Lucerne University of
Applied Sciences and Arts

HOCHSCHULE
LUZERN

Technik & Architektur
FH Zentralschweiz

Entwicklung eines Fallschirmlandesystems für Forschungsraketen

Herstellung eines Kreuzfallschirmes mit Skirt-Reefing

von André Trochsler

Dozent: Prof. Dr. Gerhard S. Székely
Experte: Dipl. Ing Paul Joachim Schüngel
Datum: 06.06.2019

Bachelor-Thesis an der Hochschule Luzern - Technik & Architektur

Titel	**Entwicklung eines Fallschirmlandesystems für Forschungsraketen**
Diplomandin/Diplomand	**André Trochsler**
Bachelor-Studiengang	**Bachelor Maschinentechnik**
Semester	**FS19**
Dozentin/Dozent	**Prof. Dr. Gerhard S. Székely**
Expertin/Experte	**Dipl. Ing. Paul Joachim Schüngel**

Abstract Deutsch
Für den Verein ARIS soll ein einfaches, wiederverwendbares und sicheres Fallschirmlandesystem für selbstgebaute Forschungsraketen in Form eines „Reefed-Parachutes“ entwickelt werden. Das Ziel ist es die vorgegebenen Fallgeschwindigkeiten der IREC einzuhalten. Der Fokus dieser Bachelorarbeit liegt daher auf der Entwicklung und Herstellung eines Kreuzfallschirmes mit integriertem Skirt-Reefing.

Ein „Reefed-Parachute“ vereint die Eigenschaften eines Pilotfallschirmes mit denen des Hauptfallschirmes. Das heisst, dass mit nur einem Fallschirm zwei verschiedene und konstante Fallgeschwindigkeiten erreicht werden können.

In dieser Thesis wird zuerst eine Konzeptstudie durchgeführt und das Konzept mit der besten Bewertung weiterentwickelt. Es wird gezeigt, wie ein Kreuzfallschirm mit Skirt-Reefing dimensioniert, hergestellt und geprüft wird. Im Vordergrund steht die Ermittlung des Zugkraftkoeffizienten C_D des Fallschirmes im offenen und gereeften Zustand.

Dabei stützt sich die Arbeit auf das “Parachute Recovery System Design Manual” von T.W. Knacke und die Testreihe “Effects Of Canopy Geometry On The Drag Coefficient Of A Cross Parachute In The Fully Open And Reefed Conditions For A W/L Ratio of 0.264” von W.P. Ludtke.

Die Tests haben gezeigt, dass der hergestellte Kreuzfallschirm einen C_D-Offen von 0.57 und einen C_D-Reefed von 0.109 aufweist. Damit werden eine Landegeschwindigkeit von 8.5 m/s und eine Fallgeschwindigkeit in der ersten Flugphase von 19.44 m/s erreicht.

Die Vorgabegeschwindigkeit der IREC liegt in der ersten Phase zwischen 23 m/s und 45 m/s und die Landegeschwindigkeit soll weniger als 9 m/s betragen. Damit wurde nur eine der beiden Hauptanforderungen erfüllt. Um beide Anforderungen erfüllen zu können muss die Dimensionierung des Fallschirmes optimiert und erneut getestet werden.

Alle Rechte vorbehalten. Die Arbeit oder Teile davon dürfen ohne schriftliche Genehmigung der Rechteinhaber weder in irgendeiner Form reproduziert noch elektronisch gespeichert, verarbeitet, vervielfältigt oder verbreitet werden.

Sofern die Arbeit auf der Website der Hochschule Luzern online veröffentlicht wird, können abweichende Nutzungsbedingungen unter Creative-Commons-Lizenzen gelten. Massgebend ist in diesem Fall die auf der Website angezeigte Creative-Commons-Lizenz.

Abstract Englisch
The objective of this thesis is to develop a simple, reusable and save recovery system in the form of a reefed parachute for the self-constructed rockets of the student association ARIS. Therefore the requirements of IREC regarding the descent rate must be met. Special focus was set on the development and manufacture of a cruciform parachute with integrated skirt-reefing.

A reefed parachute combines the properties of a drogue parachute with those of a main parachute. That is to say that only one parachute can realize two different constant descent rates.

In this thesis a concept study was made and the best assessed solution was enhanced. It was shown, how a cruciform parachute with skirt-reefing was dimensioned, manufactured and tested. The determination of the drag coefficient C_D for the open and reefed parachute were emphasized.

This thesis was based on the "Parachute Recovery System Design Manual" by T.W. Knacke and on the technical report "Effects Of Canopy Geometry On The Drag Coefficient Of A Cross Parachute In The Fully Open And Reefed Conditions For A W/L Ratio of 0.264" by W.P. Ludtke.

A $C_D$of 0.57 in the open stage was determined by the conducted drop test out of 60 meters and a C_D of 0.109 in the reefed stage was extracted by the translational drive test. With these performance values a touchdown velocity of 8.5 m/s and a constant descent rate in the first stage of 19.44 m/s can be reached.

The required descent rate of IREC is in between 23 m/s and 45 m/s during the first stage and the touchdown velocity must be less than 9 m/s. Thereby only one of both main requirements was met. To satisfy both requirements the dimensioning of the canopy must be optimized and tested again.

Ort, Datum Luzern, 06.06.2019

© André Trochsler, Hochschule Luzern – Technik & Architektur

Abkürzungen

AGL Above Ground Level. 14

ARIS Akademische Raumfahrt Initiative Schweiz. 12

CONOPS Concept of Operations. 63

FLS Fallschirmlandesystem. 12

G G-Kraft. 41

IREC Intercollegiate Rocket Engineering Competition. 13

Definitionen

Annular

ringförmig. 20

Apogäum

Höchster Punkt der Flugbahn, engl. Apogee. 14

Cross

Cruciform, X-Form, kreuzförmig. 20

Dual-event

Fallschirmlandesystem mit Pilot- und Hauptfallschirm. 63

Fallschirmcontainer

Verpackungseinheit in welcher sich der Fallschirm vor dem Ausstoss befindet. 12

Fallschirmlandesystem

auch Recovery System, Bergungssystem. 12

Funktionsprototyp

Prototyp, welcher entscheidende funktionelle Eigenschaften besitzt. 33

G-Kraft

Belastung auf Körper, welche als Vielfaches der Fallbeschleunigung angegeben wird. 51

Hemispherical

hemisphärisch, halbkugelförmig. 20

Oszillationswinkel α

Je tiefer dieser Wert, umso stabiler ist der Flug des Fallschirmes. Instabile Fallschirme tendieren zum Oszillieren. 20

Pyro-Cutter

Pyrotechnischer Mechanismus, welcher Zugleinen durchschneiden kann. 22, 27

Quicklink

Mechanische Schnellsicherung von Schnüren und Zugleinen. 28

Reefing

Raffen, den Durchmessers des Fallschirmes begrenzen. 13

Tender Descender

Pyrotechnischer Mechanismus, welcher die Verbindung von Quicklinks trennen kann. 17, 28

Zugkraftkoeffizient C_D

Je höher dieser Wert, umso effizienter bremst ein Fallschirm bei gleichbleibender Textilfläche. Ein hoher Wert minimiert somit das Gewicht und Volumen des Fallschirmes
. 20

Öffnungskraftkoeffizient C_X

Je tiefer dieser Wert, umso tiefer ist die plötzliche Öffnungskraft des Fallschirmes. Ein niedriger Wert schützt somit das gesamte System vor hohen Schockkräften und gewährleistet ein sicheres Öffnen des Fallschirmes. 20

Liste mathematischer Symbole

A	Fläche	m^2
a	Beschleunigung	m/s^2
C_D	Zugkraftkoeffizient	[-]
C_X	Öffnungskraftkoeffizient	[-]
F	Kraft	N
L	Schirmlänge	m
l	Zugleinenlänge	m
m	Masse	kg
S	Projizierte Fläche	m^2
v	Geschwindigkeit	m/s
α	Oszillationswinkel	$^\circ$
ρ	Luftdichte	kg/m^3

Inhaltsverzeichnis

Abkürzungen **4**

Definitionen **5**

1 Einführung **12**
1.1 Kunde . . . 12
1.2 Rahmen der Arbeit . . . 12
1.3 Hauptherausforderungen . . . 13
1.4 Vorgehen . . . 13

2 Anforderungsanalyse **14**
2.1 Mission . . . 14
2.2 Funktionsbeschreibung Bergungssystem . . . 17
2.2.1 Systemabgrenzung . . . 17
2.2.2 Herleitung und Analyse der Fallschirmkraft . . . 18

3 Lösungsvorschläge **20**
3.1 Ideenfindung . . . 20
3.1.1 Fallschirmgrundform . . . 20
3.1.2 Reefing-Methoden . . . 22
3.1.3 Reefingsteuerung . . . 27
3.1.4 Auslösemechanismen . . . 27
3.2 Lösungskonzepte . . . 29
3.2.1 Variante 1: Modified Slider . . . 30
3.2.2 Variante 2: Classic . . . 32
3.2.3 Variante 3: SwissCross . . . 33
3.2.4 Variante 4: Shape Change . . . 35
3.2.5 Variante 5: SwissCross 2.0 . . . 36
3.3 Bewertung . . . 39
3.3.1 Gewichtung . . . 39
3.3.2 Entscheidung . . . 40

4 Hauptlösung **41**
4.1 Dimensionierung Fallschirm . . . 41
4.1.1 Berechnung Fallschirmfläche . . . 43
4.1.2 Berechnung Anzahl Zugleinen . . . 43
4.1.3 Gewählte Design-Parameter . . . 44
4.2 Herstellung des Fallschirms . . . 44
4.2.1 Ressourcen . . . 44

4.2.2 Verbindungstechnik . . . 45
4.2.3 Reefing . . . 45
4.2.4 Swivellink . . . 46

5 Testreihe **47**
5.1 Test 1: Handling und Swivellink . . . 47
5.1.1 Setup . . . 47
5.1.2 Vorbereitung und Durchführung . . . 48
5.1.3 Erkenntnisse aus Test 1 . . . 48
5.2 Test 2: Sinkgeschwindigkeit im offenen Zustand . . . 49
5.2.1 Setup . . . 49
5.2.2 Vorbereitung . . . 50
5.2.3 Durchführung . . . 50
5.2.4 Berechnung: Zugkraftkoeffizient . . . 51
5.2.5 Erkenntnisse aus Test 2 . . . 52
5.3 Test 3: Sinkgeschwindigkeit im gereeften Zustand . . . 53
5.3.1 Setup . . . 53
5.3.2 Vorbereitung . . . 54
5.3.3 Durchführung . . . 55
5.3.4 Erkenntnisse aus Test 3 . . . 57

6 Ergebnisse **58**
6.1 Fallschirm . . . 59
6.1.1 Eigenschaften . . . 59
6.1.2 Bewertung . . . 59
6.2 Reefing . . . 60
6.2.1 Eigenschaften . . . 60
6.2.2 Bewertung . . . 60
6.3 Swivellink . . . 61
6.3.1 Eigenschaften . . . 61
6.3.2 Bewertung . . . 61

7 Erfüllung der Anforderung **62**
7.1 Nicht erfüllte Anforderungen . . . 62
7.2 Ausstehende Anforderungen . . . 63

8 Zusammenfassung und Ausblick **65**
8.1 Rückblick . . . 65
8.2 Selbstbeurteilung . . . 66
8.3 Ausblick . . . 66

Literatur und Referenzen **67**

A Fallschirmgrundformen **69**

B Anleitung Fallschirmherstellung **72**

C Pflichtenheft **75**

D Fallschirmcontainer **77**

Abbildungsverzeichnis

2.1 HEIDI's Mission . . . 15
2.2 Übersicht der Subsysteme und deren Aufgabenbereich . . . 17
2.3 Angreifende Kräfte am Fallschirm im Sinkflug . . . 18

3.1 Funktionsweise Skirt Reefing [1] . . . 22
3.2 Funktionsweise Vent Reefing [1] . . . 23
3.3 Funktionsweise Skirt Reefing mit Steuerleine[1] . . . 24
3.4 Funktionsweise Line Reefing[2] . . . 25
3.5 Funktionsweise Fold Reefing . . . 26
3.6 Auslegeordnung eines Pyro-Cutters [3] . . . 27
3.7 Zusammengebaute Tender Descender mit zwei Quicklinks[4] . . . 28
3.8 Morphologischer Kasten: Reefing System . . . 29
3.9 Funktionsweise: Modified Slider . . . 31
3.10 Mechanismus der Seilklemme im Querschnitt . . . 31
3.11 Funktionsweise: Variante Classic . . . 32
3.12 SwissCross im Querschnitt . . . 34
3.13 Funktionsprototyp SwissCross . . . 34
3.14 Funktionsweise: Variante Shape Change . . . 35
3.15 Funktionsweise SwissCross 2.0 . . . 36
3.16 Prototyp SwissCross 2.0 reefed . . . 37
3.17 Prototyp SwissCross 2.0 open . . . 37
3.18 Übersicht Konzept SwissCross 2.0 . . . 38

4.1 Nahtvorlage . . . 45
4.2 Resultat: Nahtkopie . . . 45
4.3 Konfiguration Skirt-Reefing nach Ludtke[5] . . . 45
4.4 Resultat: Skirt Reefing . . . 45
4.5 Technische Zeichnung mit Grösstmassen . . . 46

5.1 SwissCross 2.0 Test 1: Reefed . . . 48
5.2 SwissCross 2.0 Test 1: disreefed . . . 48
5.3 Testgewicht mit gepacktem Fallschirm . . . 50
5.4 Testgewicht vor Abwurf aus Gondel . . . 50
5.5 Projizierte Fläche aus Falltest $Nr.1$ . . . 51
5.6 Haltevorrichtung für Messeinrichtung mit Federwaage . . . 54
5.7 SwissCross 2.0 im Testflug $Nr.1$ mit 70 km/h . . . 55
5.8 SwissCross 2.0 mit simulierter Reefing-Line . . . 56

6.1 Resultat: SwissCross 2.0 . . . 59
6.2 Resultat: Swivellink mit Steuerleinenführung . . . 61

Tabellenverzeichnis

2.1 Anforderungsliste 16

3.1 Mögliche Grundformen [1] 21
3.2 Gewichtung der Anforderungen 39
3.3 Entscheidungsmatrix 40

4.1 C_D Test Daten aus Versuchsreihe Nr. 2 [5] 42

5.1 Messwerte Test 3 57

Kapitel 1

Einführung

1.1 Kunde

Der Verein ARIS bietet interessierten Studenten von der ETH Zürich, HSLU und ZHAW eine Plattform, um sich mit dem Thema Raumfahrt intensiv auseinanderzusetzen. Dabei geht es nicht nur um den Bau von Raketen, sondern auch um die persönliche Entwicklung der Mitglieder und die Vernetzung mit Industriepartnern. Jedes Studienjahr entwickeln verschiedene Teams von Studenten Raketen für den Spaceport America Cup, den weltweit grössten Raketenentwicklungswettbewerb für Universitäten. Eines der diesjährigen Projekte, HEIDI, soll ein Ladegut (Payload) auf eine Ziel Höhe von 10000 Fuss befördern und anschliessend wieder heil auf dem Boden landen.

1.2 Rahmen der Arbeit

Damit die von ARIS selbstgebauten Raketen nachhaltig genutzt werden können, soll ein einfaches, wiederverwendbares, effizientes und sicheres Fallschirmlandesystem FLS entwickelt werden. Das Bergungssystem besteht bislang aus zwei Fallschirmen. Der erste Fallschirm "Drogue Parachute" wird nach dem Erreichen des höchsten Punktes der Flugbahn ausgelöst. Er verlangsamt die Rakete in der ersten Bergungsphase auf eine bestimmte Fallgeschwindigkeit und stabilisiert den Flug. Der zweite Fallschirm "Main Parachute" wird in Bodennähe auf die gewünschte Landegeschwindigkeit entfaltet, um den Landeradius einzuschränken.

Innerhalb dieser Arbeit soll in einer ersten Phase eine Konzeptstudie als Alternative zum aktuellen Bergungssystem durchgeführt werden. Diese Arbeit fokussiert sich auf die Konzeptionierung eines "Reefed Parachute". Die Idee des Reefing ist es mit nur einem Fallschirm zwei verschiedene Fallgeschwindigkeiten zu realisieren. Der Vorteil liegt darin, dass damit and Gewicht und Volumen gespart werden kann. In einer zweiten Phase soll das ausgewählte Konzept designet, dimensioniert und entwickelt werden. Ein FLS beinhaltet:

- Fallschirm
- Fallschirmcontainer
- Verbindungsteile
- Redundante Auslösemechanismen
- Redundante Auslöseelektronik
- Befestigung zur Rakete

Das neue System soll eine Rakete von 24 kg auf die vorgegebenen Fallgeschwindigkeiten der IREC abbremsen. So kann das Bergungssystem idealerweise als Grundlage für das Raketenprojekt 2019/2020 dienen. Für weitere Randbedingungen werden deshalb die vorhandenen Daten von HEIDI verwendet. Das Konzept soll aber auch in anderen Raketen, zum Beispiel Level 01 oder grösser, eingebaut werden können und muss in skalierten Dimensionen das gleiche dynamische Verhalten aufweisen. Im Rahmen dieser Arbeit wird jedoch kein fertig implementierbares Produkt hergestellt, da die zeitlichen Ressourcen für ein solches Projekt nicht ausreichen. Deshalb wird ein Lösungsansatz ausgearbeitet und getestet. Die daraus gewonnen Informationen über das Verhalten des neuen Konzeptes dienen als Grundlage für Optimierungsanweisungen. Der Fokus liegt in der Herstellung des Fallschirmes, mit integriertem Reefing System.

1.3 Hauptherausforderungen

- Ausarbeitung verschiedener Konzepte
- Richtige Dimensionierung anhand von Testberichten und empirischen Versuchen
- Materialbeschaffung und Herstellung des Prototypen
- Ermittlung des Zugkraftkoeffizienten im offenen und gereeften Zustand

1.4 Vorgehen

1. Im Kapitel 2 werden die Anforderungen des Kunden analysiert und aufgelistet.
2. Des weiteren wird im zweiten Kapitel eine Systemgrenze gezogen und die Funktionsweise des FLS erläutert.
3. Schliesslich werden wichtige Formeln hergeleitet, welche zum Verständnis der Funktion eines Fallschirmes dienen.
4. Kapitel 3 zeigt verschiedene Lösungsvarianten auf und das Vorgehen bei der Auswahl der Hauptlösung.
5. Die Dimensionierung und Herstellung dieser Hauptlösung wird dann im 4. Kapitel beschrieben.
6. In Kapitel 5 werden die Eigenschaften der Hauptlösung durch eine Testreihe ermittelt und verifiziert.
7. Die Ergebnisse dieser Testreihe und deren Bewertung werden im 6. Kapitel diskutiert.
8. In Kapitel 7 wird geprüft, in wieweit die Anforderungen des Kunden erfüllt werden konnten.
9. Schlussendlich fasst das Kapitel 8 die gesamte Thesis zusammen und bietet einen Ausblick auf mögliche Verbesserungen.

Kapitel 2

Anforderungsanalyse

2.1 Mission

Die Rakete HEIDI soll am Spaceport America Cup 2019 einen Apogäum von 10′000 ft AGL (3048 m) erreichen und danach wieder sanft auf dem Boden Landen. Die Grafik 2.1 zeigt die qualitative Flugbahn der Forschungsrakete, wobei auf der Y-Achse die Höhe über dem Boden und auf der X-Achse die Aktionen und Meilensteine dargestellt werden. Nachdem der Apogäum erreicht ist, beginnt die Bergung, welche in zwei Phasen unterteilt ist.
Der erste Event löst eine CO_2-Ladung aus, welche die Nasenspitze der Rakete wegsprengt und den Fallschirm im gereeften Zustand rauszieht. Bei diesem Event müssen zwei Kriterien erfüllt werden. Einerseits muss der Fallschirm aufgehen, ohne dass sich die Leinen ineinander verheddern und andererseits müssen die durch die hohen Geschwindigkeiten und Gewichtskräfte entstehenden Schockkräfte durch die Leinen des Fallschirms aufgenommen werden können.
In der ersten Landephase (Orange) soll der Flug der Rakete stabilisiert und eine konstante Sinkgeschwindigkeit zwischen 23 m/s und 45 m/s erreicht werden. Auf einer Höhe von 1500 ft AGL (457 m) löst dann der zweite Event einen Mechanismus aus, welcher den Fallschirm komplett öffnet, um in Phase zwei (Rot) über zu gehen. Bis zur Landung “Touchdown” soll dann eine konstante Fallgeschwindigkeit von weniger als 9 m/s erreicht werden, damit die Rakete unversehrt bleibt und wieder verwendet werden kann.

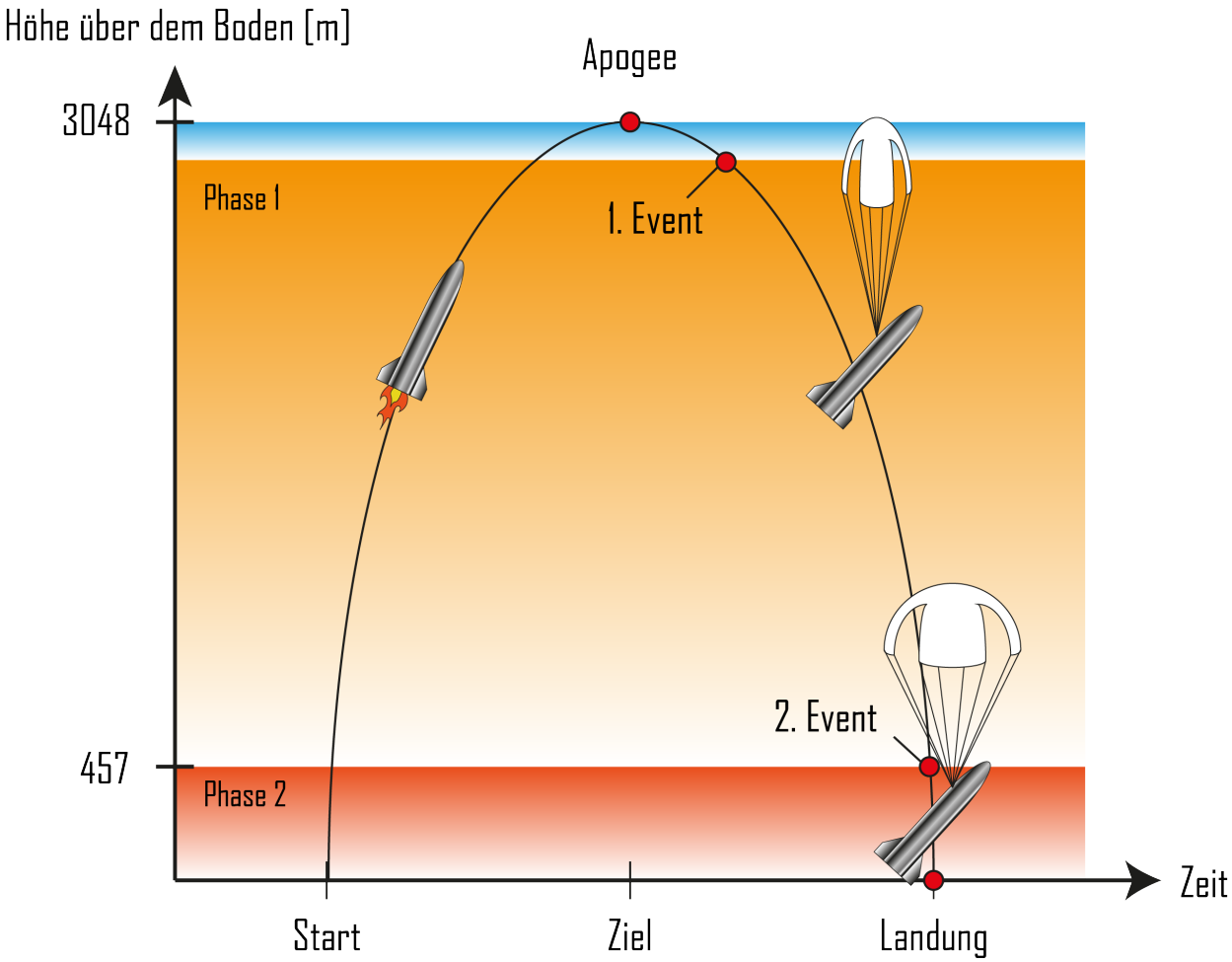


Abbildung 2.1: HEIDI's Mission

Nr.	Anforderung	Quelle
1	Das konzipierte FLS muss 2 Fallgeschwindigkeiten mit demselben Fallschirm erlauben	ARIS
2	Das FLS muss in die Rakete HEIDI integriert werden können (Bauraum: 125 mm Durchmesser,550 mm Länge)	ARIS
3	Das FLS muss in einer ersten Phase die Rakete mit der Masse 24 kg auf eine Geschwindigkeit zwischen 23 und 45 m/s abbremsen können	ARIS/ IREC
4	Das FLS muss in einer zweiten Phase die Rakete mit der Masse 24 kg auf eine Geschwindigkeit von weniger als 9 m/s abbremsen können	ARIS/ IREC
5	Das FLS muss sicher und zuverlässig sein	ARIS
6	Das FLS muss einen stabilen Flug gewährleisten	ARIS
7	Das FLS muss soll geringe Öffnungskräfte verursachen und diese aufnehmen können	ARIS
8	Das FLS soll einfach in der Herstellung sein	ARIS
9	Das FLS soll eine reproduzierbare Leistung erbringen können, unabhängig vom Anwender	ARIS
10	Das FLS soll durch einen Swivellink mit der Rakete verbunden sein	ARIS
11	Das FLS soll skalierbar sein	ARIS
12	Das FLS soll einfach in der Handhabung, Wartung und Vorbereitung sein	ARIS
13	Das FLS soll wiederverwendbar sein	ARIS
14	Das FLS soll im eingepackten Zustand eine axial-symmetrische Gewichtsverteilung haben	ARIS
15	Das Gewicht des FLS soll 6 kg nicht übersteigen (25% des Gesamtgewicht von HEIDI)	ARIS
16	Das FLS soll Temperaturen von 10 - 80 Grad Celsius stand halten können.	ARIS

Tabelle 2.1: Anforderungsliste

[6][7]

Durch diese Mission ergeben sich die primären Anforderungen des Kunden, welche in der Tabelle 2.1 mit dem Wort “muss” beschrieben sind. Sekundäre Kriterien werden in der Anforderungsliste mit “soll” beschrieben. Als tertiäre Anforderung gilt auch, dass das FLS für beliebige Missionen und Raketengrössen eingesetzt werden solle. Diese Anforderung wird in dieser Arbeit jedoch nicht berücksichtigt und deshalb auch nicht in der Anforderungsliste aufgeführt. Im Anhang C kann das gesamte Pflichtenheft eingesehen werden.

2.2 Funktionsbeschreibung Bergungssystem

2.2.1 Systemabgrenzung

Die Abbildung 2.2 zeigt exemplarisch ein vollumfassendes Bergungssystem einer Forschungsrakete. Der Aktionszyklus streicht die wichtigsten Punkte des Bergungssystems, von der Vorbereitung bis zur Landung, heraus. Die Zugehörigkeit der Bauteilgruppen zu den jeweiligen Teilaufgaben im Aktionszyklus wird in der Abbildung farblich ersichtlich. Im Rahmen dieser Arbeit wird die Systemgrenze rund um die Entwicklung und Herstellung des Fallschirmes und die Konzeptionierung des Reefing-Systemes und des Swivellinks gezogen, da sowohl die Separation der Raketenspitze mittels CO_2 Kartuschen, als auch der Auslösemechanismus mit dem Tender Descender direkt von der Rakete HEIDI übernommen werden können.
Das FLS in der Abbildung 2.2 beinhaltet einen Fallschirm 1 mit integriertem Reefing System 2, welcher über einen Swivellink 3 und eine Schockleine 4 mit dem unteren Teil der Rakete 5 verbunden ist. In diesem Teil sitzt neben dem Antrieb und dem Avionik-System auch die Auslöseelektronik und der Auslösemechanismus 6 des FLS. Die Raketenspitze 8 zieht nach der Separation durch den mitfliegenden Fallschirmcontainer 7 den Fallschirm raus und bleibt durch die Verbindungsleine 9 mit der Rakete verbunden.

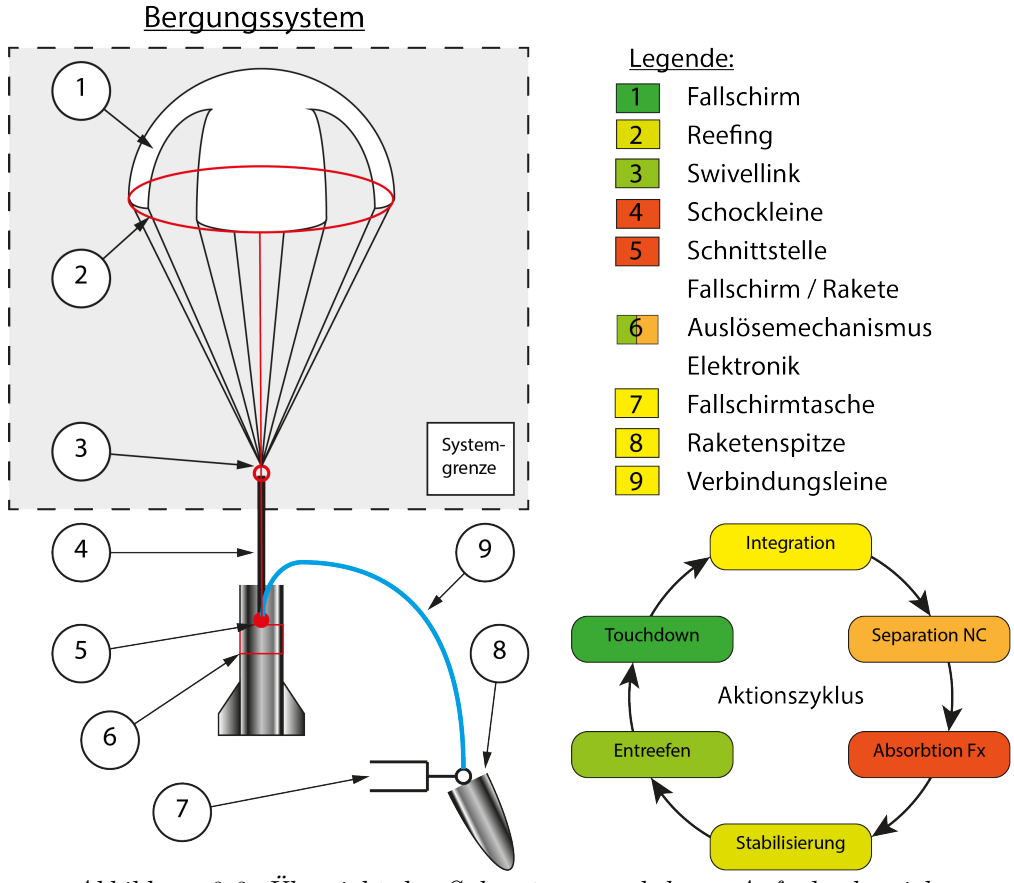


Abbildung 2.2: Übersicht der Subsysteme und deren Aufgabenbereich

Der Aktionszyklus beinhaltet die Schritte:

- Integration: Vorbereitung des FLS vor dem Start der Rakete
- Separation: Nach Erreichen des Apogäum wird die Nasenspitze weggesprengt
- Absorbtion: Der Fallschirm entfaltet sich im gereeften Zustand und nimmt die ersten Schockkräfte auf
- Stabilisierung: Der Flug wird auf eine konstante Fallgeschwindigkeit stabilisiert
- Entreefen: Der Fallschirm wird komplett geöffnet
- Touchdown: Die Rakete landet sicher am Boden
- Integration: Vorbereitung für den nächsten Start

2.2.2 Herleitung und Analyse der Fallschirmkraft

Der Aktionszyklus wird in dieser Arbeit von hinten aufgerollt und beginnt mit dem Touchdown der Rakete. Dabei ist die verlangte Sinkgeschwindigkeit die massgebende Grösse für eine erste Vordimensionierung des Fallschirmes. Um geeignete Lösungsvarianten zu entwerfen, muss zuerst verstanden werden wie die Fallschirmform und die Sinkgeschwindigkeit zusammenhängen.

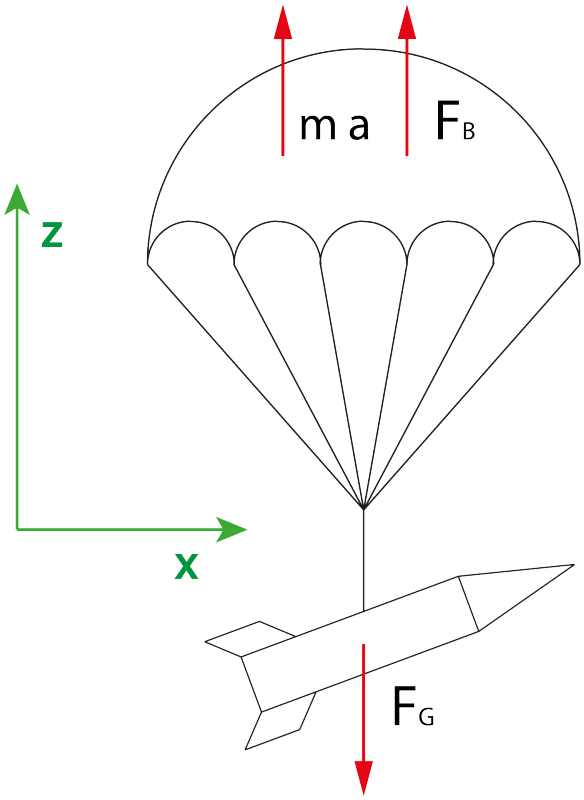


Abbildung 2.3: Angreifende Kräfte am Fallschirm im Sinkflug

Die Abbildung 2.3 zeigt die angreifenden Kräfte auf das dynamische System. Die Gewichtskraft F_G wirkt in Fallrichtung, wobei die Bremskraft F_B und die Trägheitskraft $m \cdot a$ entgegen der Fallrichtung wirken [8]. Das Summengleichgewicht der Kräfte in Fallrichtung lautet:

$$\sum F_z = m \cdot a + F_B - F_G = 0 \tag{2.1}$$

Im Gleichgewichtszustand ist die Fallgeschwindigkeit konstant und damit die Fallbeschleunigung a, welche die Trägheitskraft verursacht, null. Damit fällt der erste Term der Gleichung 2.1 weg und es bleibt:

$$F_B = F_G \tag{2.2}$$

Die Bremskraft und die Gewichtskraft setzen sich folgendermassen zusammen [1]:

$$Bremskraft \quad F_B = \frac{1}{2} \cdot \rho \cdot C_D \cdot A \cdot v^2 \tag{2.3}$$

$$Gewichtskraft \quad F_G = m_R \cdot g \tag{2.4}$$

Werden nun die Gleichungen 2.3 und 2.4 in die Gleichung 2.2 eingesetzt kann nach der Fallgeschwindigkeit v aufgelöst werden:

$$v = \sqrt{\frac{2 \cdot m_R \cdot g}{\rho \cdot C_D \cdot A}} \tag{2.5}$$

Der Zusammenhang zeigt, dass die Fallgeschwindigkeit bei konstantem Gewicht hauptsächlich von der Fläche des Fallschirmes A und dem Zugkraftkoeffizienten C_D abhängen. Das Produkt aus diesen zwei Termen ergibt die tatsächliche Fläche oder auch projizierte Fläche S des Fallschirmes, welche die Bremskraft erzeugt.

$$S = C_D \cdot A \tag{2.6}$$

Schockkräfte

Um die Schockkraft nach der Separation der Nasenspitze zu berechnen, wird die Bremskraft mit dem Öffnungskraftkoeffizienten C_X multipliziert[1]. In der Rakete wird die Separation der Nasenspitze spätestens durch einen Zeitzünder ausgelöst, falls die integrierte Sensorik der Rakete nicht wie geplant funktioniert. Deshalb rechnet ARIS mit einer maximalen Geschwindigkeit von $v_{Apogee} = 50\ m/s$[9]. Die Formel lautet:

$$Schockkraft \quad F_{Schock} = F_B \cdot C_X = 1/2 \cdot \rho_{10000ft} \cdot C_D \cdot A \cdot v_{apogee}^2 \cdot C_X \tag{2.7}$$

Mit dieser Formel kann später die Anzahl Zugleinen bestimmt und die Schockleine dimensioniert werden.

Kapitel 3

Lösungsvorschläge

3.1 Ideenfindung

3.1.1 Fallschirmgrundform

Der Rundkappenfallschirm ist die am häufigsten verbreitete Fallschirmform, sowohl für den Hauptfallschirm als auch für den Bremsfallschirm. Jedoch werden in dem "Parachute Recovery System Design Manual" weitere 20 Grundformen aufgeführt[1]. Die wichtigsten Designkriterien bei der Auswahl sind:

- Zugkraftkoeffizient C_D
- Öffnungskraftkoeffizient C_X
- Oszillationswinkel α

Mit Hilfe dieser Designkriterien wurden aus der Tabelle im Anhang A die drei Formen herausgesucht, welche sich am ehesten für ein Reefing System eignen. Die ausgewählten Formen sind in der Tabelle 3.1 aufgelistet. Der Hemispherical Fallschirm hat zwar eine relativ schlechte Performance, hohe Öffnungskräfte und ein instabiles Flugverhalten, jedoch lässt diese Form die später beschriebene Vent-Reefing-Methode zu. Der Annular Fallschirm hat mit dem hohen Zugkraftkoeffizienten die beste Performance und auch ein gutes Öffnung- und stabiles Flugverhalten. Jedoch lässt diese Form wenige Reefing-Methoden zu. Der Cross Fallschirm besitzt den stabilsten Flug, die geringsten Öffnungskräfte und eignet sich mit seinem relativ hohen C_D-Wert sowohl als Bremsfallschirm als auch als Hauptfallschirm. Dazu können mit dieser Form viele Reefing-Methoden kombiniert werden.

TYPE	CONSTRUCTED SHAPE PLAN	PROFILE	$\frac{D_c}{D_o}$	INFLATED SHAPE $\frac{D_p}{D_o}$	DRAG COEF C_{D_o} RANGE	OPENING FORCE COEF C_X (INF MASS)	AVERAGE ANGLE OF OSCILLATION, DEGREES	GENERAL APPLICATION
HEMISPHERICAL			0.71	0.66	0.62 TO 0.77	~1.6	±10 TO ±15	DESCENT, M < 0.5, OBSOLETE
ANNULAR			1.04	0.94	0.85 TO 0.95	~1.4	<·6	DESCENT, M < 0.5
CROSS		—	1.15 TO 1.19	0.66 TO 0.72	0.60 TO 0.85	1.1 TO 1.2	0 TO ·3	DESCENT, DECELERATION

Tabelle 3.1: Mögliche Grundformen [1]

3.1.2 Reefing-Methoden

Die Variable in der Gleichung 2.5 zur Berechnung der Fallgeschwindigkeit ist die projizierte Fläche. Wird also der Zugkraftkoeffizient des Schirmes oder der in der Fläche enthaltene Durchmesser verändert, ändert sich auch die Fallgeschwindigkeit.

Skirt Reefing

Die Abbildung 3.1 zeigt, wie mit dieser Methode der Durchmesser des Schirmes am Saum "Skirt" begrenzt werden kann. Dazu werden an jeder Leine Ringe befestigt, durch welche eine sogenannte Reefing-Leine eingefädelt wird. Diese Reefing-Leine wird durch mindestens zwei Pyro-Cutter getrennt und somit das vollständige Entfalten des Fallschirmes ermöglicht [1].

Vorteile:

- kann mit verschiedenen Fallschirmformen kombiniert werden
- kann mit verschiedenen Auslösemechanismen kombiniert werden

Nachteil:

- erhöht das Gewicht im oberen Teil des Fallschirmes

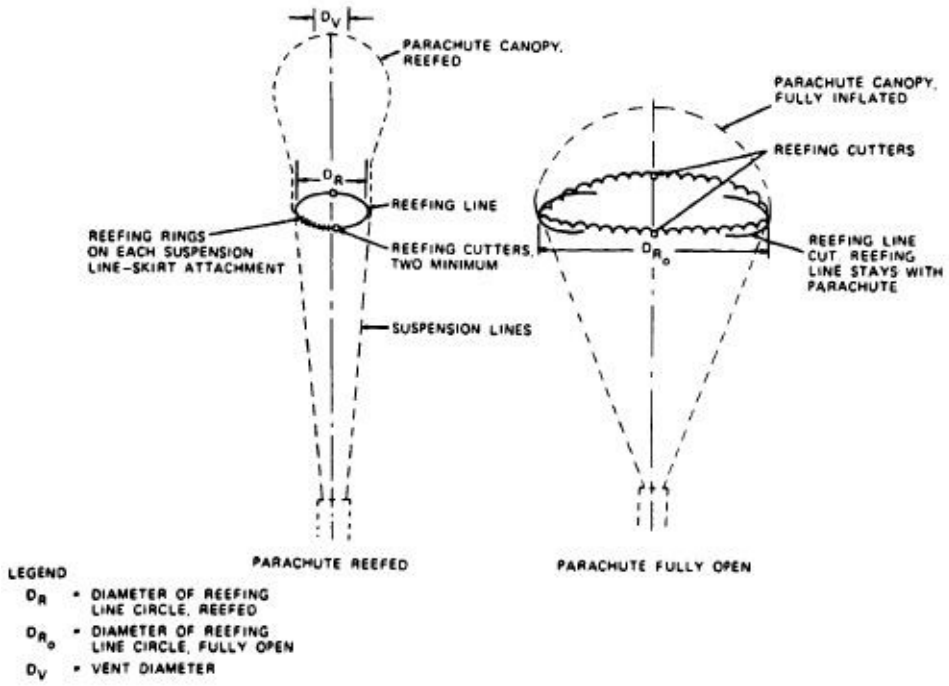


Abbildung 3.1: Funktionsweise Skirt Reefing [1]

Vent Reefing

Bei Rundkappenfallschirmen mit einer hemisphärischen Form kann die projizierte Fläche verkleinert werden, indem eine verkürzte Steuerleine zwischen dem Stabilisierungsloch "Vent" und dem Verbindungspunkt der Zugleinen angebracht wird. Dabei wird ebenfalls der Durchmesser verkleinert und es entsteht eine ringähnliche Form wie in der Abbildung 3.2 zu sehen ist [1].

Vorteile:

- es sind grosse Bremskraftunterschiede realisierbar
- kein zusätzliches Gewicht am Schirm

Nachteile:

- es entstehen hohe Schockkräfte nach dem Öffnen des Fallschirmes
- kann nur mit hemisphärischen Fallschirmformen kombiniert werden

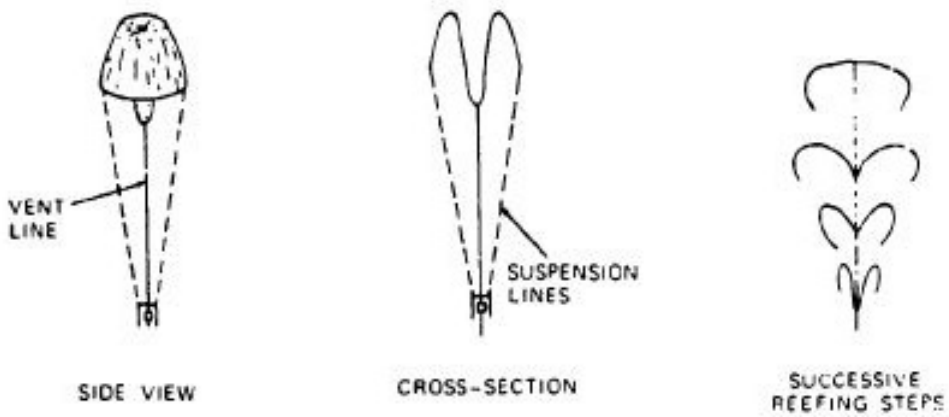


Abbildung 3.2: Funktionsweise Vent Reefing [1]

Skirt Reefing mit Steuerleine

Diese Reefing Methode kombiniert die Vielfältigkeit des Skirt-Reefing mit der Gewichtsreduktion im Schirm des Vent-Reefing. Die Abbildung 3.3 zeigt die beiden Reefing-Leinen, welche mittig über eine Steuerleine zum Auslösemechanismus "Disreefing Device" geführt werden. Zu beachten ist, dass hier der Durchmesser des Fallschirmes im geöffnet Zustand abhängig von der Länge der Reefing-Leinen ist [1].

Vorteile:

- kann mit verschiedenen Fallschirmformen kombiniert werden
- kann mit verschiedenen Auslösemechanismen kombiniert werden
- nur geringes zusätzliches Gewicht am Schirm

Nachteile:

- Steuerleine kann sich durch Rotation des Fallschirmes mit den Zugleinen verheddern
- Zusätzliche Leinen erschweren die Übersicht beim Packen des Fallschirmes

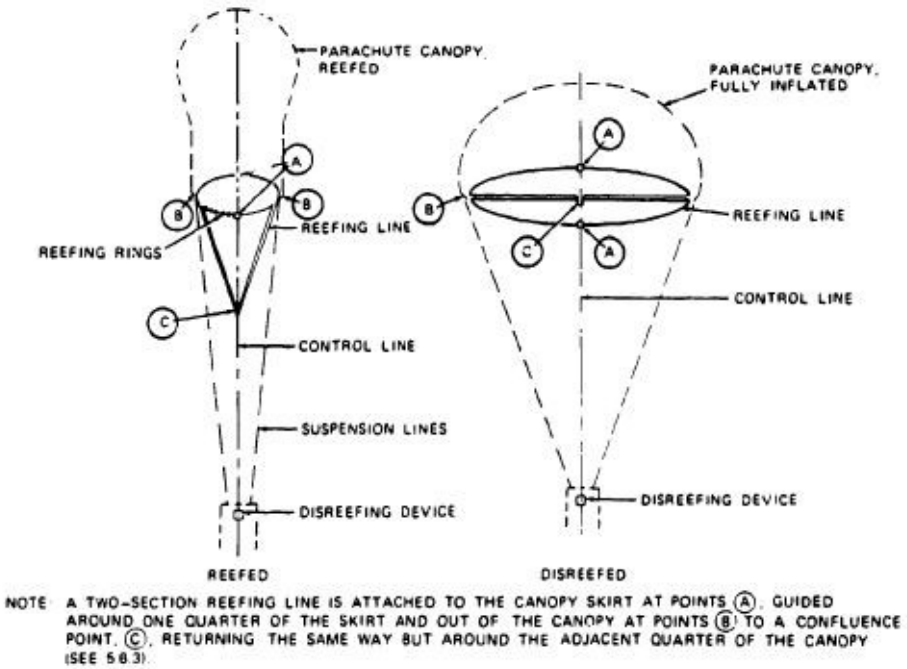


Abbildung 3.3: Funktionsweise Skirt Reefing mit Steuerleine[1]

Line Reefing

Line-Reefing ist eine Technik, mit der die Öffnungskräfte bei hohen Ausstossgeschwindigkeiten begrenzt werden können. Diese Reefing-Methode wird beispielsweise bei der Rettung von Kleinflugzeugen angewandt, damit bei der Öffnung des Fallschirmes keine Flugzeugteile verletzt werden. Diese Technik begrenzt den Durchmesser der Zugleinen indem in der Nähe des Fallschirmsaumes ein sogenannter “Slider” um die Zugleinen gespannt wird. Die nach aussenwirkende Zugkraft des Saumes bewirkt, dass der Slider, wie in der Abbildung 3.4 zu sehen ist, nach unten rutscht und somit die Fallgeschwindigkeit kontinuierlich gesenkt wird [2].

Vorteile:

- Kann mit verschiedenen Fallschirmformen kombiniert werden
- Simples und wiederverwendbares Prinzip
- Geringe Schockkräfte auf das System beim vollständigen Öffnen

Nachteile:

- Kann so nicht auf einer bestimmte Höhe ausgelöst werden
- Halte- und Auslösemechanismen nötig, welche das Gewicht am Saum erhöhen

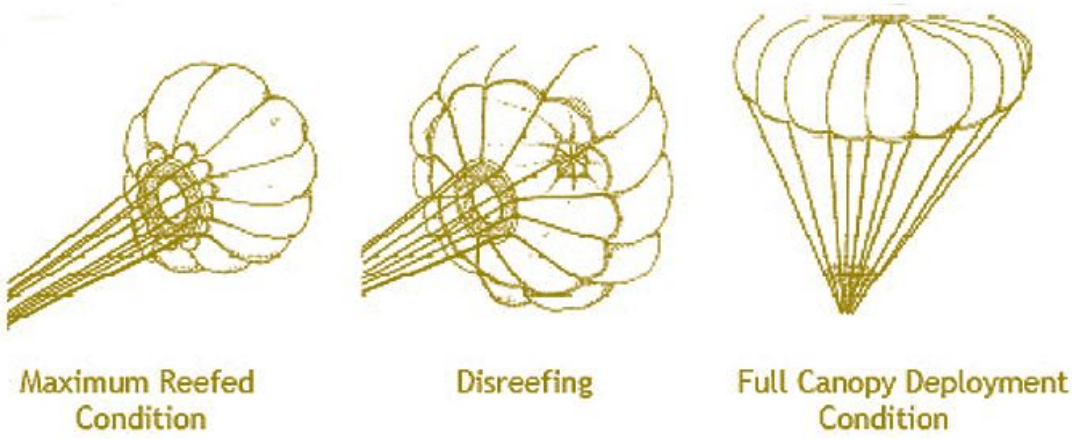


Abbildung 3.4: Funktionsweise Line Reefing[2]

Fold Reefing

Eine weitere noch nicht existierende Variante um die projizierte Fläche zu begrenzen, wäre den Fallschirm in einem teilweise gefalteten Zustand zu halten. Die Abbildung 3.5 zeigt einen Fallschirm im Querschnitt mit den rot gekennzeichneten Befestigungspunkten, welche auf der oberen Fläche des Schirmes angebracht sind. Links befindet sich der Fallschirm im teilweise gefalteten Zustand, da die zwei Befestigungspunkte zusammen gehalten werden. Durch einen Auslösemechanismus werden diese Punkte voneinander getrennt und der Fallschirm kann sich vollständig öffnen.

Vorteile:

- Die bremskrafterzeugende Fläche kann um ein vielfaches reduziert werden
- Simples und wiederverwendbares Prinzip

Nachteile:

- Kann nur mit dem Kreuzfallschirm kombiniert werden
- Aufwendige Falttechnik nötig beim Packen des Fallschirmes
- Instabiles Verhalten des Fallschirmes im gereeften Zustand
- Keine Literatur vorhanden für Dimensionierung

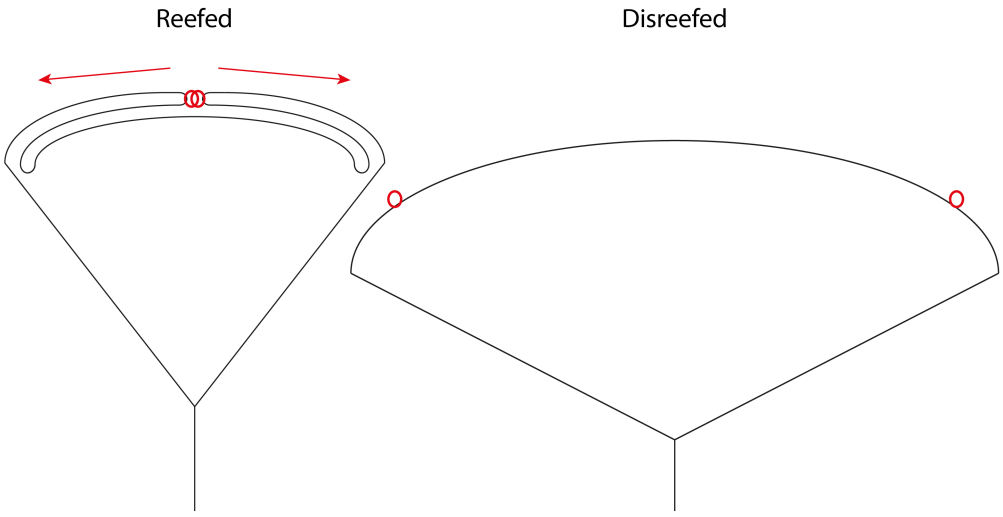


Abbildung 3.5: Funktionsweise Fold Reefing

3.1.3 Reefingsteuerung

Die Reefing Steuerung beschreibt, wie der Fallschirm im gereeften Zustand gehalten werden kann. Einige denkbare Möglichkeiten werden hier stichwortartig aufgeführt. Deren Einsatz und die Beschreibung der Funktion werden im Abschnitt 3.2 erläutert.

- Seilklemme
- Steuerleine
- Seilwinde
- Slider-Ring

3.1.4 Auslösemechanismen

Servomotor

Der Servomotor besteht aus einem Elektromotor mit integriertem Getriebe und Steuergerät. Je nach Ausführung des Motors ist es möglich präzise Drehbewegungen von z.B. 60 *Grad* auszuführen. Der Vorteil dieses Motors ist, dass bereits bei kleinen Ausführungen durch die Übersetzung des Getriebes ein relativ hohes Drehmoment entsteht. Wird diese Drehbewegung beispielsweise mit Hebelmechanismen und Seilzügen kombiniert, kann damit auch ein Auslösemechanismus für ein Reefing-System realisiert werden.

Schrittmotor

Auch mit dem Schrittmotor lassen sich präzise Drehbewegungen ausführen. In Kombination mit einer Seilwinde könnte damit eine Steuerleine ein- und ausgefahren werden.

Pyro-Cutter

Der Pyro-Cutter ist in der Abbildung 3.6 explosionsartig dargestellt. Dabei wird die Reefing-Line durch das blaue Gehäuse geführt. Der Kabelstrang auf der rechten Seite zündet dann eine Sprengladung, welche den kleinen Bolzen durch die Reefing-Line schiesst, und diese somit trennt.

Abbildung 3.6: Auslegeordnung eines Pyro-Cutters [3]

Tender Descender

Die Tender Descender “TD” wurde dazu entwickelt Hauptfallschirme auszulösen. Die Abbildung 3.7 zeigt eine zusammengebaute TD inkl. Quicklinks. Das robuste Aluminium Gehäuse verbindet die Quicklinks über zwei Stifte, welche durch das gravierte Verbindungsstück mit einer Kunststoffkapsel verbunden sind. Diese Kapsel wird über eine elektrisch entfachte Sprengladung mit samt den Stiften aus dem Gehäuse gesprengt und gibt somit die Verbindung der beiden Quicklinks frei.

Abbildung 3.7: Zusammengebaute Tender Descender mit zwei Quicklinks[4]

3.2 Lösungskonzepte

Aus den gesammelten Ideen wurde ein Morphologischer Kasten 3.8 zusammengestellt, um die verschiedenen Ideen visuell kombinieren zu können. Die fünf Konzepte werden hier durch die Vernetzung gleichfarbiger Pfeile dargestellt und im folgenden Abschnitt vorgestellt.

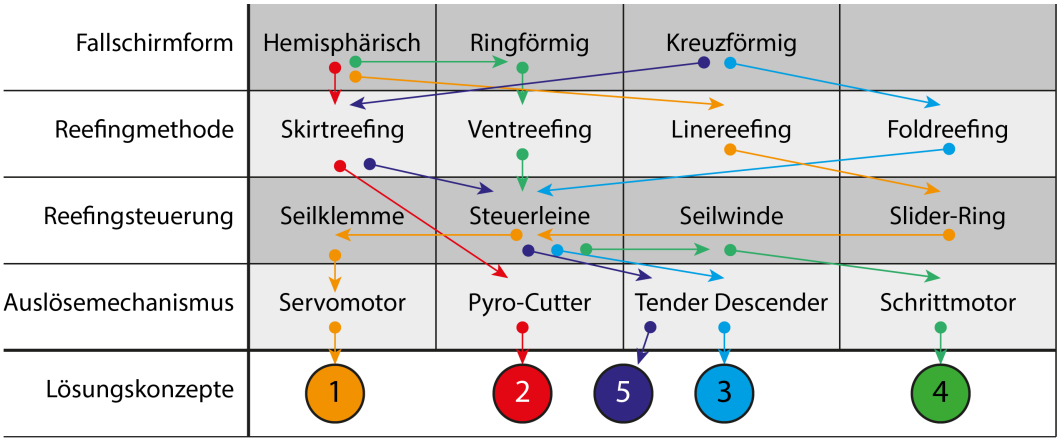


Abbildung 3.8: Morphologischer Kasten: Reefing System

3.2.1 Variante 1: Modified Slider

Das Konzept basiert auf der Line-Reefing-Methode in welcher, eine hemisphärische Fallschirmform zum Einsatz kommt. Die Abbildung 3.9 verdeutlicht nochmals vereinfacht dargestellt, das Prinzip des Sliders. Das Problem, den Slider-Ring auf der gewünschten Position zu halten, wird durch eine integrierte Seilklemme gelöst. Die Abbildung 3.10 zeigt das Innenleben einer Hälfte des Ringes im Querschnitt, einmal in der Halteposition und einmal im Moment des Lösens. Die Seilklemme funktioniert nach demselben Sicherungsprinzip wie man es aus dem Klettersport kennt. In der Halteposition, wird durch die Abwärtsbewegung des Ringes, die Seilklemme automatisch gegen die Zugleine gezogen und erzeugt somit die haltende Reibkraft (3.10 links). Ein Servomotor kann durch seine präzise Ansteuerung die benötigte Zugbewegung an der Steuerleine einleiten, welche die Seilklemme löst und in der gelösten Position einrasten lässt. Der Ring kann dann nach unten rutschen und somit den Fallschirm komplett öffnen (3.10 rechts).

Vorteile:

- Komplett Wiederverwendbar
- Sicheres Reefing
- Geringe Schockkräfte
- Innovativ

Nachteile:

- Rotation des Fallschirmes kann den Ring zu früh lösen
- Beim verheddern der Steuerleine ist der Öffnungsvorgang nicht sicher gewährleistet
- Viele mechanische Teile nötig
- Dadurch entsteht ein hohes Gewicht

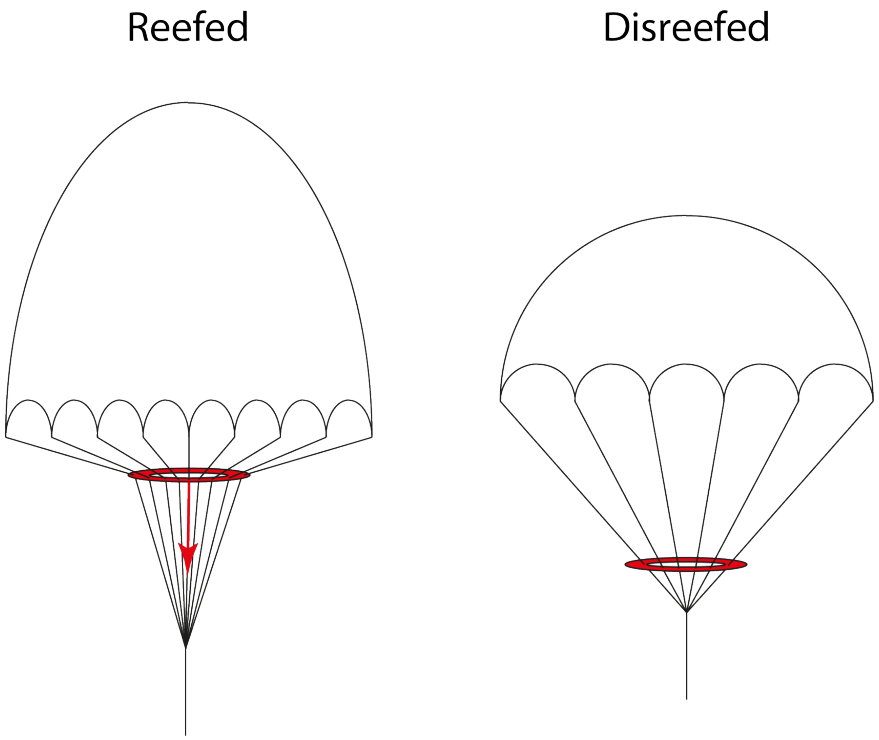


Abbildung 3.9: Funktionsweise: Modified Slider

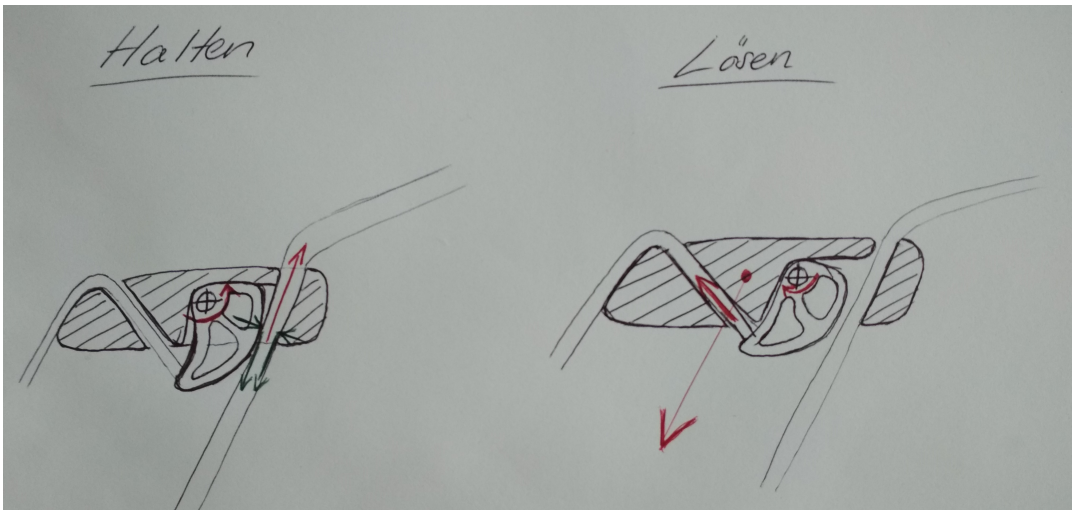


Abbildung 3.10: Mechanismus der Seilklemme im Querschnitt

3.2.2 Variante 2: Classic

Die Klassische Methode entspricht dem Konzept des im Abschnitt 3.1.2 vorgestellten Skirt-Reefing und wurde so direkt als Lösungsvariante aufgenommen. In der Abbildung 3.11 rot dargestellt, ist das Symbol des Pyro-Cutters zu sehen, welcher die Reefing-Line trennt. Da sich diese Pyro-Cutter am Saum des Fallschirmes befinden, müssen die Signalkabel von der Rakete, über die Schock- und Zugleinen zum Fallschirm geführt werden.

Vorteile:

- Bewährtes System
- Redundanz gut implementierbar
- Zuverlässig

Nachteile:

- Nur teilweise wiederverwendbar
- Komplexe Vorbereitung mit Sprengladung nötig
- Erhöhtes Gewicht am Fallschirm

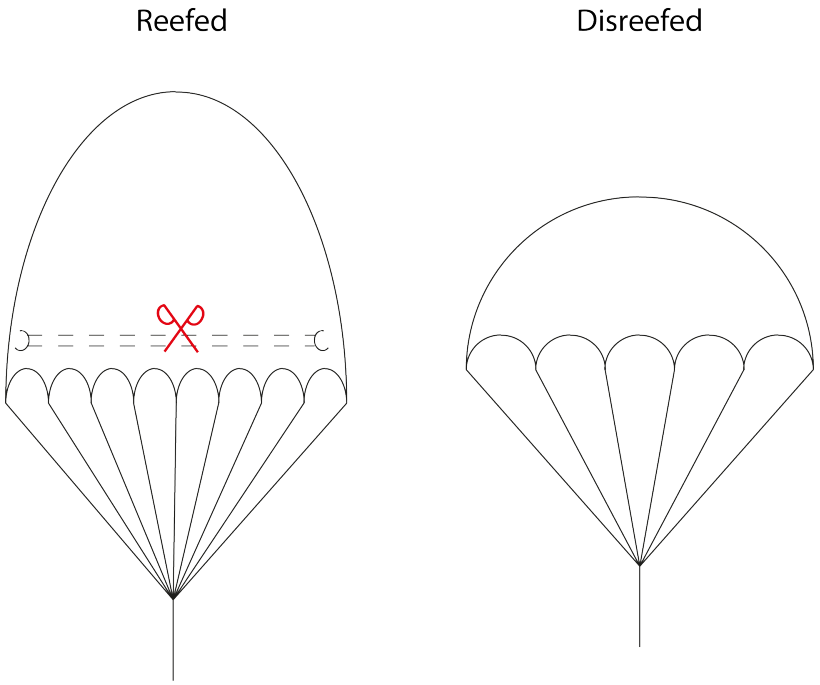


Abbildung 3.11: Funktionsweise: Variante Classic

3.2.3 Variante 3: SwissCross

Die Fold-Reefing-Methode kann nur sinnvoll mit einem kreuzförmigen Fallschirm kombiniert werden. Diese Fallschirmform sticht nicht nur durch seine hohe Stabilität im Flug und die geringen Schockkräfte bei der vollständigen Öffnung ins Auge, sondern vermittelt am Spaceport America Cup auch eine gewisse "Swissness". Die Abbildung 3.12 zeigt den gereeften Fallschirm im Querschnitt. Die roten Ringe kennzeichnen die Verbindungsstelle, welche am Fallschirm eingenäht sind. Eine erste Idee war es, diese Verbindungsstelle über eine Steuerleine zu lösen, welche an Board der Rakete über eine Tender Descender ausgelöst wird.

Ein erster Funktionsprototyp mit den Massen 1.2x1.2 m wurde aus einer Rettungsdecke, 1 mm-Drachenschnur und Scotch-Klebeband gefertigt. Abbildung 3.13 zeigt den Prototypen im gefalteten Zustand. Es ist zu erkennen, dass der Fallschirm eine undefinierbare und somit unberechenbare Form angenommen hat. Es hat sich auch gezeigt, dass es sehr schwierig ist einen Auslösemechanismus über eine Steuerleine zu implementieren, da der Verbindungspunkt auf der Aussenseite des Schirmes angebracht ist.

Vorteil:

- Potentieller Blickfang

Nachteile:

- Hohes Gewicht am Fallschirm
- Unberechenbares Verhalten im gereeften Zustand
- Komplizierter Öffnungsmechanismus notwendig
- Hohe Schockkräfte beim Öffnen

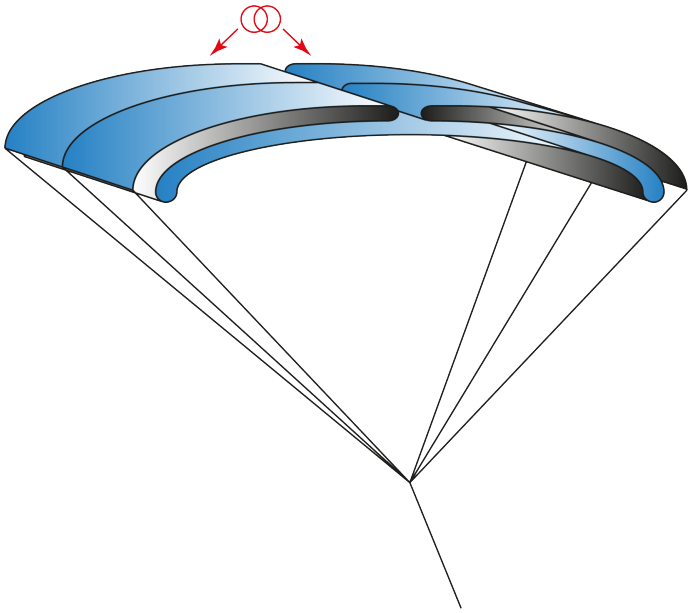


Abbildung 3.12: SwissCross im Querschnitt

Abbildung 3.13: Funktionsprototyp SwissCross

3.2.4 Variante 4: Shape Change

Die vierte Variante lehnt sich an die Vent-Reefing-Methode an. Jedoch wird hier der Reefing-Prozess umgekehrt. Das heisst, dass sich die hemisphärische Fallschirmform, in der ersten Phase, durch ziehen an der Kuppe in eine ringförmige Fallschirmform umwandelt. Der Fallschirm wird gebremst, da diese Form einen höheren Zugkraftkoeffizienten aufweist, als die hemisphärische Fallschirmform (siehe Tabelle 3.1). Die Zugarbeit wird von einem Schrittmotor verrichtet, welcher die Steuerleine über eine Seilwinde einzieht.

Vorteil:

- Komplett wiederverwendbar

Nachteile:

- Geschwindigkeitsreduktion von max. 12 % [8]
- Hohe Zugkraft in der Steuerleine nötig
- Hohe Sinkgeschwindigkeit in der ersten Phase führen zu instabilem Flug
- Bei Versagen der Steuerleine stürzt Rakete mit hoher Geschwindigkeit zu Boden

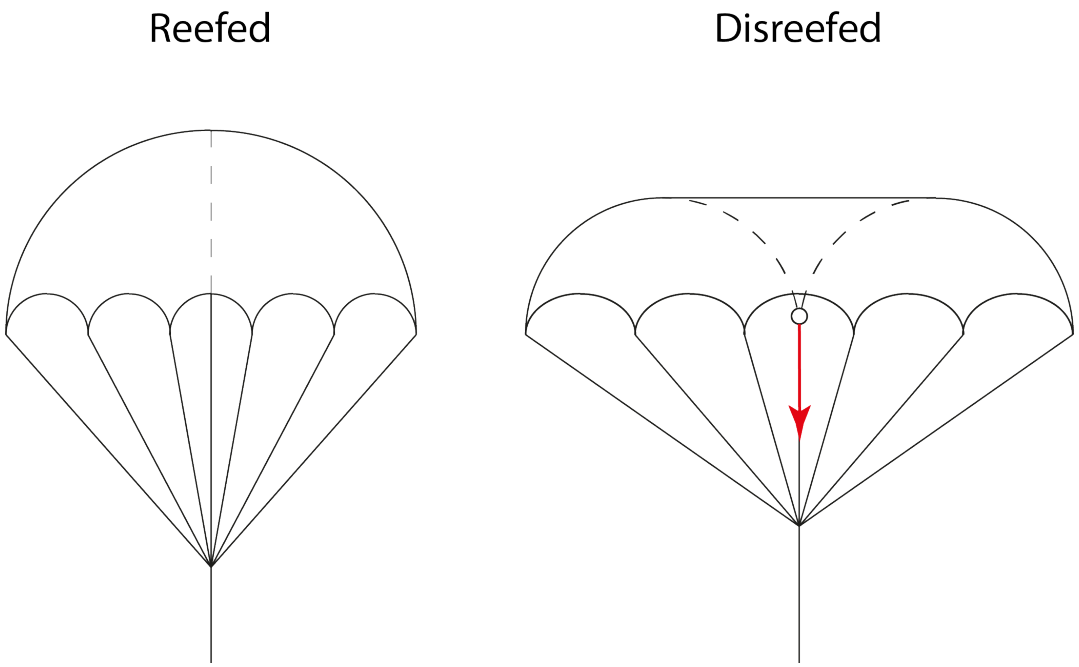


Abbildung 3.14: Funktionsweise: Variante Shape Change

3.2.5 Variante 5: SwissCross 2.0

Die Kombination aus dem klassischen und bewährten Skirt-Reefing mit Steuerleine und dem Kreuzfallschirm ergibt die Lösungsvariante SwissCross 2.0 (Abbildung 3.15). Auf der Innenseite des Fallschirmsaumes wird jeweils an jeder Zugleine ein Ring angenäht. Der Fallschirm wird gereeft indem die Steuerleine wie ein Lasso durch diese Ringe gezogen wird. Der Durchmesser wird dann in Abhängigkeit der Länge der Steuerleine begrenzt. Sobald die Tender Descender vom Flugcomputer das elektrische Signal erhält, wird die Steuerleine von der Rakete gelöst und durch die Zugkraft des Saumes nachgezogen. Die Steuerleine bleibt im offenen Zustand im Saum eingefädelt.

Vorteile:

- Fallschirm
  - Hohe Stabilität
  - Geringe Öffnungskraft
  - Einfache Herstellung
  - Geringe Wartung und Vorbereitung
- Reefing-Methode
  - Hohe Zuverlässigkeit
  - Niedriges Gewicht
  - Geringe Wartung und Vorbereitung
- Tender Descender
  - Wiederverwendbar
  - Robust

Nachteil:

- relativ schlechter C_D-Wert im offenen Zustand

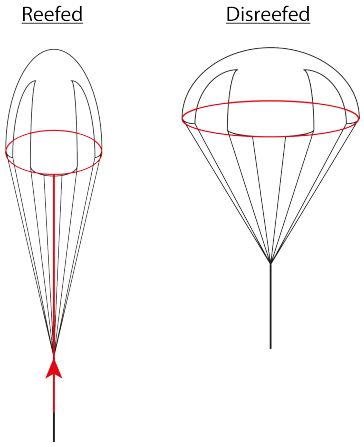


Abbildung 3.15: Funktionsweise SwissCross 2.0

Abbildung 3.16: Prototyp SwissCross 2.0 reefed

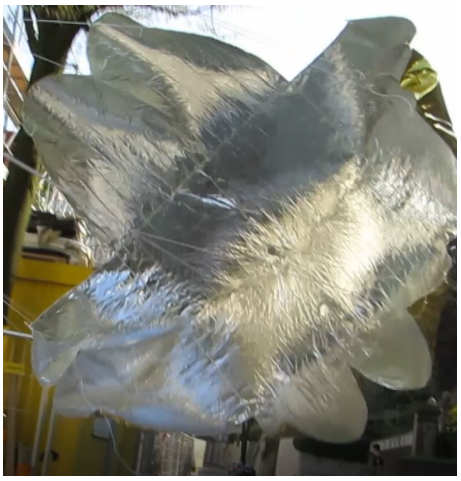


Abbildung 3.17: Prototyp SwissCross 2.0 open

Proof of Concept

Mit demselben Prototypen aus Abschnitt 3.2.3 wurde diese Konzeptvariante auf die Funktion des Reefing, Reproduzierbarkeit und Zuverlässigkeit geprüft. Die Windgeschwindigkeit wurde durch eine translatorische Bewegung von ca. 25 km/h simuliert, wobei der Auslösemechanismus der Steuerleine manuell erfolgte. Die Abbildung 3.16 zeigt den Prototyp im gereeften und Abbildung 3.17 im geöffneten Zustand. Trotz Windböen am Testtag konnte das System durch einen stabilen Flug und zuverlässiges Öffnen überzeugen. Deshalb werden die Stabilität, Zuverlässigkeit, Wiederverwendbarkeit und Reproduzierbarkeit des Systems hoch benotet.
Durch die leichte Rotation des Schirmes im gereeften Zustand, hat sich die Steuerleine um die Zugleinen gewickelt, was eine Latenz von ungefähr 4 Sekunden verursachte bis der Schirm vollständig geöffnet war. Diese Latenz wird durch einen Swivel-Link mit integrierter Steuerleinenführung beseitigt. Wegen der einfachen Fallschirmform konnte der Prototyp innerhalb weniger Stunden hergestellt werden. Zudem funktionierte das Reefing-System auch in diesen Dimensionen.

Optimierung

In der Abbildung 3.18 wird das überarbeitete Konzept mit integriertem Swivellink sichtbar. Durch die drehbare Lagerung ermöglicht der Swivellink, dass Rotationen des Fallschirmes nicht auf die Rakete übertragen werden. Dadurch, dass der Swivellink hohl ist, dient er als Führung für die Steuerleine und garantiert somit ein sicheres Öffnen, ohne dass sich die Steuerleine mit den Zugleinen verheddert. Die Steuerleinen werden zudem durch die einzelne Aufhängung in den axialsymmetrisch angeordneten Bohrungen organisiert.

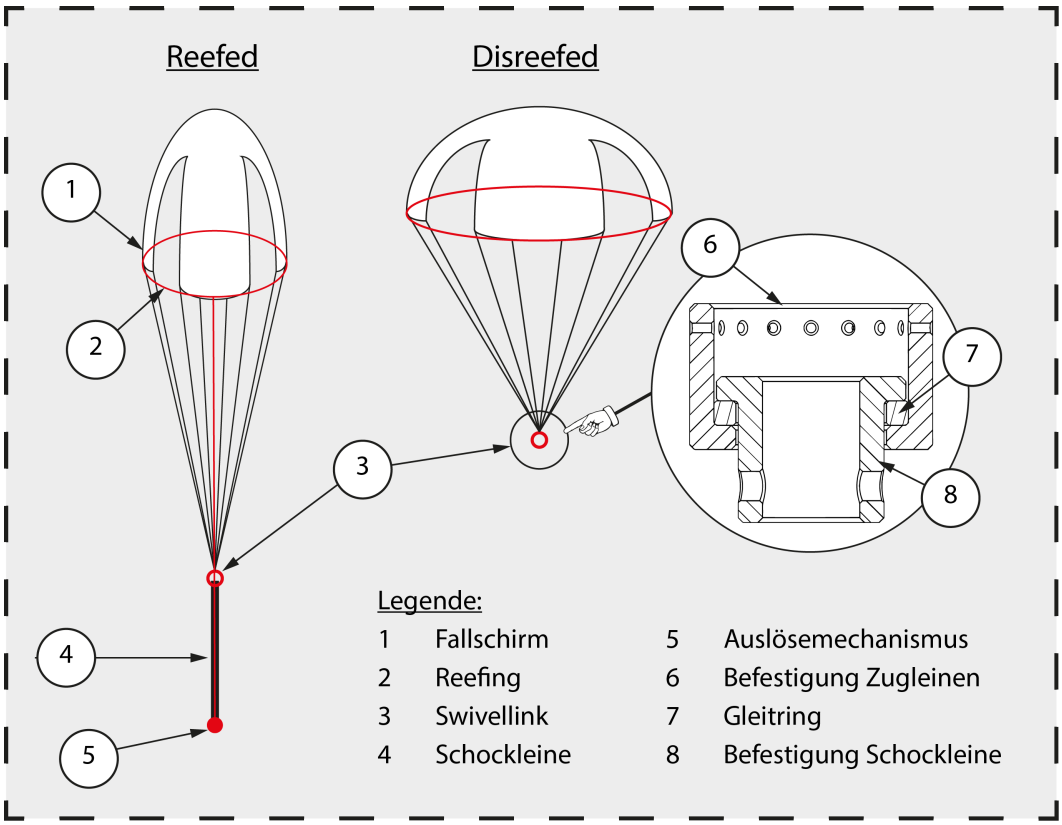


Abbildung 3.18: Übersicht Konzept SwissCross 2.0

3.3 Bewertung

3.3.1 Gewichtung

Die Auswahl der geeignetsten Variante erfolgt durch eine gewichtete Benotung der wichtigsten Kriterien. In der Tabelle 3.2 wird die Wichtigkeit der einzelnen Kriterien ermittelt indem alle Anforderungen paarweise verglichen werden. Wenn die Zeile wichtiger ist als die Spalte wird eine 2 eingetragen, sonst eine 0. Falls beide Anforderungen gleichrangig sind, kann eine 1 eingetragen werden. Das Gewicht des Kriteriums ergibt sich dann durch die Formel:

$$Gewicht = \frac{ZeilenSumme + 1}{max(ZeilenSummen + 1)} \cdot 5 \tag{3.1}$$

Damit die Bewertung der Varianten objektiv bleibt, wurde die Gewichtung der Anforderungsliste zusammen mit dem Kunden ermittelt.

Ermittlung der Gewichtung	Zuverlässigkeit	Stabilität	Hoher Drag	Geringe Öffnungskräfte	Wiederverwendbarkeit	Niedriges Gewicht und Volumen	Reproduzierbarkeit	Einfachheit Herstellung	Geringe Wartung & Vorbereitung	Kosten	Skalierbarkeit	Innovation	Summe	Gewicht
1 Zuverlässigkeit		2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	22	115.0
2 Stabilität	0		2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	20	105.0
3 Hoher Drag	0	0		2	2	2	2	2	2	2	2	2	18	95.0
4 Geringe Öffnungskräfte	0	0	0		2	2	2	2	2	2	2	2	16	85.0
5 Wiederverwendbarkeit	0	0	0	0		2	2	2	1	2	2	2	13	70.0
6 Niedriges Gewicht und Volumen	0	0	0	0	0		0	2	0	2	2	1	7	40.0
7 Reproduzierbarkeit	0	0	0	0	0	2		2	0	2	1	2	9	50.0
8 Einfachheit Herstellung	0	0	0	0	0	0	0		0	0	1	1	2	15.0
9 Geringe Wartung & Vorbereitung	0	0	0	0	1	2	2	2		2	2	2	13	70.0
10 Kosten	0	0	0	0	0	0	0	2	0		1	1	4	25.0
11 Skalierbarkeit	0	0	0	0	0	0	1	1	0	1		1	4	25.0
12 Innovation	0	0	0	0	0	1	0	1	0	1	1		4	25.0

Tabelle 3.2: Gewichtung der Anforderungen

3.3.2 Entscheidung

Die Tabelle 3.3 listet die bewerteten Varianten auf. Das Notensystem reicht von der Punktezahl 5 “ideal” bis zu 1 “knapp akzeptabel”. Schlussendlich ergibt sich daraus eine gewichtete Bewertung in Prozent. Ergebnisse unter 65 % sind grundsätzlich als unbefriedigende Lösungen anzusehen. Das überarbeitete Konzept des SwissCross 2.0 geht mit 86 % bei der Bewertung als Sieger hervor. Diese Lösungsvariante vereint alle herausragenden Attribute, welche für ein sicheres Reefing-System nötig sind.

	Gewicht	Classic Reefing	Produkt: Note&Gewicht	Shape Change	Produkt: Note&Gewicht	Swiss Cross	Produkt: Note&Gewicht	Modified Slider	Produkt: Note&Gewicht	Swiss Cross 2.0	Produkt: Note&Gewicht
Zuverlässigkeit	5.0	4	20.0	3	15.0	2	10.0	3	15.0	4	20.0
Stabilität	4.6	4	18.3	4	18.3	3	13.7	3	10.9	5	22.8
Hoher Drag	4.1	5	20.7	4	16.5	3	12.4	5	15.2	3	12.4
Geringe Öffnungskräfte	3.7	5	18.5	3	11.1	4	14.8	4	3.5	5	18.5
Wiederverwendbarkeit	3.0	3	9.1	3	9.1	5	15.2	5	13.7	5	15.2
Niedriges Gewicht und Volumen	1.7	3	5.2	3	5.2	4	7.0	2	20.7	5	8.7
Reproduzierbarkeit	2.2	4	8.7	3	6.5	3	6.5	5	14.8	4	8.7
Einfachheit Herstellung	0.7	3	2.0	3	2.0	4	2.6	2	12.2	4	2.6
Geringe Wartung & Vorbereitung	3.0	2	6.1	4	12.2	5	15.2	4	1.3	5	15.2
Kosten	1.1	4	4.3	3	3.3	2	2.2	2	2.2	3	3.3
Skalierbarkeit	1.1	3	3.3	3	3.3	3	3.3	4	4.3	3	3.3
Innovation	1.1	2	2.2	2	2.2	5	5.4	5	5.4	4	4.3
Benotung		3.5		3.2		3.6		3.7		4.2	
Gewichtete Benotung		118.3		104.6		108.3		119.1		135.0	
Ergebnis in %		76%		67%		69%		76%		86%	

Legende
Benotung
5 = ideal
1 = knapp akzeptabel

Tabelle 3.3: Entscheidungsmatrix

Kapitel 4

Hauptlösung

Am “Launchday” vom 23. März 2019 wurde das aktuelle Bergungssystem von HEIDI in Val de Ruz getestet. Durch die Einsicht in die Prozessabläufe des Recovery Teams von ARIS konnten wertvolle Erfahrungen gesammelt werden. Die wichtigsten Erkenntnisse für diese Arbeit waren:

- Umso weniger Teile das Bergungssystem beinhaltet, umso mehr kann die Vorbereitungszeit verkürzt werden.
- Die 1. Phase muss einen stabilen Flug gewährleisten, da sonst die 2. Phase durch die äusseren Kräfte zu früh eingeleitet werden kann.
- Die Verzögerung beim Öffnen des Hauptfallschirmes beträgt ca. 4 G, wobei die Verzögerung beim Pilotschirm nur ca. 2 G beträgt.

4.1 Dimensionierung Fallschirm

Die Dimensionierung des Fallschirmes stützt sich auf die Forschungsergebnisse einer Testreihe, welche 1971 im Windkanal des Naval ordnance Laboratory in White Oak, Maryland, durchgeführt wurde. Die Testreihe wurde mit Kreuzschirmen sowohl im vollständig geöffneten, als auch im gereeften Zustand durchgeführt. Die Fallschirme wurden für diese Tests aus jeweils 2 Paneelen mit einer Länge von 40 Zoll (1.016 m) und einem Armbreiten W zu Schirmlängen L Verhältnis W/L von 0.264 gefertigt. Aus der Untersuchung zum Zugkraftkoeffizienten C_D von W.P. Ludtke, welche in der Tabelle 4.1 ersichtlich sind, ergeben sich folgende Haupteinflussfaktoren, welche das Design des Fallschirmes bestimmen[5]:

Verhältnis W/L

Grundsätzlich gilt, dass ein tiefes Verhältnis W/L eine hohe Stabilität und eine geringe Öffnungskraft des Fallschirmes zur Folge hat. Jedoch sinkt damit auch der C_D-Wert [5].

Permeabilität des Stoffes

Die Permeabilität eines porösen Materials ist eine geometrische Grösse und beschreibt die Durchlässigkeit dieses Materials für Fluide. Eine niedrige Textilpermeabilität führt zu einer Instabilität des Fallschirmes in Form von Rotation und zu einer erhöhten Öffnungskraft [5][10].

Anzahl und Länge der Zugleinen

Die Versuche wurden mit 8, 16 und 24 Zugleinen durchgeführt und jeweils jeder dieser Versuche mit einer Zugleinenlänge von 1.8, 1.6 und 1.4 mal der Schirmlänge L. Dies ergab, dass der Zugkraftkoeffizient C_D erhöht wird mit steigender Anzahl Zugleinen und steigender Zugleinenlänge [5].

Geschwindigkeit

Die Versuche wurden bei Windgeschwindigkeiten zwischen 15.24 und 91.44 m/s ($50 - 300$ ft/s) durchgeführt. Es zeigte sich, dass der C_D-Wert mit sinkender Geschwindigkeit abnimmt [5].

VELOCITY V	DYNAMIC PRESSURE q	DRAG COEFFICIENT								
		8 SUSPENSION LINES			16 SUSPENSION LINES			24 SUSPENSION LINES		
		SUSPENSION LINE LENGTH / CANOPY DIAMETER			SUSPENSION LINE LENGTH / CANOPY DIAMETER			SUSPENSION LINE LENGTH / CANOPY DIAMETER		
		1.0 L	1.4 L	1.8 L	1.0 L	1.4 L	1.8 L	1.0 L	1.4 L	1.8 L
50	2.973	0.540	0.632	0.604	0.561	0.620	0.620	0.595	0.645	0.670
75	6.689	0.566	0.611	0.610	0.577	0.629	0.646	0.587	0.645	0.680
100	11.892	0.568	0.625	0.635	0.580	0.624	0.677	0.598	0.661	0.704
125	18.582	0.560	0.627	0.638	0.589	0.644	0.681	0.603	0.682	0.721
150	26.758	0.566	0.627	0.641	0.605	0.667	0.694	0.613	0.700	0.738
175	36.420	0.568	0.629	0.637	0.603	0.672	0.701	0.626	0.704	0.749
200	47.569	0.570	0.633	0.645	0.613	0.679	0.715	0.638	0.714	0.757
225	60.602	0.566	0.627	0.642	0.617	0.685	0.724	0.641	0.715	0.762
250	74.327	0.568	0.631	0.650	0.616	0.692	0.730	0.651	0.726	0.775
275	89.936	0.570	0.633	0.645	0.624	0.695	0.732	0.658	0.729	0.774
300	107.031	0.568	0.615	0.654	0.625	0.698	0.733	0.662	0.729	0.779

Tabelle 4.1: C_D Test Daten aus Versuchsreihe Nr. 2 [5]

4.1.1 Berechnung Fallschirmfläche

Im Abschnitt 2.2.2 wird hergeleitet, wie man die Fallgeschwindigkeit eines Fallschirmes berechnet. Mit der Vorgabe der Landegeschwindigkeit aus der Anforderungsliste 2.1 lässt sich durch Auflösen der Formel 2.5 nach A eine erste Dimensionierung erstellen. Die Gleichung lautet dann:

$$A = \frac{2 \cdot m_R \cdot g}{\rho \cdot C_D \cdot v^2} \tag{4.1}$$

Die Fallgeschwindigkeit wurde mit $v = 8\ m/s$ gewählt und ist damit am oberen Limit der Vorgabegeschwindigkeit, welche $< 9\ m/s$ sein soll. Der Zugkraftkoeffizient wurde anhand der Tabelle 3.1 mit $C_D = 0.7$ festgelegt. Die Masse der Rakete beträgt $m_R = 24\ kg$. Die Fallbeschleunigung g und die Luftdichte ρ werden mit $g = 9.81\ m/s^2$ und $\rho = 1.15 kg/m^3$ angenommen. Die Fallschirmfläche A eines Kreuzfallschirmes berechnet sich aus der Armlänge W und der Fallschirmlänge L [5]:

$$A = 2 \cdot W \cdot L - W^2 \tag{4.2}$$

Daraus ergibt sich die mindestens benötigte Fallschirmfläche $A = 9.1\ m/s$.

4.1.2 Berechnung Anzahl Zugleinen

Die Anzahl der Zugleinen ist abhängig von der Grösse der Schockkraft. Mit der Gleichung 2.7 lässt sich die maximale Schockkraft beim Öffnen der Rakete berechnen, wobei für das Worst-Case-Szenario der C_D und C_X-Wert des offenen Kreuzfallschirmes eingesetzt werden:

$$\begin{aligned}
F_{Schock} &= F_B \cdot C_X \\
&= 1/2 \cdot \rho_{10000ft} \cdot C_D \cdot A \cdot v_{apogee}^2 \cdot C_X \\
&= 9400N \\
C_D &= 0.7 && [1] \\
C_X &= 1.2 && [1] \\
v_{apogee} &= 50 m/s && [9] \\
\rho_{10000ft} &= 0.9 kg/m^3 && [11] \\
A &= 9.95 m^2
\end{aligned}$$

Die Tragkraft des gewählten Zugleinenmaterials beträgt 60 $kg/Leine$. Somit ergibt sich bei der Auswahl von 8, 16 oder 24 Zugleinen die Anzahl:

$$n = \frac{F_{Schock}}{F_{Trag}} = 15.97 => 16$$
$$F_{Trag} = 60kg/n \cdot g$$

4.1.3 Gewählte Design-Parameter

Da das Verhalten und die Performance des Fallschirmes grösstenteils von der Qualität der Herstellung abhängen, wird die Fläche etwas grösser gewählt, damit die gewünschte Fallgeschwindigkeit sicher erreicht werden kann. Um die Herstellung zu vereinfachen wurde die Armbreite W des Fallschirmes auf $W = 1.15\ m$ begrenzt, da die Breite des bestellten Fallschirmstoffes $1.2\ m$ beträgt.

Daraus ergeben sich die weiteren Parameter:

- 16 Zugleinen
- Verhältnis $W/L = 0.235$
- Armbreite $W = 1.15\ m$
- Fallschirmlänge $L = 4.9\ m$
- Verhältnis $l/L = 1.63$
- Zugleinenlänge $l = 8\ m$
- Fallschirmfläche $A = 9.95\ m^2$

4.2 Herstellung des Fallschirms

Für die Herstellung des Fallschirmes wurden innerhalb von 25 Arbeitsstunden über $200\ m$ Faden, knapp $130\ m$ Leinenmaterial und $10\ m^2$ Stoff verarbeitet. Der Fallschirm kann mit einer handelsüblichen Nähmaschine genäht werden. Im folgenden Abschnitt sind die verarbeiteten Materialien aufgelistet.

4.2.1 Ressourcen

Nähmaschine:
Bernina Record 930 electronic
Fallschirmstoff:
10x1.23m white army parachute ripstop nylon material lining FIRST GRADE, Flächendichte 40 g/m^2
Faden:
Amann Group EXTRA STARK Polyester No. 36
Zugleinen:
Meister Polyester Normalgeflecht ø1.5 mm, Reisskraft 60 kg
Reefing-Ring:
15x3mm Messingring
Saumband:
Polyester Ripsband 10 mm

4.2.2 Verbindungstechnik

Die Nähte des Fallschirmes wurden von einem Notschirm, wie er im Paraglide-Sport verwendet wird, kopiert. Dazu wurden die Nähte des Notschirmes geöffnet und analysiert. Die Abbildung 4.1 zeigt die Verbindungstechnik der Vorlage und in Abbildung 4.2 ist das Resultat des selbst hergestellten Fallschirmes zu sehen. Zu den Schlüsselstellen gehören die Naht am Saum und die Verbindung der Zugleine mit dem Fallschirm. Um eine Rissbildung im Flug zu vermeiden, werden diese beiden Stellen mit Ripsband verstärkt. Die Anleitung zur Fallschirmherstellung kann im Anhang B eingesehen werden.

Abbildung 4.1: Nahtvorlage

Abbildung 4.2: Resultat: Nahtkopie

4.2.3 Reefing

Die Modifizierung zum Reefing-System am Fallschirm geschieht nur durch Anbringen von Ringen am Saum. Die Abbildung 4.3 zeigt, wie der Ring am Saum zu befestigen ist. Die Abbildung 4.4 zeigt das Resultat anhand eines Exempels am Fallschirm. Der Ring wurde mit $1mm$ Zugleinenmaterial in den Saum geknöpft.

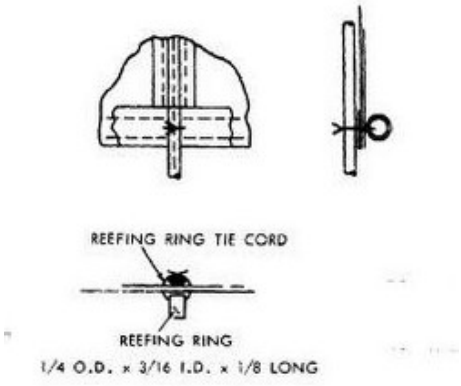


Abbildung 4.3: Konfiguration Skirt-Reefing nach Ludtke[5]

Abbildung 4.4: Resultat: Skirt Reefing

4.2.4 Swivellink

Eine erste Version des Swivellinks wurde aus Stahl gefertigt. Die Abbildung 4.5 zeigt das Bauteil mit den Hauptabmassen in der Aufsicht und im Querschnitt. Die innere Hülse $Nr.1$ wird durch eine Schockleine mit einem $5mm$-Stift verbunden. Der Stift dient gleichzeitig als Sicherung. Die Zugleinen werden mit einem Palstek-Knoten in die symmetrisch angeordneten Bohrlöcher der äusseren Hülse $Nr.3$ geknüpft. Dieser Knoten kann auch nach hoher Last noch leicht geöffnet werden und eignet sich deshalb für die Feinjustierung der Zugleinenlänge. Ein Gleitring $Nr.2$ aus Kunststoff wird zwischen den Auflageflächen von $Nr.1$ und $Nr.3$ montiert, um die Gleitreibung zu verbessern. Die Steuerleine wird nun durch den hohlen Swivellink geführt.

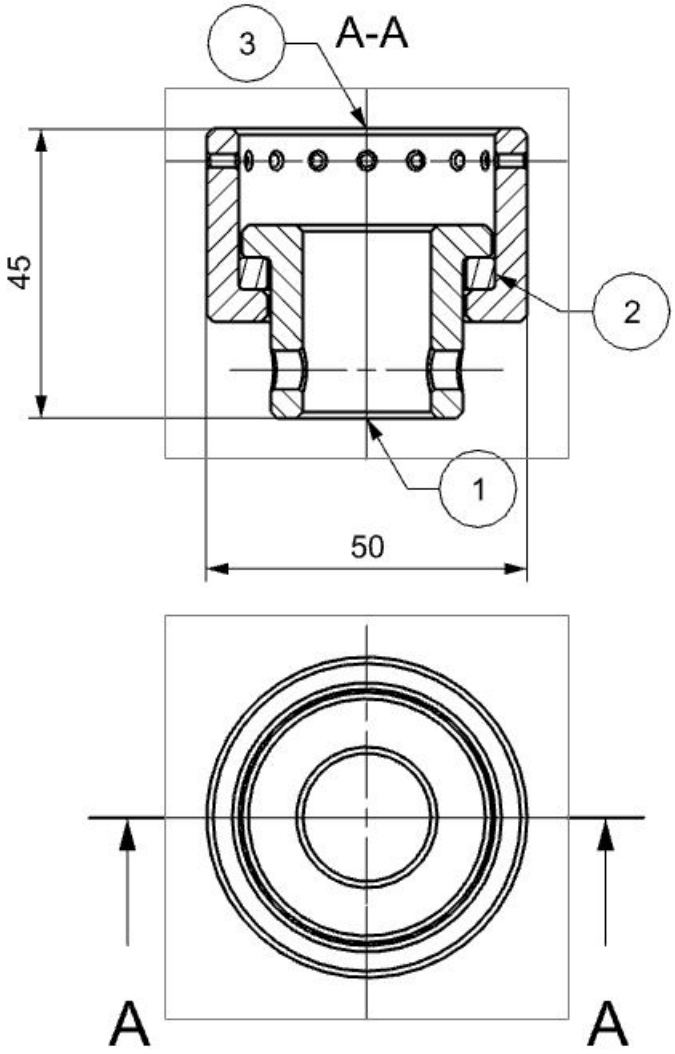


Abbildung 4.5: Technische Zeichnung mit Grösstmassen

Kapitel 5

Testreihe

5.1 Test 1: Handling und Swivellink

5.1.1 Setup

- Ziel:
  - Erstflug von Fallschirm zelebrieren
  - Gefühl für wirkende Kräfte entwickeln
  - Einfacher Funktionstest Reefing-System
- Teststrecke:
  - Sportbahn Arena, Hochdorf (LU)
- Testfahrzeug:
  - Fahrrad Interbike mit Packträger
- Überwachung:
  - Xiaomi Redmi MAG138
- Fallschirm:
  - Prototyp SwissCross 2.0
  - voll geöffnet
  - reefed
  - Manuelle Steuerleinenbetätigung

5.1.2 Vorbereitung und Durchführung

Der Fallschirm wurde am Swivellink durch ein Spannset mit dem Fahrrad verbunden. Aus dem Stand wurde das Fahrzeug auf eine Geschwindigkeit beschleunigt, bei der der Fallschirm sich schliesslich öffnete. Das Verhalten des Fallschirmes wurde im gereeften Zustand getestet (siehe Bild 5.1). Im Bild 5.2 ist der Fallschirm im komplett geöffneten Zustand zu sehen.

Abbildung 5.1: SwissCross 2.0 Test 1: Reefed

Abbildung 5.2: SwissCross 2.0 Test 1: disreefed

5.1.3 Erkenntnisse aus Test 1

Da keine Messgeräte bei diesem Test verwendet wurden, wurden nur qualitative Resultate erzielt.

- Die Qualität des Fallschirmes ist gut
- Die Kraft auf die Steuerleine ist sehr gering
- Die Öffnungszeit vom gereeften zum offenen Zustand beträgt nur noch 2 Sekunden und ist damit schneller als beim Funkionsprototyp
- Der Swivellink dreht kaum, sobald Zugkraft darauf wirkt

5.2 Test 2: Sinkgeschwindigkeit im offenen Zustand

5.2.1 Setup

- Ziel:
  - Beweis theoretische Touchdown-Geschwindigkeit $< 9\ m/s$
  - Öffnungsverhalten Fallschirm analysieren
- Testlokation:
  - Brunniswald Bahn, Wolfenschiessen (OW)
- Testgewicht 27.1 kg:
  - 2 Stahlwalzen
  - 1 Stahlblech $300x200x5\ mm$
  - 1 Stahlblech $80x40x2\ mm$
  - 3 Gewindestangen M8
  - 2 Kunststoffgriffe
  - 1 Ringmutter M10
  - 2 Ringmuttern M8
  - diverse Muttern und Unterlagsscheiben M8
- Überwachung:
  - 2 GoPro Hero 5 mit Schutzhülle und Sicherung
  - Flugcomputer SkyTraxx 2.0
- Fallschirm:
  - SwissCross 2.0
  - voll geöffnet
  - Schockleine ausgelegt für 100 kg
  - Fallschirminnencontainer mit Handgriff aus Paraglide-Sport

5.2.2 Vorbereitung

Für diesen Test wurde eine offizielle Landezone für Paraglide-Piloten ausgesucht. Die Zone wurde vor dem Falltest gesichert. Im Umkreis von 150 m besteht die Landezone aus einer unbewirtschafteten Wiese. Abbildung 5.3 zeigt das Testgewicht nach dem Packen des Fallschirmes. Das Testgewicht wurde aus der Gondel der Brunniswald Bahn von einer gesicherten Testperson geworfen. Der Handgriff des Fallschirminnencontainers wurde mit einer Schnellsicherung am Gondelgerüst befestigt, siehe Abbildung 5.4. Der Flugcomputer auf der Halteplatte ermittelt die Fallgeschwindigkeit, sowie die maximale G-Kraft im Flug. Die erste GoPro überwacht das Display des Flugcomputers und die zweite GoPro überwacht das Verhalten des Fallschirmes.

Abbildung 5.3: Testgewicht mit gepacktem Fallschirm

Abbildung 5.4: Testgewicht vor Abwurf aus Gondel

5.2.3 Durchführung

Da die Fallhöhe beim ersten Testflug zu niedrig war, konnte keine konstante Fallgeschwindigkeit ermittelt werden. Deswegen wurde die Gondel bei einem zweiten Falltest auf 632 Meter über Meer gefahren. Durch die gespeicherten Weg/Zeitdaten auf dem SkyTraxx 2.0 konnte eine konstante Sinkgeschwindigkeit von 9 m/s errechnet werden. Durch den ersten Falltest kann jedoch das Öffnungs- und Flugverhalten des Fallschirmes gut analysiert werden. Beim zweiten Falltest wurde der Fallschirm nicht mehr gefaltet und die Zugleinen wurden mit einem selbstlösenden Knoten aufgefädelt. Durch den starken Seitenwind wurde der Fallschirm seitlich zusammengedrückt. In der Abbildung 5.5 sieht man, dass der obere Arm des Kreuzschirmes durch den Talwind eingedrückt wurde. Dies verkleinert die Projizierte Fläche und damit auch den C_D-Wert des Fallschirmes.

Abbildung 5.5: Projizierte Fläche aus Falltest Nr.1

Flugdaten aus Test 1

- Starthöhe: 614 m ü. M.
- Landehöhe: 571 m ü.M.
- Fallhöhe: 43 m
- G-Kraft: 1.9
- v_{sink_1}: -

Flugdaten aus Test 2

- Starthöhe: 632 m ü.M.
- Landehöhe: 573 m ü.M.
- Fallhöhe: 59 m
- G-Kraft: 2.0
- v_{sink_2}: 9 m/s

5.2.4 Berechnung: Zugkraftkoeffizient

Da nun alle Werte bekannt sind kann die Formel 4.1 nach C_D aufgelöst und berechnet werden. Anstelle des Gewichtes der Rakete, wird das Testgewicht m_T eingesetzt.

$$C_{D_{real}} = \frac{2 \cdot m_T \cdot g}{\rho \cdot A \cdot {v_{sink_2}}^2} = 0.57 \tag{5.1}$$

Mit dem ermittelten C_D-Wert und der Formel 2.5 lässt sich wiederum die theoretische Fallgeschwindigkeit $v_{sink_{HEIDI}}$ berechnen:

$$v_{sink_{HEIDI}} = \sqrt{\frac{2 \cdot m_R \cdot g}{\rho \cdot C_{D_{real}} \cdot A}} = 8.47 m/s \tag{5.2}$$

5.2.5 Erkenntnisse aus Test 2

- Der ermittelte Zugkraftkoeffizient beträgt $C_{D_{real}} = 0.57$ und liegt damit unter dem erwarteten Wert von $C_{D_{theoretisch}} = 0.7$ aus der Tabelle 3.1
- Die konstante Sinkgeschwindigkeit mit dem Testgewicht beträgt $v_{sink_{real}} = 9\ m/s$ und liegt damit über dem erwarteten Wert von $v_{sink_{theoretisch}} = 8.13\ m/s$
- Die theoretische Touchdown-Geschwindigkeit von HEIDI beträgt damit $v_{touchdown_{HEIDI}} = 8.5\ m/s$
- Der Fallschirm hält den Kräften stand
- Der Swivellink kann bei diesem Test nicht beurteilt werden

5.3 Test 3: Sinkgeschwindigkeit im gereeften Zustand

5.3.1 Setup

- Ziel:
  - Beweis theoretische Sinkgeschwindigkeit 23 $m/s < v_{reefed} < 45$ m/s
  - Flugverhalten Fallschirm analysieren
- Teststrecke:
  - Bergweidstrasse, Lieli Berg (LU)
- Testfahrzeug:
  - Motorrad Honda 500 *ccm*
- Überwachung:
  - 2 GoPro Hero 5 mit Schutzhülle und Sicherung
- Fallschirm:
  - SwissCross 2.0
  - voll gereefed
  - Ohne Schockleine
  - Ohne Container

5.3.2 Vorbereitung

Der Fallschirm wird an der Haltevorrichtung, siehe Abbildung 5.6 über eine Taschenfederwaage befestigt. Der Fallschirm befindet sich im komplett gereeften Zustand. Aus dem Stand wird das Testfahrzeug solange beschleunigt, bis die Zugkraft der Waage 24 kg anzeigt.
Fall 1: Wird die Zugkraft bis zu einer Geschwindigkeit von ca. 90 km/h nicht erreicht, wird der Durchmesser der Reefing-Leine vergrössert und ein neuer Test gefahren.
Fall 2: Wird die Zugkraft bereits erreicht, bevor die Geschwindigkeit 23 m/s, bzw. 82.8 km/h beträgt, so ist der Fallschirm für diese Reefing-Methode falsch dimensioniert.

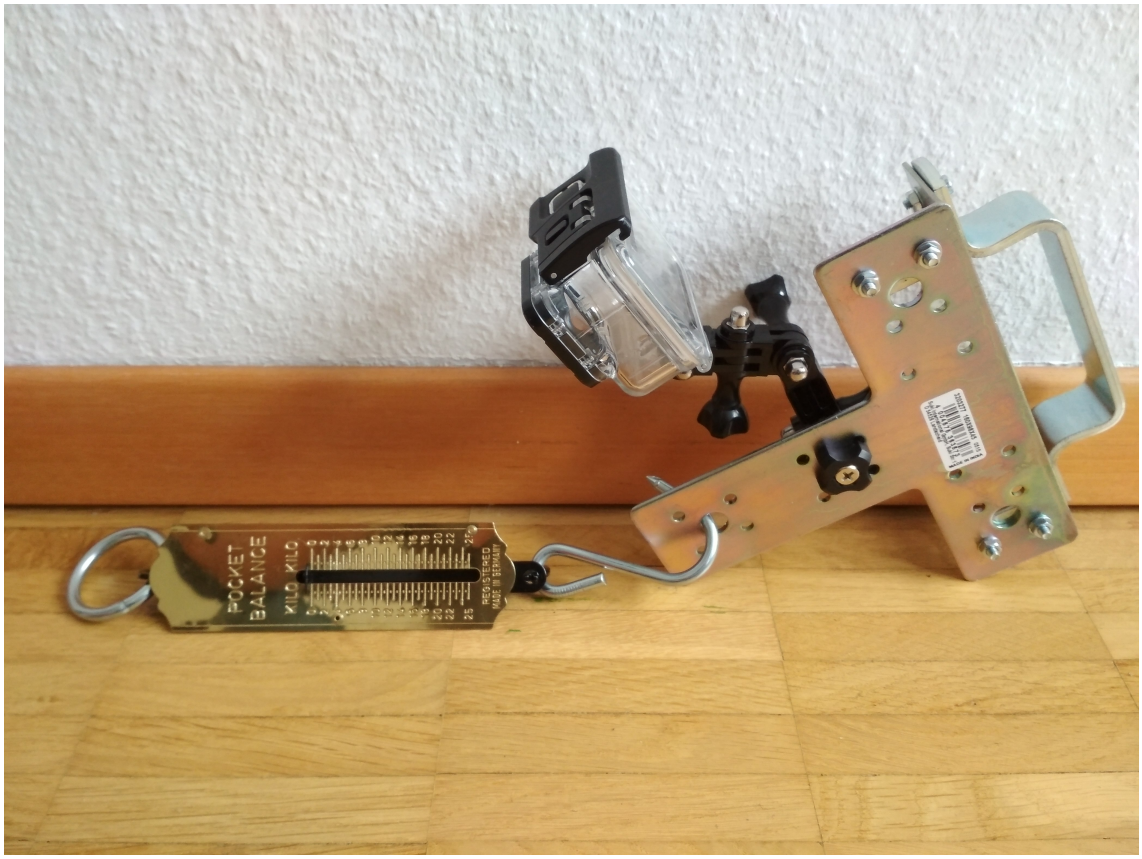


Abbildung 5.6: Haltevorrichtung für Messeinrichtung mit Federwaage

5.3.3 Durchführung

Durch die translatorische Bewegung mit dem Motorrad wird die Windgeschwindigkeit simuliert. Die Zugkraft wird mit der Taschenfederwaage zwischen dem Fallschirm und der Haltevorrichtung gemessen. Eine Testperson fährt das Motorrad, wobei ein Beifahrer auf dem Rücksitz die Haltevorrichtung mit der Überwachungskamera hält. Der erste Versuch wurde mit einer Geschwindigkeit von 70 km/h durchgeführt (siehe Abbildung 5.7). Eine erste Auswertung ergab, dass bereits bei dieser Geschwindigkeit eine Kraft von 24 kg erreicht wird.

Abbildung 5.7: SwissCross 2.0 im Testflug Nr.1 mit 70 km/h

Da nun **Fall 2** eingetreten ist, soll diese Messung überprüft werden. Um die Messung zu verifizieren wurden weitere Testfahrten mit derselben Geschwindigkeit durchgeführt, wobei die Messungen bei allen Testfahrten die gleichen Resultate ergaben.
Damit die projizierte Fläche des Fallschirmes weiter verkleinert werden kann, wird mit einer simulierter Reefing-Line (siehe Abbildung 5.8) der Durchmesser auf einer Höhe von 20 *cm* (Gemessen ab Fallschirmsaum) begrenzt . Weiter wurde auch eine Testfahrt mit der simulierten Reefing-Line auf einer Höhe von 40 *cm* (Gemessen ab Fallschirmsaum) durchgeführt. Diese improvisierte Methode wird in der Tabelle 5.1 als "Overreefed 1" für die Höhe 20 *cm*, bzw. "Overreefed 2" für die Höhe 40 *cm* bezeichnet.

Abbildung 5.8: SwissCross 2.0 mit simulierter Reefing-Line

Testdaten

In der Tabelle 5.1 sind die Messwerte aus dem dritten Test der Testreihe aufgeführt. Die C_D-Werte werden aus den erhobenen Messdaten und der Fläche des Fallschirmes bestimmt. Die unterste Zeile zeigt die theoretische Sinkgeschwindigkeit im gereeften Zustand mit welcher die Rakete HEIDI fallen würde. Da die mindest angeforderte Sinkgeschwindigkeit in der ersten Phase 23 m/s beträgt, konnte keiner der Reefing-Versuche die Anforderung erfüllen.

Testfahrt:	**Reefed**	**Overreefed 1**	**Overreefed 2**
Testgeschwindigkeit $[km/h]$:	70	80	80
m_{mess} $[kg]$:	24	25	24
C_D [-]:	0.109	0.087	0.079
$v_{sinkHEIDI}$ [m/s]:	19.44	21.77	22.78

Tabelle 5.1: Messwerte Test 3

5.3.4 Erkenntnisse aus Test 3

- Keine der Reefing-Versuche konnte die Anforderung der IREC erfüllen
- Der C_D-Wert mit Reefing an der dafür vorgesehenen Stelle beträgt 0.109
- Dadurch ergibt sich eine theoretische Fallgeschwindigkeit von HEIDI $v_{sink_{HEIDI}} = 19.44\ m/s$
- Der Fallschirm hält den Kräften stand
- Der Swivellink kann die Rotation im gereeften Zustand nicht aufnehmen

Kapitel 6

Ergebnisse

6.1 Fallschirm

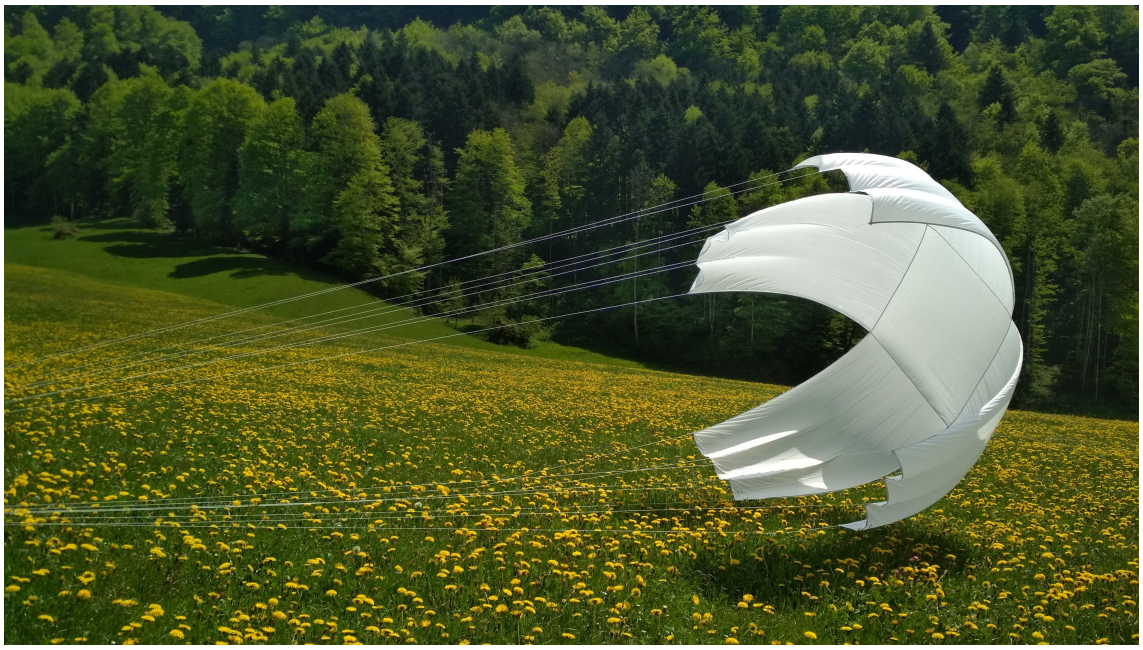


Abbildung 6.1: Resultat: SwissCross 2.0

6.1.1 Eigenschaften

C_D offen	0.57
v_{offen}	8.5 m/s
C_D reefed	0.109
v_{reefed}	19.44 m/s
Qualität	Alle Nähte i.O.
	Keine Risse im Stoff
	Alle Zugleinen i.O.
Flugverhalten	Keine Rotation im offenen Flug
	Leichte Rotation im gereeften Flug
	Keine Oszillation im offenen Flug
	Leichte Oszillation im gereeften Flug

6.1.2 Bewertung

Die Tests zeigen, dass die Qualität der verwendeten Materialien ausreicht und der Fallschirm genügend präzise hergestellt wurde. Trotzdem sollte für den Serientyp Zugleinenmaterial und Faden aus Nylon und evtl. sogar Saumband aus Kevlar verwendet werden. Die Minimalanforderung der Sinkgeschwindigkeit in der zweiten Landephase konnte unter realen Bedingungen erfüllt werden. Der C_D-Wert liegt jedoch mit 0.57 weit unter dem angenommenen Wert von 0.7. Es kann sein, dass der starke Seitenwind am Testtag die Form des Fallschirmes und somit seine projizierte Fläche negativ beeinflusst hat.

6.2 Reefing

6.2.1 Eigenschaften

$v_{reefed_{soll}}$	23 m/s
$C_{D_{reefed}}$	0.109
$v_{reefed_{ist}}$	19.44 m/s
$C_{D_{overreefed1}}$	0.087
$v_{overreefed1}$	21.77 m/s
$C_{D_{overreefed2}}$	0.079
$v_{overreefed2}$	22.78 m/s
Qualität	Alle Ringe i.O.
	Steuerleine i.O.
Öffnungsverhalten	Kraft auf Steuerleine nicht ermittelt
	Öffnungsvorgang nur mit Test 1 geprüft

6.2.2 Bewertung

Die Funktion des Systemes konnte mit dem ersten Test bei ca. 20 km/h geprüft werden. Dabei öffnete sich der Schirm bereits 2 Sekunden nachdem die Steuerleine manuell losgelassen wurde. Die Öffnungszeit wird bei steigender Geschwindigkeit verkürzt.
Wird der Fallschirm vollständig gereeft beträgt die berechnete Fallgeschwindigkeit 19.44 m/s und kann die vorgegebene Fallgeschwindigkeit von 23 m/s der IREC nicht einhalten.

6.3 Swivellink

6.3.1 Eigenschaften

Qualität	Robuste Bauart
	Überdimensioniert
	Falsche Materialwahl
Funktion	Ordnung der Zugleinen i.O.
	Öffnungsvorgang des Fallschirmes beschleunigt
	Kein Rotationsausgleich

6.3.2 Bewertung

Grundsätzlich besteht die Aufgabe des Swivellinks darin, die vom Fallschirm entstehende Rotation nicht auf die Rakete zu übertragen. Diese Aufgabe konnte jedoch nicht vollständig geprüft werden. Die Ordnung der Zugleinen und die Führung der Steuerleine werden als sinnvoll erachtet. Jedoch ist der Swivellink extrem überdimensioniert. Hierzu sollten Festigkeitsberechnungen durchgeführt und die Materialwahl optimiert werden, um an Volumen und Gewicht zu sparen.

Abbildung 6.2: Resultat: Swivellink mit Steuerleinenführung

Kapitel 7

Erfüllung der Anforderung

Nun muss geprüft werden, ob die Anforderungen des Kunden aus der Tabelle 2.1 erfüllt werden können. Im Anhang C kann die komplette Anforderungsliste inklusive Statusreport und Verifizierungsmethode, auf welche sich der folgende Abschnitt bezieht, eingesehen werden.

7.1 Nicht erfüllte Anforderungen

ID 7.5: Das Fallschirmsystem soll skalierbar sein

Grund

Diese sekundäre Anforderung konnte durch das fehlende Zeitbudget nicht berücksichtigt werden und wurde daher ausserhalb der Systemgrenze platziert.

Lösungsansatz

Prototypen gemäss Abschnitt 4.1 mit den jeweiligen Gewichts-, Geschwindigkeits- und Platzanforderungen herstellen und durch die Testreihe in Kapitel 5 verifizieren.

ID 1.1.1: Sinkrate erste Phase 23-45 ft/s

Grund

Der Test 3 aus Abschnitt 5.3 hat gezeigt, dass die theoretische Sinkrate mit 19.44 m/s ausserhalb der Toleranz der IREC liegt. Da es keine allgemeine Formel für das Verhalten eines Kreuzfallschirmes mit Skirt Reefing gibt, konnte der Fallschirm nicht exakt dimensioniert werden

Lösungsansatz 1

Die Reefing-Ringe können weiter oben an der Innenseite des Fallschirmes platziert werden, um so die projizierte Fläche weiter zu verkleinern. Mit dieser Anpassung kann dasselbe Reefing-System beibehalten werden. Jedoch müsste das Öffnungsverhalten getestet werden, da durch die kraftlosen Zugleinen die Gefahr besteht, dass diese sich ineinander verheddern.

Lösungsansatz 2

Die Schirmlänge L und/oder die Armbreite W des Fallschirmes müssten so angepasst werden, dass der Fallschirm sowohl die Anforderung der Fallgeschwindigkeit in Phase 1 und Phase 2 erfüllt. Der C_D-Wert müsste optimalerweise in einem Windkanal ermittelt werden. Damit kann berechnet werden, ob die Fallschirmfläche verkleinert werden darf, ohne dass die Landegeschwindigkeit überschritten wird.

7.2 Ausstehende Anforderungen

ID 1: Falls Apogee > 1500 ft AGL: CONOPS soll Dual-event folgen

ID 7.2: Das Fallschirmsystem soll geringe Öffnungskräfte verursachen und diese aufnehmen

Grund

Das Komplette System konnte unter realen Bedingungen aus Zeitgründen noch nicht getestet werden. Mit den folgenden Lösungsansätzen könnte sowohl ID 1, als auch ID 7.2 überprüft werden.

Lösungsansatz 1

Von der Gondel der Bannalp-Bahn werden von der Firma “Flugsau” regelmässig Falltests für Fallschirmsysteme aus 180 Metern durchgeführt. Die Tests sind von der Gemeinde offiziell bewilligt. Es ist denkbar den Prototypen mit dem Testgewicht aus Abschnitt 5.2 und einem TD als Auslösemechanismus an diesem Ort als Gesamtsystem zu testen. Der Auslösemechanismus wird dann manuell über eine Fernsteuerung gezündet.

Lösungsansatz 2

Der Gleitschirmpilot Nicolas Zemp hat sich dafür bereit erklärt das Testgewicht bei einem Tandemflug mit einem weiteren erfahrenen Piloten aus dem Gleitflug fallen zu lassen. Mit diesem Test wären Fallhöhen von bis zu 400 Metern denkbar. Damit könnten die konstanten Fluggeschwindigkeiten im gereeften, als auch im offenen Zustand mit dem Flugcomputer SkyTraxx 2.0 ermittelt werden. Der Auslösemechanismus würde ebenfalls über eine Fernsteuerung ausgelöst werden.

ID 7.6: Das Fallschirmsystem soll einfach in der Handhabung, Wartung und Vorbereitung sein

ID 7.8: Die Gewichtsverteilung des Fallschirmsystems soll axialsymmetrisch sein

ID 7.9: Als Bauraum wird der Parachutetubeinnendurchmesser von HEIDI festgelegt: ø125x550 mm

Grund

Die Verpackung des Fallschirmes wurde in dieser Arbeit nicht explizit berücksichtigt, da sich diese Anforderung ausserhalb der am Anfang definierten Systemgrenze befindet. Jedoch hängen die Punkte 7.6, 7.8 und 7.9 stark mit der Verpackung des Fallschirmes zusammen. Deshalb wurde eine Idee entwickelt, welche im Anhang D angesehen werden kann.

Lösungsansatz

Der Prototyp bestehend aus einer 2 Liter PET-Flasche mit den Massen ø100x300 mm und bietet genügend Platz für den Fallschirm. Die Packzeit beträgt mit der in Anhang D beschriebenen Methode je nach Übung ca. $5 - 10$ Minuten. Die Verpackung wird direkt an der Nasenspitze der Rakete befestigt. Bei der Separation am Apogäum wird der Fallschirm somit kontrolliert herausgezogen. Dieser Packstil wurde von den Fallschirmspezialisten von Flugsau empfohlen mit der Begründung, dass die Öffnungszeit des Fallschirmes ohne gepflegtes Falten zwar grösser wird, aber in diesem Fall keine Rolle spiele, da die Öffnungskraft auf die Schockleine im gereeften Zustand relativ klein ist.
Ausserdem ist mit dieser Verpackung das Gewicht axialsymmetrisch verteilt, die Anforderungen an den Bauraum werden erfüllt und die Handhabung und Vorbereitung ist sehr einfach und schnell. Die Idee konnte jedoch nur mit einem Funktionstest bei einer Ausstossgeschwindigkeit von ca. 10 km/h verifiziert werden.

Kapitel 8

Zusammenfassung und Ausblick

8.1 Rückblick

Innerhalb dieser Arbeit wurde ein Teil eines Fallschirmlandesystemes in Form eines technischen Prototyps konzipiert, designet und hergestellt:

- Fallschirm genäht
- Skirt-Reefing integriert
- Swivellink konzipiert und hergestellt
- Fallschirmcontainer konzipiert

Es wurde gezeigt, dass:

- die geforderte Landegeschwindigkeit von HEIDI mit dem hergestellten Fallschirm erreicht werden kann.
- das Material des Fallschirmes die durchgeführten Tests ohne Versagen bewältigen konnte.
- das Prinzip des Reefing-Systems bei niedrigen Geschwindigkeiten funktioniert.
- der Swivellink das Öffnungsverhalten des Fallschirmes verbessert, aber die Rotationen im Flug nicht ausgleicht

Die folgenden Punkte sind immer noch offen oder nicht optimal gelöst:

- Das FLS konnte nicht als Ganzes getestet werden
- Die geforderte Sinkgeschwindigkeit in der ersten Flugphase von HEIDI kann mit dem hergestellten Fallschirm knapp nicht erreicht werden.
- Der Swivellink ist überdimensioniert und sollte optimiert werden
- Eine wiederverwendbare Alternative zum TD als Auslösemechanismus steht noch offen

8.2 Selbstbeurteilung

Die Arbeit zeigt, dass die Auslegung eines FLS vieler Iterationen bedarf und das Bauen und Testen von Prototypen von bedeutender Wichtigkeit ist. Die Tests wurden mit improvisierten Hilfsmitteln durchgeführt und liefern deshalb und durch eventuelle Umgebungseinflüsse keine genauen Werte. Um die Eigenschaften des Fallschirmes zu eruieren ist ein Test im Windkanal nötig. Obwohl der hergestellte Fallschirm zwar noch nicht alle Anforderungen des Kunden erfüllt, liefert die Testreihe nützliche Informationen, um den Fallschirm optimal dimensionieren zu können. Trotzdem die gemessenen Werte nur knapp die Anforderungen des Kunden verfehlen, wurde eine brauchbare Vorlage für einen eventuellen Einsatz am Spaceport America Cup 2019/2020 geschaffen.

8.3 Ausblick

Damit das FLS am Spaceport America Cup 2019/2020 zum Einsatz kommen kann und alle Kundenwünsche abgedeckt werden können, müssen folgende Punkte erledigt werden:

- Fallschirm optimieren, sodass die Fallgeschwindigkeit der ersten Landephase erreicht werden kann.
- Systemtest als Ganzes durchführen, inkl. bestehendem Auslösemechanismus, idealerweise mit einer Rakete.
- Swivellink optimieren und Festigkeitsrechnungen durchführen
- Fallschirmcontainer entwickeln, um Vorbereitungszeit zu verkürzen und Handling zu vereinfachen
- Weitere Prototypen für kleinere Raketen dimensionieren und herstellen und das Flugverhalten testen, um die Skalierbarkeit des Systems zu überprüfen.

Danksagung

An erster Stelle möchte ich meinem Betreuer Prof. Dr. Gerhard S. Székely danken, für die richtungsweisende, motivierende und inspirierende Begleitung während meiner Arbeit.

Des Weiteren möchte ich mich herzlich bei Philipp Aschwanden, Head of Technology bei der Benteler Rothrist AG, bedanken für die Bereitstellung der Ressourcen des Falltests Nr. 2, die flexiblen Arbeitszeiten und die grosszügige Unterstützung.

Ein herzliches Dankeschön geht auch an meinen Coach Anna Kiener und das ARIS Recovery Team für den Einblick in die ARIS-Familie und die Bereitstellung wichtiger Informationen für meine Arbeit.

Der grösste Dank gilt meinen Freunden und meiner Familie, die mich sowohl bei der Herstellung des Fallschirmes, beim Testen und Dokumentieren unterstützt und motiviert haben. Namentlich:

Theres und Herbert Trochsler

Fabienne, Guido und Yannik Oehen

Jasmin Trochsler und Patrick Fischer

Nicolas Zemp

Gabriel Voirol

Julian Becker

Fabian Müller

Vivian Leiteritz

Literaturverzeichnis

[1] T. W. Knacke, *Parachute Recovery System Design Manual.* Naval Weapons Center China Lake, Ca 93555-6001: U.S. Navy, 1991.

[2] B. Popov, *Development of the ballistic parachute system allowing the safe descent of disabled aircraft.* Aerospace Manufacturing and Automated Fastening Conference Exhibition Century II Conference Center in Wichita, KS: The Elmer A. Sperry Award, 2010.

[3] Unkown, "Recovery: Cutdown pyros," 2017, besucht am 17.05.2019. [Online]. Available: https://hialtphoto.blogspot.com/2017/05/cutdown-pyros.html

[4] T. Rocketry, "Tender descender," 2019, besucht am 17.05.2019. [Online]. Available: https://aeroconsystems.com/cart/launch-recovery/tender-descender/

[5] W.P.Ludtke, *Effects Of Canopy Geometry On The Drag Coefficient Of A Cross Parachute In The Fully Open And Reefed Conditions For A W/L Ratio Of 0.264.* White Oak, Silver Spring, Maryland: Naval Ordnance Laboratory, 1971.

[6] ESRA, "Spaceport america cup: Intercollegiate rocket engineering competition design, test, evaluation guide," 2019. [Online]. Available: http://www.soundingrocket.org/sa-cup-documents--forms.html

[7] ——, "Spaceport america cup: Intercollegiate rocket engineering competition rules requirements document," 2019. [Online]. Available: http://www.soundingrocket.org/sa-cup-documents--forms.html

[8] E. Brunner, H. Boross, E. Mingard, L. Amez-Droz, C. Nussbaumer, Q. Talon, N. Appfle, J. Triomph, M. Eckstein, M. G. du Roslan, G. Herment, G. Locher, and L. Giezendanner, *Team 35 Project Technical Report to the 2018 Spaceport America Cup.* Swiss Federal Institute of Technology, EPFL, Lausanne, Switzerland, 2018.

[9] A. Kiener, *Mechanical Integration of the Avionics in a Sounding Rocket.* Technikumstrasse 21 CH- 6048 Horw: Lucerne University Of Applied Sciences and Arts Technic Architecture, 2018.

[10] S. Zaremba, "Permeabilität," 2019, besucht am 30.04.2019. [Online]. Available: https://www.lcc.mw.tum.de/forschungsgruppen/gruppenuebergreifende-themen/permeabilitaet/

[11] T. E. ToolBox, "U.s. standard atmosphere," 2019, besucht am 23.03.2019. [Online]. Available: https://www.engineeringtoolbox.com/standard-atmosphere-d_604.html

Anhang A

Fallschirmgrundformen

TABLE 5-1. Solid Textile Parachutes.

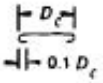
TYPE	CONSTRUCTED SHAPE PLAN	CONSTRUCTED SHAPE PROFILE	$\frac{D_c}{D_o}$	INFLATED SHAPE $\frac{D_p}{D_o}$	DRAG COEF C_{D_o} RANGE	OPENING FORCE COEF C_X (INF MASS)	AVERAGE ANGLE OF OSCILLATION, DEGREES	GENERAL APPLICATION
FLAT CIRCULAR			1.00	0.67 TO 0.70	0.75 TO 0.80	~1.7	±10 TO ±40	DESCENT, OBSOLETE
CONICAL			0.93 TO 0.95	0.70	0.75 TO 0.90	~1.8	±10 TO ±30	DESCENT, M < 0.5
BICONICAL			0.90 TO 0.95	0.70	0.75 TO 0.92	~1.8	±10 TO ±30	DESCENT, M < 0.5
TRICONICAL POLYCONICAL			0.90 TO 0.95	0.70	0.80 TO 0.96	~1.8	±10 TO ±20	DESCENT, M < 0.5
EXTENDED SKIRT 10% FLAT			0.86	0.66 TO 0.70	0.78 TO 0.87	~1.4	±10 TO ±15	DESCENT, M < 0.5
EXTENDED SKIRT 14.3% FULL			0.81 TO 0.85	0.66 TO 0.70	0.75 TO 0.90	~1.4	±10 TO ±15	DESCENT, M < 0.5
HEMISPHERICAL			0.71	0.66	0.62 TO 0.77	~1.6	±10 TO ±15	DESCENT, M < 0.5, OBSOLETE
GUIDE SURFACE (RIBBED)			0.63	0.62	0.28 TO 0.42	~1.2	0 TO ±2	STABILIZATION, DROGUE, 0.1 < M < 1.5
GUIDE SURFACE (RIBLESS)			0.66	0.63	0.30 TO 0.34	~1.4	0 TO ±3	PILOT, DROGUE, 0.1 < M < 1.5
ANNULAR			1.04	0.94	0.85 TO 0.95	~1.4	<±6	DESCENT, M < 0.5
CROSS			1.15 TO 1.19	0.65 TO 0.72	0.60 TO 0.85	1.1 TO 1.2	0 TO ±3	DESCENT, DECELERATION

TABLE 5-2. Slotted Parachutes.

TYPE	CONSTRUCTED SHAPE PLAN	PROFILE	$\frac{D_c}{D_o}$	INFLATED SHAPE $\frac{D_p}{D_o}$	DRAG COEF C_{D_o} RANGE	OPENING FORCE COEF C_X (INF MASS)	AVERAGE ANGLE OF OSCILLATION, DEGREES	GENERAL APPLICATION
FLAT (FIST) RIBBON			1.00	0.67	0.45 TO 0.50	~1.05	0 TO ±3	DROGUE, DESCENT, DECLERATION, OBSOLETE
CONICAL RIBBON			0.95 TO 0.97	0.70	0.50 TO 0.55	~1.05	0 TO ±3	DESCENT, DECELERATION, 0.1 < M < 2.0
CONICAL RIBBON (VARIED POROSITY)				0.70	0.55 TO 0.60	1.05 TO 1.30	0 TO ±3	DROGUE, DESCENT, DECELERATION, 0.1 < M < 2.0
RIBBON [1] (HEMISFLO)			0.62	0.62	0.30 [1] TO 0.46	1.00 TO 1.30	±2	SUPERSONIC DROGUE, 1.0 < M < 3.0
RINGSLOT			1.00	0.67 TO 0.70	0.56 TO 0.65	~1.05	0 TO ±5	EXTRACTION, DECELERATION, 0.1 < M < 0.9
RINGSAIL			0.84	0.69	0.75 TO 0.85	~1.10	±5 TO ±10	DESCENT, M < 0.5
DISC-GAP-BAND			0.73	0.65	0.52 TO 0.58	~1.30	±10 TO ±15	DESCENT, M < 0.5

[1] FOR SUPERSONIC APPLICATION. SEE SECTION 5.8

TABLE 5-3. Rotating Parachutes.

TYPE	CONSTRUCTED SHAPE PLAN	PROFILE	$\frac{D_i}{D_o}$	INFLATED SHAPE $\frac{D_p}{D_o}$	DRAG COEF C_{D_o} RANGE	OPENING FORCE COEF C_X (INF MASS)	AVERAGE ANGLE OF OSCILLATION, DEGREES	GENERAL APPLICATION
ROTAFOIL			1.0	~0.90	0.85 TO 0.99	1.05	0 TO ±2	DROGUE $D_o < 7'$
VORTEX RING			1.9	N/A	1.5 TO 1.8	1.1 TO 1.2	0 TO ±2	DESCENT SMALL D_o
SANDIA RFD			1.0	~0.9	1.25	1.1	0 TO ±2	DROGUE

Anhang B

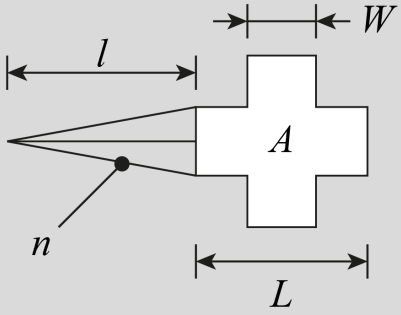
Anleitung Fallschirmherstellung

Anleitung: Fallschirmherstellung SwissCross2.0

1 Dimensionieren

$A = 2WL - W^2 = 10\ m^2$

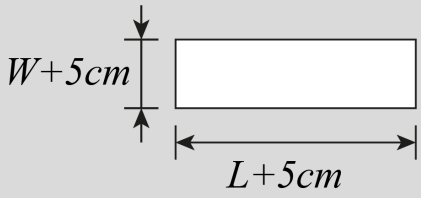
W/L	$= 0.235$	l/L	$= 1.63$
W	$= 1.15\ m$	L	$= 4.9\ m$
l	$= 8\ m$	n	$= 16$



2 Stoff zuschneiden

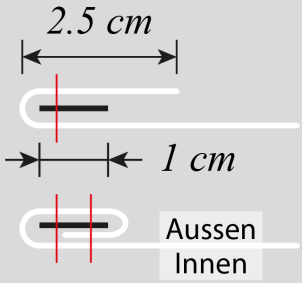
Material: *Fallschirmstoff*
Nylon Ripstop Lining

Anzahl Paneele: 2



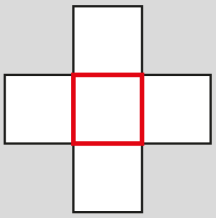
3 Saumband anstecken und annähen

Material: *Saumband*
Polyester Ripsband 1 cm
Faden: *Polyester No 36 EXTRA STARK*
Stichart: - - - - - -
Stichlänge: 4



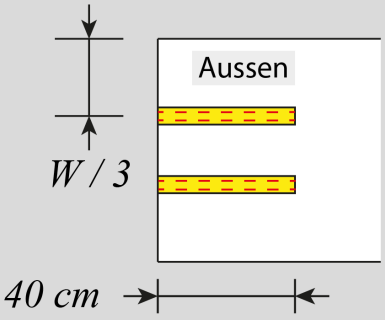
4 Paneele übereinander legen und vernähen

Faden: *Polyester No 36 EXTRA STARK*
Stichart:
Stichlänge: 1
Stichbreite: 3



5 Verstärkungsband auf Arm nähen

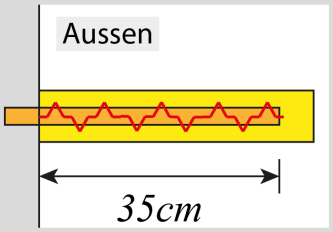
Material: *Verstärkungsband*
Polyester Ripsband 1 cm
Faden: *Polyester No 36 EXTRA STARK*
Stichart: - - - - - -
Stichlänge: 4



Anleitung: Fallschirmherstellung SwissCross2.0

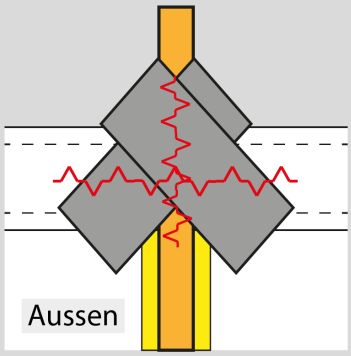
6 Zugleinen auf Verstärkungsband nähen

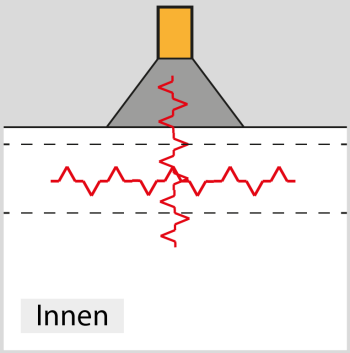
Material: *Zugleinen*
Polyester Normalgeflecht ø 1.5 mm
Faden: *Polyester No 36 EXTRA STARK*
Stichart:
Stichlänge: 1
Stichbreite: 2



7 Leinensicherung an Saum nähen

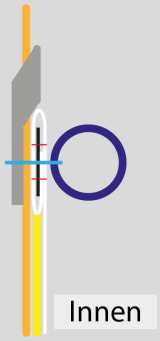
Material: *Verstärkungsband*
Polyester Ripsband 1 cm
Faden: *Polyester No 36 EXTRA STARK*
Stichart:
Stichlänge: 1
Stichbreite: 2





8 Reefing Ringe an Saum knüpfen

Material: *Messingring ø 15x3 mm*
Polyester Normalgeflecht ø 1 mm



Anhang C

Pflichtenheft

ID	Betroffene Subsysteme							Anforderung	Quelle	Verifiziert durch	Status	Begründung & Kommentar	Update
	F	R	SL	S	FR	A	FC						
1	X	X	X	X	X	X	X	Falls Apogee > 1500 ft (AGL):"CONOPS" soll "dual-event" folgen	IREC	I	Ausstehend	Haupttest Gesamtsystem	28.02.2019
1.1				X				Erster Event soll in der Nähe des Apogee erfolgen	IREC	V	Erfüllt	Extern	29.05.2019
1.1.1	X	X						Sinkrate erste Phase 75-150 ft/s	IREC	A / T	Nicht Erfüllt	Test 3	28.02.2019
1.2				X		X		Zweiter Event soll < 1500 ft (AGL) erfolgen	IREC	V	Erfüllt	Extern	29.05.2019
1.2.1	X							Sinkrate zweite Phase < 30 ft/s	IREC	A / T	Erfüllt	Test 2	16.05.2019
1.3							X	Schutz vor Gasausstoss	IREC	T		Ausserhalb Systemgrenze	
1.4			X					Fallschirm Swivel Link	IREC	A / T	Erfüllt	Test 1, Test 2	16.05.2019
1.5	X							Wenn 2 Fallschirme: Färbung & Kennzeichnung	IREC	I	Erfüllt	Nur 1 Fallschirm	29.05.2019
2								Nicht-Fallschirm Bergungssysteme: Beim ESRA melden	IREC			Irrelevant	
3								Redundant Electronics	IREC	V			
3.1								At least 1 COTS	IREC	V			
3.2								Disimilar redundandt recovery	IREC	V			
4								Safe critical wiring	IREC				
4.1								Cable management: prevent tangling & free movement	IREC	T			
4.2								Secure connections: prevent de-mating	IREC	Tug test			
5					X			Stored-energy devices	IREC				
5.1					X			Energetic devices shall be safed until launch position	IREC	V			
5.1.1					X			Pyrogens shunted igniter leads or connected to unpowered avionics	IREC	V			
5.1.2					X			Mechanical devices mechanically locked, not releasable by single event	IREC	V			
5.1.3					X			Pressure Vessels: two events required to open main valve	IREC	V			
5.2					X			Arming features shall be externally controllable/accesible	IREC	V			
6								Tests	IREC				
6.1	X	X	X					Boden Test obligatorisch	IREC	T	Erfüllt	Test 1	09.05.2019
6.2	X	X	X	X	X	X	X	Flug Test optional	IREC	T	Erfüllt	Test 2 ohne Reefing	16.05.2019
7								Spezifische Anforderungen des Kunden	ARIS				
7.1	X	X						Das Fallschirmsystem muss einen stabilen Flug gewährleisten	ARIS	T	Erfüllt	Test 1, Test 2	16.05.2019
7.2	X	X		X	X			Das Fallschirmsystem soll geringe Öffnungskräfte verursachen und diese aufnehmen	ARIS	T	Ausstehend	Test 2, Test mit v = 50 m/s fehlt	16.05.2019
7.3	X	X						Das Fallschirmsystem soll einfach in der Herstellung sein	ARIS	I	Erfüllt	25 h Arbeitszeit	27.04.2019
7.4	X							Das Fallschirmsystem soll eine Reproduzierbare Leistung erbringen, unabhängig vom Benutzer	ARIS	T	Erfüllt	Test 1, Test 2	16.05.2019
7.5	X	X	X	X	X	X	X	Das Fallschirmsystem soll skalierbar sein	ARIS	I	Nicht Erfüllt	Fehlendes Zeitbudget	25.02.2019
7.6	X	X			X	X	X	Das Fallschirmsystem soll einfach in der Handhabung, Wartung und Vorbereitung sein	ARIS	T	Ausstehend	Prototyp Container	18.05.2019
7.7	X	X	X	X	X	X	X	Das Fallschirmsystem soll wiederverwendbar sein	ARIS	T	Erfüllt	Alle Tests	27.02.2019
7.8							X	Die Gewichtsverteilung des Fallschirmsystems soll axialsymmetrisch sein	ARIS	I	Ausstehend	Prototyp Container	18.05.2019
7.9	X	X	X				X	Als Bauraum wird der Parachutetubeinnendurchmesser von HEIDI festgelegt: ø125x550 mm	ARIS	V	Ausstehend	Prototyp Container	18.05.2019

Subsysteme	
F	Fallschirm
R	Reefing
SL	Swivel-Link
S	Schockleine
FR	Schnittstelle Fallschirm / Rakete
A	Auslösemechanismus
FC	Fallschirmcontainer

Legende Verifizierung	
B	Bewertung
A	Analyse
I	Inspektion
T	Test 1-3
V	Vorhergehende Arbeit

Legende Status
Erfüllt
Ausstehend
Teilweise Erfüllt
Nicht Erfüllt

Anhang D

Fallschirmcontainer

Kurzanleitung: Fallschirm packen

1. Hilfsschnur diagonal zwischen Fallschirmarme führen
2. Hilfsschnur mit Fallschirm in Container ziehen
3. Fallschirm komplett in Container stossen
4. Leinen im Z-Faltstil in die Laschen führen
5. Verbindungsdeckel zur Nasenspitze der Rakete anbringen