statische Auslenkung bei einer Betrachtung der Schwingung.

<sup>7</sup>Die Herleitung zu dieser Gleichung ist in Anhang A aufgeführt.

## Geometrisches Verhalten des Booms bei Auslenkung

Wird der Boom in eine Richtung ausgelenkt, folgt er der Biegelinie eines auf Biegung beanspruchten Stabes. Dabei beschreibt die BSDU in erster Näherung eine Kreisbahn. Siehe Abbildung 2.9

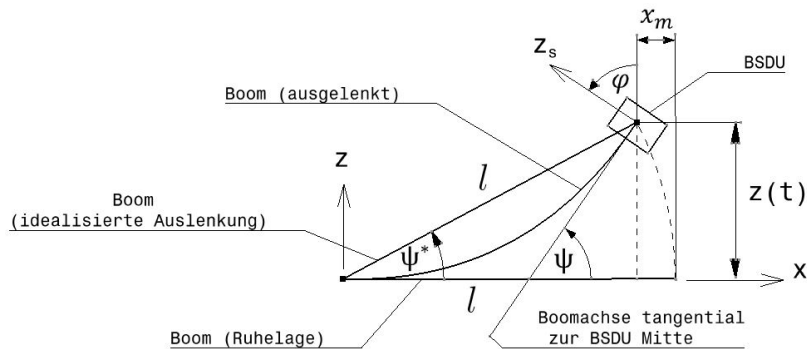


Abbildung 2.9.: Geometrisches Verhalten des Booms bei Auslenkung

Für kleine Auslenkungen gleicht sich die Biegelinie immer weiter der idealisierten Auslenkung an und für den Auslenkungswinkel gilt  $\psi = \psi^*$ .

Da die Stirnseite der BSDU immer senkrecht auf die Tangente der Boom-Achse im Mittelpunkt der BSDU gerichtet ist, gilt für den Kippwinkel  $\varphi$  der BSDU:

$$\varphi = \psi = \psi^* = \sin^{-1} \left( \frac{z(t)}{l} \right) \quad (2.9)$$

Bedingt durch die Kreisbahn, die die BSDU bei Auslenkung beschreibt, beginnt diese in x-Richtung, zu schwanken. Die Schwankung der BSDU wird durch  $x_m$  beschrieben:

$$x_m = l - l \cdot \cos(\psi) = l - l \cdot \cos \left( \sin^{-1} \left( \frac{z(t)}{l} \right) \right) \quad (2.10)$$

Tabelle 2.5 zeigt die maximal entstehenden Schwankungen der BSDU und den dazugehörigen Kippwinkel an. Der Kippwinkel darf bei einer Begleitung der BSDU nicht vernachlässigt werden und muss ihr ermöglicht werden.

Nr.:	Boomlänge $l$	Max. Schwankung $x_m$	Kippwinkel $\varphi$
1	0,5000 m	0,0066 mm	0,2865 °
2	1,0000 m	0,0492 mm	0,5672 °
3	1,5000 m	0,1525 mm	0,8175 °
4	2,0000 m	0,3305 mm	1,0428 °
5	2,5000 m	0,5877 mm	1,2423 °
6	3,0000 m	0,9202 mm	1,4192 °
7	3,5000 m	1,3175 mm	1,5717 °
8	4,0000 m	1,7630 mm	1,7019 °
9	4,3000 m	2,0451 mm	1,7671 °

Tabelle 2.5.: Schwankungen der Masse

## 2.5. Schwingungsverhalten des Systems

Durch die Auslenkung der BSDU in z-Richtung ist der Boom wie eine Zugfeder vorgespannt. Ein plötzliches Entspannen durch Loslassen der BSDU führt zur Schwingung des Systems. Die Steifigkeit des Booms und die Dämpfung durch Materialreibung sorgen für eine harmonisch abklingende Schwingung. Das System wird als gedämpfter Einmassenschwinger betrachtet. Die Eigenfrequenz  $f$  des Systems wird über die Eigenkreisfrequenz  $\omega$  berechnet [8]:

$$f = \frac{\omega}{2 \cdot \pi} \quad (2.11)$$

Dabei richtet sich die Eigenkreisfrequenz des Systems nur nach der Steifigkeit des Booms und der Masse der BSDU:

$$\omega = \sqrt{\frac{c_{Boom}}{m_{BSDU}}} \quad (2.12)$$

Die Schwingungsdauer ergibt sich aus dem Kehrwert der Eigenfrequenz zu:

$$T = \frac{1}{f} = \frac{2 \cdot \pi}{\omega} \quad (2.13)$$

Tabelle 2.6 stellt, zur Berechnung der Eigenfrequenzen, die Masse der BSDU den verschiedenen Boomlängen gegenüber.

Nr.:	Boomlänge	$l$	Masse der BSDU	$m_{BSDU} (l)$
1	0,5000	m	1,9898	kg
2	1,0000	m	1,9795	kg
3	1,5000	m	1,9693	kg
4	2,0000	m	1,9591	kg
5	2,5000	m	1,9489	kg
6	3,0000	m	1,9386	kg
7	3,5000	m	1,9284	kg
8	4,0000	m	1,9182	kg
9	4,3000	m	1,9120	kg

Tabelle 2.6.: Masse der BSDU in Abhängigkeit der Boomlängen

Eigenkreisfrequenz, Eigenfrequenz und Eigenschwingungsdauer sind in Tabelle 2.7 den verschiedenen Boomlängen gegenübergestellt. Grundlage für ihre Berechnung sind die Werte für  $c_{Test2}$  aus Tabelle 2.3.

Nr.:	Boomlänge $l$	Eigenkreisfrequenz $\omega$	Eigenfrequenz $f$	Eigenschwingungsdauer $T$
1	0,5000 m	84,4470 1/s	13,7585 Hz	0,0727 s
2	1,0000 m	30,6425 1/s	4,8769 Hz	0,2051 s
3	1,5000 m	16,7229 1/s	2,6615 Hz	0,3757 s
4	2,0000 m	10,8902 1/s	1,7332 Hz	0,5770 s
5	2,5000 m	7,8128 1/s	1,2434 Hz	0,8042 s
6	3,0000 m	5,9591 1/s	0,9484 Hz	1,0544 s
7	3,5000 m	4,7414 1/s	0,7546 Hz	1,3252 s
8	4,0000 m	3,8611 1/s	0,6193 Hz	1,6148 s
9	4,3000 m	3,4967 1/s	0,5565 Hz	1,7969 s

Tabelle 2.7.: Systemfrequenzen

Das System wird in Abbildung 2.10 idealisiert dargestellt. Abbildung 2.10.a zeigt das System in einer Modellvorstellung und Abbildung 2.10.b gibt ein zugehöriges Ersatzmodell an [8].

Obwohl das reale System einen durch Materialreibung gedämpften Einmassenschwinger darstellt, wird die Dämpfung an dieser Stelle vernachlässigt, da hier nur der Bereich der größten Beschleunigungen und Geschwindigkeiten von Bedeutung ist. Die maximale Beschleunigung und Geschwindigkeit tritt sowohl bei der gedämpften, als auch bei der ungedämpften Schwingung am Anfang der Systemschwingung auf.

Die Schwingung des Systems wird an dieser Stelle betrachtet, um einen Eindruck über das theoretische Systemverhalten zu gewinnen. Die realen Systemverläufe sollen durch geeignete Messungen, unter kompensierter Schwerkraft, ermittelt werden.

Abbildung 2.10.c zeigt das freigeschnittene System mit allen relevanten Kräften. Für kleine Schwingungen sind die Schwankungen der BSDU in x-Richtung vernachlässigt. Die Masse  $m$  repräsentiert die Masse der BSDU.



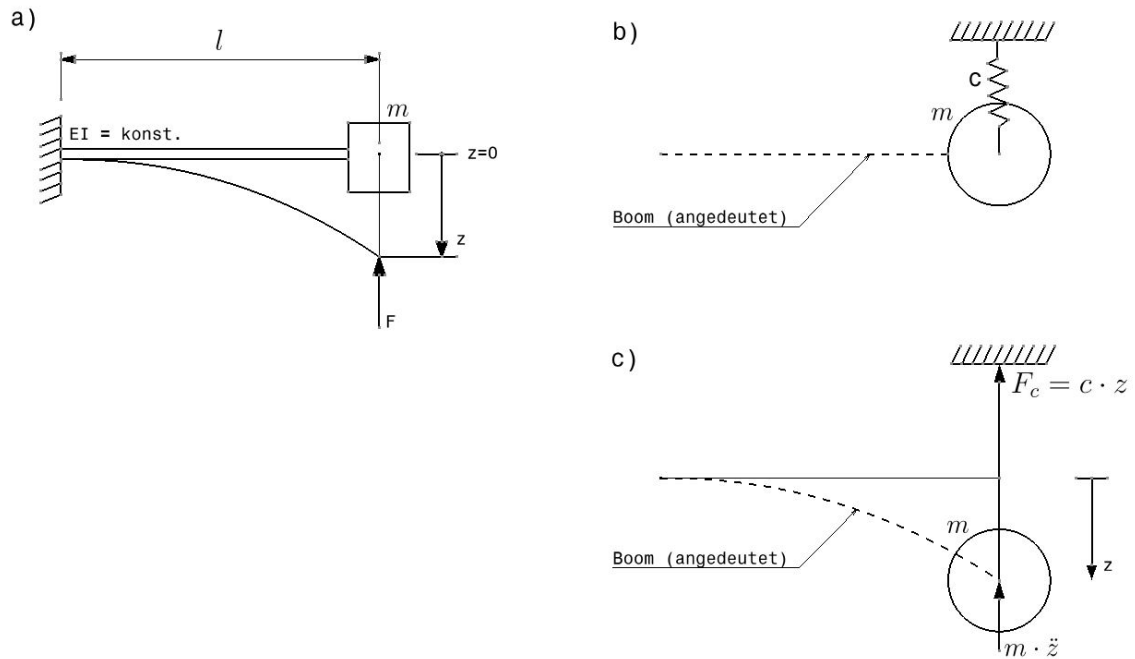


Abbildung 2.10.: System in Modellvorstellung (a); Ersatzsystem (b); freigeschnittenes System (c)

Aus der Gleichgewichtsbedingung ergibt sich die Bewegungsdifferentialgleichung des Systems:

$$m \cdot \ddot{z} + c \cdot z = 0 \quad (2.14)$$

Nach Umstellung ergibt sich mit der Eigenkreisfrequenz die Gleichung 2.12. Eine homogene Differentialgleichung (DGL) 2. Ordnung:

$$\ddot{z} + \omega^2 \cdot z = 0 \quad (2.15)$$

Die allgemeine Lösung dieser DGL lautet [11]:

$$z(t) = A \cos(Bt) + C \sin(Dt) \quad (2.16)$$

Mit den Faktoren B und C:

$$B = C = \sqrt{\frac{c}{m}} = \omega \quad (2.17)$$

Somit lautet die allgemeine Lösung der DGL und die dazugehörige erste zeitliche Ableitung:

$$z(t) = A \cos(\omega t) + C \sin(\omega t) \quad (2.18)$$

$$\dot{z}(t) = -A\omega \sin(\omega t) + C\omega \cos(\omega t) \quad (2.19)$$

Zur Lösung der Konstanten A und C sind die Anfangsbedingungen des Systems gegeben:

$$z(t_1 = 0) = z_0 \quad (2.20)$$

$$\dot{z}(t_1 = 0) = 0 \quad (2.21)$$

$$\ddot{z}(t_1 = 0) = 0 \quad (2.22)$$

Durch Einsetzen in die allgemeine Lösung der DGL ergeben sich:

$$z(t_1 = 0) = A \cos(\omega 0) + C \sin(\omega 0) = z_0 \rightarrow A = z_0 \quad (2.23)$$

$$\dot{z}(t_1 = 0) = -A\omega \sin(\omega 0) - C\omega \cos(\omega 0) = 0 \rightarrow -C\omega = 0 \quad (2.24)$$

Letztlich lassen sich die Systemverläufe der Auslenkung, Geschwindigkeit und Beschleunigung durch Einsetzen der Konstanten  $A = z_0$  und  $C = 0$  in die allgemeine Lösung (Gleichung 2.18) und zweimaligem, zeitlichen Ableiten ermitteln:

$$z(t) = z_0 \cos(\omega t) \quad (2.25)$$

$$\dot{z}(t) = -z_0 \omega \sin(\omega t) \quad (2.26)$$

$$\ddot{z}(t) = -z_0 \omega^2 \cos(\omega t) \quad (2.27)$$

Zur Übersicht des Systemverhaltens am Anfang einer Schwingung sind die maximalen Geschwindigkeits- und Beschleunigungswerte für die verschiedenen Boomlängen in Tabelle 2.8 betragsweise dargestellt. Die jeweilige Anfangsauslenkung ( $z_{0(l)}$ ) wurde aus Tabelle 2.4 entnommen.

Nr.:	Boomlänge	$l$	Geschwindigkeit	$\dot{z}_{(t=\frac{\pi}{\omega}, l)}$	Beschleunigung	$\ddot{z}_{(t=0, l)}$
1	0,5000	m	19,3188	m/s	0,2235	m/s <sup>2</sup>
2	1,0000	m	9,3178	m/s	0,3041	m/s <sup>2</sup>
3	1,5000	m	5,9818	m/s	0,3577	m/s <sup>2</sup>
4	2,0000	m	4,3120	m/s	0,3959	m/s <sup>2</sup>
5	2,5000	m	3,3086	m/s	0,4234	m/s <sup>2</sup>
6	3,0000	m	2,6385	m/s	0,4428	m/s <sup>2</sup>
7	3,5000	m	2,1587	m/s	0,4553	m/s <sup>2</sup>
8	4,0000	m	1,7979	m/s	0,4621	m/s <sup>2</sup>
9	4,3000	m	1,6213	m/s	0,4637	m/s <sup>2</sup>

Tabelle 2.8.: Maximalwerte der Systemverläufe

## 3. Stand der Technik

Der Stand der Technik wurde in einer vorangestellten Literaturrecherche<sup>1</sup> bereits erarbeitet. Neben verschiedenen Methoden, die zur Schwerkraftkompensation genutzt werden können, wie zum Beispiel die Kompensation durch Ausnutzung von Auftriebs-effekten im Wasser, oder die Simulation von Schwerelosigkeit während eines freien Falls, hat sich die mechanische Schwerkraftkompensation als geeignetste Methode für diesen Anwendungsfall herausgestellt.

### 3.1. Mechanische Schwerkraftkompensation

Die mechanische Schwerkraftkompensation wird oft für komplexe, mechanische Strukturen genutzt, da sie direkt mit der zu testenden Hardware verwendet werden kann. Dies erspart die Einbringung und Entwicklung verschiedener Modelle der Teststruktur. Die Nutzbarkeit der komplexen Hardware erfordert allerdings auch die Entwicklung speziell auf die Strukturen zugeschnittener Kompensationsmechanismen.

Das Prinzip der mechanischen Schwerkraftkompensation besteht einerseits aus der Suspension<sup>2</sup> einer Struktur zur direkten Kompensation der Schwerkraft, andererseits aus der Ermöglichung der Bewegung der Struktur in Kompensationsrichtung.

Bei der Suspension der Struktur durch ein Suspensionssystem wird die Struktur so gelagert, dass sich die Gewichtskraft vollständig als Lagerreaktion abzeichnet. Ein Suspensionssystem besteht dazu meist aus Seilen oder Fäden, an denen eine Struktur aufgehängt werden kann, es sind aber auch starre Suspensionssysteme denkbar, die eine Struktur unterstützen. Durch die Suspension wird, neben der Gewichtskraft der Struktur, allerdings auch jede Störkraft kompensiert, da sich Gewichtskräfte und Störkräfte addieren. Daher muss ein mechanisches Schwerkraftkompensationssystem auch eine Möglichkeit bereitstellen, auf Störkräfte ausweichend zu reagieren. Durch eine ausweichende Bewegung als Reaktion auf Störkräfte, wird das Verhalten einer Struktur in völliger Schwerelosigkeit simuliert. Die Reaktion auf Störkräfte kann einerseits passiv, andererseits aktiv erfolgen. Passive Reaktion beinhaltet meist Gegengewichte und Umlenkrollen. Die Gegengewichte sind exakt auf das Gewicht der Struktur angepasst. Bei einer Kraftzu-, oder -abnahme entsteht ein Ungleichgewicht, dass vom System selbstständig ausgeglichen wird. Allerdings ist es für diese Art der Schwerkraftkompensation nötig, die bewegte Masse zu verdoppeln, was sich negativ auf die Trägheitskräfte auswirkt.

---

<sup>1</sup>Projektarbeit: Schwerkraftkompensationsmechanismen für faltbare Strukturen.

<sup>2</sup>Lateinisch suspendere: „aufhängen“, „schweben lassen“.

Aktive Kompensation dagegen basiert auf der Bewegung aktiv gesteuerter Komponenten, die direkt in den Regelkreis des Systems implementiert werden. Störkräfte werden durch permanente Kraftmessung und dem Vergleich mit Sollwerten erkannt. Die ausweichende Bewegung der Struktur wird dann eingeleitet. Die Struktur wird solange in eine Richtung verschoben, bis die Störkraft keinen Einfluss mehr auf das System hat. Nachteilig an dieser Methode der Schwerkraftkompensation ist, dass die Störkräfte in ihrer Art und Wirkung ungefähr bekannt sein müssen.

## 3.2. Ergebnisse der Recherche

In der vorangestellten Literaturrecherche wurden bereits einige etablierte Techniken zu Thema Schwerkraftkompensation analysiert und zusammengetragen. In diesem Zuge ist es gelungen, die Hauptfunktionen, die ein solcher Mechanismus leisten soll, in einer Funktionsstruktur abzubilden. Weiterhin wurden einige Lösungsprinzipien für die einzelnen Funktionen abgeleitet und in einem morphologischem Kasten zur Verfügung gestellt.

Funktionsstruktur und morphologischer Kasten gelten in diesem Zusammenhang als Richtwerte für die Erstellung eigener Kompensationsmechanismen und können im Konstruktionsprozess verwendet werden. Die folgenden Abschnitte geben die Funktionsstruktur, den morphologischen Kasten und die Beschreibung der drei Hauptfunktionen als Auszug aus der Literaturrecherche wieder.

### 3.2.1. Funktionsstrukturen und Lösungsprinzipien

Die Funktionsstruktur ist in zwei Ebenen gegliedert. Die erste Ebene verdeutlicht das Gesamtziel, das an den Mechanismus gestellt ist, während die zweite Ebene dieses in drei Hauptfunktionen aufteilt.

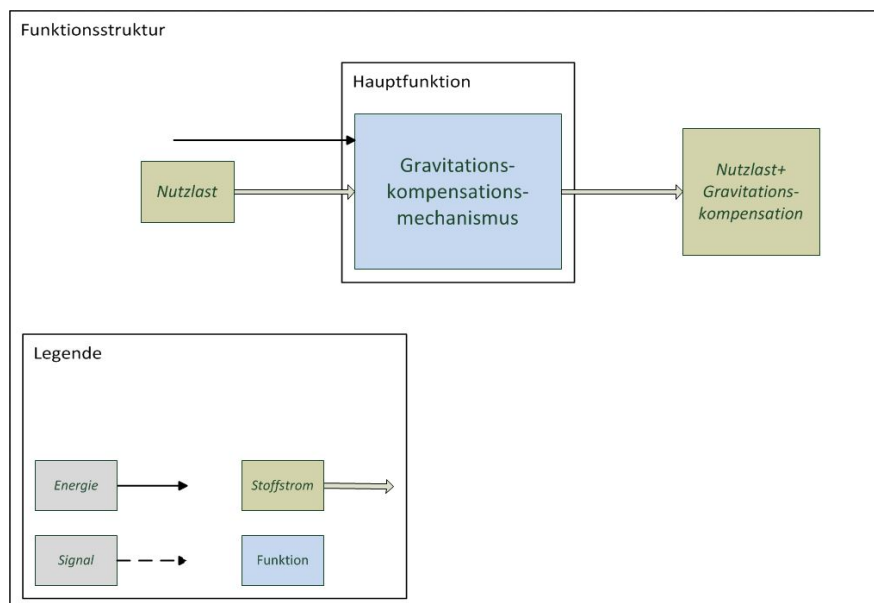


Abbildung 3.1.: Funktionsstruktur Ebene 1

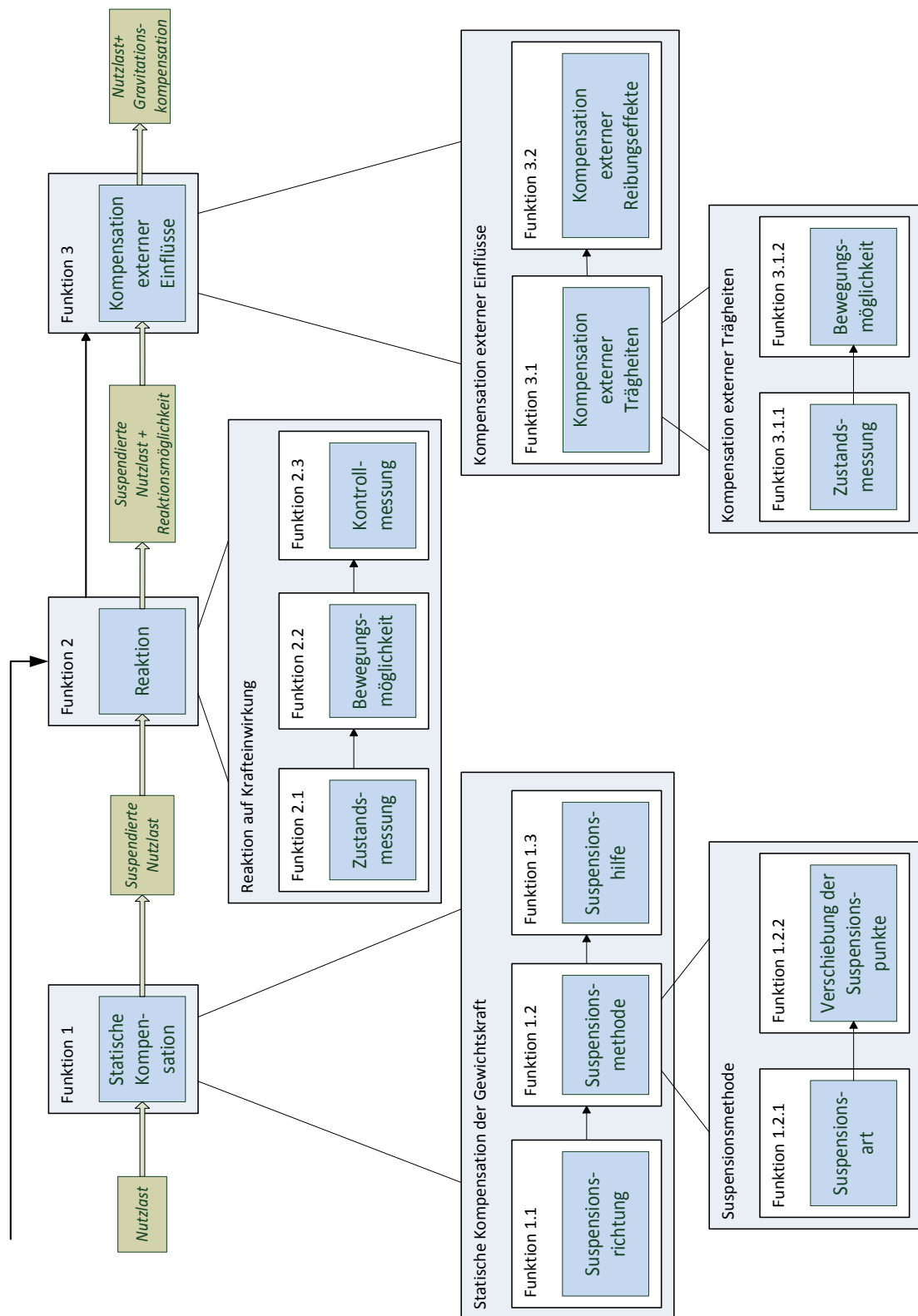


Abbildung 3.2.: Funktionsstruktur Ebene 2

		Morphologischer Kasten: Hauptfunktionen der Gravitationskompensationsmechanismen			
Funktion\Variante		1	2	3	4
F 1.1	1 Suspensionsrichtung	1D	2D	1D + 2D	3D
F 1.2.1	2 Suspensionsart	Aufhängung	Unterstützung		
F 1.2.2	3 Verschiebung der Suspensionspunkte	Entfällt (System ist stationär)	Wird passiv begleitet	Wird aktiv begleitet	Anbindung an eine Spiegelstruktur
F 1.3	4 Suspensionshilfe	Seil/ Faden	Linearfeder	Konstantkraftfeder	Druckfeder
F 2.1	5 (Zustands-)Messung	Passive Messung im Vorfeld	Aktive Messung während des Testes		
F 2.1	6 Messgröße (was?)	Gewicht (Masse der Nutzlast)	Kraft (Spannung im Seil)	Beschleunigung (... eines Teils)	Druck (... in einem Teil)
F 2.2	7 Prinzip	Passive Reaktion durch über Umlenkrollen geführtes Gegengewicht	Passive Reaktion durch Druckausgleich	Aktive Reaktion durch Motor und Seilwinde	Aktive Reaktion durch Motor und Linearbewegung
F 2.3	8 Kontrollmessung	Entfällt	Absolute Wegmessung	Relative Wegmessung	
F 3.1.1	9 Zustandsmessung	Entfällt	Auch durch F5	Auch durch F8	Separat
F 3.1.2	10 Prinzip	Entfällt	Unterstützender Motor	ZSRM	Abstimmung und Ausnutzung bestehender Komponenten
F 3.2	11 Kompensation externer Reibungseffekte	Entfällt	FUZZY-Algorithmus		

Abbildung 3.3.: Morphologischer Kasten der Hauptfunktionen

### 3.2.2. Beschreibung der Hauptfunktionen

- Statische Kompensation:

Hier wird die Gewichtskraft der Struktur bzw. der Nutzlast in einem Suspensionssystem kompensiert. Durch Aufhängen oder Unterstützen wird die Gravitationskraft in Form einer entgegen gerichteten Antigravitationskraft messbar.

- Reaktion auf Störkräfte:

Bei Auftreten einer Störkraft soll durch diese Funktion sichergestellt werden, dass sich die Struktur, ungehindert durch den Gravitationseinfluss, in eine entsprechende Richtung bewegen kann. Dies kann entweder passiv durch das Ermöglichen von immer gleichbleibenden Kräfteverhältnissen oder aktiv durch das Erzwingen einer ausweichenden Bewegung erfolgen.

- Kompensation externer Einflüsse:

Werden durch das Erfüllen einer Funktion, den Kompensationsmechanismus selbst, oder durch andere Begebenheiten externe Kräfte in das System geleitet, die eine Struktur in einer Schwerelosigkeitsumgebung nicht überwinden müsste, muss dafür gesorgt werden, dass diese kompensiert werden. Dazu muss gegebenenfalls ein geeigneter, zusätzlicher Mechanismus integriert werden.





# 4. Konzeptentwicklung

Der Konstruktionsprozess gestaltet sich im Folgenden nach der VDI-Richtlinie 2221 [5].

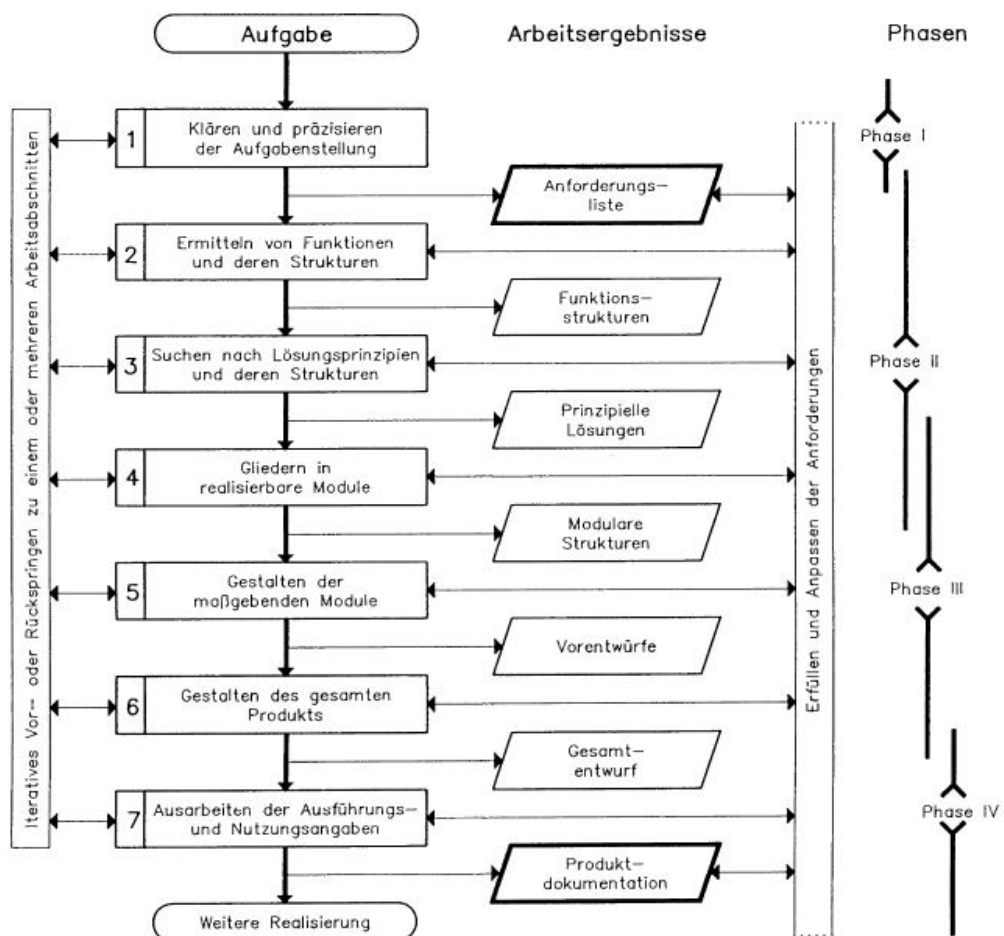


Abbildung 4.1.: Aus [5]: Generelles Vorgehen beim Entwickeln und Konstruieren

## 4.1. Klären und präzisieren der Aufgabenstellung

In dieser Aufgabe geht es um die Konzeptionierung und Entwicklung eines Schwerkraftkompensationsmechanismus (SKM), der die unter Kapitel 3 genannten Funktionen beschreibt.

Die Funktion des Mechanismus soll gleichermaßen unter normaler Atmosphäre, wie im Vakuum ermöglicht werden, damit der Einfluss der Segel auf das Schwingungsverhalten unter verschiedenen Bedingungen ermöglicht und analysiert werden kann. Dafür soll der Mechanismus so in den Teststand integriert werden, dass es möglich ist, das System auch vollständig, in Teilen oder ein Modell davon in einer Thermal-Vakuum Kammer aufzustellen. Je nach Anwendungsfall ist dann auf die Kompatibilität mit einer WSA bzw. SSA zu achten. Aufgrund des Wechsels zwischen den verschiedenen Testumgebungen soll eine kompakte oder modulare Bauweise gewählt werden. Aus Gründen der Ressourcenausnutzung sind hierfür Aluminium-Normprofile zu bevorzugen.

Alle gewollten und ungewollten Bewegungen, die die Masse des Systems bei einer Schwingung oder einer Entfaltung vollzieht, müssen durch den Mechanismus ausreichend begleitet werden. Dies gilt für die maximale Auslenkung der BSDU in Gravitationsrichtung ( $z_{s\max}=300$  mm), für die Schwankung der Masse in negativer x-Richtung während der Schwingung (Tabelle 2.5), den aus der Auslenkung resultierenden Kippwinkel der Masse ( $\varphi_{\max}=4.00^\circ$  bei  $z_{s\max}$ , siehe Gleichung 2.9) und für den Verdrehwinkel der Masse um die Längsachse des Booms<sup>1</sup>.

Die errechneten Werte für die maximalen Bewegungen müssen mit geeigneten Sicherheitsfaktoren verrechnet werden.

Die Lateralbewegung des Booms<sup>2</sup> und der dadurch resultierende Kippwinkel der Masse darf durch den Mechanismus nicht grundsätzlich behindert werden, benötigt allerdings auch keine spezielle Unterstützung, da diese Bewegung nicht in Gravitationsrichtung erfolgt. Für das Ausmaß dieser Bewegungen wird ebenfalls auf die oben genannten Werte referenziert, da sich die Steifigkeiten, für die Auslenkung in den entsprechenden Richtungen, nur geringfügig unterscheiden (Tabelle 2.1). Allerdings müssen diese Werte mit dem Faktor 1,5 versehen werden, da das BSI einer Lateralauslenkung des Booms nur geringen Widerstand bietet und es dadurch nicht als feste Einspannung angesehen werden kann.

Die Schwingung des Systems wird direkt durch die mitschwingenden Massen beeinflusst, daher müssen diese möglichst klein gehalten werden. Dies betrifft in erster Linie die Masse der BSDU-Lagerung, da diese für die Systemschwingung einen Fremdkörper darstellt.

Die Testläufe sollen möglichst repräsentativ gehalten werden, aus diesem Grund muss die Amplitude der Schwingung während der gesamten Schwingungsdauer dokumentiert werden. Die Dokumentation der Schwingung ist außerdem für anschließende Berechnungen der Schwingungsdämpfung des Systems wichtig. Die Amplitude der Schwingung soll daher durch ein externes Messgerät als Funktion der Zeit dargestellt werden können.

---

<sup>1</sup>Für diesen Winkel wurde aufgrund fehlender Referenzen ein ausreichend großer Wert von  $\pm 5^\circ$  angenommen.

<sup>2</sup>Die Lateralbewegung des Booms entspricht einer Auslenkung der Masse in y-Richtung.

Seitens der statischen Kompensation muss die Gewichtskraft der Struktur während der gesamten Entfaltung kompensiert werden. In einer statischen Überslagsrechnung wird dabei von insgesamt ca. 10 kg Kompensationsgewicht ausgegangen. Die mitschwingende Masse des Booms kann gegenüber der Kompensationsmasse vernachlässigt werden, daher ist es ausreichend, die Suspensionspunkte (SPs) nur an die BSDU zu bringen. Das Suspensionssystem muss dabei so gewählt werden, dass es die Gewichtskraft auch bei Bewegungen in Gravitationsrichtung kompensiert. Während der Entfaltung verschiebt sich die BSDU dauerhaft gegenüber dem Entfaltungsursprung, die BSDU-fixen SPs müssen daher vom Suspensionssystem begleitet werden können. Dabei muss das Suspensionssystem so ausgelegt werden, dass kleine Verschiebungen der SPs nicht zu Querkräften im System führen.

Weiterhin muss der Mechanismus auf die Bewegungen der Struktur bei einer Schwingung reagieren können. Aus Sicherheitsgründen und um das natürliche Verhalten der Teststruktur nicht zu beeinflussen, wird die Dynamik der Entfaltung auf maximal 15 Hz begrenzt. Daraus ergeben sich die Beschleunigungs- und Geschwindigkeitsrichtwerte für die Auslegung der Komponenten. Für die Reaktion auf Störkräfte muss die Gewichtskraft der Struktur in jedem Punkt erkannt und als Vergleichsgröße festgehalten werden. Dazu muss das variable Gewicht der Struktur in Vorversuchen möglichst genau ermittelt und festgehalten werden. Während der Entfaltung muss die Kraft, die tatsächlich auf die Masse wirkt, kontrolliert gemessen werden.

Da es sich bei den getesteten Strukturen um Flug- oder Qualifikationsmuster handelt, die nicht beschädigt werden dürfen, muss ein redundantes System zur Messung der maximalen Auslenkung eingeführt werden. Dieses System muss außerhalb des getesteten Systemkreises positioniert werden, um keine Komponente zu beeinflussen. Durch den Einsatz dieses Systems sollen Abbruchbedingungen für den Testlauf eingeführt werden können.

Weiterhin müssen externe Einflüsse, wie Trägheitskräfte oder Reibungseffekte, aktiv kompensiert werden, sobald sie entstehen. Externe Einflüsse sind grundsätzlich zu vermeiden.

## 4.2. Anforderungsliste

Aus den vorangestellten Kapiteln, den Ergebnissen aus der Literaturrecherche und der logischen Überlegung, wurde die nachstehend aufgeführte Anforderungsliste formuliert. Zur besseren Übersicht wurden die Hauptanforderungen in Kapitel 4.1 bereits ausformuliert.

Zur Gliederung der Liste wurden die Anforderungen in 5 Punkte unterteilt.

Punkt 1 „Allgemeine Anforderungen“ fasst die Anforderungen zusammen, die aufgrund des Bezugsprojektes an das System gestellt sind. Durch die in diesem Punkt aufgestellten Anforderungen können auch Funktionen abgeleitet werden, die von dem System erfüllt werden müssen.

Aus den Anforderungen A1.4 bis A1.8 wird abgeleitet, dass eine geeignete Lagerung eingeführt werden muss, die die geforderten Freiheitsgrade bereit stellen kann. die Anforderung A1.9 führt die Funktion der Amplitudenmessung ein.

Nicht alle Anforderungen führen zu einer eigenen Funktion. Anforderungen ohne direkten Bezug zu einer Funktion sind ebenfalls unter Punkt 1 aufgeführt.

Die Anforderungen A1.10 bis A1.12 geben die inneren Maße der Vakuumkammer (SSA) an. Für eventuelle Vakuumtests soll ein Modell des Teststandes in dieser Kammer aufgebaut werden. Es ist darauf zu achten, dass der Mechanismus ebenfalls mit einer Modellversion des Entfaltungsteststandes kompatibel ist. Da zu diesem Zeitpunkt allerdings keine Modellversion existiert, sind die inneren Maße der SSA als Richtwerte anzusehen.

Die Punkte 2 bis 4 wurden, in Bezeichnung und Reihenfolge, den in Kapitel 3.2.2 beschriebenen Hauptfunktionen entnommen. Aus diesen Anforderungen lassen sich die Funktionen wie unter Kapitel 3.2.1 entnehmen.

Anforderungen, die aus vorangestellten Anforderungen resultieren und als eigenständig gelten, werden in Punkt 5 „Resultierende Anforderungen“ aufgeführt.

Anforderungsliste: Schwerkraftkompensationsmechanismus				
Organisationsdaten			Anforderung	Version: 1
Nr.	Ursprung	F/W		Seite: 1 von 3
				Wert-Daten
1.) Allgemeine Anforderungen				
A1.1	DLR	F	Funktion in Atmosphäre und im Vakuum ermöglichen Einsatz in einer Thermal-Vakuum Kammer (SSA/ WSA)	<0,01 - 1 bar 10 - 30 °C
A1.2		W	Kompakte mobile Bauweise	
A1.3	DLR	W	Verwendung von Baukasten-Profilen/ Aluminium-Normprofile	
A1.4	GOS	F	Maximale Auslenkung der Masse in z-Richtung suspendieren Maximalen Hub beachten: $H_{max} = 2 \cdot z_{s max}$	$z_{s max}$ ± 300 mm $H_{max}$ ≥ 600 mm
A1.5	GEO	F	Schwankung der Masse in x-Richtung zulassen (Massenschwankung bei Auslenkung immer in negativer x-Richtung) Resultierende Rückstellkraft vernachlässigbar klein halten	$x_m$ 0 - 3 mm
	GEO	F	Kippwinkel der Masse bei Auslenkung in z-Richtung ermöglichen	$\varphi$ ± 4 °
A1.6	GEO	F	Maximalen Verdrehwinkel der Masse um die x-Achse ermöglichen	$\tau_{xs}$ ± 5 °
	GOS	W	Querauslenkung der Masse in y-Richtung zulassen (bei Lateralbewegung des Booms)	$y_{s max}$ ± 450 mm
A1.7	GEO	W	Verdrehwinkel um die Suspensionsachse ermöglichen (Entspricht dem Kippwinkel bei einer Auslenkung in y-Richtung)	$\tau_{zs}$ ± 6 °
A1.8		F	Vermeidung additiver Massen in der Lagerung	≤ 5 kg
A1.9		W	Kontinuierliche Messung der Amplitude während der Schwingung Zum Vergleich verschiedener Messungen Genauigkeit der Messung Abtastrate	± 300 mm ± 0,1 mm ≥ 200 Hz
A1.10	SSA	F	Max. Länge einhalten Hauptauszugsrichtung	ca 800 mm
A1.11	SSA	W	Max. Breite Entfaltungsrahmen beachten (mit bzw. ohne Segel)	ca 800 mm
A1.12	SSA	F	Max. Höhe Kompensationshub	ca 730 mm

Abbildung 4.2.: Anforderungsliste Seite 1 von 3

Anforderungsliste: Schwerkraftkompensationsmechanismus				
Organisationsdaten			Anforderung	Version: 1
Nr.	Ursprung	F/W		Seite: 2 von 3
				Wert-Daten
2.) Suspensionsanforderungen (Statische Kompensation)				
A2.1	FS	F	Gewichtskraft vertikal kompensieren 1D (vertikal)	≥ 10 kg
A2.2	FS	F	Geeignete Suspensionsmethode wählen Anbringung der Suspensionspunkte (SP) an der Masse	1 - 2 SP
A2.3	FS	F	Fixpunkte dauerhaft suspendieren und begleiten Suspensionspunkte verschieben sich mit der Struktur	
A2.4	FS	F	Struktur geeignet suspendieren Möglichst biegeweiche Suspensionshilfe verwenden	
3.) Reaktion auf Störkräfte				
A3.1	FS	F	In Gravitationsrichtung auf externe Kräfte reagieren Dynamisch Testablauf 1D (vertikal)	f ≤ 15 Hz
A3.2	FS	F	Kompensationsbedingungen geeignet messen Kompensationsbedingungen sind variabel (Gewichtsabnahme) (Eventuell Referenzmessung Verarbeiten)	m <sub>BSDU</sub> ≤ 2 kg Genauigkeit: ± 10 g
A3.3	FS	F	Kraft im Suspensionssystem dauerhaft messen Genauigkeit der Messungen Abtastrate	1 - 100 N ± 0,1 N ≥ 200 Hz
A3.4	FS	F	Aktive Reaktionsmöglichkeit:	
A3.4.1		F	Benötigte Kraft des Motors am Suspensionssystem	F ≥ 100 N
A3.4.2		F	Maximal benötigte Geschwindigkeit der Struktur	v ≥ 0,5 m/s
A3.4.3		F	Beschleunigung des Motors	a ≥ 20 m/s <sup>2</sup>
A3.5	FS	F	Integrierte Kontrollmessung: Auslenkung in z-Richtung Genauigkeit der Messung Abtastrate	± 300 mm ± 0,1 mm ≥ 200 Hz
4.) Kompensation externer Einflüsse				
A4.1	FS	W	Externe Einflüsse, wie Trägheitskräfte oder Reibung Vermeiden (Aktive Kompensationsregelung der passiven bevorzugen)	

Abbildung 4.3.: Anforderungsliste Seite 2 von 3

Anforderungsliste: Schwerkraftkompensationsmechanismus				
Organisationsdaten			Anforderung	Version: 1
Nr.	Ursprung	F/W		Seite: 3 von 3
				Wert-Daten
5.) Resultierende Anforderungen				
A5.1	A2.3	W	Positionssteuerung Externes Signal	
A5.2	A1.1	F	Vermeidung von Reibungseffekten "schlechtes Reibverhalten im Vakuum"	
A5.3		F	Komponenten gut Regelbar auslegen	
A5.4	SSA	F	Regelungstechnik muss für die Nutzung in einer Vakuumkammer extern angeschlossen werden können	
A5.5	SSA	F	Montierungsmöglichkeit für SSA Lochabstand, Verschraubungsschema etc. einhalten	
FS	Bezug auf Funktionsstruktur		SP	Suspensionspunkt(e)
GOS	Anf. folgt aus GOSSAMER		GEO	geometrisch bedingte Anforderung
Ax.x	Anf. folgt aus Ax.x		DLR	spezielle Anforderung seitens DLR

Abbildung 4.4.: Anforderungsliste Seite 3 von 3

### 4.3. Ermitteln von Funktionen und Strukturen

Die Funktionen, die der Mechanismus leisten soll, ergeben sich größten Teils aus der oben aufgeführten Anforderungsliste, sie wurden in einer Funktionsstruktur geordnet dargestellt. Die Funktionsstruktur wurde auf der Grundlage der in Kapitel 3 aufgeführten Funktionsstruktur erstellt. Zusätzlichen Funktionen, die in Kapitel 4.2 beschrieben sind, wurden ergänzt.

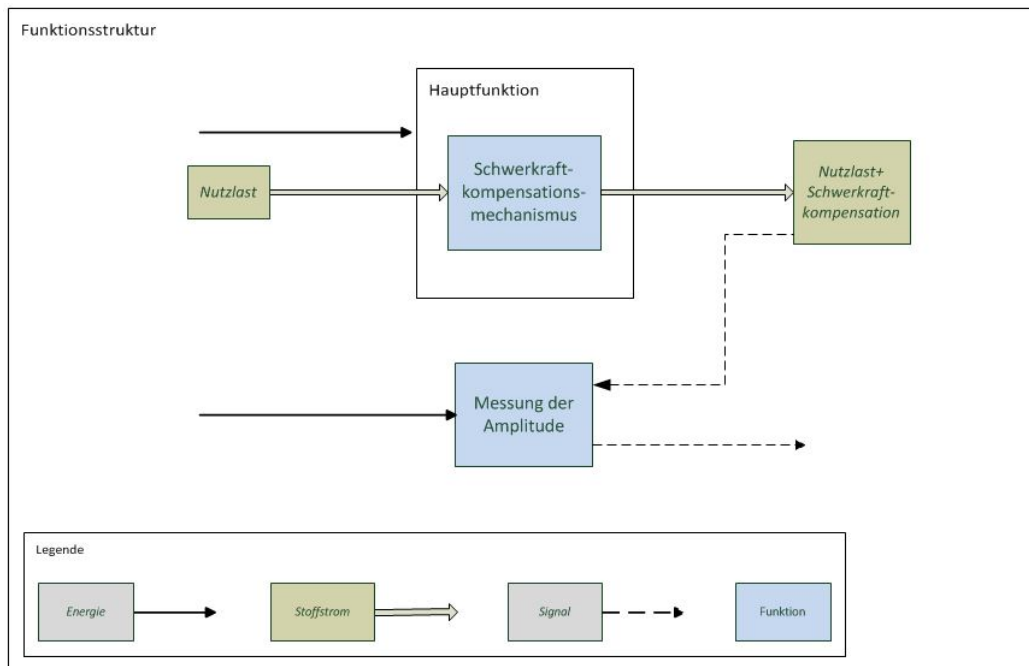


Abbildung 4.5.: Funktionsstruktur Ebene 1



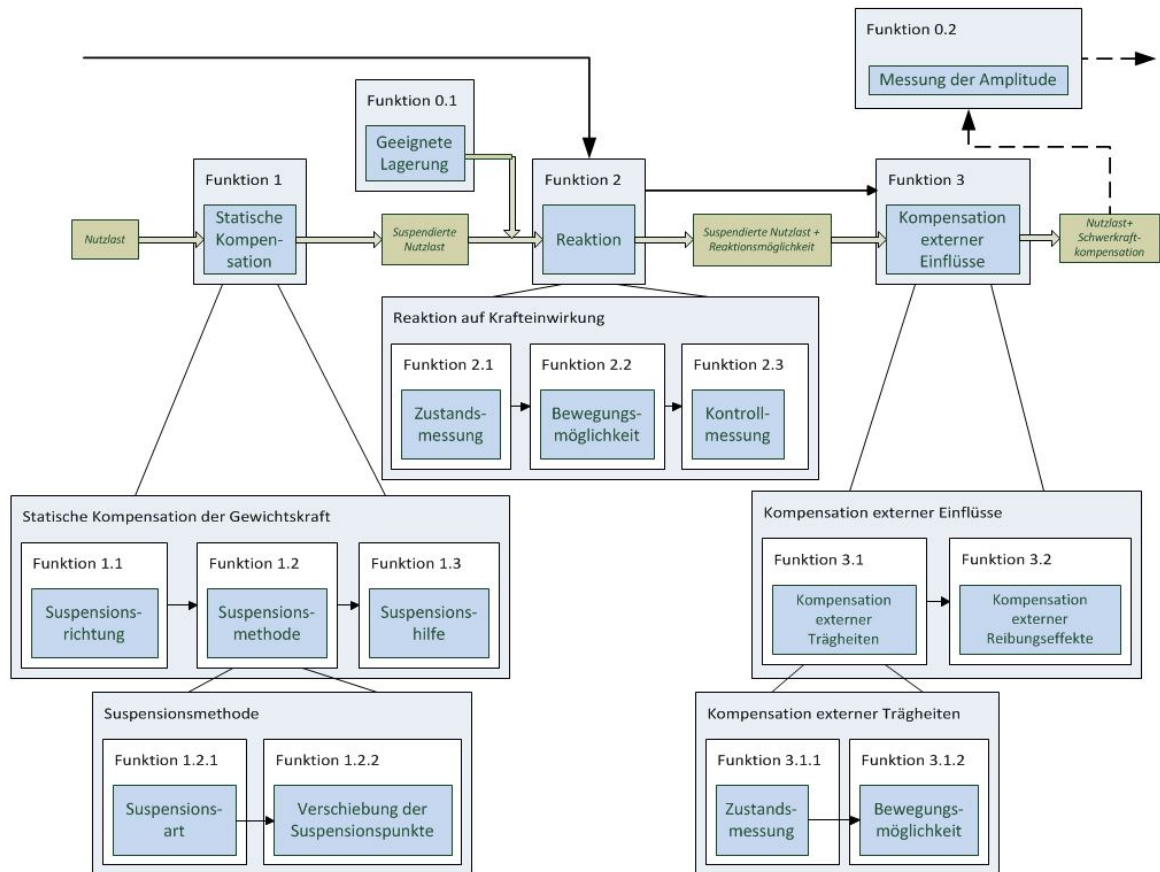


Abbildung 4.6.: Funktionsstruktur Ebene 2

## 4.4. Lösungsprinzipien und deren Strukturen

Der morphologische Kasten bietet zu den einzelnen Funktionen geeignete Lösungsprinzipien an. Die Kombination der einzelnen Prinzipien führt zu einem Gesamtkonzept.

Grundlage für die Erstellung des in Abbildung 4.7 angegebenen morphologischen Kastens war der morphologische Kasten aus der Literaturrecherche in Kapitel 3 (Abbildung 3.3), die oben angegebene Anforderungsliste sowie die Funktionsstruktur.

In dem hier dargestellten Kasten wurden, zur besseren Übersicht, die für die jeweiligen Konzepte verwendeten Kombinationen durch farbige Linien hervorgehoben. Eine Version des Kastens ohne Hervorhebung befindet sich in Anhang B.

Die aus der Kombination der verschiedenen Teillösungen hervorgehenden Konzepte 1,2 und 3 sind in Kapitel 4.4.1 bis 4.4.3 dargestellt. Die Konzeptskizzen sind rein quantitativ und dienen nur der groben Darstellung der verschiedenen Komponenten. Ein in der Skizze eingezeichnetes Detail soll hier nur als Andeutung angesehen werden und kann sich im weiteren Konstruktionsprozess hinsichtlich Position, Art und Form noch grundlegend ändern. Wichtig ist, dass die entsprechende Funktion prinzipiell dargestellt ist.

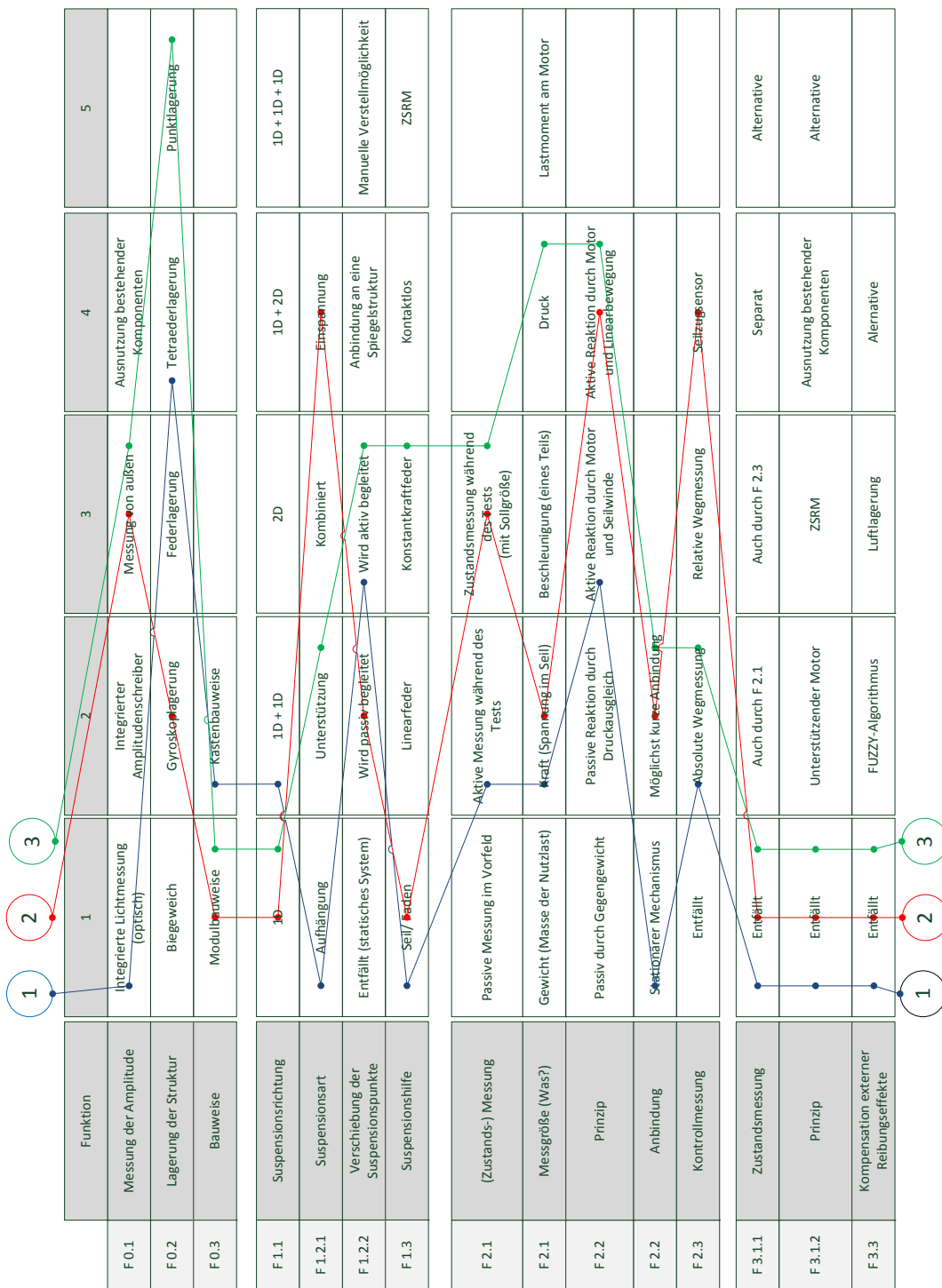


Abbildung 4.7.: Morphologischer Kasten zur Übersicht prinzipieller Lösungen der Anforderungen des SKM

## 4.4.1. Konzept 1

F 0.1	Integrierte Lichtmessung (optisch)	F 1.1	1D + 1D	F 2.1	Aktive Messung während des Tests	F 3.1.1	Entfällt
F 0.2	Tetraederlagerung	F 1.2.1	Aufhängung	F 2.1	Kraft (Spannung im Seil)	F 3.1.2	Entfällt
F 0.3	Kastenbauweise	F 1.2.2	Wird aktiv begleitet	F 2.2	Aktive Reaktion durch Motor und Seilwinde	F 3.3	Entfällt
		F 1.3	Seil/Faden	F 2.2	Stationärer Mechanismus		
				F 2.3	Absolute Wegmessung		

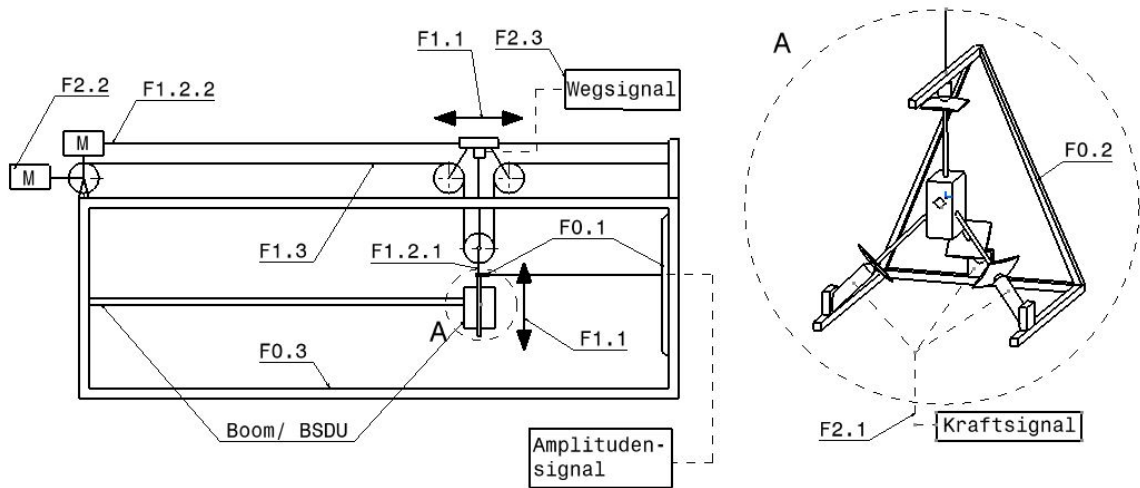


Abbildung 4.8.: Konzept-1 Skizze

Dieses Konzept verbindet den Schwerkraftkompensationsmechanismus in einer kompakten Bauweise. Alle Komponenten befinden sich in einem festen Rahmen. Die Masse wird von dem Suspensionssystem getragen und ein Kraftsensor misst die tatsächlich auf die Masse wirkende Kraft. Zur Regulierung der Kraft in dem System ist das Seil des Suspensionssystems an einen Radialmotor angeschlossen. Dieser kann durch die Drehbewegung die Länge des Seils kontrollieren, dadurch wird die Position der Masse beeinflusst.

Das Suspensionssystem ist seinerseits an einem Verschiebemechanismus angebracht, um die Position der Masse während der Entfaltung zu begleiten.

Die Masse wird dabei in einer Tetraederlagerung gelagert. Durch die sphärischen Lagerflächen lässt die Lagerung alle Rotationsfreiheitsgrade der Masse zu.

Die Amplitude der Schwingung wird durch ein Lichtsignal digital ausgewertet.

Die Wegmessung erfolgt über einen extern angeschlossenen Wegsensor.

## 4.4.2. Konzept 2

F 0.1	Messung von außen	F 1.1	1D	F 2.1	Zustandsmessung während des Tests (mit Sollgröße)	F 3.1.1	Entfällt
F 0.2	Gyroskoplagerung	F 1.2.1	Einspannung	F 2.1	Kraft (Spannung im Seil)	F 3.1.2	Entfällt
F 0.3	Modulbauweise	F 1.2.2	Wird passiv begleitet	F 2.2	Aktive Reaktion durch Motor und Linearbewegung	F 3.3	Entfällt
		F 1.3	Seil/ Faden	F 2.2	Möglichst kurze Anbindung		
				F 2.3	Seilzugsensor		

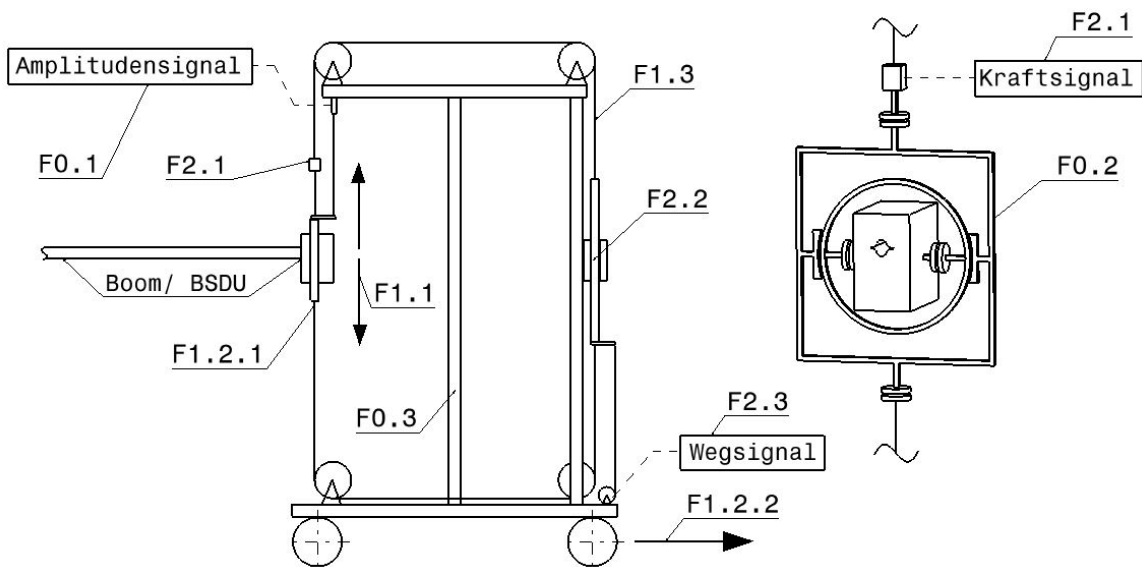


Abbildung 4.9.: Konzept-2 Skizze

Der SKM wird in diesem Konzept direkt an ein Modul des Entfaltungsteststandes angebunden. Das Modul kann im Ganzen mit der Teststruktur verbunden werden. Das Suspensionssystem spannt die Masse von beiden Seiten ein, dabei ist sie gyroskopisch gelagert, um ihr alle Rotationsfreiheitsgrade zu erlauben. Über Umlenkrollen ist das System an beiden Enden mit einem vertikal angeordnetem Linearmotor verbunden. Dadurch hat eine Verschiebung des Motorläufers direkten Einfluss auf die Position der Masse.

Es ist möglich, den Motor in diesem Konzept in verschiedenen Positionen anzuordnen (Hinter der Masse oder seitlich davon).

Die Kraft, die auf die Masse wirkt, wird über einen Kraftsensor ständig gemessen und mit Sollwerten verglichen.

Die Amplitude der Schwingung wird durch ein Lichtsignal digital ausgewertet.

Die Wegmessung erfolgt über einen extern angeschlossenen Wegsensor.

### 4.4.3. Konzept 3

F 0.1	Messung von außen	F 1.1	1D + 1D	F 2.1	Zustandsmessung während des Tests (mit Sollgröße)	F 3.1.1	Entfällt
F 0.2	Punktlagerung	F 1.2.1	Unterstützung	F 2.1	Druck	F 3.1.2	Entfällt
F 0.3	Modulbauweise	F 1.2.2	Wird aktiv begleitet	F 2.2	Aktive Reaktion durch Motor und Linearbewegung	F 3.3	Entfällt
		F 1.3	Konstantkraftfeder	F 2.2	Möglichst kurze Anbindung		
				F 2.3	Absolute Wegmessung		

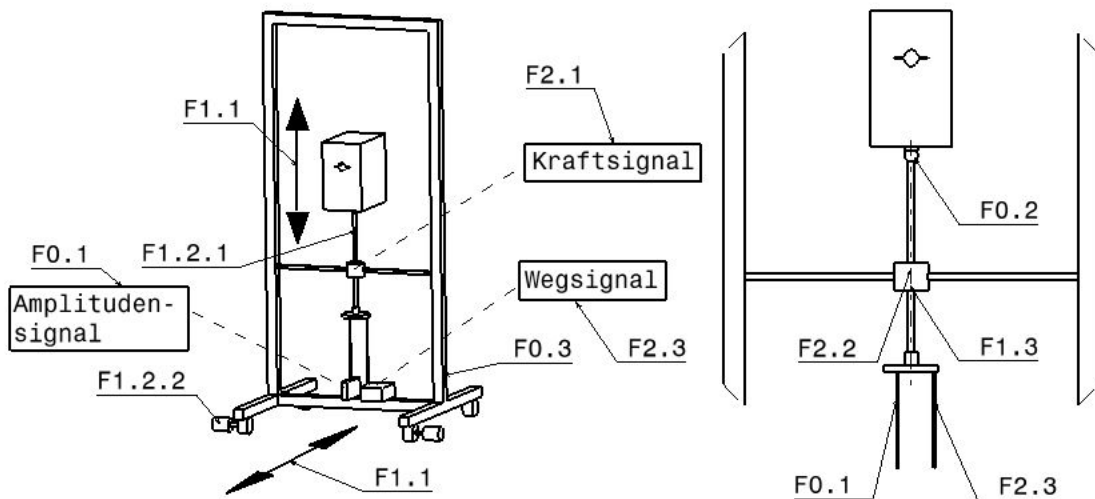


Abbildung 4.10.: Konzept-3 Skizze

Der SKM wird in diesem Konzept direkt an ein Modul des Entfaltungsteststandes angebunden. Das Modul kann im Ganzen mit der Teststruktur verbunden werden. Die Masse wird hierbei durch ein Suspensionssystem unterstützt, das direkt aus einem vertikal angeordnetem Linearmotor mit Punkt- oder Punktlagerung besteht. Die Punkt- oder Punktlagerung an der Unterseite der Masse lässt die Rotationsfreiheitsgrade ausreichend zu. Eine Verstellung der Läuferposition hat direkten Einfluss auf die Position der Masse.

Zur Bestimmung der tatsächlich wirkenden Kraft wird permanent der Druck gemessen, der durch das System auf einen Kraftsensor ausgeübt wird.

Die Amplitude der Schwingung wird durch ein Lichtsignal digital ausgewertet.

Die Wegmessung erfolgt über einen extern angeschlossenen Wegsensor.

## 4.5. Bewertung der Konzepte

Die Bewertung der aufgeführten Konzepte erfolgt anhand einer spezifischen Bewertungsmatrix, die den gestellten Anforderungen und sonstigen Einflüssen Bewertungskriterien zuweist. Es wird hierbei geprüft, inwiefern die jeweiligen Lösungsprinzipien der einzelnen Konzepte und deren Zusammenspiel, die in der Bewertungsmatrix gestellten Leitsätze erfüllen.

Die Punktevergabe erfolgt hierbei anhand einer Werteskala (Tabelle 4.1). Für eine Auswertung durch ein Zehnersystem, mit Anlehnung an eine Prozentvorstellung, wird das Wertspektrum mit 0 bis 10 Punkten bevorzugt<sup>3</sup>.

Jedem Bewertungskriterium wird dabei eine Gewichtung zugeordnet, die die Wichtigkeit der einzelnen Kriterien im Vergleich zu deren Gesamtheit angibt. Die Gewichtung aller Bewertungskriterien beträgt in Summe 1.

Werteskala			
Nutzwertanalyse		Richtlinie VDI 2225	
Pkt.	Bedeutung	Pkt.	Bedeutung
0	absolut unbrauchbare Lösung	0	unbefriedigend
1	sehr mangelhafte Lösung		
2	schwache Lösung	1	gerade noch tragbar
3	tragbare Lösung		
4	ausreichende Lösung	2	ausreichend
5	befriedigende Lösung		
6	gute Lösung mit geringen Mängeln	3	gut
7	gute Lösung		
8	sehr gute Lösung	4	sehr gut (ideal)
9	über die Zielvorstellung hinausragende Lösung		
10	Ideallösung		

Tabelle 4.1.: Aus [5]: Werteskala für Nutzwertanalyse und Richtlinie VDI 2225

Aus Tabelle 4.1 wird abgeleitet, dass für eine „gute“ Konzeptlösung, die für die weitere Bearbeitung in Betracht gezogen werden kann, ein Erfüllungsgrad von mindestens 70 % erreicht werden muss. Abbildung 4.11 zeigt die Bewertung der einzelnen Konzepte anhand einer Bewertungsmatrix. Im Folgenden wird Konzept 2 weiter bearbeitet, da der Erfüllungsgrad für dieses Konzepts bei über 70 % liegt.

<sup>3</sup>Das Wertspektrum mit 0 bis 4 Punkten zielt auf eine Grobbewertung bei bekanntem Durchschnittswert.

Nr		Bewertungsmatrix											
		Bewertungskriterium:											
		Beschreibung		Konzept 1			Konzept 2			Konzept 3			
Benennung	Bew.	Eigenschaft	Wert	Gew. Wert	Eigenschaft	Wert	Gew. Wert	Eigenschaft	Wert	Gew. Wert	Eigenschaft	Wert	Gew. Wert
	Gew.	e1	w1	wg1	e1	w1	wg1	e1	w1	wg1	e1	w1	wg1
1	0,01	Der SKM lässt sich einfach und schnell an verschiedenen Orten auf-, und abbauen, bzw. mit der Struktur verbinden.	gute Lösung	7	0,1	ausreichende Lösung	4	0	über die Zielvorstellung hinausragende Lösung	9	0,1		
2	0,07	Der SKM lässt sich in seiner Größenordnung variieren, ohne Komponenten auszutauschen.	ausreichende Lösung	4	0,3	sehr gute Lösung	8	0,6	befriedigende Lösung	5	0,4		
3	0,02	Die räumliche Ausrichtung des SKM, relativ zum System lässt sich platzsparend variieren.	absolut unbrauchbare Lösung	0	0	gute Lösung	7	0,1	schwache Lösung	2	0		
4	0,19	Die benötigten Komponenten sind einach zu beschaffen, oder schon vorhanden und das Prinzip lässt sich baulich einfach umsetzen.	ausreichende Lösung	4	0,8	gute Lösung	7	1,3	sehr gute Lösung	8	1,5		
5	0,17	Die Schwenkbewegung der Masse bei Auslenkung wird durch das Prinzip nicht behindert und die Rückstellende Kraft bleibt vernachlässigbar klein.	gute Lösung mit geringen Mängeln	6	1	sehr gute Lösung	8	1,4	sehr mangelhafte Lösung	1	0,2		
6	0,1	Der Kippwinkel der Masse wird ohne Entstehung eines Kraftmomentes ermöglicht.	gute Lösung	7	0,7	gute Lösung	7	0,7	gute Lösung mit geringen Mängeln	6	0,6		
7	0,06	Die Rotation der Masse um die Boom-Achse ohne Entstehung eines Kraftmomentes ermöglicht.	sehr gute Lösung	8	0,5	gute Lösung	7	0,4	schwache Lösung	2	0,1		
8	0,1	Die Lateralbewegung des Booms wird durch das System nicht grundsätzlich behindert.	schwache Lösung	2	0,2	gute Lösung	7	0,7	gute Lösung	7	0,7		
9	0,06	Die bewegte Masse im Messbereich des Systems wird möglichst klein gehalten.	ausreichende Lösung	4	0,2	befriedigende Lösung	5	0,3	sehr gute Lösung	8	0,5		
10	0,14	Das Sicherheitssystem kann die maximale Auslenkung messen, ohne dabei die Kompensation zu beeinflussen.	ausreichende Lösung	4	0,6	sehr gute Lösung	8	1,1	sehr gute Lösung	8	1,1		
11	0,08	Die verwendeten Komponenten lassen sich regelungstechnisch betrachtet gut steuern.	ausreichende Lösung	4	0,3	gute Lösung	7	0,6	gute Lösung	7	0,6		
				0			0			0			
				0			0			0			
	1		SUMME:	50	4,63	SUMME:	75	7,23	SUMME:	63	5,75		
	0,0909		Erfüllungsgrad [%]:	46,3		Erfüllungsgrad [%]:	72,3		Erfüllungsgrad [%]:	57,5			

SKM: Schwerkraftkompensationsmechanismus

Abbildung 4.11.: Bewertungsmatrix





## 5. Konzeptionelle Lösung

Die Bewertung aller Konzeptlösungen in Kapitel 4.5 zeigt, dass das Konzept 2 als die vielversprechendste Lösung aus dem Konzeptionsprozess hervorgeht. Aus diesem Grund wird nur dieses weiter verfolgt und bearbeitet. Das Konzept wird im Folgenden näher beschrieben und als Schwerkraftkompensationsmechanismus bezeichnet.

### 5.1. Schwerkraftkompensationsmechanismus

Der SKM wird von einem Gerüst aus Aluminiumprofilen getragen und stellt somit ein Modul der Bodenentfaltungstestanlage dar. Das Gerüst bildet den Rahmen an dem das Suspensionssystem befestigt wird, in das die zu testende Struktur eingespannt werden kann. Dabei wird die translatorische Bewegung der Struktur in Gravitationsrichtung durch einen Linearmotor ermöglicht, der seitlich an dem Gerüst befestigt wird. Die vertikale Ausrichtung des Motors sorgt dabei für eine möglichst reibungsarme Bewegung des Motorläufers. Die Führung des Seils erfolgt durch Seilrollen, die ebenfalls direkt an das Gerüst montiert werden.

Eine gyroskopische Lagerung sorgt während des Tests für die Bereitstellung der benötigten Freiheitsgrade.

Störkräfte werden durch Kraftsensoren erkannt, die direkt in die Lagerung implementiert sind. Während des Testes wird die Kraft, die von der zu testenden Struktur ausgeht, permanent gemessen und mit vorher definierten Sollwerten verglichen. Das Suspensionssystem reagiert auf zu große oder zu kleine Kräfte indem es die Struktur entsprechend bewegt.

Ein Sicherheitssystem, bestehend aus einem Seilzugsensor, der außerhalb des Systemkreises mit dem Linearmotor verbunden ist, überwacht während des gesamten Tests die Auslenkung der Struktur und führt Abbruchbedingungen ein.

Weiterhin misst ein Lichtsensor die während einer Schwingung entstehende, zeitliche Amplitude der Masse, um das Schwingverhalten des Systems zu dokumentieren.

## 5.2. Gliederung in realisierbare Module

Das Gesamtkonzept lässt sich zur besseren Gliederung und Bearbeitung in die folgenden Module aufteilen. Die Module stellen Baugruppen dar, die für sich als eigenständig betrachtet werden können.

- Modul 1: Gestell

Das Gestell bildet die tragende Struktur für den Mechanismus.

- Modul 2: Kraftmessung

Die Kraftmessung soll während des gesamten Testlaufes die tatsächlich auf die Masse wirkende Kraft messen. Durch eine geschickte Anbringung, möglichst nah an der Masse, sollen dabei Fehler vermieden werden.

- Modul 3: Gyroskopische Lagerung

Die gyroskopische Lagerung wird als ein eigenständiges Modul betrachtet. Sie wird speziell nur dann benötigt, wenn in dem betrachteten System eine starre Struktur als schwingende Masse fungiert, die drehbar gelagert werden muss. Schwingende Punktmassen oder Systeme ohne definierbaren Massepunkt benötigen diese Art Lagerung nicht, da eine biegeeweiche Lagerung ausreichend ist.

- Modul 4: Linearmotor und Seilsystem

Das Seilsystem soll einerseits die Masse statisch suspendieren, andererseits die Bewegung dieser Masse, hauptsächlich in Gravitationsrichtung, zulassen. Der Linearmotor wird dazu direkt mit dem Seilsystem verbunden. Er wird so ausgelegt, dass sein Hub in beiden Richtungen der maximalen Massenauslenkung entspricht.

- Modul 5: Sicherheitssystem

Das Sicherheitssystem soll die maximale Auslenkung des Motors und damit die der Masse messen, ohne dabei einen Einfluss auf das System zu nehmen.

- Modul 6: Amplitudenmessung

Die Amplitudenmessung wird ebenfalls als eigenständige Baugruppe eingeführt. Sie kann für Entfaltungstests, ohne Schwingungsbetrachtung aus dem System entfernt werden.

# 6. Gestaltung der maßgeblichen Module

## 6.1. Gesamtentwurf

Der Gesamtentwurf ist in folgender Abbildung isometrisch dargestellt. Die beweglichen Seilsysteme wurden nur angedeutet dargestellt.

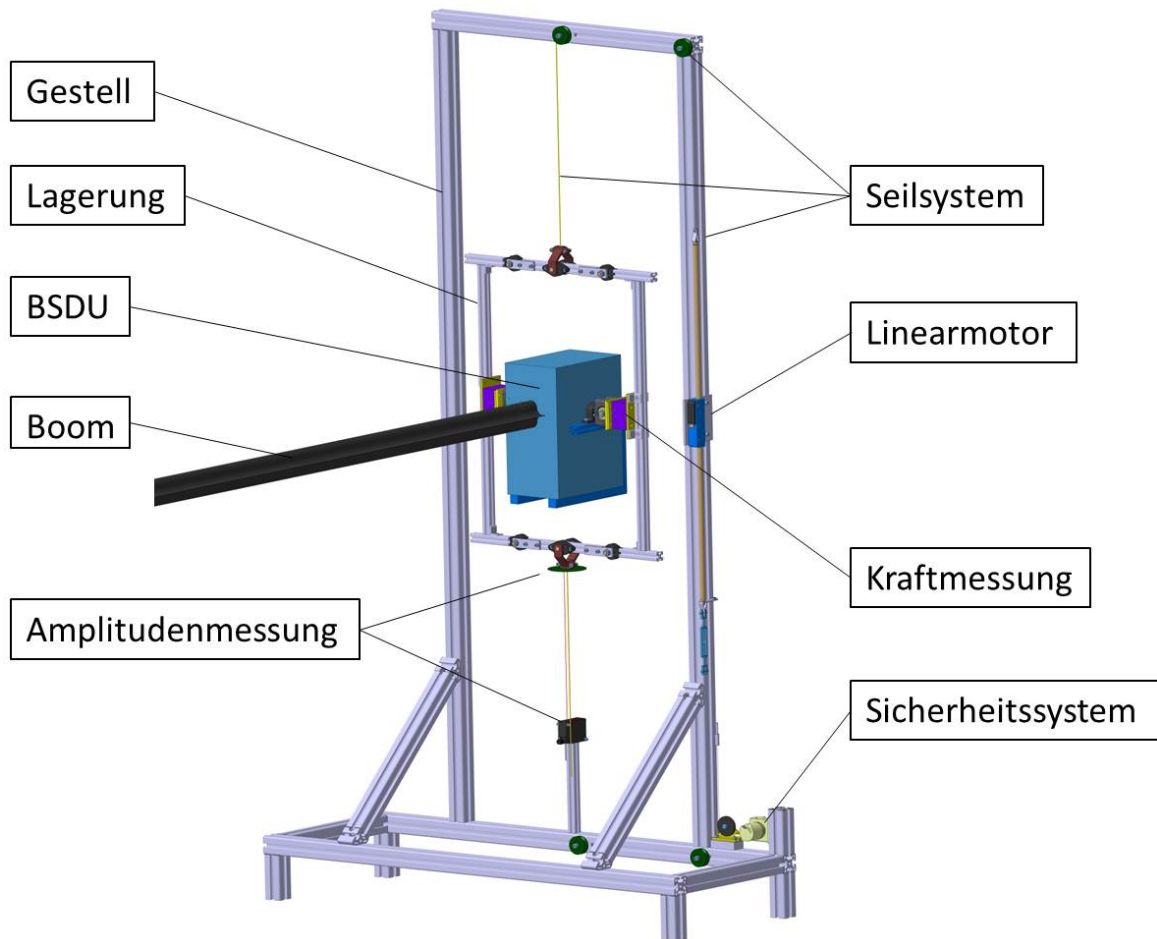


Abbildung 6.1.: SKM

Die verwendeten Teile sind in einer Stückliste in Anhang C aufgeführt.

## 6.2. Gestell

Das Gestell wird durch Ausnutzung bestehender Ressourcen vollständig aus Aluminiumprofilen hergestellt. Die Profile haben eine Kantenlänge von 40 mm und an jeder Seite eine 8 mm breite Befestigungsnut für Verschraubungen mit maximal M8 Gewindeschrauben und den dazugehörigen Nutensteinen. Stoßseitig werden Automatik-Verbindungssätze in die Nuten geschraubt um die Profile direkt miteinander zu verbinden. Abbildung 6.2 zeigt ein solches Normprofil und einen Verbindungssatz.

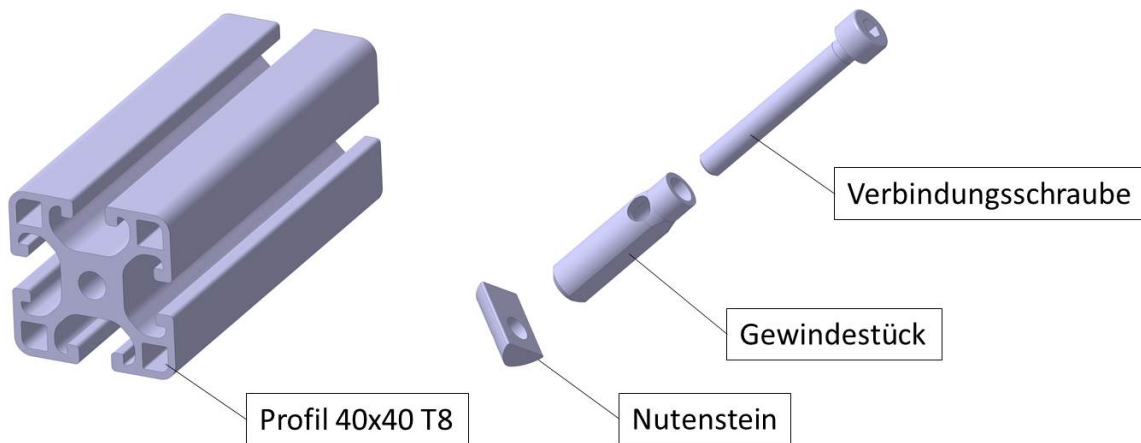


Abbildung 6.2.: Profil 40x40-T8 (links), Automatik-Verbindungssatz (rechts)

Das Gestell ist in Abbildung 6.3 dargestellt. Die BSDU wird inklusive Lagerung in der hinteren Ebene, zwischen den seitlichen Streben befestigt. Die Umlenkrollen des Seilsystems befinden sich dann ebenfalls an dem hinteren Rahmen. Das Seilsystem verläuft in der Ebene des Rahmens, der Linearmotor wird außenseitig an einer der seitlichen Streben befestigt.

Die Form des Gestells wurde an eine seitliche Anordnung des Motors angepasst, um den Raum hinter der BSDU möglichst wenig zu beanspruchen. Die Füße des Gestells werden zur Anbindung an die Bodenentfaltungstestanlage, je nach Anwendungsfall auf eine bestehende Bewegungsvorrichtung oder auf ein Schienensystem montiert. In beiden Fällen können eventuell entstehende Kippmomente durch das tragende System ausgeglichen werden.

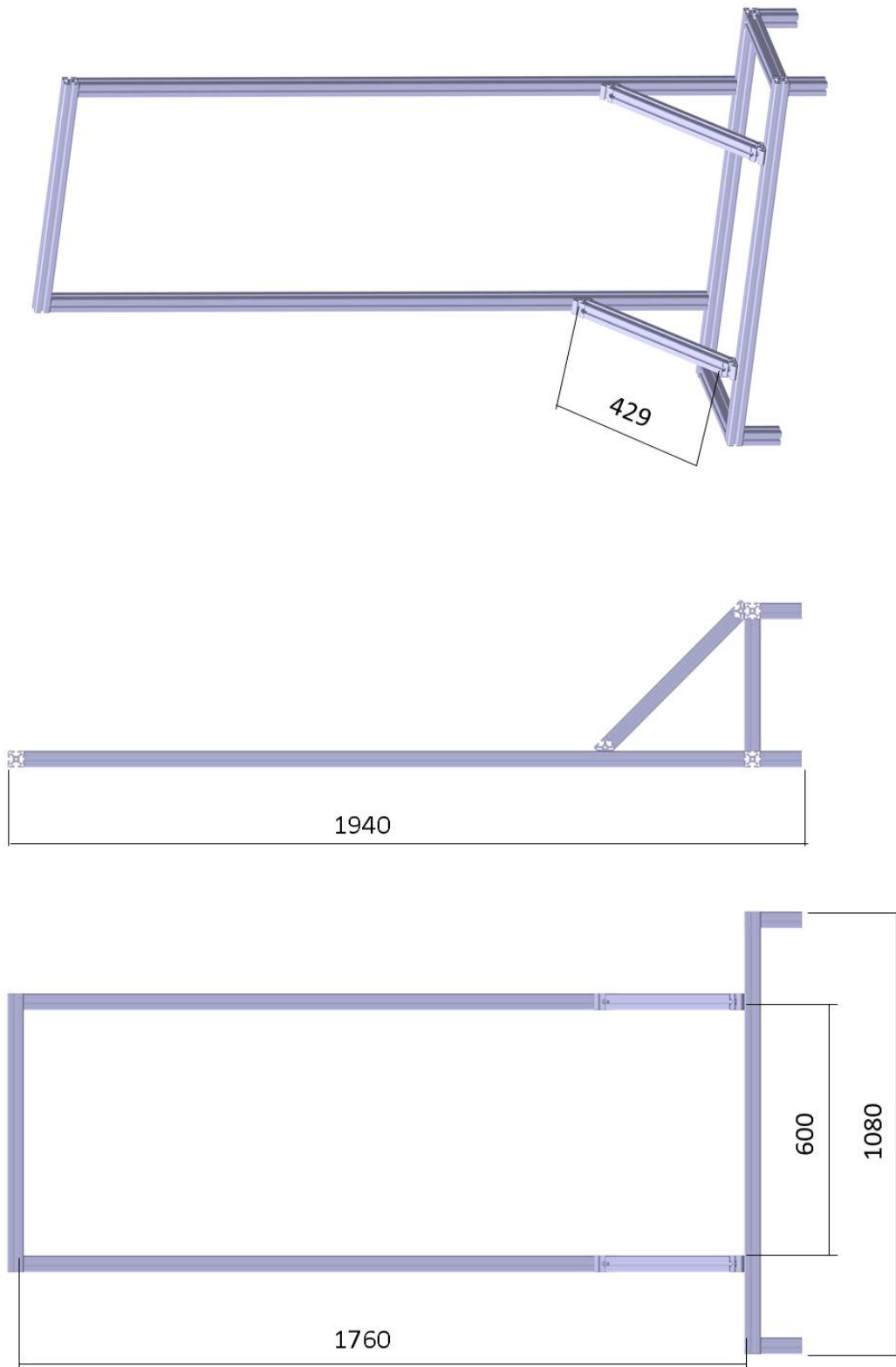


Abbildung 6.3.: Gestell in Hauptansichten

### 6.3. Kraftmessung

Zur Kraftmessung wird eine Dreiachkraftmessdose verwendet, die so ausgerichtet wird, dass sie die in Gravitationsrichtung wirkende Kraft unabhängig von der Schiefstellung der BSDU aufnehmen kann. Es werden zwei Messdosen verwendet, die möglichst nah an die schwingende Masse gebracht werden, um die Messung systemfremder Trägheiten zu vermeiden. Die symmetrische Anordnung erlaubt eine bessere Umsetzbarkeit und Austarierung der Lagerung.

Das Prinzip der Anordnung ist in Abbildung 6.1 dargestellt.

Zur Auslegung der Kraftmessdose (KMD) werden alle Kräfte addiert, die auf der KMD lasten. Einen Einfluss haben die Masse der BSDU ( $m_{BSDU}(l)$ ) und die Masse der Befestigungsteile der Lagerung ( $m_{li} \approx 600 \text{ g}$ ) unter Wirkung der Erdbeschleunigung  $g$ , sowie unter Wirkung der maximalen Beschleunigung ( $\ddot{z}_{(t=0,l)}$ ) aus Tabelle 2.8 und die maximale Federkraft des Booms ( $F_c = c_{Test2}(l) \cdot z_{(t=0,l)}$ )<sup>1</sup>. Der Einfluss auf die KMD ( $F_{KMD}$ ) ist in Gleichung 6.1 zusammengefasst.

$$F_{KMD}(l) = (m_{BSDU}(l) + m_{li}) \cdot (g + \ddot{z}_{(t=0,l)}) + c_{Test2}(l) \cdot z_{(t=0,l)} \quad (6.1)$$

Der Verlauf der maximal wirkenden Kraft wird in Abbildung 6.4 als Funktion der Boomlänge dargestellt.

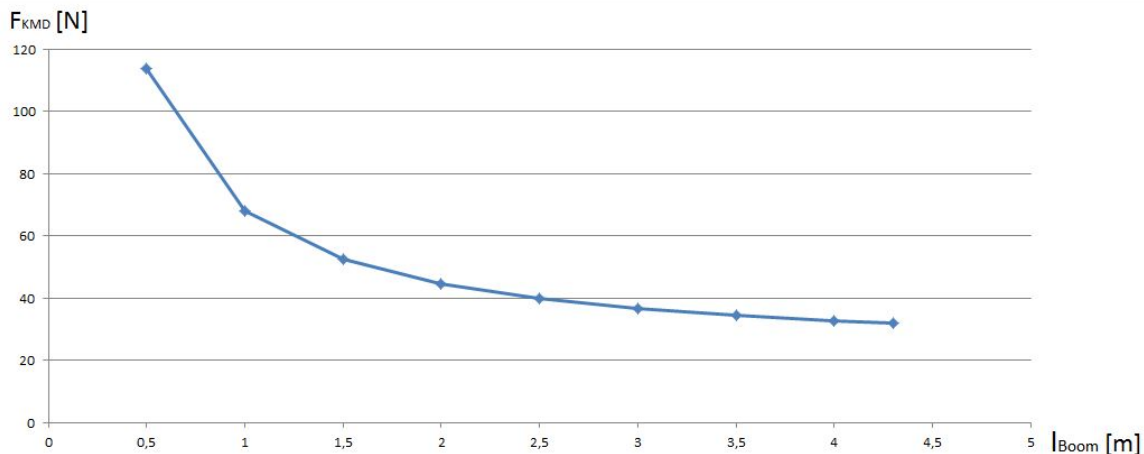


Abbildung 6.4.: Verlauf der auf die KMD wirkenden Kraft

<sup>1</sup>Die Werte für die Steifigkeit und die maximale Auslenkung sind aus den Tabellen 2.3 und 2.4 entnommen.

Die verwendete KMD ist in Abbildung 6.5 schematisch und mit Anschlussmaßen in den Hauptansichten dargestellt. Aufgrund der wirkenden Kräfte wurde ein Mehrachsen Kraftsensor K3D60 mit einem Messbereich von  $\pm 50\text{ N}$  gewählt. Die doppelte Anordnung erlaubt eine ausreichend hohe Belastung, da die maximale Gebrauchslast 150% der Nennlast beträgt.

Die KMD's werden so eingesetzt, dass ihre interne x-Achse in Gravitationsrichtung liegt.

Alle Daten wurden dem Datenblatt zu dieser KMD entnommen [3].

Zur Befestigung der KMD werden beidseitig Aluminiumplatten mit den jeweils benötigten Lochabständen angebracht. Weitere Teile der Lagerung können somit direkt an die Platten geschraubt werden.

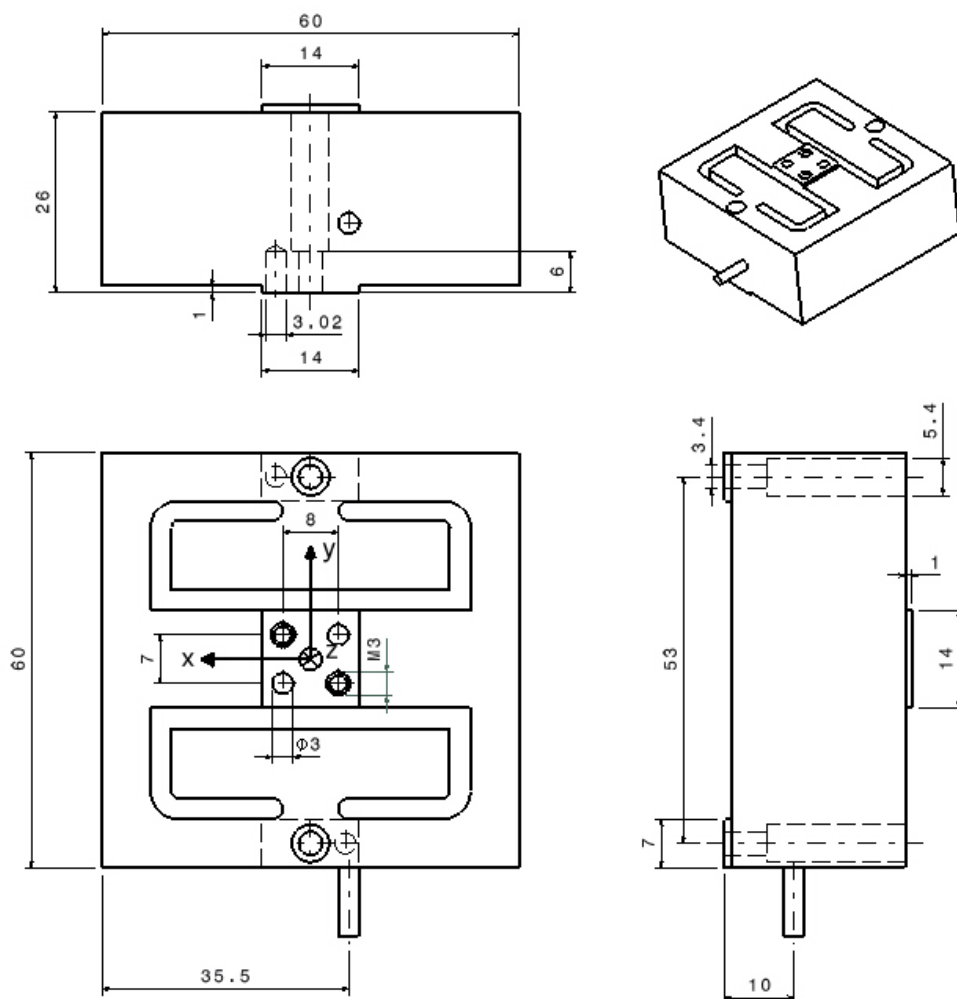


Abbildung 6.5.: KMD Skizze mit Anschlussmaßen

## 6.4. Gyroskopische Lagerung

Die Lagerung der BSDU basiert auf dem Prinzip eines Parallelogramms mit einer Mittelachse. Das Prinzip wird in Abbildung 6.6 verdeutlicht. Durch eine Verschiebung der beiden Seitenstreben wird die Mittelachse des Parallelogramms entlang der roten Kreisbahn verdreht, während die drei Mittelpunkte ihre Position zueinander beibehalten.

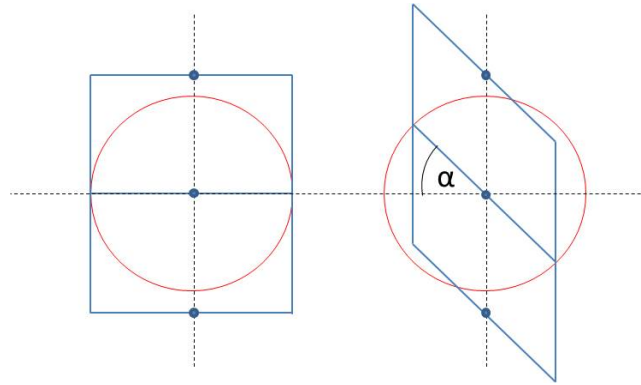


Abbildung 6.6.: Prinzip des Parallelogramms: In Nullstellung (links); um den Winkel  $\alpha$  verdreht (rechts)

Umgesetzt wird das Prinzip durch einen Rahmen aus Aluminiumprofilen mit einer Kantenlänge von 20 mm und jeweils einer 5 mm breiten Nut für Verschraubungen. Es werden in allen Drehgelenken der Lagerung Rillenkugellager vorgesehen, um die Drehgrade der BSDU möglichst reibungsarm zu erreichen. Die Lagerung ist in Abbildung 6.7 dargestellt.

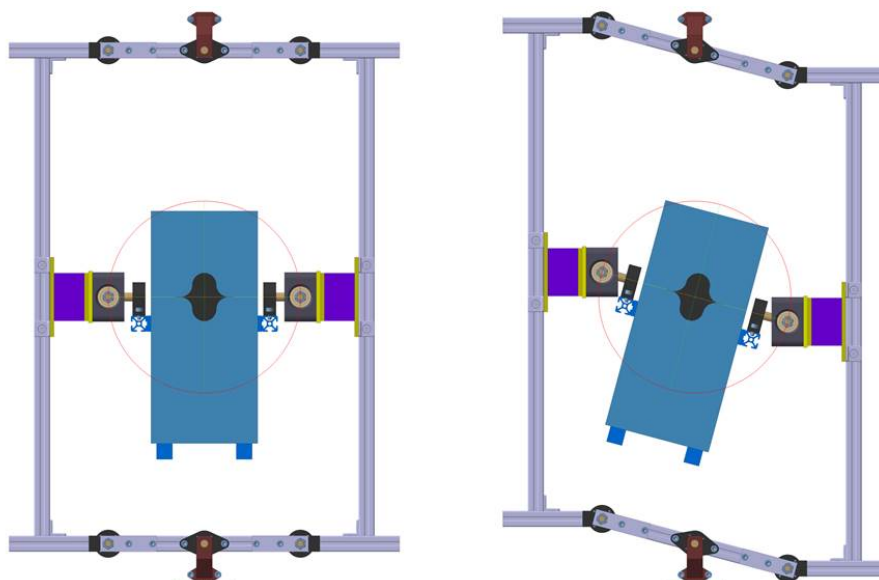


Abbildung 6.7.: Prinzip der Lagerung: In Nullstellung (links); um die x-Achse verdreht (rechts)



Durch Positionierung des Schwerpunktes, bzw. Drehpunktes der BSDU im Mittelpunkt der Lagerung bleibt das System bei Verdrehung frei von rückstellenden Kraftmomenten.

Durch die dargestellte Anordnung der KMD, hinter dem Drehpunkt der Lagerung, kann das Seilsystem eine einspannende Kraft auf die Lagerung ausüben, ohne die Messung der KMD zu beeinflussen.

Abbildung 6.8 zeigt die Mittelachse der Lagerung im Schnitt. Die beiden Lagerböcke neben der BSDU ermöglichen den Kippwinkel der BSDU. Sie bilden eine Festlager-Loslager Konfiguration, um ein Verklemmen der Lagerung bei Verdrehung um die x-Achse zu verhindern. Das Loslager bekommt Spiel durch einen verschiebbaren Außenring des Lagers. Die Realisierung des Kippwinkels ist in Abbildung 6.9 dargestellt.

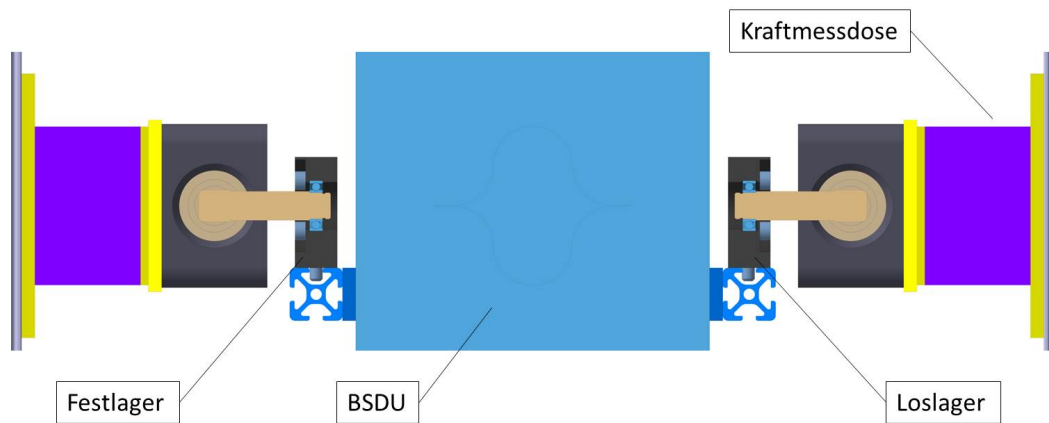


Abbildung 6.8.: Mittelachse der Lagerung in Schnittansicht

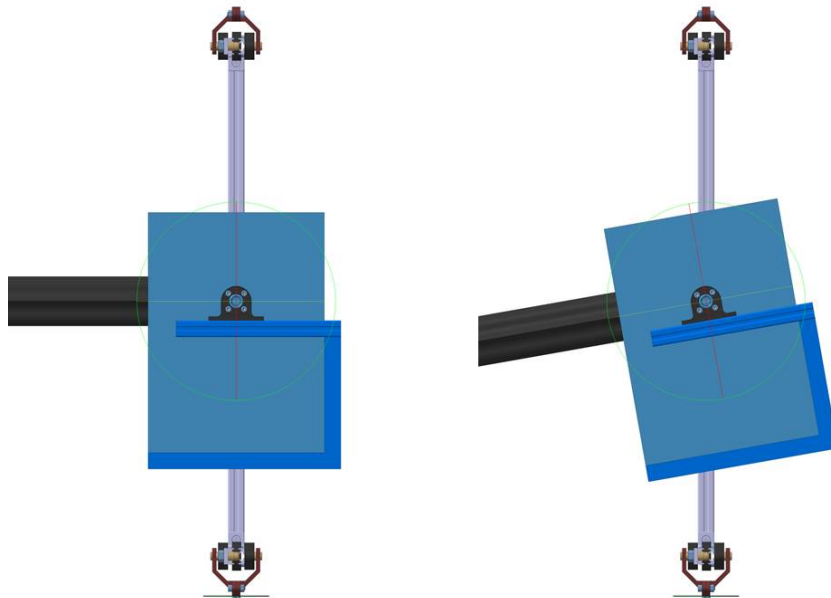


Abbildung 6.9.: Verdeutlichung des Kippwinkels: In Nullstellung (links); um die y-Achse verdreht (rechts)

## 6.5. Linearmotor und Seilsystem

### 6.5.1. Seilsystem

Als Suspensionsseil des Seilsystems wird eine 2 mm dicke Flechtschnur „D-Black“ (siehe [10] Seite 275) verwendet. Das Seil besitzt eine Bruchlast von 410 daN bei einem Gewicht von 0,09 kg/100 m. Ein besonderes Merkmal ist die Arbeitsdehnung von  $<1\%$ .

Durch Verknoten des Seilendes in einem speziellen Drehbolzen, kann das Seil drehbar mit der Lagerung verbunden werden. Das Prinzip der Seilbefestigung ist in Abbildung 6.10 dargestellt.

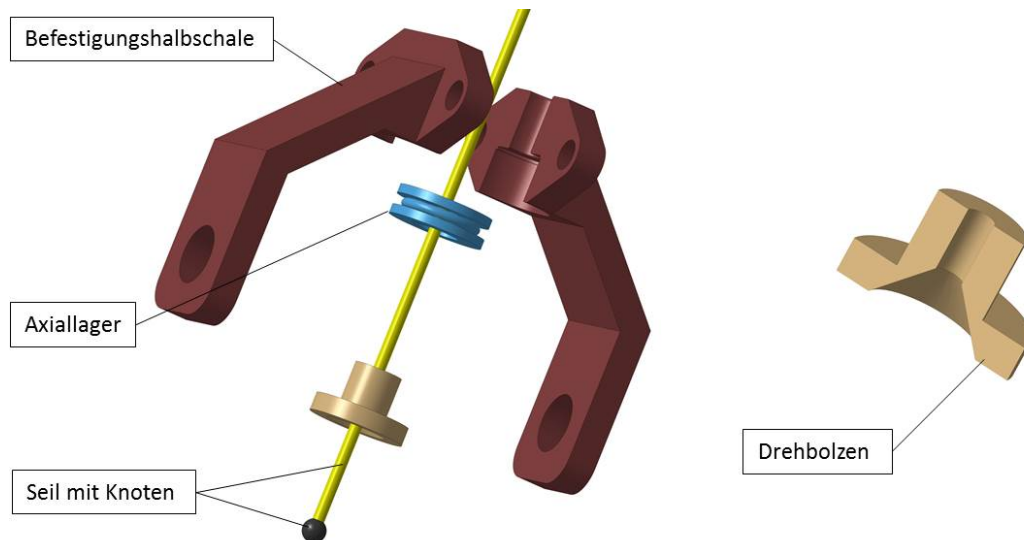


Abbildung 6.10.: Prinzip der Befestigung (links); Drehbolzen im Schnitt (rechts)

Von der Befestigung an der Lagerung wird das Seil über Umlenkrollen zum Läufer des Linearmotors geführt und dort befestigt. Abbildung 6.11 zeigt das Prinzip der Umlenkrollenanbringung, die Anordnung im Gesamtsystem ist in Abbildung 6.1 zu erkennen. Abbildung 6.12 zeigt die Verbindung des Seils mit dem Läufer, dazu muss das Seilende mit einem Haken versehen werden.

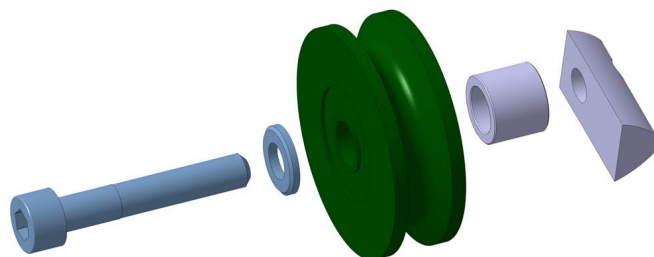


Abbildung 6.11.: Prinzip der Umlenkrollenanbringung

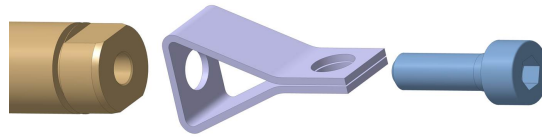


Abbildung 6.12.: Verbindung Seil und Läufer

Auf der anderen Seite des Läufers wird ein Seilspannschloss zwischen Läufer und Seil gesetzt, damit das Seil vorgespannt werden kann und ein straffer Sitz garantiert wird (siehe [10] Seite 104). Es wird ebenfalls ein Befestigungsblech zwischen den Läufer und die Befestigungslasche gesetzt, damit das Seil des Seilzugsensors dort angebracht werden kann. Abbildung 6.13 stellt das Prinzip der Seilbefestigung am unteren Läuferende dar.

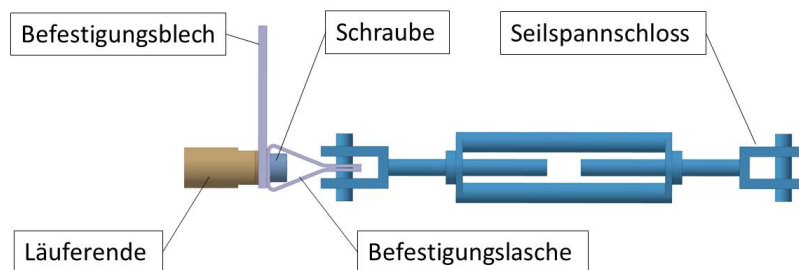


Abbildung 6.13.: Verbindungsprinzip am unteren Läuferende

## 6.5.2. Linearmotor

Der Linearmotor des Systems wird mit einer Befestigungsplatte an der Seitenstrebe des Gestells befestigt. Das System ist in Abbildung 6.14 dargestellt. Es wird ein P01-37Sx120F/600x680-HP (siehe [4]) mit einem 800 mm langen Läufer verwendet. Der Motor agiert mit einer maximalen Geschwindigkeit von 3,9 m/s bei einer Maximalkraft von 255 N. Die Berechnung zur Auslegung des Motors ist in Kapitel 6.5.3 dargestellt.

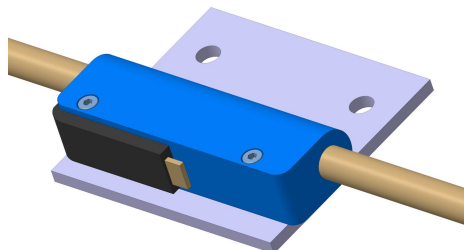


Abbildung 6.14.: Verbindungsprinzip des Linearmotors

Zur Verwendung des SKM an einem Modell des Systems und des Teststandes kann der Läufer des Linearmotors auch gegen einen kürzeren Läufer der gleichen Baureihe getauscht werden.

### 6.5.3. Auslegung des Motors

Zur Auslegung des Linearmotors wird ein statischer Kraftanteil, bestehend aus allen vom Motor zu tragenden Massen, und ein dynamischer Kraftanteil, bestehend aus allen vom Motor zu tragenden, nicht schwingenden Massenträgheiten, der vom Motor zu leistenden Kraft gegenübergestellt:

$$F_{Motor} = F_{stat} + F_{dyn} \quad (6.2)$$

In Tabelle 6.1 sind die benötigten Massenteile aufgelistet.

Nr.:	Bezeichnung	Wert
1	Masse der äußeren Lagerung	4,200 kg
2	Masse der inneren Lagerung	0,600 kg
3	Masse der BSDU	2,000 kg
4	Masse des Seils	0,003 kg
5	Masse des Läufers	1,810 kg
6	Masse der Befestigungselemente	0,101 kg
7	Gesamtmasse	8,714 kg

Tabelle 6.1.: Massenübersicht

Für den statischen Fall muss der Motor die Gesamtmasse tragen.

$$F_{stat} = m_{ges} \cdot g = 8,714 \text{ kg} \cdot 9,81 \frac{\text{m}}{\text{s}^2} = 85,5 \text{ N} \quad (6.3)$$

Für den dynamischen Fall muss der Motor die Trägheit der Masse halten und überwinden, die nicht zum schwingenden System gehört. Alle Massen, die zum Testsystem gehören und alle Massen, die von dort bis zur Kraftmessung reichen, werden als eigenständig schwingend angesehen und daher nicht berücksichtigt.

Alle anderen Massen, ab Kraftmessung bis zum Motor, werden für die Berechnung der maximalen dynamischen Kraft einbezogen. Die betrachtete Masse setzt sich aus den Masseanteilen 1; 4; 5; 6 zusammen. Dynamische Masse:  $m_{dyn} = 6,114 \text{ kg}$ . Zur Berechnung der Trägheitskraft wird die maximale Beschleunigung aus Tabelle 2.8, benötigt ( $\ddot{z}(t = 0, l = 0,5\text{m}) = 19,3 \frac{\text{m}}{\text{s}^2}$ ).

$$F_{dyn} = m_{dyn} \cdot \ddot{z}_{(t,l)} = 6,114 \text{ kg} \cdot 19,3 \frac{\text{m}}{\text{s}^2} = 118,0 \text{ N} \quad (6.4)$$

Daraus ergibt sich die mindestens vom Motor benötigte Kraft,  $F_{Motor} = 203,5 \text{ N}$ .

Die Wahl des Motors fällt daher auf einen P01-37Sx120F-HP (siehe [4]), dessen Maximalkraft bei 255 N liegt.

## 6.6. Sicherheitssystem

Das Sicherheitssystem besteht aus einem Seilzugsensor der Serie SX50 (siehe [7]), dessen Seil über eine Umlenkrolle geführt wird und direkt mit dem Ende des Linearmotors verbunden wird. Abbildung 6.15 zeigt das Prinzip der Anordnung auf dem Gestell. Das System wird direkt auf der unteren Querstrebe des Gestells, unterhalb des Linearmotors befestigt (siehe Abbildung 6.1). Ein 100 mm 40x40 T8 Aluminiumprofil dient dabei als seitliche Befestigungsstrebe.

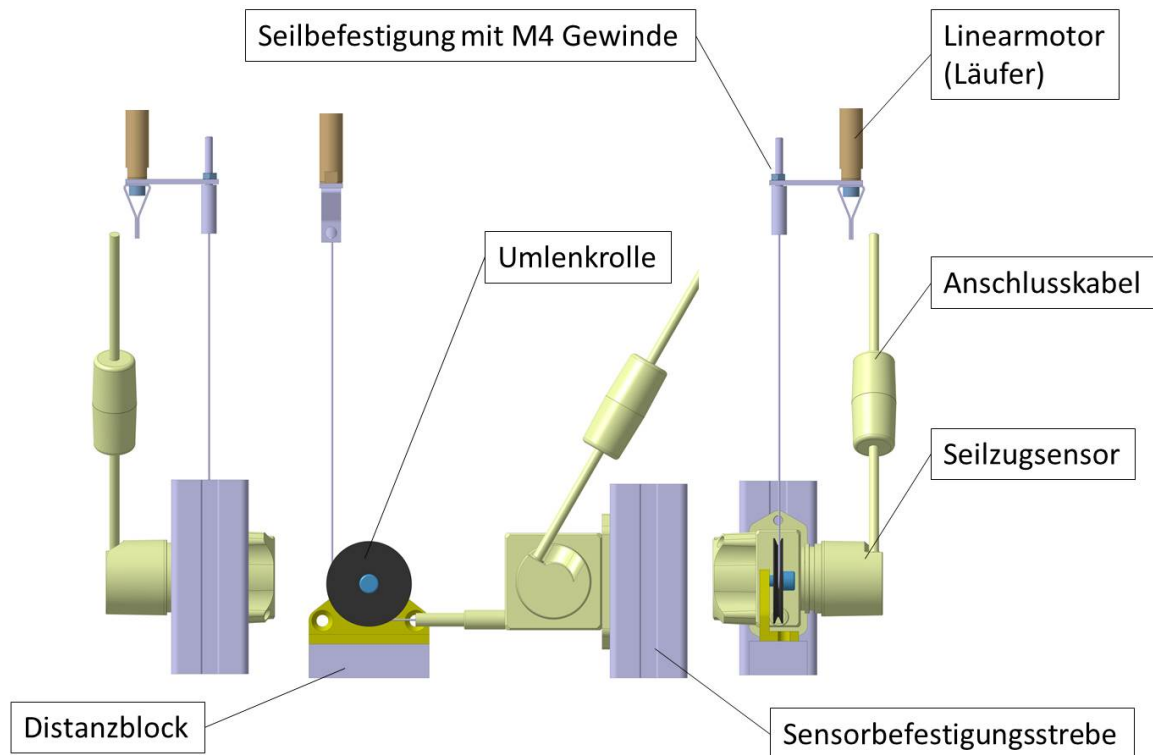


Abbildung 6.15.: Seilzugsensor Anordnungsprinzip

Der verwendete Seilzugsensor deckt einen Messbereich von 750 mm ab und benötigt dabei eine Auszugskraft von maximal 4,4 N. Bei einem digitalen Ausgangssignal liefert er einen absoluten Messwert, der die jeweilige Position angibt.

## 6.7. Amplitudenmessung

Zur Messung der Amplitude wird ein Analog Laser-Wegaufnehmer der Serie LAS verwendet (siehe [6]). Der Sensor wird auf einer Distanzstrebe befestigt und direkt unterhalb der Lagerung positioniert. Eine Reflexionsscheibe, die an der unteren Seite der Lagerung befestigt ist, dient als Angriffsfläche für den Messpunkt. Die Scheibe ist so angeordnet, dass die Messung unabhängig von der Schiefstellung der BSDU ermöglicht wird.

Die Baugruppe des Messsystems ist auf Abbildung 6.16 und 6.17 dargestellt.

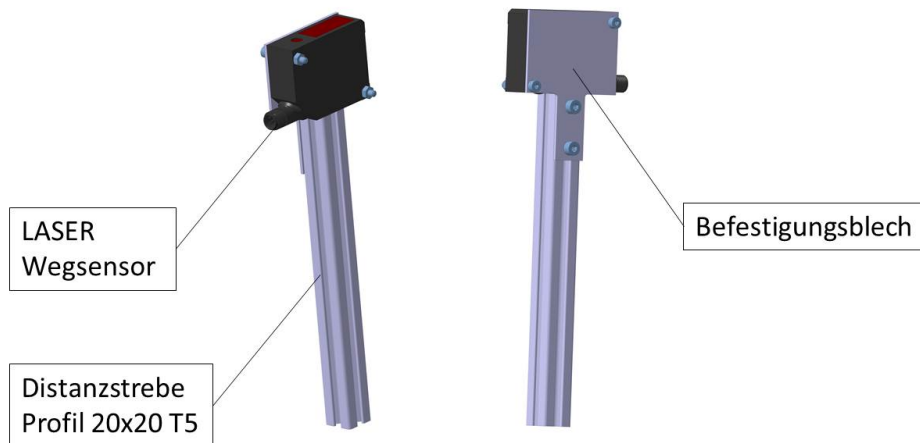


Abbildung 6.16.: Amplitudenmesssystem Befestigung

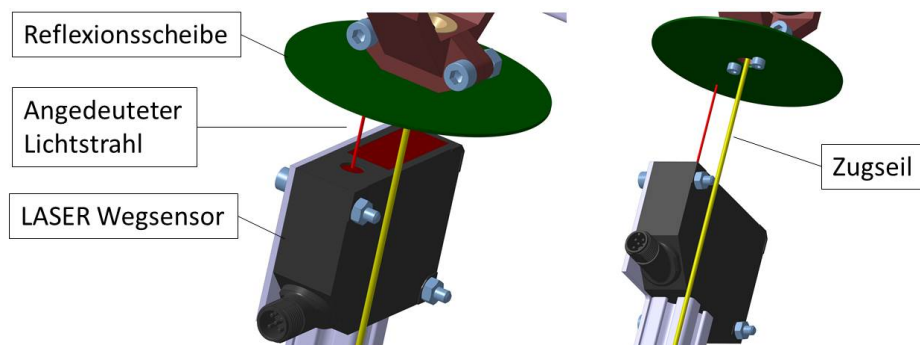


Abbildung 6.17.: Amplitudenmesssystem mit Scheibe

## 7. Fazit

In der hier vorliegenden Arbeit ist es gelungen, das System hinsichtlich seines Verhaltens für die Verwendung mit dem Schwerkraftkompensationsmechanismus zu untersuchen und einen auf die speziellen Bedürfnisse angepassten Mechanismus bereitzustellen.

Es konnten Aussagen über das Verhalten der Systemmasse (BSDU) sowie der Systemfeder (Boom) getroffen werden, die ihre Positionen während der Entfaltung in Extremsituationen beschreiben. Das Gesamtsystem lässt sich durch die aufgestellten Systemverläufe, in der ersten Eigenschwingung, auch dynamisch beschreiben. Aus diesen Erkenntnissen wurden die Randdaten für die Entwicklung des Schwerkraftkompensationsmechanismus gewonnen.

Der dargestellte Ablaufplan konnte in den angegebenen Schritten durchlaufen werden und führte zu einem Ergebnis, das die speziellen Anforderungen, die an das System gestellt sind, erfüllt. Somit liefert das in dieser Arbeit aufgestellte Konzept die Basis für die weitere Realisierung des Schwerkraftkompensationsmechanismus.

Für die Betrachtung der Segel des Systems können die Komponenten des Mechanismus auch im Vakuum betreiben werden und beliebig verkleinert werden. Dazu kann der Läufer des Motors gegen einen kürzeren ausgetauscht, das Gestell durch austauschen der seitlichen Streben komprimiert und das System zur Amplitudenmessung eventuell weggelassen oder verkürzt werden. Dadurch entsteht ein System mit einer kompakteren Form für die Anwendung auf begrenztem Raum. Die zu suspendierende Amplitude des Testsystems, sowie die Länge des Booms muss dabei den entsprechenden Bedingungen angepasst werden.

Für die Skalierung des Mechanismus auf ein minimiertes System muss ebenfalls geprüft werden, ob die gyroskopische Lagerung für die schwingende Masse benötigt wird. Das Seilsystem lässt eine kompaktere Lagerung durch Ersetzen der gelenkigen Querstreben und der seitlichen Stützen durch kurze, starre Verbindungen zu. Dabei muss mindestens die Funktion der Kraftmessung erhalten bleiben.





# Literaturverzeichnis

- [1] DLR. GOSSAMER-1 Design Description, June 2013. File name: KORRIGIERT GOS-1-DD-001-RYSEK 0-1 DesignDescriptionb 20130606.
- [2] U. Fischer. Tabellenbuch Metall, 2005. 43. Auflage.
- [3] ME-Meßsysteme GmbH. Datenblatt: Mehrachs-Kraftsensor K3D60. Stand: 04.11.2014.
- [4] LinMot. Motoren P01-37Sx120F-HP. Stand: 18.02.2015.
- [5] Pahl, G. Beitz, W. Konstruktionslehre, Juni 2006. 7. Auflage.
- [6] Waycon Positionsmesstechnik. Datenblatt: Laser Analog Laser-Wegaufnehmer Serie LAS. Stand: 27.01.2015.
- [7] Waycon Positionsmesstechnik. Datenblatt: Seilzugsensoren Serie SX50. Stand: 27.01.2015.
- [8] Knabel M. Jäger H. Mastel R. Technische Schwingungslehre, 2009. 7. Auflage.
- [9] Prof. Dr.-Ing.H. Schirmmacher. Festigkeitslehre Teil 2.
- [10] Voigt Seilerei. Seil- und Hebetchnik Produktkatalog. Onlineausgabe, Webseite: <http://www.seilerei-voigt.de/startseite-a-354.html>, aufgerufen: 18.02.2015.
- [11] Vöth, S. Dynamik schwingungsfähiger Systeme, September 2006. 1. Auflage.



# Anhang



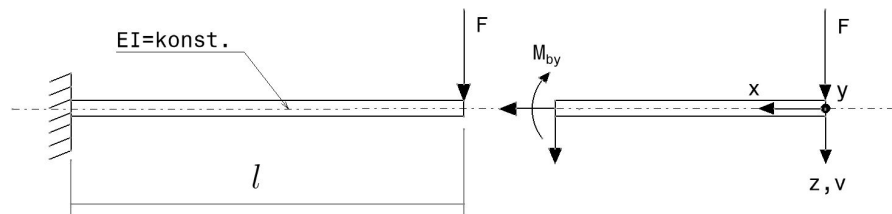
# A. Herleitung

Herleitung der Gleichung für die Verschiebung der Punkte auf einer elastischen Linie (Gleichung 2.7).

Grundgleichung der elastischen Linie [9]:

$$v'' = -\frac{M_{by}}{EI_{yy}} \quad (\text{A.1})$$

Betrachtung des Booms:



Aus der Gleichgewichtsbedingung ergibt sich:

$$M_{by} = -F \cdot z \quad (\text{A.2})$$

Eingesetzt in Gleichung A.1 ergibt sich:

$$v''(x) = \frac{F \cdot x}{EI_{yy}} \quad (\text{A.3})$$

Durch zweimalige Integration ergibt sich:

$$v'(x) = \frac{F}{EI_{yy}} \left( \frac{x^2}{2} + C_1 \right) \quad (\text{A.4})$$

$$v(x) = \frac{F}{EI_{yy}} \left( \frac{x^3}{6} + C_1 \cdot x + C_2 \right) \quad (\text{A.5})$$

Mit den Anfangsbedingungen zur Berechnung der Integrationskonstanten:

$$\text{Neigung an der Einspannstelle : } v'(z = l) \stackrel{!}{=} 0 \rightarrow C_1 = -\frac{l^2}{2} \quad (\text{A.6})$$

$$\text{Verschiebung an der Einspannstelle : } v(z = l) \stackrel{!}{=} 0 \rightarrow C_2 = \frac{l^3}{3} \quad (\text{A.7})$$

Durch Einsetzen folgt die Grundgleichung:

$$v(x) = \frac{F \cdot l^3}{E \cdot I} \cdot \left( \frac{1}{6} \left( \frac{x}{l} \right)^3 - \frac{1}{2} \frac{x}{l} + \frac{1}{3} \right) \quad (\text{A.8})$$



## **B. Morphologischer Kasten**

Im Folgenden befindet sich der morphologische Kasten aus Abbildung 4.7 in Kapitel 4.4 zur besseren Lesbarkeit und eventuell weiteren Konzeptstellungen ohne hervorgehobenen Konzeptlinien.





	Funktion	1	2	3	4	5
F 0.1	Messung der Amplitude	Integrierte Lichtmessung (optisch)	Integrierter Amplitudenschreiber	Messung von außen	Ausnutzung bestehender Komponenten	
F 0.2	Lagerung der Struktur	Biegeweich	Gyroskoplagerung	Federlagerung	Tetraederlagerung	Punktlagerung
F 0.3	Bauweise	Modulbauweise	Kastenbauweise			
F 1.1	Suspensionsrichtung	1D	1D + 1D	2D	1D + 2D	1D + 1D + 1D
F 1.2.1	Suspensionsart	Aufhängung	Unterstützung	Kombiniert	Einspannung	
F 1.2.2	Verschiebung der Suspensionspunkte	Entfällt (statisches System)	Wird passiv begleitet	Wird aktiv begleitet	Anbindung an eine Spiegelstruktur	Manuelle Verstellmöglichkeit
F 1.3	Suspensionshilfe	Seil/ Faden	Linearfeder	Konstantkraftfeder	Kontaktlos	ZSRM
F 2.1	(Zustands-) Messung	Passive Messung im Vorfeld	Aktive Messung während des Tests	Zustandsmessung während des Tests (mit Sollgröße)		
F 2.1	Messgröße (Was?)	Gewicht (Masse der Nutzlast)	Kraft (Spannung im Seil)	Beschleunigung (eines Teils)	Druck	Lastmoment am Motor
F 2.2	Prinzip	Passiv durch Gegengewicht	Passive Reaktion durch Druckausgleich	Aktive Reaktion durch Motor und Seilwinde	Aktive Reaktion durch Motor und Linearbewegung	
F 2.2	Anbindung	Stationärer Mechanismus	Möglichst kurze Anbindung			
F 2.3	Kontrollmessung	Entfällt	Absolute Wegmessung	Relative Wegmessung	Seilzugsensor	
F 3.1.1	Zustandsmessung	Entfällt	Auch durch F 2.1	Auch durch F 2.3	Separat	Alternative
F 3.1.2	Prinzip	Entfällt	Unterstützender Motor	ZSRM	Ausnutzung bestehender Komponenten	Alternative
F 3.3	Kompensation externer Reibungseffekte	Entfällt	FUZZY-Algorithmus	Luftlagerung	Alternative	

Abbildung B.1.: Morphologischer Kasten zur Erstellung eines SKM-Konzeptes



## C. Stückliste

Im Folgenden befindet sich die Stückliste zur Übersicht der verwendeten Teile für den Schwerkraftkompensationsmechanismus.



Stückliste	Schwerkraftkompensationsmechanismus		Version: 1 Seite: 1 von 3		
Nummer	Bezeichnung	Material/ Nr.:	Gewicht [g]	Menge	Gesamtgewicht [g]
10000A000.01	SKM			1	25523,82
10100A.03	Gyroskop			1	4809,2
10100P001.03	BSDU-Dummy			1	
10101A.03	Y-Achse Loslager		-	1	307,4
10101P001.03	Lagerbock Loslager	Kunststoff	24	1	24
10101P002.03	Rillenkugellager 10x19x5	VA	5,5	1	5,5
10101P003.03	Lagerabdeckung Loslager	Kunststoff	1	1	1
10101P004.03	Y-Achse	Al	22	1	22
10101P005.03	Sicherungsring	DIN 471-10x1	0,5	1	0,5
10101P006.03	ESTM Stehlager	ESTM-BB1-P10-B180	32,9	2	65,8
10101P007.03	Sicherungsscheibe	St	0,3	2	0,6
10101P008.03	Sicherungsmutter	St	6	2	12
Anschluss	Schraube 4762 M4x35	St	44	4	176
10102A.03	Y-Achse Festlager		-	1	307,4
10102P001.03	Lagerbock Festlager	Kunststoff	24	1	24
10102P002.03	Rillenkugellager 10x19x5	VA	5,5	1	5,5
10102P003.03	Lagerabdeckung Festlager	Kunststoff	1	1	1
10102P004.03	Y-Achse	Al	22	1	22
10102P005.03	Sicherungsring	DIN 471-10x1	0,5	1	0,5
10102P006.03	ESTM Stehllager	ESTM-BB1-P10-B180	32,9	2	65,8
10102P007.03	Sicherungsscheibe	St	0,3	2	0,6
10102P008.03	Sicherungsmutter	St	6	2	12
Anschluss	Schraube 4762 M4x35	St	44	4	176
10103A.03	Anschluss KMD		-	2	650,4
10103P001.03	KMD	ME K3D60	110	1	110
10103P002.03	Anschlussplatte Geruestseite	Al	79	1	79
10103P003.03	Winkel 20x20	Al+2xSchraube+1xNutenstein	16	4	64
10103P004.03	Anschlussplatte Lagerseite	Al	67	1	67
Anschluss Innen	Schraube ISO 1064 M3x10	St	0,7	2	1,4
Anschluss Innen	Sicherungsstift D3x10	St	0,6	2	1,2
Anschluss Außen	Schraube ISO 1064 M3x10	St	0,7	2	1,4
Anschluss Außen	Sicherungsstift D3x10	St	0,6	2	1,2
10104A.03	Seitenstrebe		-	2	2964
10104P001.03	Seitenstrebe	Profil 20x20 T5	288	1	288
10104A001.03	Lagerbuchse			2	1194
10104P002.03	Querstrebe	Profil 20x20 T5	48	1	48
10104P003.03	Verbinder	Verbindungssatz 5, Vz	8	1	8
10104P004.03	Lagerbuchse	Kunststoff	11	1	11
10104P005.03	Rillenkugellager 10x19x5	VA	5,5	1	5,5
10104P006.03	Lagerabdeckung	Kunststoff	1	1	1
10104P007.03	Winkel 20x20	Al+2xSchraube+2xNutenstein	18	1	18
Lagerschraube	4762 M4x6	St	1,5	4	6

Abbildung C.1.: Stückliste Seite 1 von 3

Stückliste	Schwerkraftkompensationsmechanismus		Version: 1 Seite: 2 von 3		
Nummer	Bezeichnung	Material/ Nr.:	Gewicht [g]	Menge	Gesamtgewicht [g]
<b>10105A.03</b>	<b>Querstrebe</b>			<b>2</b>	<b>334</b>
10105P001.03	Querstrebe	Profil 20x20 T5	96	1	96
10105P002.03	Verbindungsschiene	Al	17,5	2	35
10105P003.03	Welle	Al	5,5	2	11
Sicherungsring	D10	DIN 471-10x1	0,5	2	1
Sicherungsmutter	M8	M8-vz	6	2	12
Schraube	4762 M5x10	M5x10	3	4	12
<b>10106A.03</b>	<b>Schwenkkopf</b>			<b>2</b>	<b>132</b>
10106P001.03	Flanschlagerschale	Kunststoff	12	2	24
10106P002.03	Rillenkugellager 10x19x5	VA	5,5	2	11
10106P003.03	Lagerabdeckung	Kunststoff	1	2	2
10106P004.03	Welle	Al	4	2	8
10106P005.03	Sicherungsring	DIN 471-10x1	0,5	2	1
Schraube Innen	4762 M3x6	M3x6	1	8	8
Schraube Außen	4762 M5x10	M5x10	3	4	12
<b>10107A.03</b>	<b>Seilverbindung</b>			<b>2</b>	<b>114</b>
10107P001.03	Seitenschale	Al	20	2	40
10107P002.03	Drehbolzen	Al	2	1	2
10107P003.02	Axiallager 8x16x5	VA	4	1	4
Schraube	4762 M5x16	M5x16	4	2	8
Mutter	M5	M5-vz	1,5	2	3
<b>10200A.01</b>	<b>Gestell</b>			<b>1</b>	<b>16092,92</b>
10200P001.01	Universalfuss	Profil 40x40 T8	174	4	696
10200P002.01	Querverbindung	Profil 40x40 T8	1879,2	2	3758,4
10200P003.01	Laengsverbindung	Profil 40x40 T8	556,8	2	1113,6
10200P004.01	Vertikalstrebe	Profil 40x40 T8	3062,4	2	6124,8
10200P005.01	Querstrebe oben	Profil 40x40 T8	1183,2	1	1183,2
10200P006.01	Anschlagwinkel	AL	67	4	268
10200P007.01	Versteifung	Profil 40x40 T8	746,46	2	1492,92
10200P008.01	Nutenstein 2xM6	St	14	4	56
Verbindung	Automatik-Verbindungssatz M8	St	35	40	1400
<b>10300A.01</b>	<b>Suspensionssystem</b>			<b>1</b>	<b>3378,7</b>
<b>10301A.01</b>	<b>Umlenkrolle</b>			<b>4</b>	<b>152</b>
10301P001.01	Seilrolle	Kunststoff	20	1	20
10301P002.01	Distanzbuchse	St	5	1	5
10301P003.01	Nutenstein M6	St	2	1	2
Verbindung	Unterlegscheibe DIN 7091 M6	St	1	1	1
Verbindung	Schraube 4762 M6x35	St	10	1	10

Abbildung C.2.: Stückliste Seite 2 von 3

Stückliste		Schwerkraftkompensationsmechanismus		Version: 1 Seite: 3 von 3	
Nummer	Bezeichnung	Material/ Nr.:	Gewicht [g]	Menge	Gesamtgewicht [g]
10302A.01	Motoreinheit			1	2761
10302P001.01	Motorbefestigung	Al	120	1	120
10302P002.01	Stator		792	1	792
10302P003.01	Läufer		1810	1	1810
10302P004.01	Verteilerplatte	Al	4	1	4
10302P005.01	Seilöse	St	6	2	12
10302P006.01	Seilschelle	St	5	1	5
Verbindung	Schraube 4762 M4x30	St	4	2	8
Verbindung	Mutter M4	St	1	2	2
Verbindung	Schraube 4762 M5x10	St	3	2	6
Verbindung	Nutenstein M5	St	2	2	2
10303A.01	Seilsystem			1	9,7
10303P001.01	Seil	D-Black	0,9	3[m]	2,7
10303P002.01	Seilende	St	5	2	10
10303P003.01	Seilspanner	St	60	1	60
10500A.01	Sicherheitssystem			1	885
10500P001.01	Befestigungsblock	Profil 40x40 T8	174	1	174
10500P002.01	Seilzugsensor	ca.	400	1	400
10500P003.01	Umlenkrolle	ca.	200	1	200
10500P003.01	UR Befestigungsblock	Al	80	1	80
Befestigung	Schraube 4762 M5x10	St	3	2	6
Befestigung	Schraube 4762 M5x16	St	4	4	16
Befestigung	Mutter M4	St	1	1	1
Befestigung	Nutenstein M5	St	2	4	8
10600A.01	Amplidudenmessung			1	358
10600P001.01	Befestigungsstrebe	Profil 20x20 T5	96	1	96
10600P002.01	Befestigungsblech	Al	21	1	21
10600P003.01	LAS-T-500	ca.	200	1	200
10600P004.01	Zielscheibe	Al	13	1	13
Befestigung	Schraube 4762 M3x6	St	1	2	2
Befestigung	Schraube 4762 M4x30	St	4	2	8
Befestigung	Mutter M4	St	1	2	2
Befestigung	Automatik Verbindungssatz M5	St	8	2	16
Angenommene Materialdichten:		Kennwerte für Bauteile			
Kunststoff; PES:	1400 kg/m <sup>3</sup>	Profil 20x20 T5	0,48 g/mm		
Stahl (St)	7800 kg/m <sup>3</sup>	Profil 40x40 T8	1,74 g/mm		
VA	7800 kg/m <sup>3</sup>				
Aluminium (Al)	2700 kg/m <sup>3</sup>				

Abbildung C.3.: Stückliste Seite 3 von 3





## D. CD

Auf der beiliegenden CD sind die folgenden Daten zu finden:

- Eine digitale Version der vorliegenden Bachelorarbeit: BA-Temmen.pdf
- Alle für das Dokument „BA-Temmen.pdf“ erstellten Quelldateien ( $\text{\LaTeX}$ )
- Unterlagen des Konzeptionsprozesses
  - Anforderungsliste: Schwerkraftkompensationsmechanismus (MS-Excel)
  - Funktionsstruktur und morphologischer Kasten (MS-Visio)
  - Bewertungsmatrix: Schwerkraftkompensationsmechanismus (MS-Excel)
- Unterlagen des Konstruktionsprozesses
  - 3D-Modell des Schwerkraftkompensationsmechanismus  
(erstellt mit CATIA Version 5.20)
  - Stückliste: Schwerkraftkompensationsmechanismus (MS-Excel)
  - Kopien der Datenblätter für referenzierte Teile
- Eine digitale Version der vorangestellten Literaturrecherche: PA-LR-Temmen.pdf
- Alle für das Dokument „Literaturrecherche Schwerkraftkompensationsmechanismen.pdf“ erstellten Quelldateien ( $\text{\LaTeX}$ )



# Eidesstattliche Erklärung

Ich erkläre, dass ich meine Bachelorarbeit „Konzeptionelle Entwicklung eines Schwerkraftkompensationssystems für die Anbindung an eine Bodenentfaltungstestanlage“ selbstständig und ohne Benutzung anderer als der angegebenen Hilfsmittel angefertigt habe und dass ich alle Stellen, die ich wörtlich oder sinngemäß aus Veröffentlichungen entnommen habe, als solche kenntlich gemacht habe. Die Arbeit hat bisher in gleicher oder ähnlicher Form oder auszugsweise noch keiner Prüfungsbehörde vorgelegen.

Ich versichere, dass die eingereichte schriftliche Fassung der auf dem beigefügten Medium gespeicherten Fassung entspricht.

---

Ort, Datum

---

Unterschrift