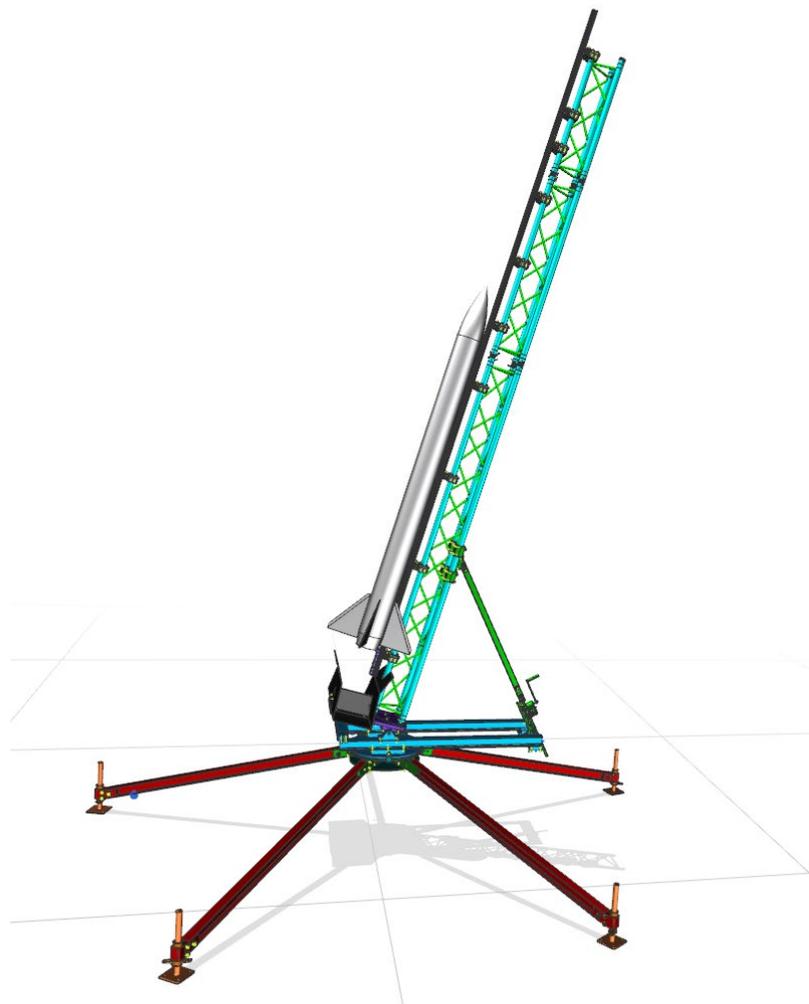


BAT – HS 2018

Startrampe ARIS Transportable Startplattform für Forschungsraketen



Bachelor-Thesis an der Hochschule Luzern - Technik & Architektur

Titel	Startrampe ARIS
Diplomandin/Diplomand	Balzarini Raffael
Bachelor-Studiengang	Bachelor Maschinentchnik
Semester	HS18
Dozentin/Dozent	Székely Gerhard Stefan
Expertin/Experte	Knodel Thomas

Abstract Deutsch

Startrampe ARIS

Diese Arbeit wurde für den Verein ARIS – Akademische Raumfahrt Initiative Schweiz erstellt.

Ziel der Arbeit ist es, eine Startplattform für Forschungsraketen zu entwickeln und deren Funktionalität zu verifizieren, um das Konzept anschliessend in Zusammenarbeit mit externen Partnern herzustellen.

In einem ersten Schritt wurden die Anforderungen an eine neue Startrampe genau untersucht. Aus den gewonnenen Erkenntnissen ist ein umfangreicher Funktions- und Anforderungskatalog entstanden, der als Grundlage für das neue Konzept dient.

Mit einem morphologischen Kasten wurden möglichst vielfältige Lösungsansätze gesucht und verglichen. Daraus wurde ein Konzept zur weiteren Entwicklung ausgewählt.

Die entwickelte Lösung ist eine transportierbare Startrampe für Forschungsraketen. Durch einen modularen Turmaufbau lassen sich Führungslängen von 1 – 5.2 m umsetzen. Die Elevation lässt sich im Bereich von 0-15° per Handkurbel einstellen und fixieren. Durch den innovativen Aufbau lässt sich der Azimutwinkel 360° stufenlos einstellen.

Für alle kritischen Bauteile wurde ein Festigkeitsnachweis gemacht, alle Bauteile haben die geforderten Sicherheiten erfüllt. Die Standsicherheit der Plattform beträgt bei allen Betriebsfällen mindestens 6.

Abstract Englisch

Launchpad ARIS

This thesis was written for the association ARIS - Akademische Raumfahrt Initiative Schweiz.

The goal of the thesis is to develop and verify a launch platform for research rockets, in order to subsequently realise the concept in cooperation with external partners.

In a first step, the requirements for a new launch pad were examined in detail. Based on the gained knowledge, a comprehensive catalogue of functions and requirements was drawn up, building the basis of the newly designed concept.

A morphological box was used to search and compare as many approaches as possible. From this, one concept was selected for further development.

The result is a transportable launch pad for research rockets. Thanks to a modular tower construction, guide lengths of 1 - 5.2 m can be realized. The elevation can be adjusted and fixed in the range of 0-15° using a hand crank. The innovative design allows for the azimuth angle to be infinitely adjusted 360°.

For all critical components a proof of strength has been made, all components have fulfilled the required safety requirements. The stability of the platform is at least 6 in all operating cases.

Ort, Datum

Luzern, 06.01.2019

© **Raffael Balzarini, Hochschule Luzern – Technik & Architektur**

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.

Startrampe ARIS

Industriepartner: **Verein Akademische Raumfahrt Initiative Schweiz – ARIS**

B.Sc. Anna Kiener
anna.kiener@gmail.com
contact@aris-space.ch
HTP C117.1
Auguste-Piccard-Hof 1
8093 Zürich

Betreut durch: Prof. Dr. Gerhard Stefan Székely
gerhardstefan.szekely@hslu.ch
Hochschule Luzern Technik & Architektur
Technikumstrasse 21
6048 Horw

Erstellt von: Raffael Balzarini
raffael.balzarini@outlook.com
Hochrütistrasse 36
6005 Luzern

Inhalt

1	Einleitung	6
1.1	Ausgangslage	6
1.2	Methodisches Vorgehen.....	6
2	Anforderungen.....	8
2.1	Betriebsfälle	8
2.2	Risikoanalyse.....	9
3	Lösungsfindung	12
3.1	Bestehende Konzepte.....	12
3.1.1	Rocket Photography	12
3.1.2	ARGOS	13
3.2	Kombinationen von Lösungsansätzen	13
3.3	Bewertungskriterien	14
3.4	Morphologischer Kasten.....	15
3.5	Lösungskombinationen.....	22
4	Lösungskonzept	24
4.1	Übersicht.....	24
4.2	Turm.....	26
4.2.1	Traversen.....	26
4.2.2	Führung	27
4.2.3	Verbindung Turm - Führung.....	28
4.2.4	Verbindung Turm - Winkelfixierung.....	28
4.2.5	Anschlag unten.....	29
4.3	Abstrahlplatte	29
4.4	Übersicht Plattform	30
4.5	Plattform oben.....	31
4.6	Plattform Mitte.....	31
4.7	Plattform unten	32
4.7.1	Beinadapter.....	33

4.7.2	Klemme.....	33
4.8	Standbein.....	33
4.9	Winkelfixierung.....	34
4.9.1	Pendelstütze.....	35
4.9.2	Handkurbel.....	35
4.9.3	Lagerbock Pendelstütze	36
4.10	Stütze	37
4.11	Zusätzliche Bauteile und Hilfsmittel	37
5	Systemverifikation und Nachweis.....	38
5.1	Lastfälle und Annahmen.....	38
5.2	Standicherheit Gesamtsystem	40
5.3	Nachweis der kritischen Bauteile	43
5.3.1	Standbeine	43
5.3.2	Klemme.....	45
5.3.3	Plattform Mitte	47
5.3.4	Achse Elevation	49
5.3.5	Winkelfixierung	50
5.3.6	Turm	52
5.4	Betrachtung der Resultate.....	55
6	Verifikation der Anforderungen	56
6.1	Nicht erfüllte Anforderungen	56
6.2	Nicht geprüfte Anforderungen	56
7	Zusammenfassung und Ausblick.....	57
7.1	Fazit.....	57
7.2	Ausblick für den weiteren Projektverlauf.....	58
Quellen		59
Literaturverzeichnis		59
Abbildungsverzeichnis		61
Tabellenverzeichnis.....		63

Anhang 1 Anforderungskatalog..... 64

Anhang 2 Baugruppenzeichnungen..... 66

1 Einleitung

1.1 Ausgangslage

Diese Arbeit wurde für den Verein ARIS (Akademische Raumfahrt Initiative Schweiz) verfasst. ARIS wird von Schweizer Hochschulen unterstützt und verfolgt das Ziel, raumfahrtbegeisterte Studierende zusammenzubringen und Projekte im Bereich der Raumfahrt zu realisieren. Im Sommer 2019 wird ARIS zum zweiten Mal mit einer eigens entwickelten Forschungsrakete am Spaceport America Cup teilnehmen.

In der Schweiz startet ARIS regelmässig Forschungsraketen – Diese werden abhängig nach Motorleistung in Level 1 – 3 eingeteilt. Zurzeit werden in der Schweiz aufgrund regulatorischer Bestimmungen nur Starts der Level 1 und 2 durchgeführt.

Für die Starts arbeitet ARIS eng mit dem Verein ARGOS (Advanced Rocketry Group of Switzerland) zusammen, welcher unter anderem seine bestehenden Startrampen für die Raketenstarts zur Verfügung stellt. Zukünftig möchte ARIS eine eigene Startrampe betreiben, mit der auch Raketen bis Level 3 sicher starten können.

In der vorliegenden Arbeit wurden die Anforderungen an eine solche Rampe evaluiert und daraus ein Produkt entworfen, das diese Anforderungen erfüllt.

1.2 Methodisches Vorgehen

Das Vorgehen der Arbeit orientiert sich am «Vorgehen beim Entwickeln und Konstruieren» gemäss Dubbel Taschenbuch für den Maschinenbau.

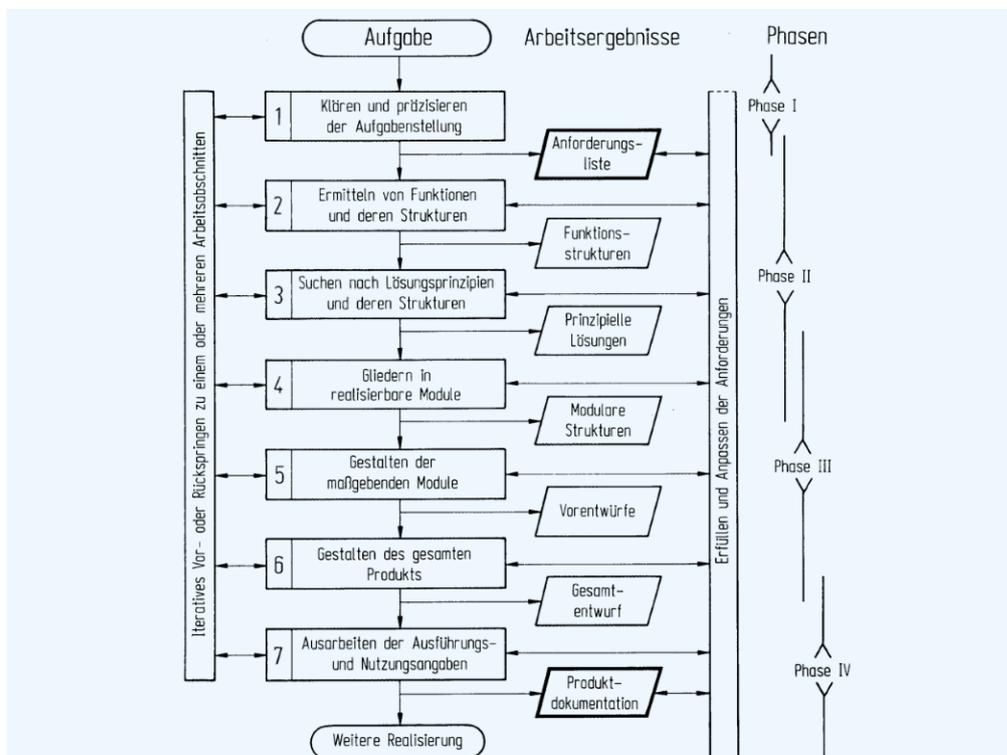


Abbildung 1 Vorgehen beim Entwickeln und Konstruieren [3]

1. In Kapitel 2 werden die Anforderungen des Auftraggebers aufgenommen und Betriebsfälle evaluiert. Daraus wird eine Anforderungsliste abgeleitet.
2. Zudem werden in Kapitel 2 aus den Anforderungen Funktionen definiert und in Teilprobleme unterteilt. Bestehende Konzepte werden untersucht, um von deren Gestaltung profitieren zu können.
3. Im dritten Kapitel werden möglichst vielfältige Lösungsansätze zur Funktionserfüllung gesucht und in einem morphologischen Kasten kombiniert und verglichen. Damit wird ein möglichst optimales Konzept zur weiteren Ausarbeitung bestimmt.
4. Kapitel 3 beschreibt die erarbeitete Lösung und deren Bestandteile.
5. In Kapitel 5 werden die kritischen Bauteile und das Gesamtsystem verifiziert.
6. Im sechsten Kapitel wird die Funktions- und Anforderungserfüllung der Lösung untersucht.
7. In Kapitel 7 wird die Arbeit reflektiert und ein Ausblick auf den weiteren Projektverlauf, inklusive weiteren Optimierungsvorschlägen, gemacht.

2 Anforderungen

Zusammen mit ARIS wurde ein Anforderungskatalog für die Startrampe erarbeitet. Die vollständige Liste befindet sich im Anhang 1. Die wichtigsten funktionellen Anforderungen lauten:

- Die Startrampe ist in einem Personenwagen mit Anhänger transportierbar.
- Die Startrampe kann am Bestimmungsort einfach montiert werden.
- Die Führungslänge ist modular.
- Die Rakete kann horizontal in die Führung geschoben werden.
- Der Turm lässt sich aufrichten und ist im Winkel von 0 - 15° zur Vertikalen fixierbar (Elevation).
- Der Azimutwinkel (horizontale Ebene) der Rakete lässt sich im Bereich von 90° einstellen.

2.1 Betriebsfälle

Die untenstehende Tabelle beinhaltet die vorgesehenen Betriebszustände der Startrampe und eine Auswahl realistischer externer Einflüsse. Für jeden Betriebsfall wurden anwendungsspezifische Anforderungen definiert, welche teilweise durch den Anforderungskatalog vorgegeben sind, oder sich aus den geforderten Funktionen sinngemäss ergeben.

Tabelle 1 Betriebsfälle

	Betriebsfall	Funktion / Tätigkeit	Spezifische Anforderungen
1	Lagerung		Kompaktes Lagervolumen, korrosionsbeständig bei trockener und sauberer Lagerung
2	Transport		Startrampe kann in zum Transport in tragbare Elemente demontiert werden, robust
3	Aufbau Abbau	Auf-/ Abbauen der modularen Startrampe	Einfache Gestaltung, möglichst geringer Montageaufwand, möglichst wenig verschiedene Werkzeuge, keine Verletzungsgefahr
4	Rakete horizontal	Rakete horizontal vorbereiten, Rakete in vertikale Position bringen	Plattform standsicher
5	Rakete vertikal		
6	Raketenstart	Rakete starten	Rakete geführt, keine losen Teile, keine Schäden an Menschen, Umwelt und Rakete, zuverlässiges und sicheres Starten der Rakete
7	Reinigung und Unterhalt	Rampe reinigen, und auf Schäden kontrollieren, Verschleiss-teile ersetzen	Möglichst einfacher Aufbau, Verschleisssteile gut zugänglich, Dreckablagerungen vermeiden

2.2 Risikoanalyse

Um die Startrampe sicher zu betreiben, müssen Risiken erkannt und ausgeschlossen werden. Dazu wird vor Beginn des Konstruktionsprozesses ein Prozess zur Risikominderung, in Anlehnung an ISO 12100, durchgeführt. In einem ersten Schritt werden potentielle Risiken, die den Betrieb der Startrampe oder deren Nutzer gefährden, tabelliert.

Tabelle 2 Risiken bei Standardbetriebsfällen

Betriebsfall	#	Gefährdung	Eintrittswahrscheinlichkeit	Risikostufe
2	1	Verletzungen beim Heben schwerer Lasten	A	III
2	2	Startrampe wird beim Transport beschädigt	B	II
3	3	Bauteile gehen verloren	B	III
4,5	4	Einklemmen von Extremitäten beim Aufrichten / Ablegen der Rakete	C	II
5	5	Startrampe kippt bei Windlast	C	I
5	6	Startrampe wird durch Korrosion beschädigt	A	IV
5	7	Beschädigung durch Blitzschlag	C	I
6	8	Rampe wird durch Abgasstrahl beschädigt	A	II
6	9	Rakete verklemmt in der Führung	C	I
6	10	Turm fällt beim Start um	C	I
6	11	Rakete startet nicht in der geplanten Elevation	C	II
5	12	Rakete kippt beim Aufrichten	B	II

Zur Visualisierung der Risikobeurteilung wurde eine Risikomatrix erstellt, in der die erwähnten Risiken mit Nummer aufgeführt sind.

Tabelle 3 Risikomatrix vor Risikominderung

Hoch	A	6	1	8	
Gering	B		3	2	12
Unwahrscheinlich	C			4, 11	5, 7, 9
Äusserst unwahrscheinlich	D				10
		IV	III	II	I
		Heilbare Verletzung ohne Arbeitsausfall, vor Ort behebbare Schäden an der Rampe	heilbare Verletzung mit Arbeitsausfall, leicht reparierbare Schäden an der Rampe. Erfolgreicher Start gefährdet.	leichter bleibender Gesundheitsschaden, reparierbare Beschädigung der Rakete	Tod, schwere bleibende Gesundheitsschäden, irreparable Beschädigung der Rakete

Alle Risiken im roten Bereich sind nicht tolerierbar, da sie aufgrund ihrer Auftretenswahrscheinlichkeit und/oder ihrer gravierenden Folgen bei Eintritt den Anwender und die Funktion der Startrampe gefährden. Um die Risiken zu minimieren, werden folgende Massnahmen für die Konstruktion definiert und ergeben weitere Anforderungen:

Tabelle 4 Massnahmen zur Risikominderung

Gefährdung	Massnahme	Neue Eintrittswahrscheinlichkeit	Neue Risikostufe
1	<ul style="list-style-type: none"> - Bauteile mit Gewicht über 20 kg werden gekennzeichnet und müssen von zwei Personen gehoben werden. Die Anzahl solcher Bauteile ist auf höchstens 5 zu beschränken. 	C	III
2	<ul style="list-style-type: none"> - Startrampe muss für den Transport in vorgesehene Teilstücke demontiert und sicher verstaut werden 	C	II
3	<ul style="list-style-type: none"> - Vor dem Transport wird die Vollständigkeit aller Baugruppen überprüft - Von allen Normteilen werden Ersatzteile mitgeführt 	D	III
4	<ul style="list-style-type: none"> - Keine scharfen Kanten an allen Bauteilen - Nur Instruierte Anwender operieren mit der Startrampe - Es wird eine Bedienungsanleitung mit Sicherheitscheckliste erstellt 	D	III
5	<ul style="list-style-type: none"> - Die Standsicherheit der Startrampe beträgt in allen Betriebsfällen mindestens 2 - Alle Kritischen Teile haben Sicherheiten gegen Fließen von mindestens 2 	D	I
6	<ul style="list-style-type: none"> - Aluminiumwerkstücke werden eloxiert - Einsatz von verzinkten Schrauben - Die Startrampe wird gereinigt und trocken gelagert 	C	4
7	<ul style="list-style-type: none"> - Die Startrampe ist durchgehend elektrisch leitend und geerdet. 	C	III
8	<ul style="list-style-type: none"> - Abgasstrahl wird durch geeignete Vorrichtung aufgenommen und abgelenkt 	C	IV
9	<ul style="list-style-type: none"> - Einsatz geeigneter Verbindungen 	D	II

	<ul style="list-style-type: none"> - Gratfreie Übergänge in der Führung - Verformungen des Turms geringer als bei bestehenden Systemen 		
10	<ul style="list-style-type: none"> - Sicherheit gegen Fliesen aller kritischen Bauteile mindestens 2 - Abarbeiten der Sicherheitscheckliste vor dem Start - Beim Start müssen die Mindestabstände gemäss TRA¹ eingehalten werden 	D	I
11	<ul style="list-style-type: none"> - Verformungen des Turms geringer als bei bestehenden Systemen - Geringer Peitschenschlageffekt, wenn die Rakete die Führung verlässt 	D	III
12	<ul style="list-style-type: none"> - Aufrichten der Rakete nur durch instruierte Anwender - Aufrichten der Rakete immer durch zwei Anwender, bei Turmlängen über 3 m durch 3 – 4 Anwender 	C	II

Durch die getroffenen Massnahmen ergibt sich die folgende Risikomatrix, die für die konstruierte Lösung gilt. Wie aus der aktualisierten Risikomatrix ersichtlich ist, können mit den getroffenen Massnahmen alle Risiken in einen tragbaren Bereich reduziert werden.

Tabelle 5 Risikomatrix nach Risikominimierung

Hoch	A				
Gering	B				
Unwahrscheinlich	C	6, 8	1, 7	2, 12	
Äusserst unwahrscheinlich	D		3, 4, 11	9	5, 10
		IV	III	II	I
		Heilbare Verletzung ohne Arbeitsausfall, vor Ort behebbare Schäden an der Rampe	heilbare Verletzung mit Arbeitsausfall, leicht reparierbare Schäden an der Rampe. Erfolgreicher Start gefährdet.	leichter bleibender Gesundheitsschaden, reparierbare Beschädigung der Rakete	Tod, schwere bleibende Gesundheitsschäden, irreparable Beschädigung der Rakete

¹ TRA: Tripoli Rocketry Association, weltweiter Interessenverband für High-Power Raketenflüge, der unter anderem Sicherheitsstandards für Raketenstarts definiert.

3 Lösungsfindung

3.1 Bestehende Konzepte

Für die Gestaltung der Startrampe wurden bestehende Lösungen untersucht und verglichen. Obwohl keines der untersuchten Konzepte die exakte Funktionalität der von ARIS gewünschten Lösung aufweist, konnten einige Lösungsansätze für das neue Konzept übernommen werden.

3.1.1 Rocket Photography

Rocket Photography (RP) ist ein amerikanischer Anbieter, der Startrampen kommerziell zur Vermietung anbietet. Am Spaceport Cup America 2018 hat ARIS die Rakete auf einer Startrampe von RP gestartet. Die verwendete Rampe entspricht zu einem Grossteil den Anforderungen von ARIS.



Abbildung 2 Startrampe von Rocket Photography [1]

Nach gründlicher Sichtung des vorhandenen Videomaterials, können die Eigenschaften der RP-Startrampe auf folgende Punkte zusammengefasst werden:

- Einfacher Aufbau mit vielen Normprofilen
- Horizontal kippbarer Turm
- Fixierung des Turms mit Schrauben und Spannseilen
- Einsatz massiver Bodenanker
- Kanal als Strahlableitung und Bodenschutz
- Azimutwinkel nach dem Aufbau nicht einstellbar
- Führungslänge nicht modular

3.1.2 ARGOS

Argos hat eine Vielzahl an Startrampen im Einsatz, deren Lösungskonzepte in Betracht gezogen werden müssen.



Abbildung 3 Auswahl von Startrampen bei ARGOS [2]

Das erste Modell von links ist die Startrampe, welche für den Start der Ariana IV Modelrakete verwendet wurde. Das Konzept zeichnet sich durch seine Einfachheit aus, ist jedoch auch bei der Funktionalität stark eingeschränkt. So muss zum Aufrichten der Rakete die Startrampe als Ganzes über die Beinenden als Kippunkt aufgerichtet werden. Als Turm wird ein quadratisches Hohlprofil nach DIN EN 10210-2 mit 90 mm Breite und 3 mm Wanddicke verwendet [Jürg Thüring]. Dies kann als Anhaltspunkt für neue Konzepte dienen.

Beim Konzept in der Mitte kann der Turm gekippt und die Elevation mit einer Stütze eingestellt und fixiert werden. Die Führungsschiene ist auf ein weiteres Profil verschraubt. Als Bodenschutz wird eine Stahlplatte von 6 mm Dicke verwendet.

Das Modell auf der rechten Seite ist die «Universal-Startrampe» von Argos. Sie besteht aus einer Plattform aus Aluminium, die auf drei längenverstellbaren Beinen steht. Die Führungsschienen sind durch einen Schraubstock mit der Plattform verbunden und können dadurch einfach ausgetauscht werden. Die Führung wird dabei nicht gestützt.

3.2 Kombinationen von Lösungsansätzen

In einem morphologischen Kasten, Abschnitt 3.4, wird die Startrampe in funktionelle Teilelemente zerlegt. Für jede Teilfunktion werden möglichst viele Lösungsansätze skizziert oder aus bestehenden Konzepten übernommen. Daraus werden zwei realistische Kombinationen gebildet, welche in Abschnitt 3.5 bewertet werden, um daraus ein finales Konzept zu entwickeln.

Dabei ist es in der weiteren Konstruktionsphase jederzeit möglich, dass aufgrund neuer Erkenntnisse, sich ändernden Anforderungen oder auftretenden Inkompatibilitäten iterativ zuvor nicht berücksichtigte Teillösungen wieder in Betracht gezogen werden.

3.3 Bewertungskriterien

Die Lösungskombinationen wurden gemäss den folgenden Kriterien bewertet:

Funktion

Erfüllt das Konzept die geforderte Funktion? Dies beinhaltet folgende Kriterien: Einfachheit und Eindeutigkeit der Funktionserfüllung, ausreichende Wirkung und minimale Störgrössen. [3]

0 – Ungenügend; 1 – Bedingt; 2 – Uneingeschränkt

Komplexität

Möglichst simpler Aufbau, wenig bewegliche Teile, geringer Raumbedarf, keine besonderen Werkstoff- und Auslegungsprobleme [3].

0 – Sehr komplexe Lösung; 1 – Lösung funktionsgerecht; 2 – Lösung einfach und funktionsgerecht

Benutzerfreundlichkeit

Die Bedienung ist intuitiv. Die Rampe lässt sich möglichst einfach und ohne besondere Hilfsmittel de- und montieren. Alle Bauteile lassen sich problemlos transportieren. Allfällige Verschleissteile lassen sich leicht austauschen. Der Unterhaltsaufwand der Lösung ist gering.

0 – Wenig Nutzerfreundlich; 1 – Neutral; 2 – Sehr nutzerfreundlich

Sicherheit

Die Lösung stellt in allen Nutzungsszenarien keine Gefahr für Mensch und Umwelt dar. Angestrebt ist eine Lösung mit unmittelbarer Sicherheit, die keine zusätzlichen Schutzmassnahmen erfordert. Die Funktionserfüllung ist stets gewährleistet.

0 – Lösung birgt Risiken; 1 – Lösung mittelbar sicher; 2 – Lösung unmittelbar sicher

Herstellbarkeit

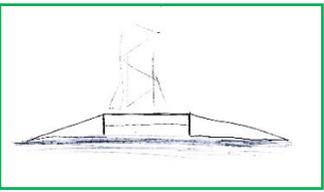
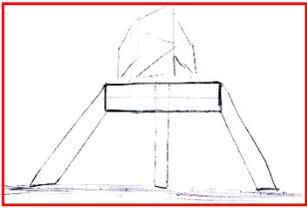
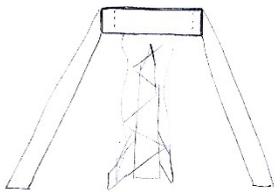
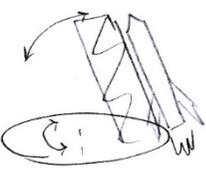
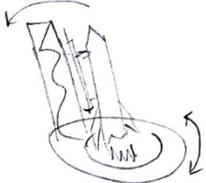
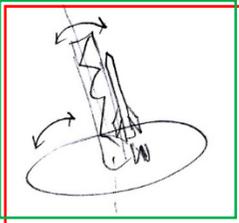
Die Herstellung der Lösung erfordert möglichst wenige, gebräuchliche Verfahren. Wo möglich werden Normteile und Standardbaugrössen verwendet.

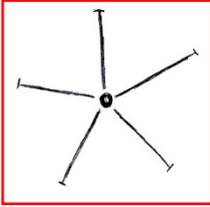
0 – Fertigung komplex; 1- Fertigung machbar; 2 – Fertigung problemlos

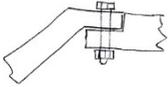
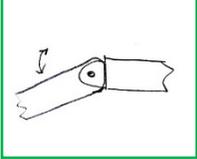
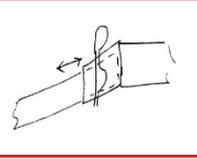
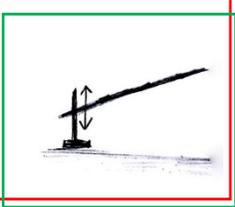
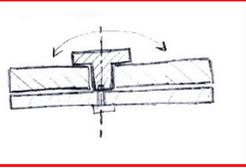
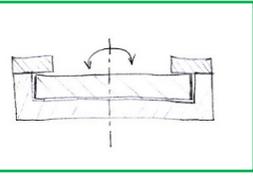
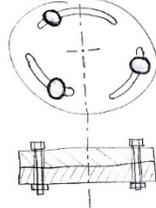
3.4 Morphologischer Kasten

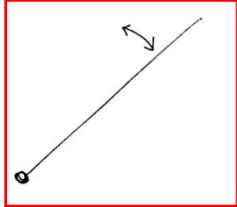
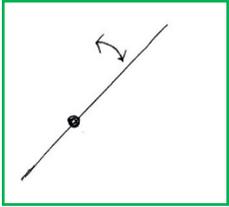
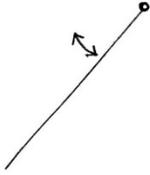
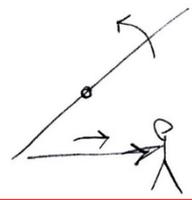
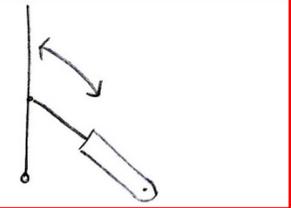
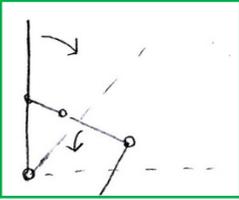
Kombination 1: Rot

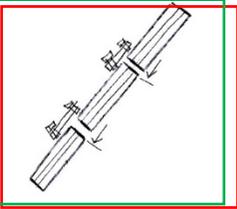
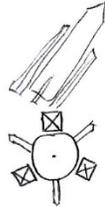
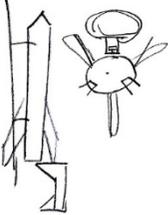
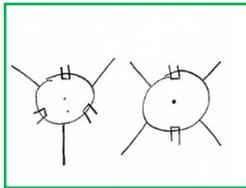
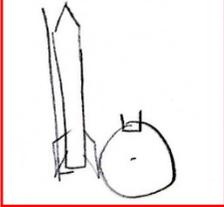
Kombination 2: Grün

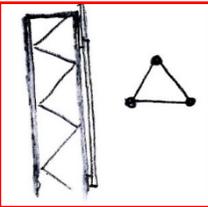
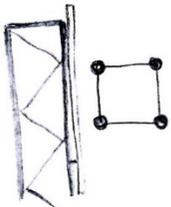
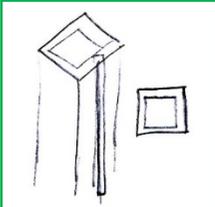
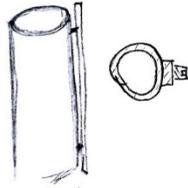
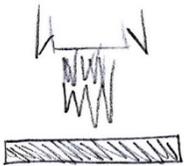
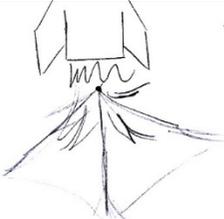
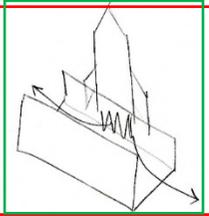
Teilfunktion		a	b	c	d
Plattform bieten	I	  <p>[2] Plattform auf dem Boden</p>	  <p>[1] Plattform auf Beinen</p>	 <p>Rakete «in» der Plattform</p>	
Position der Rakete auf Plattform	II	 <p>Turm ausserhalb Azimutachse, Rakete aussen + Abgase nicht auf der Plattform</p>		 <p>Turm auf Azimutachse + Standsicherheit</p>	

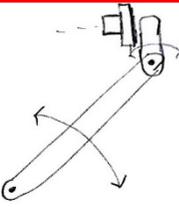
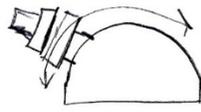
			 <p>[1]</p> <p>Turm ausserhalb Azimutachse, Rakete innen - Grosse Bauteile</p>		
Platt- form stützen	III	 <p>3 Beine + Geometrische Bestimmtheit + Einfach</p>	  <p>[2]</p>	  <p>[1]</p> <p>5 Beine + Redundanz + Standsicherheit - Mehr Bauteile</p>	 <p>Abstützung auf Kreisring + Gleiche Standsicherheit in alle Richtungen - Grosse Bauteile</p>

<p>Beine und Plattform verbinden</p>	<p>IV</p>	 <p>Schraubverbindung + Einfach</p>	 <p>Gelenk + Robust - Komplex</p>	 <p>Formschlüssige Verbindung + Schnell</p>	
<p>Plattform nivellieren</p>	<p>V</p>	 <p>Verstellbare Fusshöhe + Einfach</p>	 <p>Verstellbare Beinlänge</p>	 <p>Gelenk im Bein - Sicherheit, Komplexität</p>	 <p>Gelenk an der Verbindung</p>
<p>Turm drehen</p>	<p>VI</p>	 <p>Drehachse + Einfach</p>	 <p>Drehteller mit Führung + Robust - Viele Teile</p>	 <p>Drehteller mit Schrauben + Einfach - Grosse Reibkräfte</p>	

<p>Turm klappen</p>	<p>VII</p>	  <p>[1]</p> <p>Drehpunkt unten + Einfach + Robust</p>	 <p>Drehpunkt nahe am Schwerpunkt + Sicher + Benutzerfreundlich - Mehr Teile</p>	 <p>Drehpunkt oben + Standsicherheit - Komplexität</p>	
<p>Turm bewegen und fixieren</p>	<p>VIII</p>	  <p>[1] Manuell +Einfach</p>	 <p>Zylinder + Benutzerfreundlich + Sicher</p>	 <p>Kniehebel + Benutzerfreundlich + Sicher - Komplex</p>	

<p>Rakete führen</p>	<p>IX</p>	 <p>Führungsschiene am Stück +Sicherheit + Grosse Teile</p>	 <p>Führungsschiene modular +Benutzerfreundlich - Mehr Teile</p>	 <p>Führung an der Raketenoberfläche «Tower-System» - Komplex</p>	
<p>Anschlag unten für Rakete</p>	<p>X</p>	 <p>Auflage auf 2 Punkten +Symmetrische Last</p>	 <p>Auflage auf 3/2 Punkten, je nach Anzahl Finnen + Symmetrische Last - Viele Teile</p>	  <p>[1] Einzelner Auflagepunkt + Einfach - Asymmetrische Last</p>	

<p>Rakete stützen</p>	<p>XI</p>   <p>[1]</p> <p>Leichtbautraverse 3 eck + Hohe Steifigkeit + Modular</p>	 <p>Leichtbautraverse 4 eck + Hohe Steifigkeit + Modular</p>	  <p>[2]</p> <p>Quadratisches Rohrprofil + Einfach + Günstig</p>	 <p>Kreisförmiges Hohlprofil + Einfach + Günstig</p>
<p>Boden schützen</p>	<p>XII</p>   <p>[2]</p> <p>Stahlblech</p>	 <p>Symetrisches Ableiten der Abgase mit 3d Form</p>	  <p>[1]</p> <p>Kanal</p>	

Bildmaterial erstellen	XIII	 <p>Statische Kameraanbindungen</p>	 <p>Nachgeführte Kameraanbindungen</p>	 <p>[1]</p>	 <p>[1]</p>
------------------------	------	--	---	--	--

3.5 Lösungskombinationen

Aus den möglichen Teillösungen im morphologischen Kasten wurden zwei favorisierte Kombinationen gebildet und verglichen. Elemente aus Kombination 1 sind rot markiert, Elemente aus Kombination 2 grün. Einzelne Teilfunktionen kommen in beiden Kombinationen zum Einsatz.

Kombination 1 Rot

Der Lösungsansatz von Kombination 1 besteht aus einer Plattform, die mit Beinen vom Boden gehoben wird. Damit wird die Rakete auf eine angenehme Arbeitshöhe gebracht. Die Rakete wird mit einer modularen Führungsschiene geführt und von einer dreieckigen Leichtbau-traverse, wie bei Rocketry Photography bewährt, gestützt. Deren Drehpunkt soll unten liegen, um die Rakete nicht zu hoch zu lagern. Die Position des Aufbaus soll mittig auf der Plattform sein.

Der Aufbau kann manuell aufgerichtet und mit einer Stütze fixiert werden. Die Lagerung in der horizontalen Ebene erfolgt mit einer Achse. Die Beine sind formschlüssig mit der Plattform verbunden, was die Montage beschleunigt. Unebenheiten können mit verstellbaren Füßen nivelliert werden. Als Bodenschutz wird ein Kanal eingesetzt, wie sich bei bestehenden Konzepten bewährt hat. Bei den Kameraanbindungen soll sich das Konzept voll und ganz an der bewährten Lösung von Rocket Photography orientieren.

Kombination 2 Grün

Die zweite Lösungskombination verfolgt einen anderen Ansatz, teilt jedoch einige Teillösungen mit der ersten Kombination. Die Plattform steht bei dieser Lösung am Boden, von verstellbaren Füßen nur soweit abgehoben, um Unebenheiten zu kompensieren. Der Aufbau kann auf einem Drehteller in der horizontalen Ebene gedreht werden. Um die Rakete auf Arbeitshöhe zu bringen, ist der Drehpunkt für die vertikale Bewegung nicht am Turmende, sondern weiter oben. Das bringt den zusätzlichen Vorteil, dass die Kräfte zum Aufstellen geringer werden. Die Aufstellbewegung soll mit einem Kniehebel unterstützt werden. Die Rakete wird in vertikaler Position an 2 oder 3 Punkten gestützt, je nachdem ob eine Rakete mit 4 oder 3 Finnen gestartet wird. Die Führungsschienen werden wie in Lösung 1 in der Länge modular sein. Zu deren Stützung wird ein quadratisches Hohlprofil verwendet. Die Kameralösung soll ebenfalls am Konzept von Rocket Photography orientiert sein.

In der folgenden Tabelle werden die Kombinationen gemäss Kriterien aus Abschnitt 3.3 bewertet.

Tabelle 6 Bewertung der Lösungskombinationen

	Kombination 1 Rot	Kombination 2 Grün
Funktion	2	2
Gestaltung	2	1
Benutzer-freundlichkeit	1	2
Sicherheit	2	1
Herstellbarkeit	2	1
Total	9	7

Gemäss den definierten Kriterien schneidet die Kombination 1 knapp besser ab. Die entscheidenden Unterschiede liegen bei der simpleren Gestaltung, was auch die Bewertung der Herstellbarkeit beeinflusst. Zudem wird die Sicherheit von Kombination 2 als schlechter angesehen, weil die Lösung mit drei Beinen weniger Redundanz bietet.

Somit wird die Lösungskombination 1 weiter ausgearbeitet. Es soll jedoch während der Entwicklung jederzeit möglich sein, bei neuen Erkenntnissen auf bessere Teillösungen zurückzugreifen.

4 Lösungskonzept

4.1 Übersicht

In diesem Kapitel wird die erarbeitete Lösung beschrieben. Diese besteht aus acht Baugruppen:

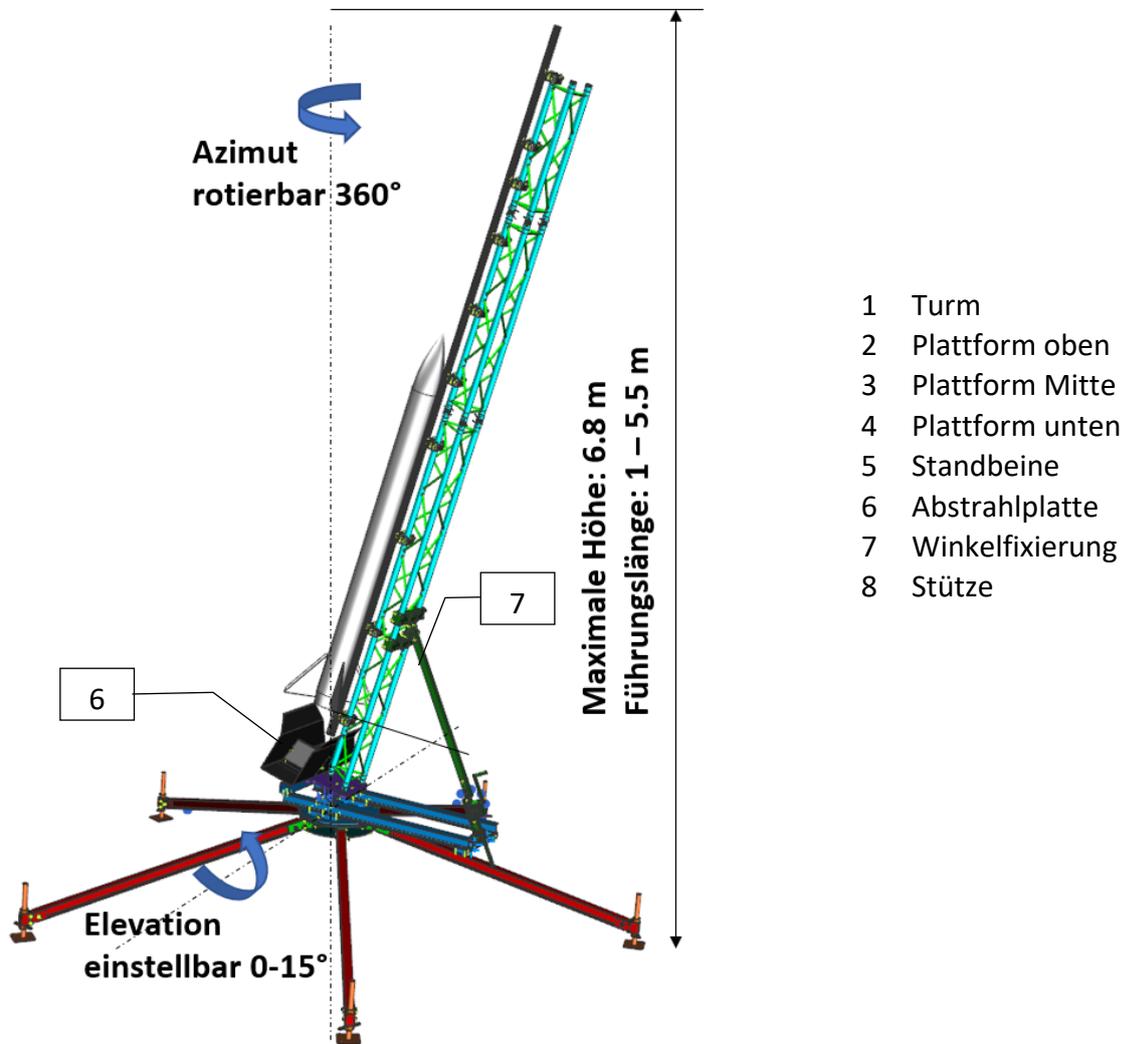


Abbildung 5 Startrampe in 15° Position mit den Achsen Azimut und Elevation

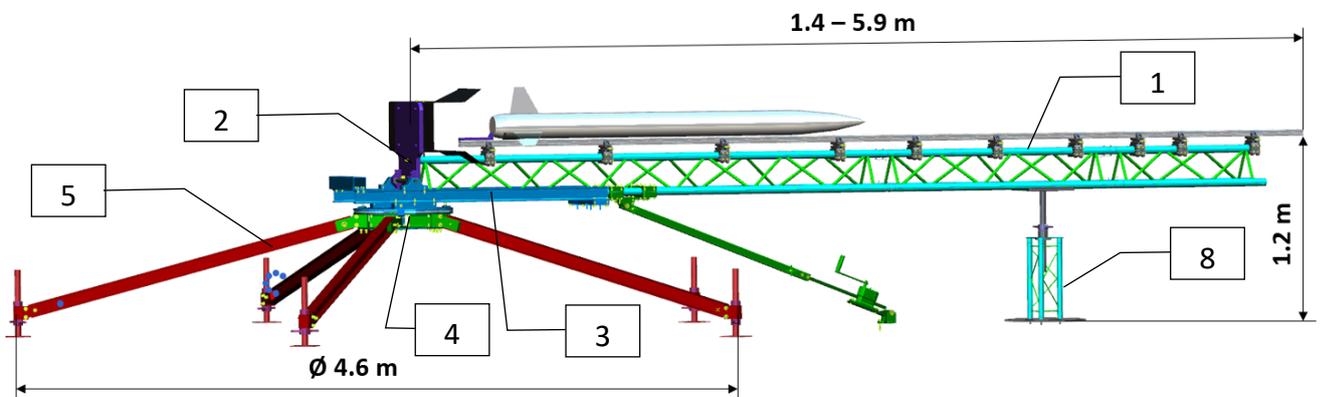


Abbildung 4 Startrampe horizontal

Die wichtigste Baugruppe zur Funktionserfüllung der Startrampe ist der Turm. Dieser ist aus Leichtbauelementen modular aufgebaut und stützt die Führungen, in der die Forschungsraketen gestartet werden. Um die Startrampe vor heissen Abgasen beim Start zu schützen, ist unter der Führungsschiene die Baugruppe «Abstrahlplatte» montiert.

Um den Turm zwischen 0° (vertikal) und 90° (horizontal) bewegen zu können, ist der Turm auf «Plattform oben» montiert. Diese ist mit einer Achse auf «Plattform Mitte» gelagert und kann sich somit um die Elevationsachse drehen. Die Drehung wird durch Anschläge bei 0 und 90° limitiert.

Um bei wechselnden Windstärken starten zu können, kann der Winkel mit der Baugruppe «Winkelfixierung» zwischen 0 und 15° eingestellt und fixiert werden.

Mit der Baugruppe «Plattform Mitte» kann der Azimutwinkel eingestellt werden. «Plattform Mitte» lässt sich 360° um die Azimutachse rotieren und fixieren. Somit kann der Turm an alle Windrichtungen angepasst werden.

Der Turm ist über die Baugruppe «Plattform unten» mit dem Boden verbunden. Fünf Standbeine sorgen für die geforderte Standsicherheit und bieten bei schlechtem Untergrund Redundanz. Bodenunebenheiten bis 300 mm können mit den Standfüssen ausgeglichen werden.

Bei der Montage der Beine kann «Plattform unten» mit der Baugruppe «Stütze» in Position gehalten werden. Beim Startbetrieb wird der Turm in der horizontalen Lage mit der Stütze gestützt.

In den folgenden Abschnitten werden die einzelnen Baugruppen im Detail beschrieben. In den jeweiligen Abschnitten wurde nur eine vereinfachte Grafik zur besseren Übersicht erstellt. Zur besseren Orientierung sind im Anhang 2 die wichtigsten Baugruppenzeichnungen zu finden.

4.2 Turm

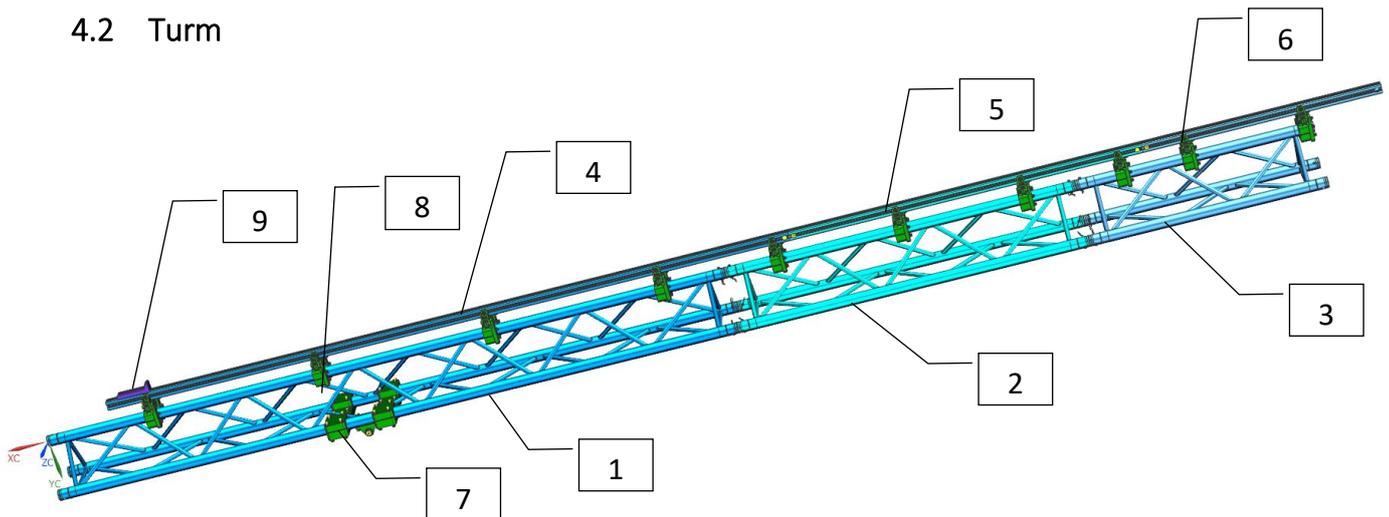


Abbildung 6 Baugruppe Turm

- | | | | |
|---|---------------------------|---|-----------------------------------|
| 1 | Traverse F33 3000 mm | 6 | Item Profil 40x40 1000 mm |
| 2 | Traverse F33 1500 mm | 7 | Verbindung Turm - Winkelfixierung |
| 3 | Traverse F33 1000 mm | 8 | Verbindung Turm - Führung |
| 4 | Item Profil 40x40 3000 mm | 9 | Anschlag unten |
| 5 | Item Profil 40x40 1500 mm | | |

In den folgenden Unterkapiteln werden Aufbau und Funktionen der Unterbaugruppen näher beschrieben.

4.2.1 Traversen

Grundgerüst des Turms sind die Leichtbautraversen von Global Truss. Um verschiedene Führungslängen umsetzen zu können, sind diese in drei Elemente unterteilt. Mit verschiedenen Kombinationen der Elemente können Turmlängen von 1 – 5.5 m realisiert werden. Aus praktischen Gründen wird jedoch empfohlen, das 3 m Stück stets als unterstes Element einzusetzen und Führungslängen unter 2.5 m durch Verstellen des «Anschlag unten» einzustellen. Die Traversen werden durch Kegelstifte kraft- und formschlüssig verbunden.

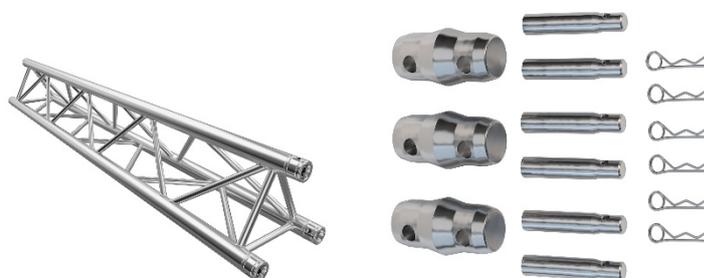


Abbildung 7 Traverse F33 mit zugehörigen Verbindungselementen

4.2.2 Führung

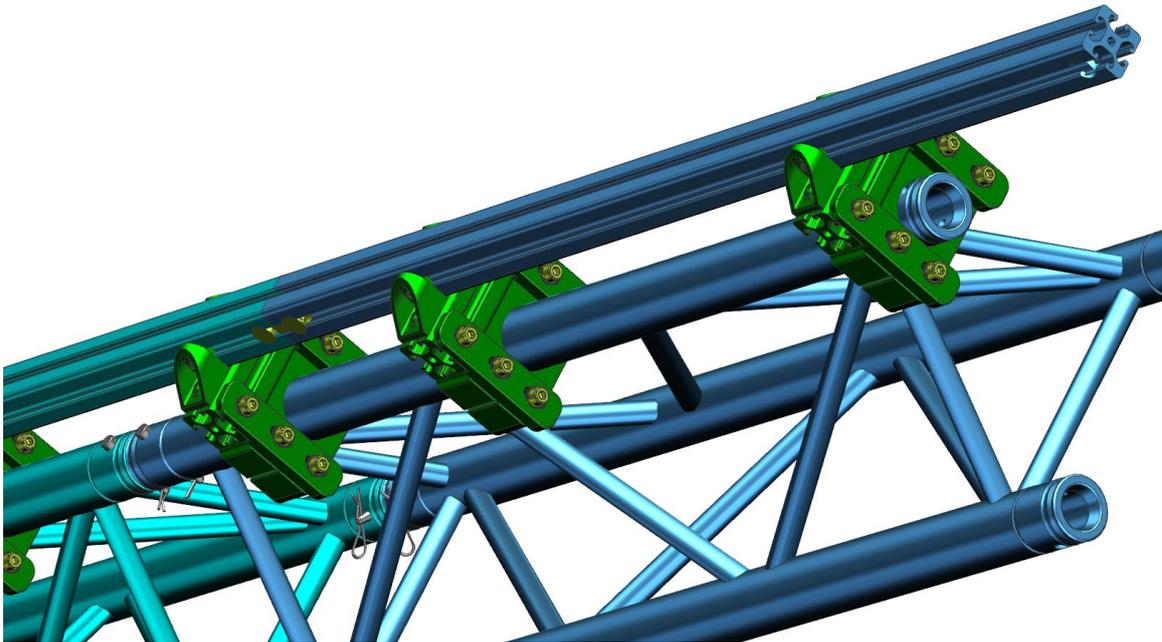


Abbildung 8 Führungsprofil montiert auf Traverse

Die Forschungsraketen werden beim Start mit «Rail guides» - Schienenführungen - geführt. Als Führungsprofil werden «Item Profil 8 40x40 leicht» Stranggussprofile aus eloxiertem Aluminium verwendet. Es können auch Profile anderer Hersteller oder anderen Baugrößen eingesetzt werden. Die Profile sind äquivalent zu den Turmlängen modular. Die Profile werden durch Universal Stossverbindungsätze der Firma Item verbunden.

Die Verbindungsstellen der Führungsschienen liegen jeweils über den Fugen der Traversen, damit allfällige Verformungen der Traversen besser kompensiert werden können.

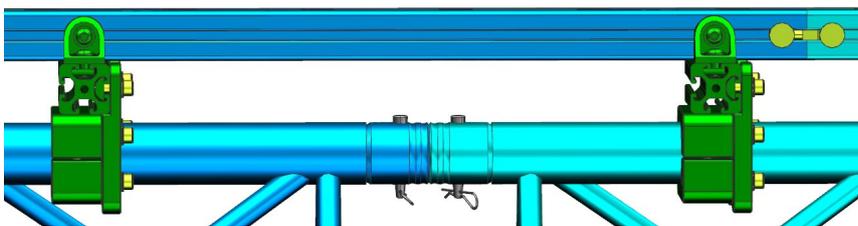


Abbildung 9 Verbindungsstellen der Traversen und Führungen

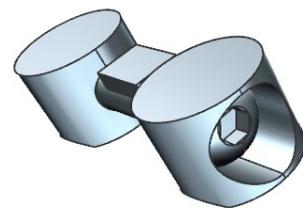


Abbildung 10 Item Stossverbinder

4.2.3 Verbindung Turm - Führung

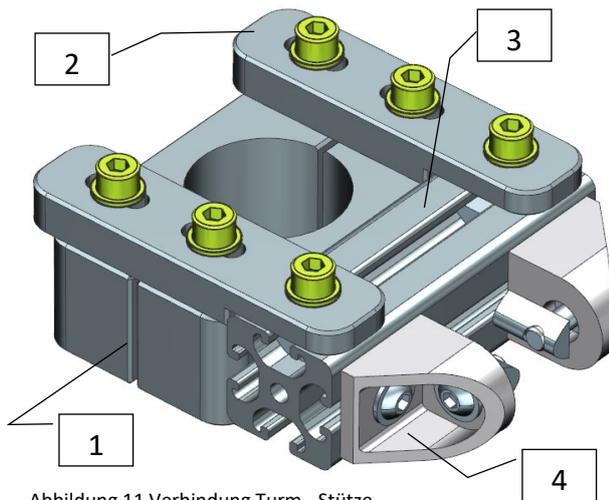


Abbildung 11 Verbindung Turm - Stütze

Die Führungsschienen werden über die Baugruppe «Verbindung Turm – Stütze» mit den Traversen verbunden. Die Befestigungselemente [1] werden nach dem Prinzip einer Rohrschelle an der Traverse verklemmt. Durch die Langlöcher in der Oberschiene [2] und die Nutensteine im I-tem-Profil [3] kann die Position der Führungsschiene in beiden horizontalen Achsrichtungen verstellt werden. Somit können Fertigungsungenauigkeiten, Montagefehler oder Verformungen durch Schäden an den Traversen ausgeglichen werden, so dass die Führungsschiene immer gerade verläuft.

Beim Wechsel auf andere Führungsschienenprofile muss lediglich die Distanz der Gelenkwinkel [4] und die Grösse der Nutensteine angepasst werden.

4.2.4 Verbindung Turm - Winkelfixierung

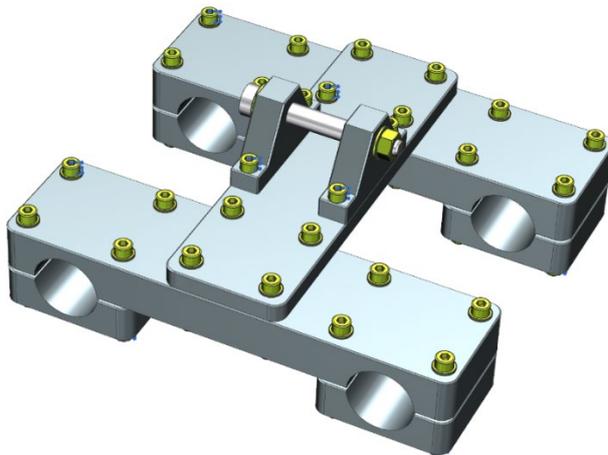


Abbildung 12 Verbindung Turm – Stütze

Die Elevation des Turms wird mit der Baugruppe «Winkelfixierung» eingestellt und fixiert. Die Verbindung zur Traverse ist nach demselben Prinzip gestaltet wie bei «Verbindung Turm – Führung». Die Krafteinleitung ist hingegen auf vier Flächen verteilt, damit die Querkraft auf die Traverse zu verkleinert und die übertragbare Reibkraft zu vergrössert werden kann. Die Pendelstütze der Baugruppe «Winkelfixierung» ist durch eine Passschraube mit «Verbindung Turm – Winkelfixierung» verbunden.

4.2.5 Anschlag unten

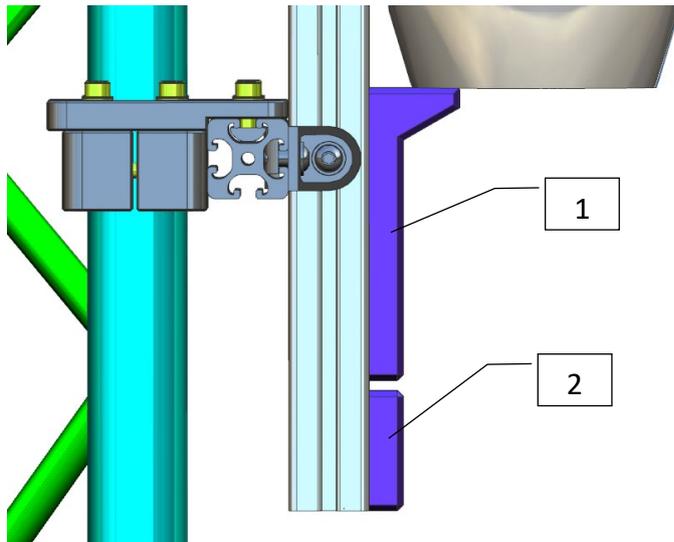


Abbildung 13 Anschlag unten



Abbildung 14 Konzept bei RP [17]

Das Konzept um die Rakete von unten zu stützen, wurde von der Startrampe von Rocket Photography übernommen. Die Rakete liegt dabei einseitig auf einem Anschlag [1] auf, welcher mit drei Nutensteinen befestigt wird. Um zu verhindern, dass die Rakete beim Aufrichten des Turms aus der Führung fällt, falls vergessen wurde die Schrauben anzuziehen, ist am Ende der Führung darunter noch ein Sicherheitselement [2] verschraubt.

4.3 Abstrahlplatte

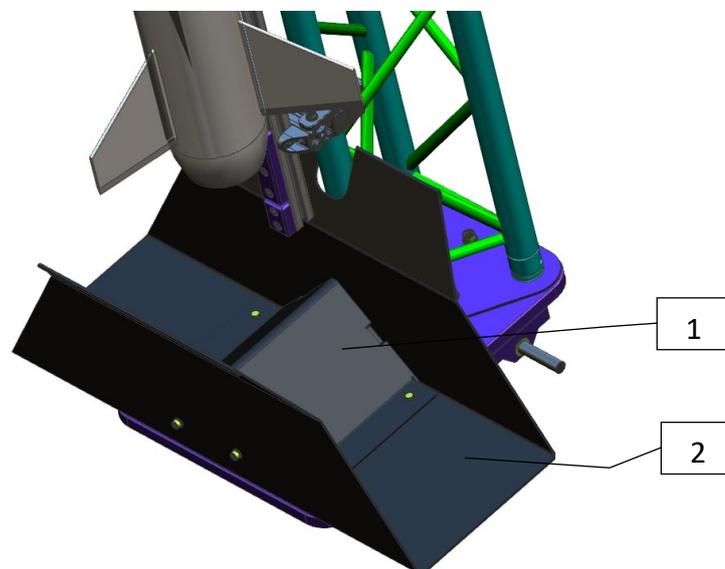


Abbildung 15 Abstrahlplatte

- 1 Strahlableiter
- 2 Kanal

Um die Startrampe vor dem Abgasstrahl zu schützen, wird eine zweiteilige Blechkonstruktion eingesetzt. Der Strahlableiter [1] besteht aus 5 mm korrosionsbeständigem Stahlblech, lenkt die Abgase symmetrisch ab, wonach diese durch den Kanal [2] von der Startrampe weggeführt werden. Die notwendigen Dimensionen für den Kanal konnten lediglich aus vorhandenem Bildmaterial abgeschätzt werden. Die Funktionalität des Kanals sollte bei den ersten Raketenstarts mit der



Abbildung 17 Abgasstrahl TELL [17]

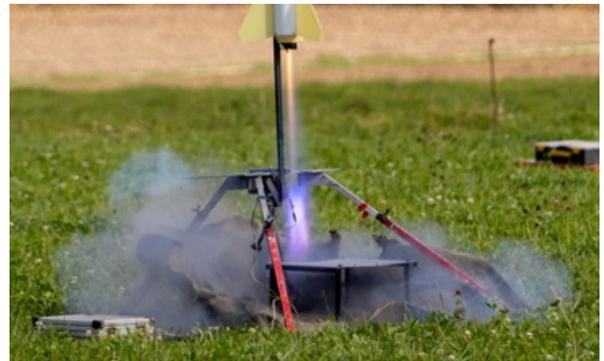


Abbildung 16 Abgasstrahl Level 1 Rakete [2]

Rampe beurteilt werden, damit gegebenenfalls Korrekturen vorgenommen werden können, sollten die Dimensionen der Abstrahlplatte zu klein sein.

4.4 Übersicht Plattform

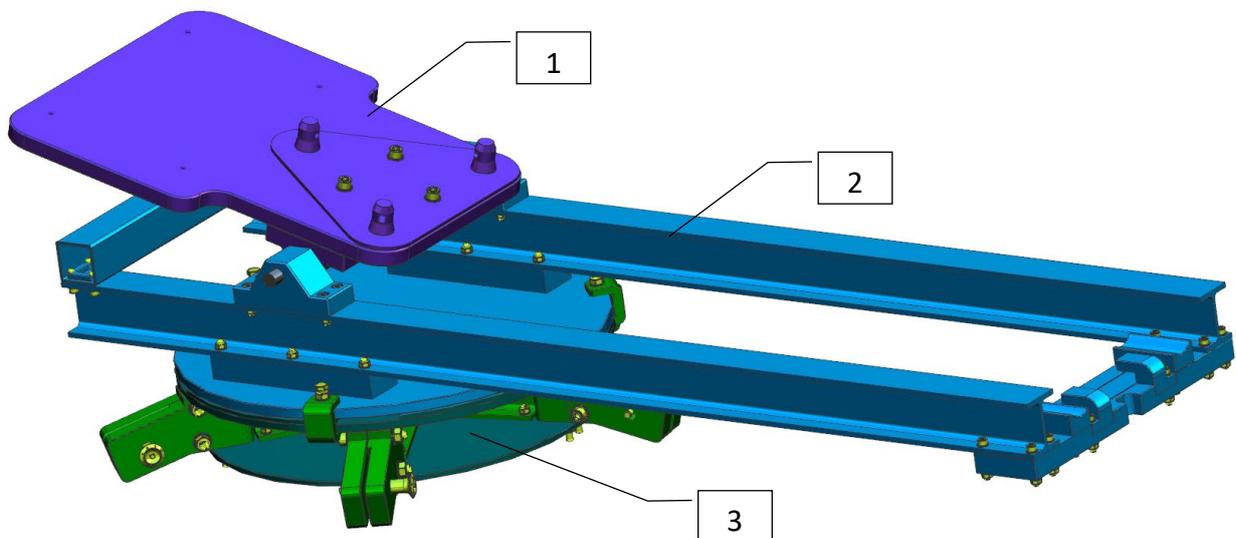


Abbildung 18 Plattform

Die drei Baugruppen «Plattform oben [1], «Plattform Mitte» [2] und «Plattform unten» [3] bilden die Funktionseinheit «Plattform» und beinhalten die meisten Funktionen der Startrampe. Die Plattform verbindet den Turm mit den Standbeinen und erlaubt die Drehungen in Azimut und Elevation.

4.5 Plattform oben

Die Baugruppe «Plattform oben» verbindet den Turm mit der Plattform und ist durch eine Achse mit «Plattform Mitte» verbunden, damit bildet sie den Drehpunkt zum Einstellen der Elevation. Die Baugruppe «Abstrahlplatte» wird auf die Grundplatte verschraubt.

In den Lagerböcken ist die Achse mit Gleitlagern gelagert. Durch Festziehen der Muttern an beiden Enden wird die Achse mit den Lagerböcken von «Plattform Mitte» verbunden.

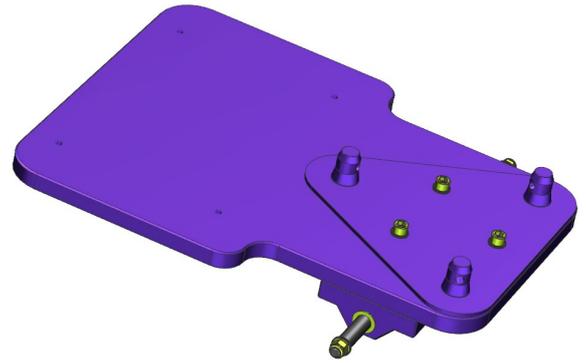


Abbildung 19 Plattform oben

4.6 Plattform Mitte

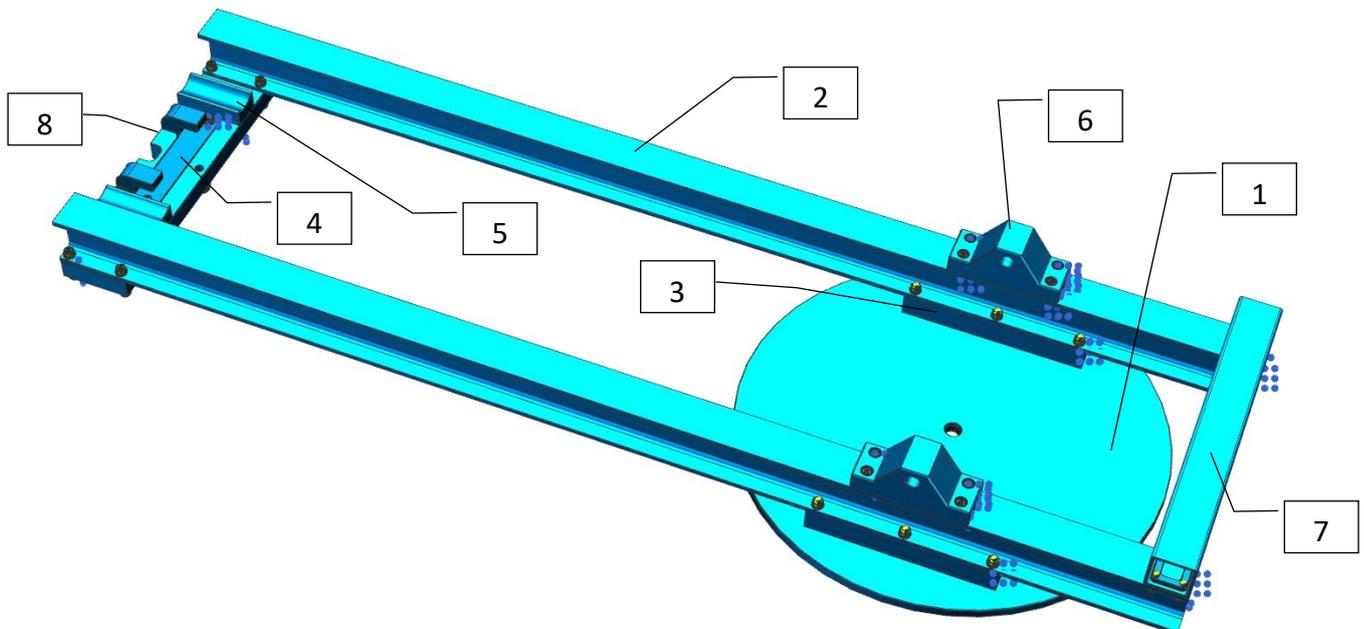


Abbildung 20 Plattform Mitte

- | | |
|----------------------------|----------------------------|
| 1 Drehplatte Azimut | 5 Auflage Turm |
| 2 I-Träger | 6 Lagerbock |
| 3 Distanzstück | 7 Querstrebe raketenseitig |
| 4 Anschlag Winkelfixierung | 8 Querstrebe turmseitig |

Die «Plattform Mitte» ist durch die Drehplatte Azimut [1] drehbar auf «Plattform unten» montiert. Die Lagerböcke [6], bilden über die Achse den Kontakt zur «Plattform oben». An den Enden der I-Träger [2] befinden sich die Querstreben [7,8]. Die Länge der I-Träger ist ausschlaggebend

für den Kraftangriffswinkel der BG «Stütze». Auf der «Querstrebe turmseitig» wird die Winkelfixierung in der «Anschlag Winkelfixierung» [4] fixiert. Daneben befinden sich Auflagen [5], auf denen der Turm in horizontaler Lage aufliegt. Die «Querstrebe raketenseitig» dient als Anschlag, wenn die Elevation des Turmes 0° erreicht.

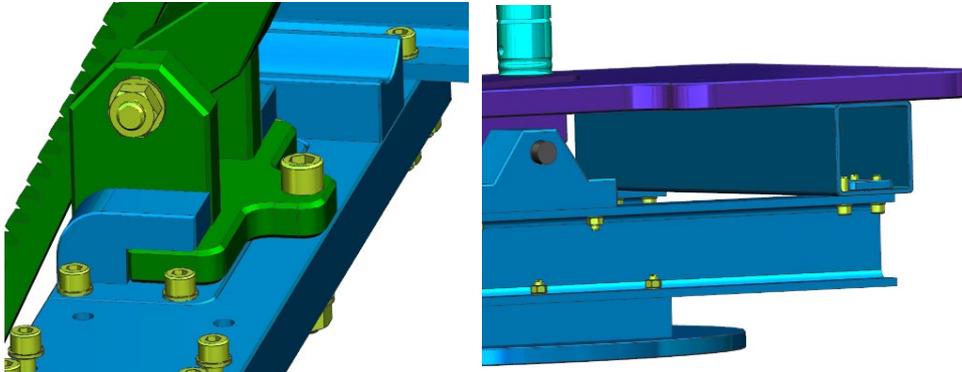


Abbildung 21 Links: Anschlag Winkelfixierung, rechts: Anschlag Plattform oben

4.7 Plattform unten

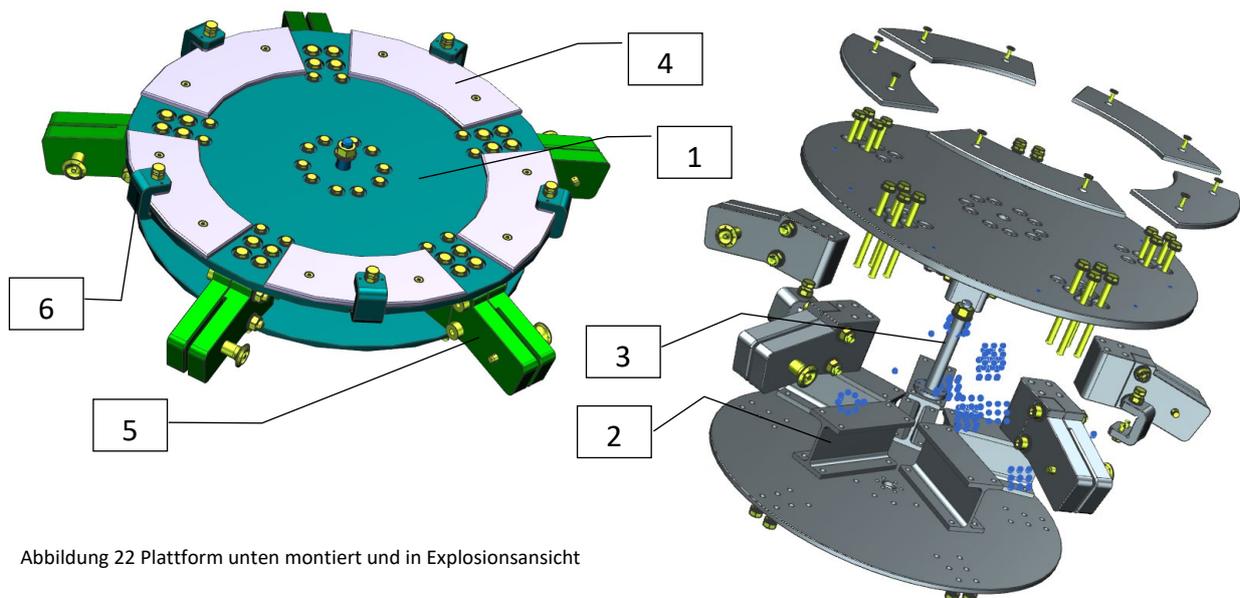


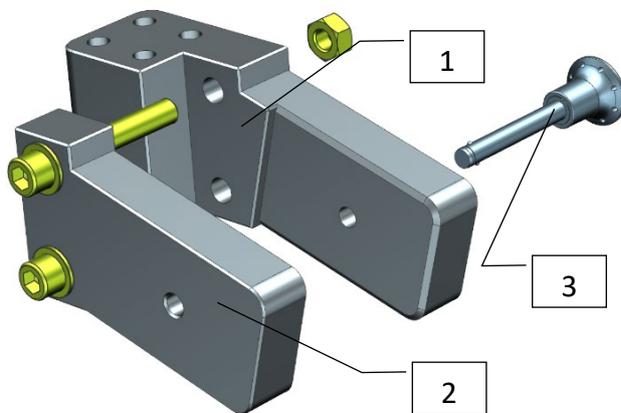
Abbildung 22 Plattform unten montiert und in Explosionsansicht

- | | |
|----------------|----------------|
| 1 Grundplatte | 4 Gleitschicht |
| 2 I-Profil | 5 Beinadapter |
| 3 Achse Azimut | 6 Klemme |

Basis der Funktionseinheit «Plattform» ist die Baugruppe «Plattform unten». Der Aufbau besteht aus zwei Grundplatten [1], die durch die Beinadapter [5] verschraubt werden. Um die flächigen Grundplatten zu versteifen, werden fünf I-Profile [2] angebracht, die mit beiden Grundplatten verschraubt sind. Die BG «Plattform Mitte» liegt auf den Gleitschichten [4] auf und wird beim

Drehen durch die Achse Azimut [3] geführt. Um den Azimutwinkel der Plattform zu fixieren, müssen die Stellschrauben in den Klemmen [6] angezogen werden.

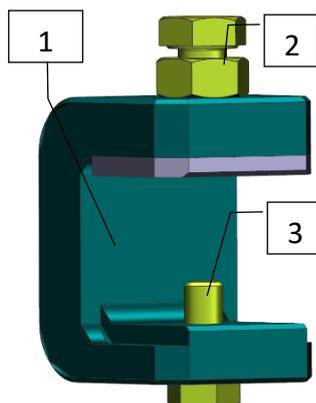
4.7.1 Beinadapter



Mit den Beinadapters werden die «Standbeine» mit der Plattform verbunden. Die Bracke [2] wird mit der Basis [1] verschraubt. Das I-Profil des Standbeins wird in die so entstandene Nut geschoben und mit dem Kugelsperrbolzen [3] gesichert.

Abbildung 23 Explosionsansicht des Beinadapters

4.7.2 Klemme



Nach dem Anziehen der Stellschraube [2] verbindet die Klemme [1] «Plattform Mitte» und «Plattform unten» kraftschlüssig. Somit wird der Azimutwinkel des Turms fixiert. Momente, die durch externe Kräfteinflüsse auf den Turm wirken werden über die Klemmen auf «Plattform unten» übertragen.

Die Befestigungsschraube [3] dient dazu, dass die Klemme sich nicht von der Grundplatte lösen kann, übernimmt jedoch keine Kräfte, da auf die Klemme nur Kräfte gegen oben wirken.

Abbildung 24 Klemme

4.8 Standbein



Abbildung 25 Anordnung Beine

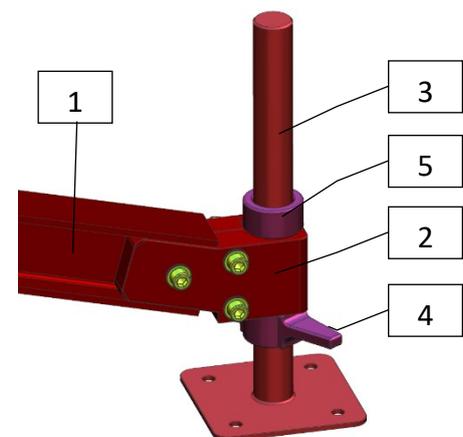
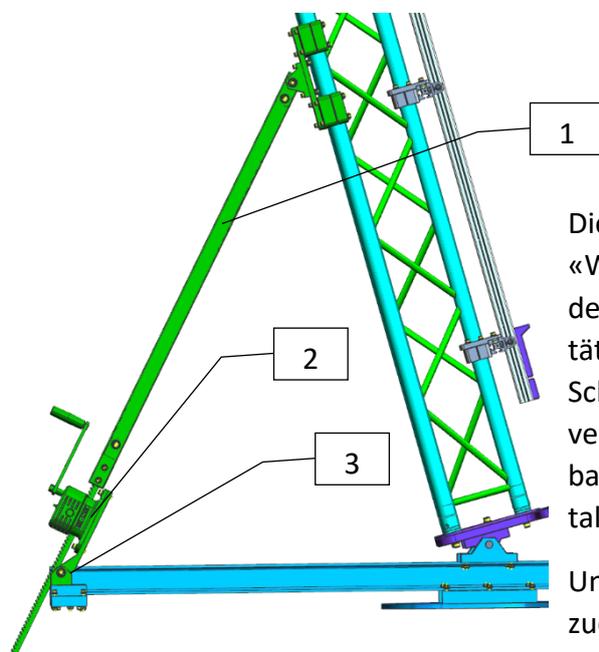


Abbildung 26 Standbein mit Fuss

- | | | | |
|---|---------------|---|-------------------------|
| 1 | I-Profil | 4 | Spindelmutter mit Griff |
| 2 | Fussadapter | 5 | Spindelmutter |
| 3 | Gerüstspindel | | |

Die Standbeine verbinden die Plattform mit dem Boden und sorgen für die nötige Standsicherheit der Startrampe. Als Standbein wird ein 80x60 mm I-Profil [1] eingesetzt, an dessen Ende der Fussadapter [2] montiert ist. Eine Gerüstspindel [3] mit Kugelgewinde verbindet die Standbeine mit dem Boden. Die Gerüstspindel hat einen Hub von 400 mm und kann durch Verstellen der Spindelmutter mit Griff [4], Bodenunebenheiten ausgleichen. Nachdem die Plattform nivelliert wurde, muss die Gerüstspindel mit der Spindelmutter [5] gesichert werden. An den Bohrungen in der Platte an der Gerüstspindel können je nach Untergrund verschiedene Platten montiert werden.

4.9 Winkelfixierung



- | | |
|---|------------------------|
| 1 | Pendelstütze |
| 2 | Handkurbel |
| 3 | Lagerbock Pendelstütze |

Die Elevation des Turms kann mit der Baugruppe «Winkelfixierung» eingestellt und fixiert werden. Um den Winkel einzustellen, muss die Handkurbel [2] betätigt werden, welche mit einem selbsthemmenden Schneckengetriebe die Länge der Pendelstütze [1] verstellt. Der Winkel ist zwischen 0 und 15° einstellbar, die Messung des Winkels erfolgt mit einer digitalen Wasserwaage am Turm.

Um den Turm in horizontale Lage zu bringen, muss zuerst die Pendelstütze eingefahren werden (15° Position). Darauf wird die Befestigungsschraube am Lagerbock [3] gelöst. Anschliessend muss der Turm von Hand in vertikale Lage (0° Position) gebracht werden, damit der Lagerbock aus seiner Verankerung gelöst werden kann, bevor der Turm manuell in horizontale Lage gebracht wird. Bevor der Turm abgelegt wird, muss sichergestellt sein, dass die Baugruppe «Stütze» richtig positioniert und eingestellt ist, um den horizontalen Turm zu stützen.

Abbildung 27 Stütze mit Turm und Plattform Mitte

4.9.1 Pendelstütze



Abbildung 28 Explosionsansicht der Pendelstütze

Die Pendelstütze besteht aus einem Hohlprofil mit quadratischem Querschnitt [4] mit 45 mm Breite und 3 mm Wandstärke. An den Enden sind gefrästete Verstärkungen montiert, wo über Passschrauben die Kraft übertragen wird. Mit solchen ist am unteren Ende auch die Zahnstange an die Stütze verschraubt.

4.9.2 Handkurbel

Die Elevation wird mit einem Handzahnstangengetriebe HZW 53.0610 der Firma Lock verstellt. Dieses ist für Druckkräfte bis 6000 N ausgelegt und behält die eingestellte Position durch ein selbsthemmendes Schneckengetriebe bei. Die Drehplatte, auf der das Getriebe verschraubt ist, wurde so gestaltet, dass der Abstand des Drehpunktes zum Schubmittelpunkt der Zahnstange möglichst gering ist.

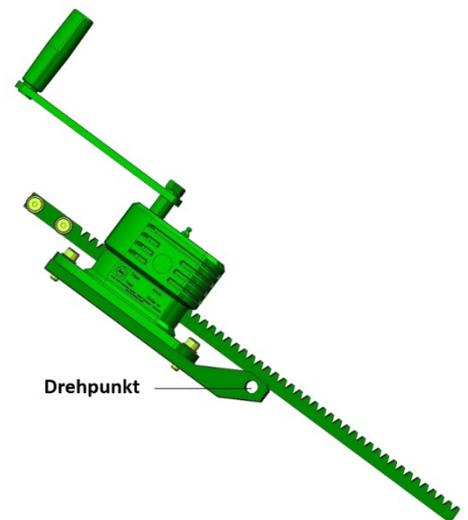
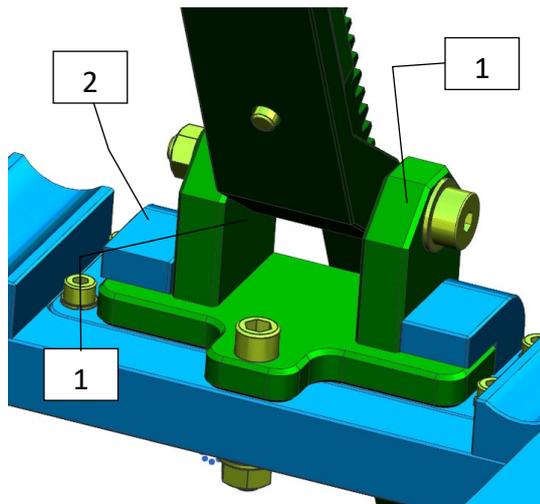


Abbildung 29 Lock HZW53

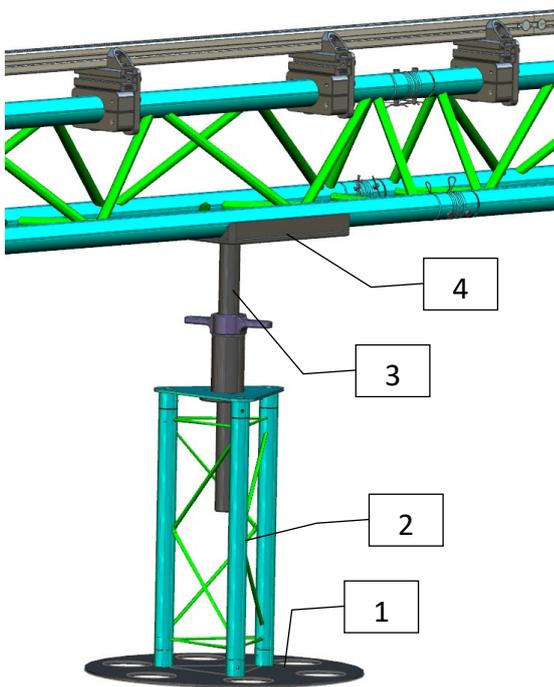
4.9.3 Lagerbock Pendelstütze



Der Lagerbock der Pendelstütze [1] ist formschlüssig mit dem Bauteil «Anschlag Winkelfixierung» [2] auf «Plattform Mitte» verbunden. Die Kraftübertragung erfolgt durch diese Verbindung. Zur Sicherheit gegen Verschiebung dient die Befestigungsschraube [3] an der Vorderseite.

Abbildung 30 Lagerbock der Winkelfixierung

4.10 Stütze



- 1 Bodenplatte
- 2 Traverse F23
- 3 Gerüstspindel
- 4 Auflage

Die Baugruppe «Stütze» wird eingesetzt, um den Turm in horizontaler Position zu stützen. Mit Hilfe der Gerüstspindel [3] kann die Höhe verstellt werden, um Bodenunebenheiten zu kompensieren. Bei der Montage der Startrampe kann die BG «Plattform unten» mit der Stütze ab Boden gehalten werden, währenddem die Beine montiert werden. Wenn alle Beine montiert sind, wird die Stütze mit der Spindelmutter gesenkt, bis alle Beine den Boden berühren. Zum Kurbeln kann ein Quadratrohr mit 18 mm Innenmass verwendet werden.

Abbildung 31 Stütze

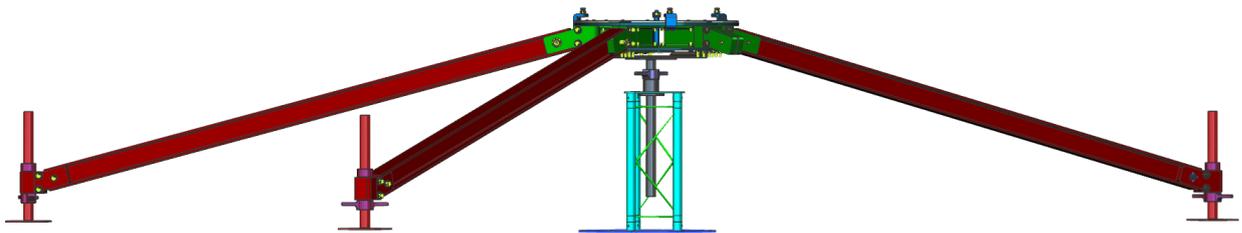


Abbildung 32 Stütze beim Zusammenbau der Startrampe

4.11 Zusätzliche Bauteile und Hilfsmittel

Um die Startrampe beim Zusammenbau zu nivellieren, sowie die Elevation einzustellen, wird eine elektronische Wasserwaage benötigt. Empfohlen wird die «WAWAAGE-EL-DIGITAL-IP66-L80CM» Würth.

Wenn die Startrampe auf Asphalt aufgebaut wird, ist der Blitzschutz nicht gewährleistet. Das Blitzschutz-Set von elektro-material.ch lässt sich in der freien Gewindebohrung an den Standbeinenden befestigen und über einen Kreuzerder, beispielsweise von Hornbach, mit der Erde verbinden.



Abbildung 34 Blitzschutz-Set [18]



Abbildung 33 Kreuzerder [19]

5 Systemverifikation und Nachweis

In diesem Kapitel wird die Festigkeit der kritischen Bauteile sowie die Standfestigkeit des Gesamtsystems nachgewiesen.

5.1 Lastfälle und Annahmen

Die aufgeführten Bauteile werden als kritisch angenommen.

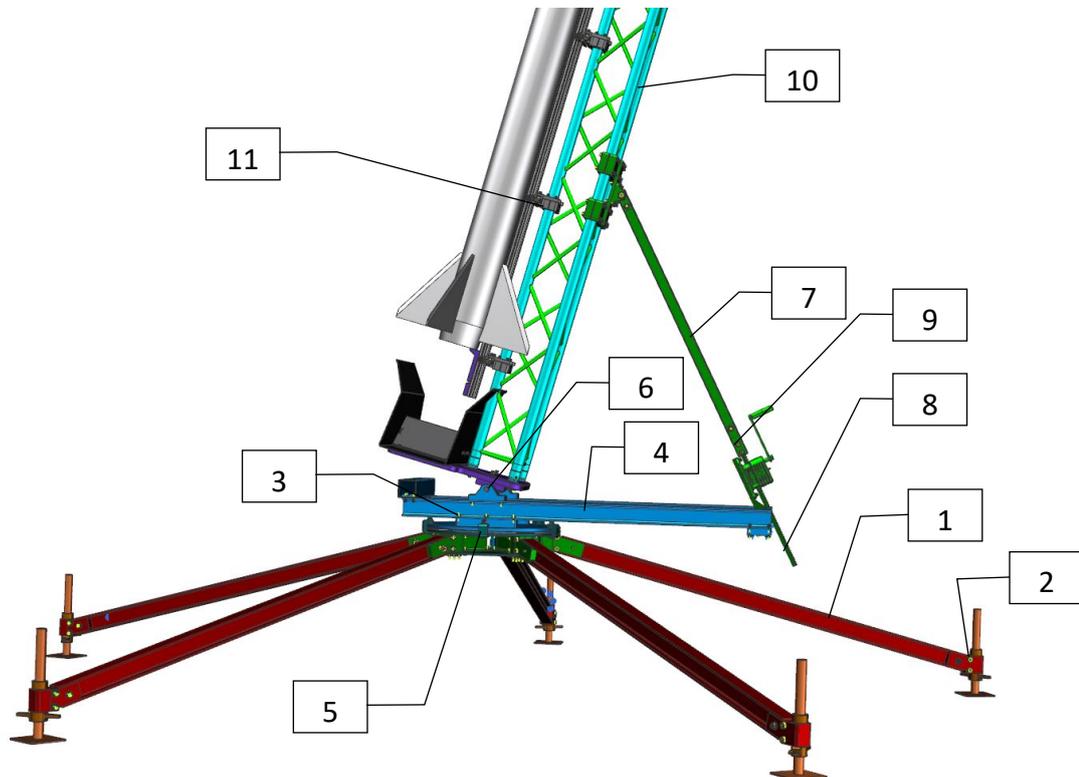


Abbildung 35 Als kritisch angenommene Bauteile

Bauteil	Baugruppe	Hauptbeanspruchung
1 I-Träger	Standbein	Biegung
2 Passschraube	Standbein	Abscherung
3 Befestigungsschraube	Plattform Mitte	Zug
4 I-Träger	Plattform Mitte	Biegung
5 Klemme	Plattform unten	Biegung
6 Welle Elevation	Plattform oben	Abscherung
7 Pendelstütze	Winkelfixierung	Knickung
8 Zahnstange	Winkelfixierung	Knickung
9 Passschraube	Winkelfixierung	Abscherung
10 Traverse F33	Turm	Zug / Druck
11 Verbindung Turm - Führung	Turm	Torsion

Tabelle 7 Liste der als kritisch angenommenen Bauteile

Zur Berechnung der Lasten wurden folgende Daten und Vereinfachungen verwendet:

Tabelle 8 Daten und Vereinfachungen für Lastfälle

Bereich	Bezeichnung		Grösse	Bemerkung
Umwelt	Maximal zulässige Windgeschwindigkeit	v_{wmax}	12.5 m/s	Entspricht Beaufort 6
	Luftdichte	ρ_m	1.204 kg/m ³	
Startrampe	Gesamtgewicht	m_{sr}	332 kg	
	Masse Plattform oben	m_{po}	21 kg	
	Masse Plattform Mitte	m_{pm}	34 kg	
	Masse Plattform unten	m_{pu}	34 kg	
	Masse Standbeine	m_{sb}	5*15 kg	
	Masse Abstrahlplatte	m_{as}	23 kg	
	Masse Winkelfixierung	m_{wf}	18 kg	
	Masse Stütze	m_s	17 kg	
	Windkraft auf Turmaufbau	F_w	244 N	$F_w = F_{wR} + F_{wT} + F_{wF}$ Für die Berechnungen wird immer die Windkraft F_w verwendet, unabhängig ob der Wind normal oder seitlich wirkt.
	Windangriffshöhe	h_w	2.75 m	
Rakete	Masse	m_R	30 kg	
	Durchmesser	\varnothing_R	200 mm	
	Höhe	h_r	3000 mm	
	Projizierte Fläche	A_{prR}	0.6 m ²	200 mm*3000 mm
	Fläche der Finnen			Wird vernachlässigt
	Massenschwerpunkt	cm_r	mittig	
	Strömungswiderstandskoeffizient	c_{w_r}	1.2 [5]	
	Windkraft bei seitlicher Anströmung	F_{wR}	68 N	$F_w = c_w * A_{pr} * 0.5 * \rho_m * v_{wmax}^2$
Turm	Profil			Global Truss F33 [6]
	Querschnitt	A_t	1206 mm ²	$3 * (50^2 - 48^2) * \pi / 4$
	Projizierte Fläche	A_{prT}	1.1 m ²	Vereinfacht als 4*Gurtrohre voll im Wind, dafür Vernachlässigung der

				Verstrebungen und Verwirbelungseffekten. 4*50 mm*5500 mm
	Höhe	h_t	5500 mm	
	Masse	m_T	63 kg	
	Strömungswiderstandskoeffizient	c_{w_t}	1.2 [5]	Gurtrohr
	Windkraft bei seitlicher Anströmung	F_{wT}	136N	$F_w = c_w * A_{pr} * 0.5 * \rho_m * v_{wmax}^2$
Führung	Profil			Item Profil 8 40x40 leicht, natur [7]
	Querschnitt	A_f	646 mm ²	
	Projizierte Fläche	A_{prF}	0.22 m ²	40 mm*5500 mm
	Höhe	h_f	5000 mm	
	Strömungswiderstandskoeffizient	c_{w_f}	2 [5]	Annahme Umströmung als Rechteckplatte
	Windkraft bei seitlicher Anströmung	F_{wF}	40 N	$F_w = c_w * A_{pr} * 0.5 * \rho_m * v_{wmax}^2$

5.2 Standsicherheit Gesamtsystem

Für die Untersuchung der Standsicherheit werden zwei Lastfälle angenommen:

- Lastfall 1: Rakete horizontal, Stütze nicht vorhanden, Wind in X-Richtung
- Lastfall 2: Rakete vertikal 15°, Azimutwinkel in der Winkelhalbierenden zwischen zwei Standbeinen, Wind in X – Richtung.

Standsicherheit Lastfall 1

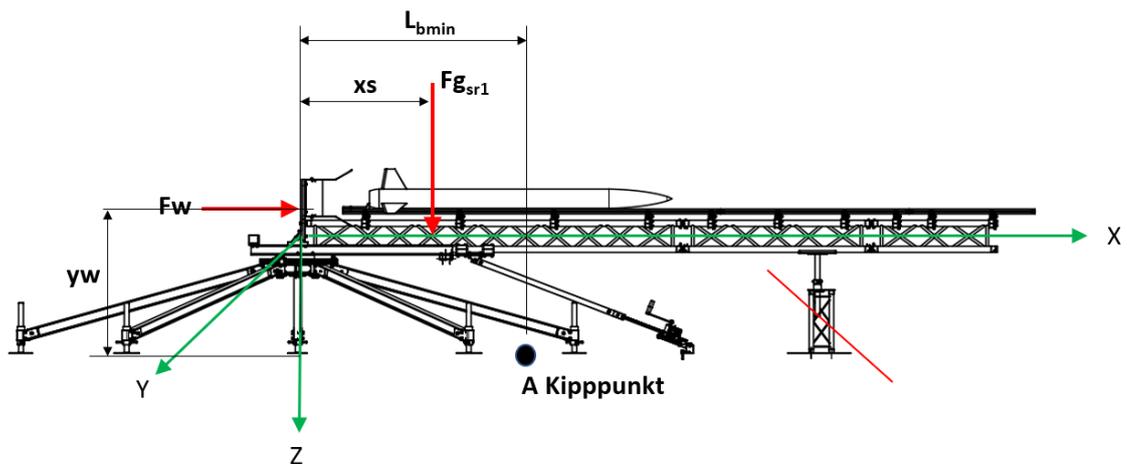


Abbildung 36 Standsicherheit Lastfall 1

Maximale abgestützte Länge	L_{bmax}	2233	mm	$2312 \text{ mm} * \cos(15^\circ)$ 2312 mm: Distanz Achse Azimut - Standfuss
Minimale abgestützte Länge (Winkelhalbierende zwischen zwei Standbeinen)	L_{bmin}	1806	mm	$L_{bmin} = \cos(\alpha_{sb}/2) * L_{bmax}$
Winkel zwischen zwei Standbeinen	α_{sb}	72	°	
Schwerpunkt der Startrampe	x_s	1006	mm	CAD
Schwerpunkt der Startrampe beim Einführen der Rakete	x_{sa}	1314	mm	CAD
Windkraft	F_w	223	N	$F_w = c_w * A_{pr} * 0.5 * \rho_m * v_{wmax}^2$
Windangriffsfläche	A_{pr}	1	m ²	Konservative Vereinfachung: Unterfläche Abstrahlplatte + Unterfläche Plattform unten
	y_w	1.2	m	
Gewichtskraft Startrampe ohne Stütze	F_{gsr1}	2892	N	$m_{sr1} * g$ $293 \text{ kg} * 9.81 \text{ m/s}^2$

$$\text{Standsicherheit } S1 = \frac{\Sigma M_{stand}}{\Sigma M_{kip}} = \frac{F_{gsr} * (L_{bmin} - x_{sa})}{F_w * y_w} = 6$$

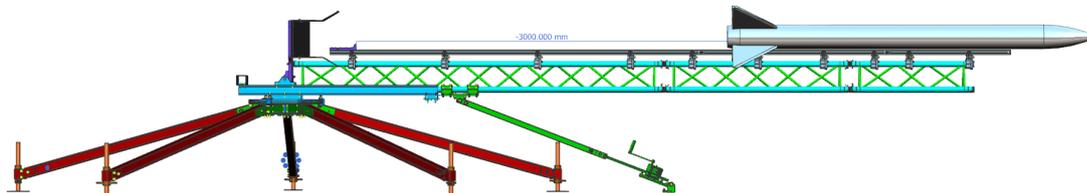


Abbildung 37 Standsicherheit Lastfall 1a beim Einschoben der Rakete

Standsicherheit Lastfall 2

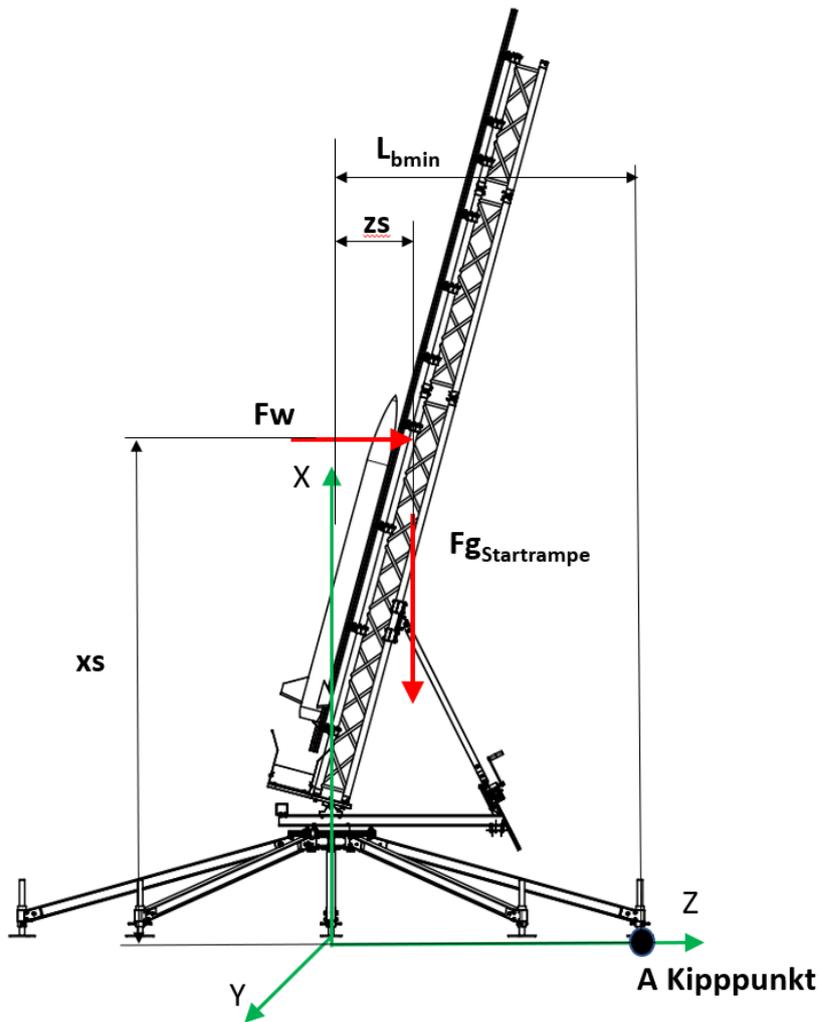


Abbildung 38 Standsicherheit Lastfall 2

Schwerpunkt der Startrampe	z_s	230	mm	CAD
Windkraft	F_w	244	N	Gemäss Tabelle 8
Windangriffshöhe	x_s	3085	m	Konservative Vereinfachung: Höhe Drehachse Elevation + Halbe Turmhöhe

$$Standsicherheit S2 = \frac{\Sigma M_{stand}}{\Sigma M_{kip}} = \frac{F_{gsr1} * (L_{bmin} - z_s)}{F_w * x_s} = 6.3$$

Mit einer Standsicherheit von 6 kann das Kippen der Startrampe ausgeschlossen werden.

5.3 Nachweis der kritischen Bauteile

5.3.1 Standbeine

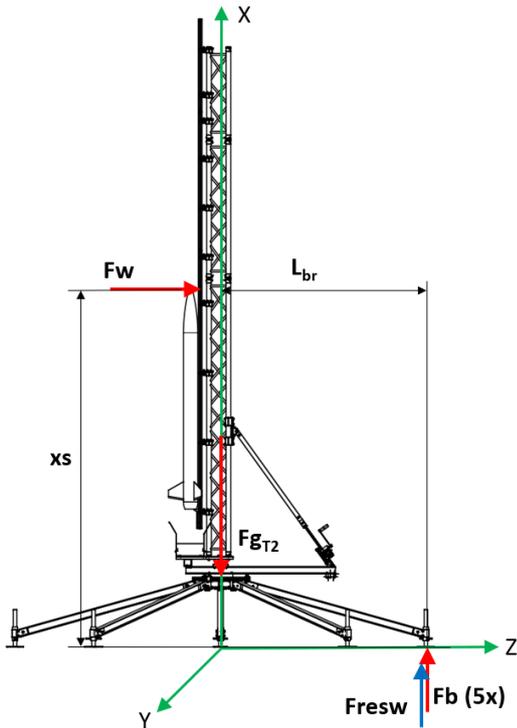


Abbildung 40 Standbeine Lastfall 1

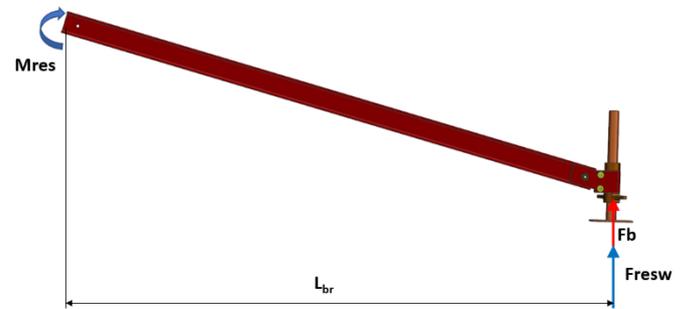


Abbildung 39 Auf den I-Träger wirkende Kräfte

Windkraft	F_w	244	N	Gemäss Tabelle 8
Windangriffshöhe	x_s	3085	mm	
Gewichtskraft Startrampe ohne Stütze und Standbeine	F_{gT2}	2100	N	$m_T \cdot g$ $214 \text{ kg} \cdot 9.81 \text{ m/s}^2$
Gewichtskraft pro Bein	F_b	420	N	
Projizierte Beinlänge	L_{br}	1932	mm	$L_{br} = L_b \cdot \cos(15)$
Windbedingte Reaktionskraft	F_{resw}	390	N	$F_{resw} = (F_w \cdot x_s) / l_{br}$
Biegemoment 1 auf Träger	M_{res}	1565	Nm	$M_{res} = (F_{resw} + F_b) \cdot l_{br}$

Standbeine Lastfall 2

Für diesen Lastfall werden die Lastannahmen von «Standsicherheit Lastfall 1a» übernommen.

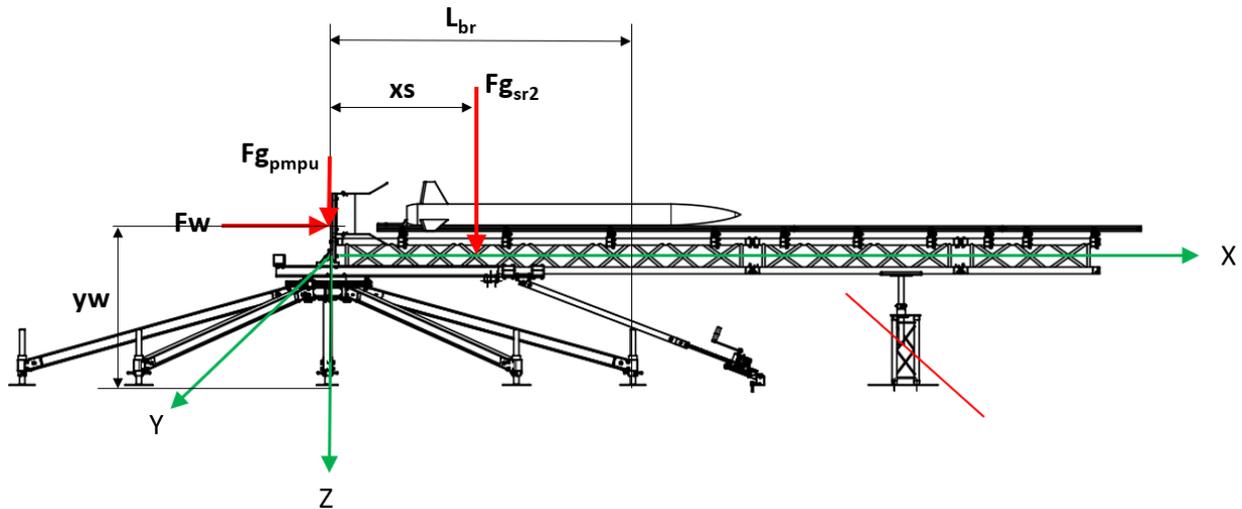


Abbildung 41 Standbeine Lastfall 2

Moment auf Plattform	M_p	2410	Nm	$F_w * y_w + F_{g_{sr2}} * x_s$
	$F_{g_{pmpu}}$	667	N	$(m_{pm} + m_{pu}) * g$
Biegemoment 2 auf Träger	M_{res2}	2670	Nm	$M_{res2} = M_p + F_{g_{pmpu}} / 5 * L_{br}$

Materialeigenschaften

I-Träger	R_e	150	N/mm ²	I-Träger 80x60, EN AW-6060 T66 [4]
Widerstandsmoment	W	31	Cm ³	[4]
Zulässige Spannung	σ_{zul}	225	N/mm ²	$\sigma_{zul} = R_e * n_{pl} = 150 \text{ N/mm}^2 * 1.5$ $n_{pl} \text{ gem TB 3-2b) [8]}$

$$\text{Maximale Biegespannung im Träger } \sigma_{b_{max}} = \frac{|M_b|}{W} = \frac{|M_{res}|}{W} = 86 \frac{N}{mm^2}$$

$$\text{Sicherheit gegen Fließen der Standbeine } S_e = \frac{\sigma_{zul}}{\sigma_{b_{max}}} = 2.6$$

Der I-Träger der Standbeine weist somit ausreichend Sicherheit gegen Fließen auf.

Passschrauben Standbein

Die Kräfte werden durch zwei Passschrauben vom der Gerüstspindel auf den Träger übertragen. Geprüft wird die Sicherheit gegen Abscherung sowie die Lochleibung. Vereinfacht wird angenommen, dass die Kraft durch nur eine der Zwei Schrauben übertragen wird.

Passschraube	R_e	1080	N/mm ²	7379-20-M16-60, Stahl brüniert, Festigkeitsklasse 12.9
Zulässige Abscherspannung	τ_{zul}	648	N/mm ²	$\tau_{zul} = 0.6 * R_e$ [9]

Passungsdurchmesser	d_{ps}	16	mm	
Kürzeste Auflagelänge	l_{min}	25	mm	
Beinadapter	R_e	250	N/mm ²	ENAW-6082 T6 [8]
Zulässiger Lochleibungsdruck	σ_{lzul}	375	N/mm ²	1.5 * R_e [10]

Abscherungsspannung auf die Passschraube $\tau_s = \frac{Q}{A_{ps}} = \frac{F_b + F_{resw}}{d_{ps}^2 * \frac{\pi}{4}} = 4 \frac{N}{mm^2}$

Sicherheit gegen Abscherung der Passschraube $S_s = \frac{\tau_{szul}}{\tau_s} = 160$

Lochleibung im Beinadapter

$$\sigma_l = \frac{F_b + F_{resw}}{l_{min} * d_{ps}} = 2 \frac{N}{mm^2}$$

Die Belastungen auf die Passschraubenverbindungen sind somit unbedenklich.

5.3.2 Klemme

Für die Belastung auf die Klemmen wird das Resultierende Moment M_{res2} aus dem Lastfall «Standbeine Lastfall 2» übernommen. Dies ist das grösste anzunehmende Moment, welches vom Turm auf «Plattform unten» übertragen wird.

Resultierendes Moment um Y	M_{res2}	2410	Nm	Gemäss Lastfall 2 Standbeine
Distanz Klemme	z_s	285	mm	CAD

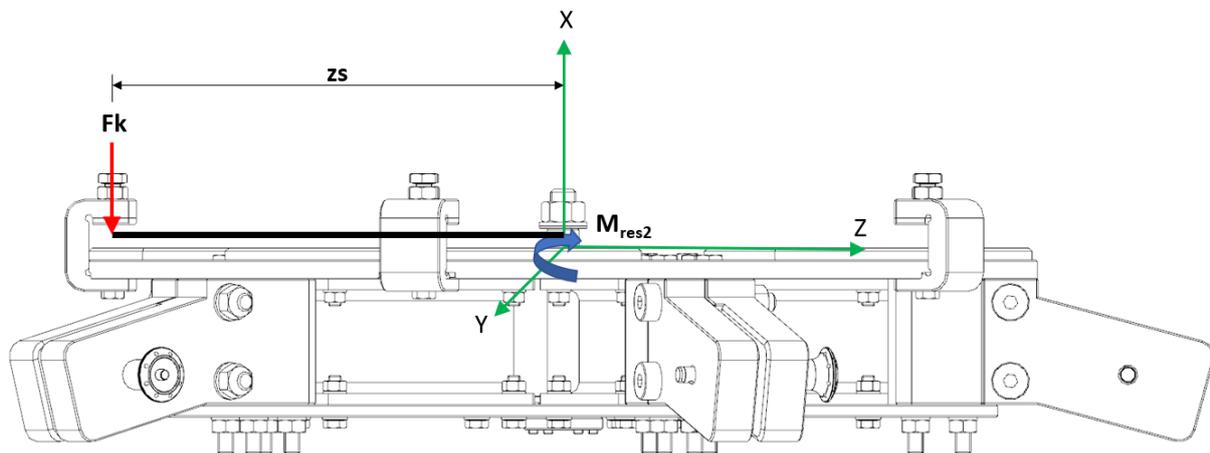


Abbildung 42 Kräfteplan zu Klemme

Vereinfachend wird angenommen, dass das Moment nur von einer einzelnen Klemme aufgenommen wird.

Resultierende Kraft in der Klemme $F_K = \frac{M_{res2}}{z_s} = 8457 \text{ N}$

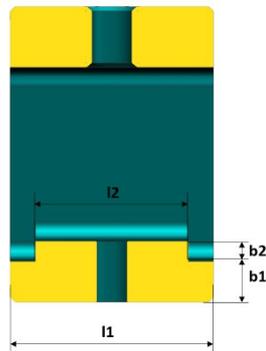


Abbildung 44 Kritischer Querschnitt Klemme

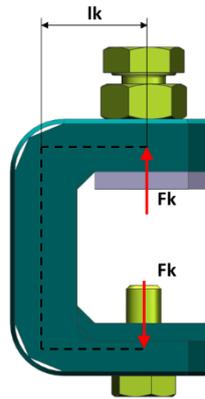


Abbildung 43 Kräfte auf Klemme

Distanz Krafteinleitung – Neutrale Achse	l_k	22.5	mm	CAD
Kritischer Querschnitt				Untere Klemmenfläche - Kerbe
Flächenmoment kritisch	I_{xkr}	7448	mm^4	
Schwerpunkt kritischer Querschnitt	z_{skr}	8.67	mm	$W_{kr} = 840 \text{ mm}^3$
Zugfestigkeit Klemme	R_e	500	N/mm^2	X20Cr13 [8]
Zulässige Zugspannung	σ_{zul}	750	N/mm^2	$\sigma_{zul} = \sigma_F = f_\sigma * n_{pl} * k_{kt} * R_e$ $\sigma_{zul} = 1 * 1.5 * 1 * 500$

Resultierendes Biegemoment $M_{bmax} = F_{resk} * l_k = 190 \text{ Nm}$

Maximale Biegespannung $\sigma_{bmax} = \frac{|M_{bmax}|}{I_{xkr}} * z_{skr} = 221 \frac{\text{N}}{\text{mm}^2}$

Daher die Handrechnungen Rechnung auf ungenauen Annahmen beruht und die Kerbspannung nicht berücksichtigt wird, wurde mit FEM eine weitere Verifikation durchgeführt.

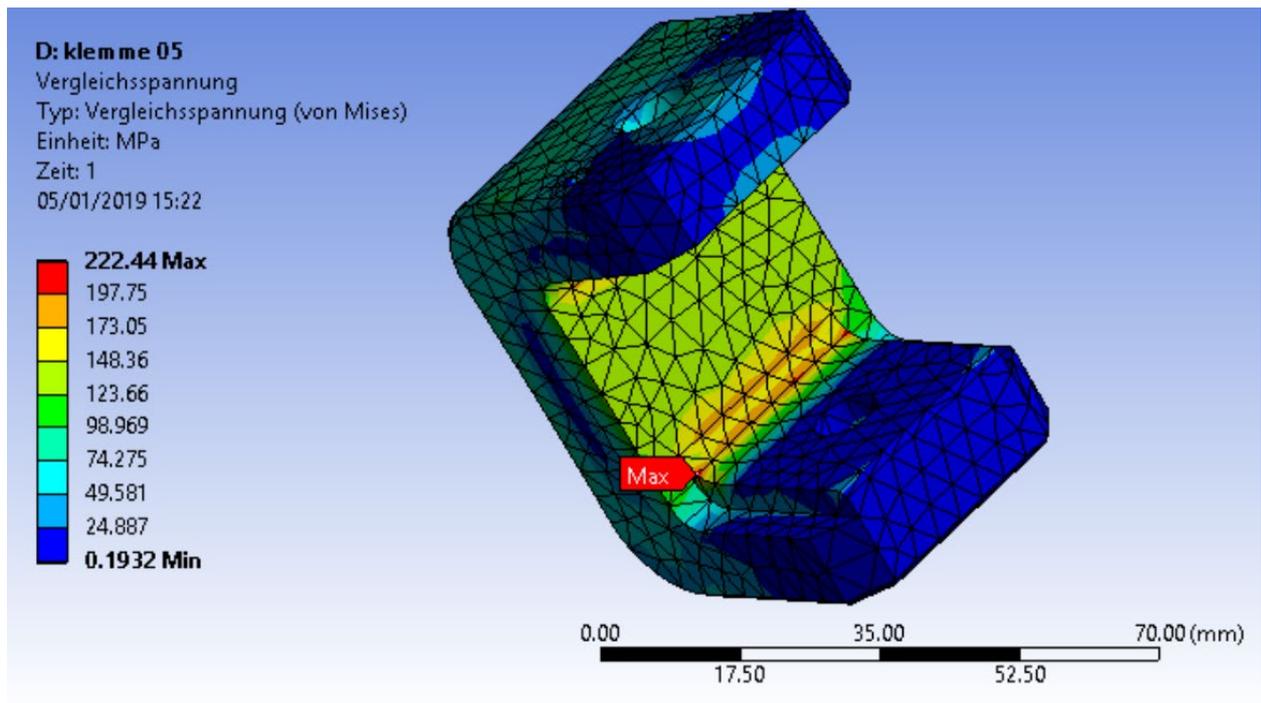


Abbildung 45 Auswertung der FEM Analyse Klemme

Die maximale Vergleichsspannung der FEM Analyse bekräftigt das Resultat der Handrechnung.

Sicherheit gegen Fließen der Klemme $S_F = \frac{\sigma_{zul}}{\sigma_{bmax}} = 3$

5.3.3 Plattform Mitte

Von Plattform Mitte werden zwei Elemente als kritisch betrachtet: Die I-Träger sowie die Befestigungsschrauben, welche die I-Träger mit der Drehplatte verbinden.

I-Träger

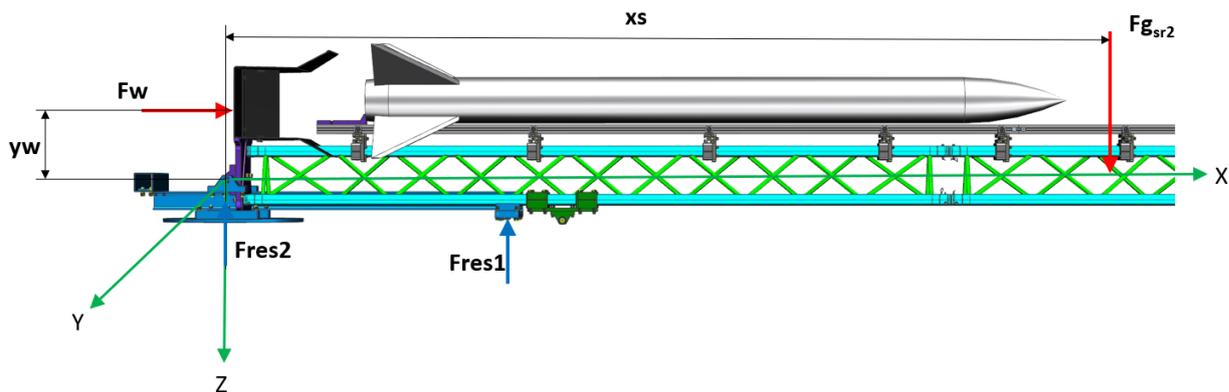


Abbildung 46 Lastfall Plattform Mitte

I-Träger	Re	150	N/mm ²	I-Träger 80x60, EN AW-6060 T66 [4]
Widerstandsmoment	W	31	cm ³	[4]
Zulässige Spannung	σ_{zul}	225	N/mm ²	$\sigma_{zul} = Re \cdot n_{pl} = 150 \text{ N/mm}^2 \cdot 1.5$ n_{pl} gem TB 3-2b) [8]

	F_{gsr3}	1680	N	$(m_{gT}+m_{gR}+m_{gpo}+m_{gAS}+m_{gpm}) * g$
	F_w	223	N	
	x_s	1460	mm	CAD
	y_w	400	mm	CAD
	l	1340	mm	CAD
	F_{res1}	1897	N	$F_{res1}=(F_w*y_w+F_{gsr3}*x_s) / l$

Maximales Biegemoment auf I-Träger $M_{bmax} = F_{res1} * l = 2542 Nm$

$$\sigma_{max} = \frac{|M_{bmax}|/2}{W} = \frac{|M_{bmax}|}{W} = 41 \frac{N}{mm^2}$$

Sicherheit gegen Fliesen I-Träger Plattform Mitte $S_e = \frac{\sigma_{zul}}{\sigma_{bmax}} = 5$

Befestigungsschrauben

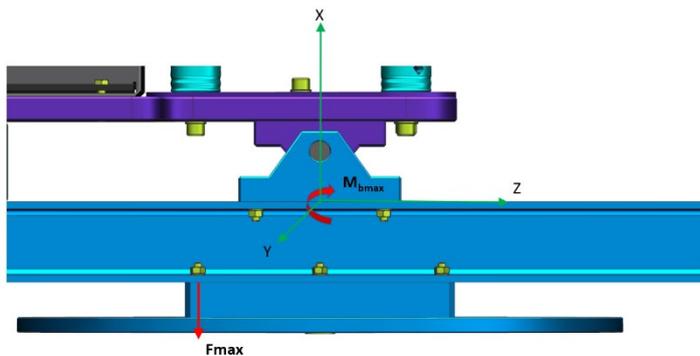


Abbildung 47 Anordnung der Befestigungsschrauben

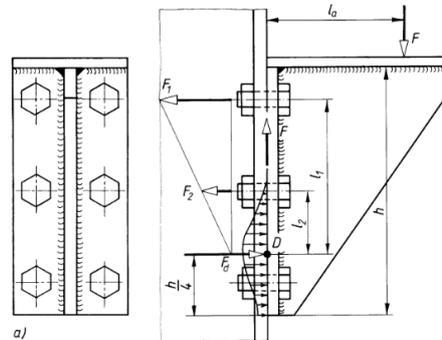


Abbildung 48 Grafik zu Formel 8.49 [10]

Die beiden I-Träger sind mit je sechs Befestigungsschrauben über einen Distanzhalter mit der Drehplatte verbunden. Die maximale Zugkraft auf eine Schraube wird gemäss Formel 8.49 aus Roloff Matek berechnet. Das Biegemoment wird vom Lastfall Plattform Mitte übernommen.

Maximales Biegemoment i	M_{bmax}	2542	Nm	Gemäss Lastfall Plattform Mitte
Schraube	R_e	640	N/mm^2	Zylinderschraube M8x60 8.8
Spannungsquerschnitt	A_s	36.6	mm^2	
Anziehdrehmoment	Ma	8000	Nm	
Schraubenvorspannkraft	F_{VM}	5890	N	$F_{VM}=MA/(0.17*d)$ [10]
Anzahl Schrauben	z	12		
Druckmittelpunkt	D	66.25	mm	
Abstand Schraube n von D	L_1	-53.75	mm	CAD
Abstand Schraube n von D	L_2	66.25	mm	CAD
Abstand Schraube n von D	L_3	53.75	mm	CAD

$$F_{max} = \frac{M_b}{z} \cdot \frac{l_1}{l_1^2 + l_2^2 + \dots + l_n^2} \tag{8.49}$$

M_b Biegemoment für die Verbindung: $M_b = F \cdot l_a$,
 z Anzahl der von der größten Zugkraft F_{max} beanspruchten Schrauben
 $l_1, l_2 \dots l_n$ Abstände der zugbeanspruchten Schrauben vom Druckmittelpunkt

Abbildung 49 Grösste Zugkraft in einer Schraube [10]

Die Schraubenbetriebskraft $F_{max} = 1120 \text{ N}$

Schraubenbetriebskraft $F_{BS} = F_{max} + F_{VM} = 7 \text{ kN} \ll F_{sp} 21 \text{ kN}$

Die Schraubenbetriebskraft ist somit kleiner als die zulässige Spannkraft der Schraube.

5.3.4 Achse Elevation

Die Achse Elevation wird auf Abscherung beansprucht.

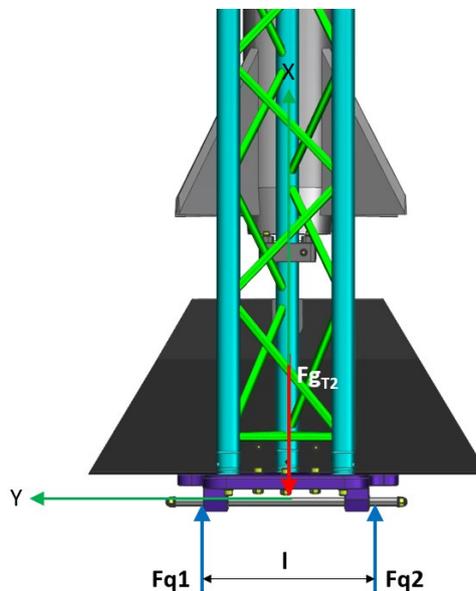


Abbildung 50 Lastannahmen für Achse Elevation

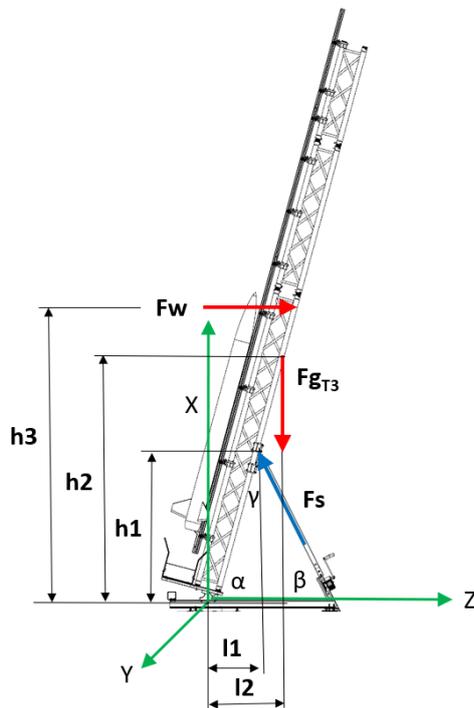
Gewichtskraft Aufbau	F_{gT2}	1333	N	$(m_T + m_R + m_{as} + m_{po} + m_{wf}) \cdot g$
Lagerabstand	l	350	mm	CAD
Kleinster Durchmesser Achse	d	20	mm	CAD
Querschnitt Achse	A_a	314	mm ²	
Zulässige Scherspannung Achse	R_e	500	N/mm ²	X39CrMo17-1 [8]
Zulässige Scherspannung	τ_{szul}	300	N/mm ²	$\tau_{szul} = 0.6 \cdot R_e$ [9]
Gleitlager				Iglidur X6SM-2023-15
Druckfestigkeit Gleitlager	σ_{dzul}	190	N/mm ²	[11]

Abscherspannung auf Achse $\tau_a = \frac{F_{gT2}}{A_a} = 2.2 \frac{N}{mm^2}$

Sicherheit gegen Abscherung $S_a = \frac{\tau_{azul}}{\tau_a} = 170$

Lochleibung im Gleitlager $\sigma_l = \frac{F_{gT2}}{d*b} = 2.3 \frac{N}{mm^2}$

Die kritischen Elemente von «Plattform oben» verfügen somit über ausreichende Sicherheiten.



5.3.5 Winkelfixierung

Für die Winkelfixierung wurden dieselben Lastannahmen wie für Lastfall 1 getroffen.

Abbildung 51 Lastfall Winkelfixierung

Gewichtskraft Aufbau	F_{gT3}	1343	N	$(m_T+m_R+m_{po}+m_{as}) * g$
Windkraft	F_w	244	N	Gemäss Tabelle 8
	l_1	367.4	mm	$h_1 * \cos(\alpha)$
	h_1	1419.6	mm	
	l_2	430	mm	$H_2 * \cos(\alpha)$
	h_2	1662	mm	$1721 * \sin(\alpha)$; 1721: xs CAD
	h_3	2657	mm	$2750 * \sin(\alpha)$; 2750 Windangriffshöhe gemäss Tabelle 8
Elevation		15	°	
Turmwinkel	α	75	°	
Winkel Stütze - Plattform	β	63.5	°	CAD
Stützwinkel	γ	41.5	°	CAD

Stützkraft $F_s = \frac{F_w * h_3 - F_{gT3} * l_2}{h_1 * \cos(\beta) + l_1 * \sin(\beta)} = 1270 \text{ N}$

Rohrprofil

Das Rohrprofil mit quadratischem Querschnitt wird rein druckbelastet. Nachgewiesen wird die Sicherheit gegen Knicken.

Rohr				Allega 45x45 t3 [4]
Streckgrenze	R _{p0.2}	160	N/mm ²	EN AW-6060
Flächenwiderstandsmoment	I _{rohr}	14.52	cm ⁴	
Länge	l	1200	mm	
Knicklänge	l _k	2400	mm	Annahme Knickfall 1

Zahnstange

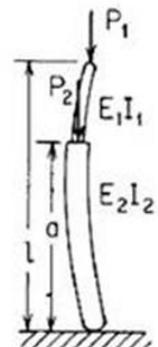
Zahnstange				Lock HZZ 53.0604
Streckgrenze	R _{p0.2}	430	N/mm ²	C45
Flächenwiderstandsmoment	I _{zs}	2.926	cm ⁴	
Länge ausgefahren	l	300	mm	
Zulässige Druckkraft	F _{zul}	6000	N	Lock [12]

Die Knickkraft der zusammengesetzten Pendelstütze wird mit der Formel aus Roark's formulas for stress and strain berechnet [13] Dabei wird von der grösstmöglichen Stützenlänge bei 0° Position ausgegangen.

$$P_1 = F_s; P_2 = 0; l = 1800 \text{ mm } a = 1255 \text{ mm } K_1 = 1.63$$

$$\text{Knickkraft } P' = K_1 * \frac{\pi^2 * E_1 * I_1}{l^2} = \mathbf{25.7 \text{ kN}}$$

Da die zulässige Druckkraft gemäss Hersteller auf 6 kN beschränkt ist, wird die Sicherheit mit dieser zulässigen Kraft berechnet. Aufgrund der berechneten Knickkraft scheint das Getriebe hier limitierend zu sein.



$$\text{Sicherheit gegen Fließen Handzahnstangengetriebe } S_f = \frac{F_{zul}}{F_s} = \mathbf{4.7}$$

Passschrauben

Passschraube	R _e	1080	N/mm ²	7379-20-M16-60, Stahl brüniert, Festigkeitsklasse 12.9
Zulässige Abscherspannung	τ _{zul}	648	N/mm ²	τ _{zul} =0.6*R _e [9]
Passungsdurchmesser	d _{ps}	16	mm	

$$\text{Abscherungsspannung auf die Passschraube } \tau_a = \frac{Q}{A_{ps}} = \frac{\frac{F_s}{2}}{d_{ps}^2 * \frac{\pi}{4}} = \mathbf{3.2 \frac{N}{mm^2}}$$

Alle kritischen Bauteile der Winkelfixierung halten den auftretenden Belastungen Stand.

5.3.6 Turm

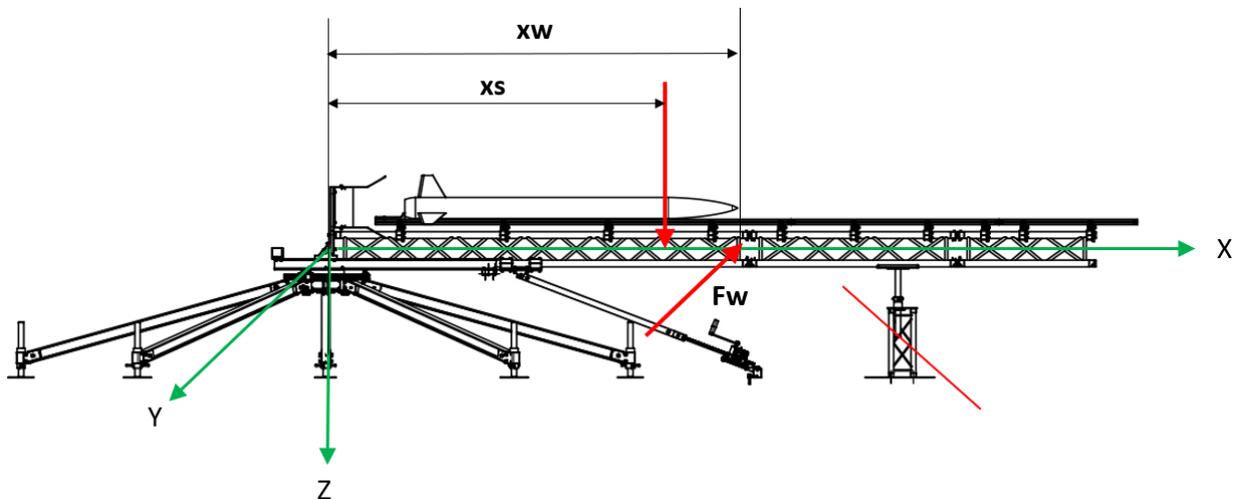
Der Turm hat zwei kritische Bauteile: Die Traversen dürfen in keinem der Lastfälle versagen und dürfen sich beim Raketenstart nur wenig elastisch verformen. Die Verbindung Turm – Führung muss die Führungsschiene bei allen auftretenden seitlichen Kräften in derselben Position an den Traversen halten.

Traversen

Für die Traversen werden zwei Lastfälle betrachtet: Rakete horizontal mit Wind in Y-Richtung, sowie Rakete 15° mit Wind aus X-Richtung.

Turm Lastfall 1

Für den horizontalen Fall wird angenommen, dass die Stütze und die Auflage auf «Plattform Mitte» nicht vorhanden sind und dadurch alle Momente am unteren Turmende aufgenommen werden. Das geringe Torsionsmoment um X wird vernachlässigt.



Gewichtskraft Aufbau	F_{gT4}	912	N	$(m_T+m_R) \cdot g$
Windkraft	F_w	244	N	Tabelle 8
	x_s	3200	mm	Rakete beim Einführen vorne in der führung $x_s = \frac{m_T \cdot 2.75m + m_R \cdot 4m}{m_T + m_R}$
	M_{resY}	2920	Nm	$M_{resY} = F_{gT4} \cdot x_s$
	M_{resZ}	781	Nm	$M_{resZ} = F_w \cdot x_s$

Traverse Global Truss F33				EN-AW 6082 T6 [14]
	R _{p0.2}	260	N/mm ²	
	e _h	240	mm	
	e _v	208	mm	$z_1=z_2=e_v/3 \quad y_1=y_2=e_h/2 \quad z_3=2/3e_v$
	I _y	895.98	cm ⁴	
	I _z	894.96	cm ⁴	
	R _{p0.2haz}	125	N/mm ²	

Mit der Formel für schiefe Biegung wird die Spannung in den Gurtrohren berechnet. Die grösste Spannung ergibt sich dabei für das obere Gurtrohr.

$$\sigma_3 = \frac{M_{by}}{I_y} * z + \frac{M_{bz}}{I_z} * y = 45.2 \frac{N}{mm^2}$$

Die schwächste Stelle der Traversen ist die Schweißnaht, die die Gurtrohre mit den Kupplungselementen verbindet. Deren 0.2% Dehngrenze ist mit 125 N/mm² definiert [6].

Sicherheit gegen plastische Verformung $S = \frac{R_{p0.2haz}}{\sigma_3} = 2.7$

Turm Lastfall 2

Für den Lastfall Rakete 15° wird dasselbe Modell wie beim «Lastfall Winkelfixierung» angenommen. Weil die Abstrahlplatte und die Plattform oben für die Belastung des Turms nicht relevant sind, ergeben sich dabei eine andere Gewichtskraft und F_{gT4} (912 N) und durch den höheren Schwerpunkt ein anderes Mass für l₂ (712 mm).

$$M_{res} = F_w * x_s + F_{gT4} * l_2 = 1328 Nm$$

Das resultierende Moment ist erheblich kleiner als im ersten Lastfall und für die Traversen somit unbedenklich.

Zur Sicherheit wurde noch die Verformung der Traversen bei Lastfall zwei berechnet, um den Vergleich mit einem bestehenden System aufstellen zu können.

Belastungsfall	Gleichung der Biegelinie	Durchbiegung	Neigungswinkel
	$w(x) = \frac{Ml^2}{2EI_y} \left[1 - 2\frac{x}{l} + \left(\frac{x}{l}\right)^2 \right]$	$f = \frac{Ml^2}{2EI_y}$	$\alpha = \frac{Ml}{EI_y}$

Abbildung 52 Standardlastfall zur Berechnung der Biegelinie [3]

Mit $E = 70000 \text{ N/mm}^2$, M_{res} gemäss Lastfall 2 und der Vereinfachung einer einzelnen Traverse von 5500 mm Länge ergibt sich eine Durchbiegung f am Ende von **32 mm**.

Dieser Wert kann mit dem Profil verglichen werden, das von ARGOS beim Start der Modellrakete Ariane IV (Bauhöhe 4.5 m) verwendet wurde. Es handelt sich dabei um ein Stahlquadratrohr 90x90 mm, $t = 4 \text{ mm}$, $E = 210000 \text{ N/mm}^2$, $I_y = 166 \text{ cm}^4$. [Schätzung Jürg Thüning]. Dieses würde sich bei derselben Belastung **57 mm** verformen. Im direkten Vergleich mit einem bestehenden System schneidet die Traverse F33 somit besser ab.

Verbindung Turm – Führung

Für den sicheren Betrieb der Startrampe, muss gewährleistet sein, dass die Führung ihre Position nicht verändern kann. Dafür werden die laterale Windkraft und das Reibmoment der Verbindungen verglichen.

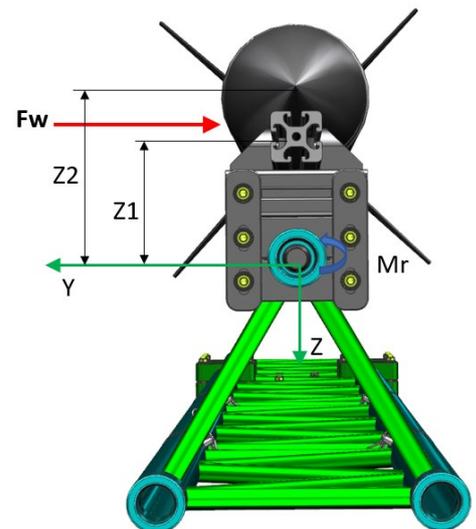


Abbildung 53 Lastfall Verbindung Turm - Führung

Windkraft auf Führung	F_{wF}	40	N	Tabelle 8
Windkraft auf Rakete	F_{wR}	68	N	Tabelle 8
	Z_1	95	mm	CAD
	Z_2	220	mm	CAD
Reibungskoeffizient	μ_r	1.3		Haftreibung trocken [8]
Schraubenvorspannkraft	F_v		N	2 Schrauben pro Verbindung, Minimum 3 Verbindungen pro Führung
Reibmoment	M_r		N	$R = \text{Gurtrohrradius} = 25\text{mm}$
Anzahl Verbindungen pro Führungsschiene	n	3		

Aus $M_r = 2 * F_v * \mu * r$ und $M_w = F_{wF} * Z_1 + F_{wR} * Z_2$ ergibt sich die erforderliche Vorspannkraft pro Schraube.

$F_v = \frac{F_{wF} * Z_1 + F_{wR} * Z_2}{n * 2 * \mu_r * R} = 96.2 \text{ N}$ Diese Betriebskraft ist durch die Vorspannkraft eingesetzten M8 Zylinderschrauben gegeben.

5.4 Betrachtung der Resultate

Alle untersuchten Bauteile erfüllen die geforderte Mindestsicherheit von 2. Die Startrampe hält somit allen Belastungen bei allen angenommenen Betriebsfällen stand.

6 Verifikation der Anforderungen

In diesem Kapitel wird die erarbeitete Lösung mit den Anforderungen aus Kapitel 2 verglichen. Die vollständige Anforderungsliste befindet sich im Anhang 1.

6.1 Nicht erfüllte Anforderungen

- Anforderungen #120, #130, #140 - Vorrichtungen zur Videodokumentation
Aus zeitlichen Gründen konnten keine Vorrichtungen zur Videodokumentation entwickelt werden. Dies wird im Kapitel 7.2, Ausblick für den weiteren Projektverlauf festgehalten und kann vor der Herstellung der Startrampe noch konstruiert werden.
- Anforderung #260 - Einzelteile in EU Palette lager- & transportierbar
Diese Anforderung erfordert, dass alle Baugruppen und Einzelteile kleiner als 1.2 x 0.8 m sind. Dies hätte die Komplexität der Startrampe erhöht und den Montageaufwand vervielfacht, weshalb darauf verzichtet wurde, diese Dimensionen einzuhalten.
- Anforderung #270 – Gewicht der Rampe, keine am Stück transportierte Baugruppe schwerer als 20 kg.
Wie in Tabelle 9 ersichtlich ist, sind vier Baugruppen schwerer als die geforderten 20 kg. Der Turm zählt nicht dazu, da dieser nicht am Stück transportiert wird. Während des Entwicklungsprozesses, wurde bemerkt, dass einige Baugruppen schwerer als 20 kg werden könnten. Nach Rücksprache mit ARIS steht Langlebigkeit und Funktionserfüllung im Vordergrund, weshalb diese schwereren Baugruppen akzeptiert werden. Im weiteren Projektverlauf wird vermerkt, dass einige Bauteile leichter gebaut werden können.

6.2 Nicht geprüfte Anforderungen

- Anforderung #30 - Startrampe ist einfach zu reinigen
Bei der Gestaltung wurde darauf geachtet, einfache Formen zu verwenden, wo die Funktionalität dies zulässt. Diese Anforderung kann erst nach einem ersten erfolgten Start verifiziert werden.
- Anforderungen #100, #110 - Die Startrampe kann innert 30' auf oder abgebaut werden
Diese Anforderung kann erst mit der hergestellten Startrampe verifiziert werden.
- Anforderung #250 - Maximale Transportdimensionen der Rampe
Die maximalen Dimensionen für den Transport waren seitens ARIS bis Projektende nicht bekannt und konnten somit nicht verifiziert werden.
- Anforderung #310 Keine Brandspuren am Boden
Es wurde eine Abstrahlplatte zum Schutz der Startplattform und der Umgebung entwickelt. Deren Funktionalität lässt sich erst nach einem ersten Start verifizieren.

7 Zusammenfassung und Ausblick

7.1 Fazit

Im Rahmen dieses Projekts wurde ein innovatives Konzept einer Startrampe für Forschungsraketen entwickelt, das sich durch zwei wesentliche Punkte von bestehenden Konzepten abhebt:

- Die Führungslänge ist modular. Somit können mit derselben Startrampe Raketen der Level 1 bis 3 gestartet werden.
- Um stets gegen den Wind starten zu können, ist die Startrichtung 360° in Azimut einstellbar.

Zu Projektbeginn wurden zusammen mit dem Team von ARIS die Anforderungen an eine neue Startrampe definiert. Während der Recherchephase wurden die Werkstätten von ARIS und ARGOS besucht, um ein umfassendes Bild der Thematik zu erhalten. Aus Gesprächen mit Experten wie Herrn Jürg Thürig, dem Präsidenten von ARGOS, konnten wertvolle Erkenntnisse für die Entwicklung gewonnen werden.

Die Startrampe wurde wortwörtlich – von oben nach unten designt, um für die Vordimensionierung bereits Kenntnisse über die oberen Bauteile zu haben.

Alle Bauteile wurden mit CAD designt und in einem Baugruppenmodell zusammengefügt, um die geforderten Funktionalitäten bereits im frühen Entwicklungsstadium überprüfen zu können. Entstanden ist das Konzept einer Startrampe, die sich durch Ihre Einfachheit in der Bedienung auszeichnet. Von dem entstandenen Modell wurden die kritischen Bauteile definiert. Mit Handrechnungen und FEM wurden für alle Bauteile ausreichende Sicherheiten nachgewiesen.

Während dem Entwicklungsprozess hat sich gezeigt, dass die wahre Schwierigkeit beim Entwickeln nicht in der Umsetzung komplexer Funktionen liegt, sondern darin, die Lösungen möglichst einfach zu gestalten. Dank der stetigen Unterstützung des Projektbetreuers, Herrn Székely, der konstruktiven Zusammenarbeit mit Frau Anna Kiener von ARIS und den wertvollen Hinweisen aus der Praxis von Herrn Jürg Thürig von Argos konnte eine solide, innovative Lösung erarbeitet werden.

Das Projekt Startrampe Aris kann somit erfolgreich in die nächste Phase übergehen. In einem nächsten Schritt folgt das Herstellen der Einzelteile und die Montage, damit hoffentlich bereits im Frühling 2019 erste Raketenstarts durchgeführt werden können.

7.2 Ausblick für den weiteren Projektverlauf

Bevor die Fertigung eingeleitet wird, soll das Konzept der Startrampe verfeinert und perfektioniert werden. Dabei sollte nicht davor gescheut werden, bereits festgelegte Konzepte kritisch zu hinterfragen und allenfalls zu verbessern.

Folgende Funktionen und Ideen wurden während des laufenden Projektes nicht abgeschlossen, oder sind währenddessen erst aufgetaucht und werden zur weiteren Entwicklung empfohlen:

- Nach dem Design Review mit ARIS werden die Einzelteilzeichnungen gemacht. Zuvor sollen die Werkstücke und geeignete Fertigungsverfahren mit Herrn Müller, maxon motor, besprochen werden.
- Die Anbindungen für Videokameras konnten im laufenden Projekt nicht realisiert werden.
- Einige Bauteile sind überdimensioniert und können unter diesem Aspekt neugestaltet werden. Mit FEM sind auch komplexere Bauteile leicht zu untersuchen und optimieren. Zu beachten gilt es jedoch, dass alle Veränderungen beim Gewicht auch die Standsicherheit beeinflussen.
- Für die «Letzte Meile» wäre ein Wagen hilfreich, mit dem die Baugruppen aufs Feld gebracht werden können. «Plattform Mitte» könnte mit einfachen Modifikationen auch als Schubkarre verwendet werden.
- Für die Raketenstarts muss noch die Zündvorrichtung installiert werden. Bei Gelegenheit könnte die ganze Startrampe mit Sensorik ausgestattet werden, um konstant Daten wie Elevation, Azimut, Windgeschwindigkeit oder Vibrationen, auslesen zu können.

Quellen

Literaturverzeichnis

- [1] D. Gerrard, „Rocket Photography,“ 2014. [Online]. Available: <http://www.rocketryphotography.com/>. [Zugriff am 1 10 2018].
- [2] „ARGOS Advanced Rocketry Group Of Switzerland,“ [Online]. Available: <https://www.argoshpr.ch/j3/>. [Zugriff am 2 10 2018].
- [3] K.-H. Grote und H. Dubbel, Dubbel - Taschenbuch für den Maschinenbau, Vieweg + Teubner, 2014.
- [4] ALLEGA, „ALLEGA Sortiment Stangen | Profile | Rohre,“ ALLEGA GmbH, Niederglatt, 2018.
- [5] L. Böswirth, Technische Strömungslehre, Wiesbaden: Vieweg + Teubner, 2010.
- [6] Büro für Tragwerksbau und Ingenieurbau vom Felde + Keppler GmbH & Co. KG, „Kurzfassung der statischen Berechnung F33,“ Aachen, 2014.
- [7] „item Industrietechnik Aluminiumprofile & Linearführungen,“ item, [Online]. Available: <https://www.item24.ch/de/>. [Zugriff am 11 10 2018].
- [8] D.-I. H. Wittel, P. D.-I. D. Janasch, D.-I. D. Muhs und P. D.-I. J. Vossiek, Roloff / Matek Maschinenelemente Tabellenbuch, Springer vieweg, 2013.
- [9] G. Niemann und H. Winter, „Maschinenelemente Band 1,“ Springer, 2005.
- [10] D.-I. H. Wittel, P. D.-I. D. Janasch, D.-I. D. Muhs und P. D.-I. J. Vossiek, Roloff / Matek Maschinenelemente, Wiesbaden: Springer Vieweg, 2013.
- [11] igus, „igus plastics for longer life,“ igus, [Online]. Available: <https://www.igus.ch/info/news-2009-5432?L=de&sop=1>. [Zugriff am 24 12 2018].
- [12] Lock, „07_Handantriebe_DE_01_HZW_53,“ Ertingen, 2018.
- [13] W. C. Young, R. G. Budynas und A. Sadegh, Roark's Formulas for Stress and Strain, mcgraw-hill education ltd, 2002.
- [14] „GlobalTruss,“ [Online]. Available: <https://globaltruss.de/>. [Zugriff am 5 10 2018].
- [15] P. R. Bärtsch, „Skript Mechanik & Festigkeit Festigkeitslehre,“ Horw, 2017.
- [16] A. Böge, „Taschenbuch Maschinenbau,“ Vieweg + Teubner, Wiesbaden, 2011.
- [17] „aris-space.ch,“ [Online]. Available: <https://aris-space.ch/>. [Zugriff am 25 09 2018].

- [18] „elektro-material.ch,“ [Online]. Available: <https://www.elektro-material.ch/de/shop/blitzschutz-ergaenzungsset-mit-1-seil-75mm-a-3m-und-klemmen/p/va-754079#tab-zubehoer>. [Zugriff am 02 01 2019].
- [19] „hornbach.de,“ [Online]. Available: <https://www.hornbach.de/shop/Kreuzerder-feuerverzinkt-1500-mm/7182797/artikel.html#artikeldetails>. [Zugriff am 02 01 2019].

Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1 Vorgehen beim Entwickeln und Konstruieren [3]	6
Abbildung 2 Startrampe von Rocket Photography [1]	12
Abbildung 3 Auswahl von Startrampen bei ARGOS [2]	13
Abbildung 4 Startrampe horizontal	24
Abbildung 5 Startrampe in 15° Position mit den Achsen Azimut und Elevation	24
Abbildung 6 Baugruppe Turm	26
Abbildung 7 Traverse F33 mit zugehörigen Verbindungselementen	26
Abbildung 8 Führungsprofil montiert auf Traverse	27
Abbildung 9 Verbindungsstellen der Traversen und Führungen	27
Abbildung 10 Item Stossverbinder	27
Abbildung 11 Verbindung Turm - Stütze	28
Abbildung 12 Verbindung Turm – Stütze	28
Abbildung 13 Anschlag unten	29
Abbildung 14 Konzept bei RP [17]	29
Abbildung 15 Abstrahlplatte	29
Abbildung 16 Abgasstrahl Level 1 Rakete [2]	30
Abbildung 17 Abgasstrahl TELL [17]	30
Abbildung 18 Plattform	30
Abbildung 19 Plattform oben	31
Abbildung 20 Plattform Mitte	31
Abbildung 21 Links: Anschlag Winkelfixierung, rechts: Anschlag Plattform oben	32
Abbildung 22 Plattform unten montiert und in Explosionsansicht	32
Abbildung 23 Explosionsansicht des Beinadapters	33
Abbildung 24 Klemme	33
Abbildung 25 Anordnung Beine	33
Abbildung 26 Standbein mit Fuss	33
Abbildung 27 Stütze mit Turm und Plattform Mitte	34
Abbildung 28 Explosionsansicht der Pendelstütze	35

Abbildung 29 Lock HZW53	35
Abbildung 30 Lagerbock der Winkelfixierung	36
Abbildung 31 Stütze	37
Abbildung 32 Stütze beim Zusammenbau der Startrampe	37
Abbildung 33 Kreuzerder [19]	37
Abbildung 34 Blitzschutz-Set [18]	37
Abbildung 35 Als kritisch angenommene Bauteile	38
Abbildung 36 Standsicherheit Lastfall 1	40
Abbildung 37 Standsicherheit Lastfall 1a beim Einschieben der Rakete	41
Abbildung 38 Standsicherheit Lastfall 2	42
Abbildung 39 Auf den I-Träger wirkende Kräfte	43
Abbildung 40 Standbeine Lastfall 1	43
Abbildung 41 Standbeine Lastfall 2	44
Abbildung 42 Kräfteplan zu Klemme.....	45
Abbildung 43 Kräfte auf Klemme	46
Abbildung 44 Kritischer Querschnitt Klemme.....	46
Abbildung 45 Auswertung der FEM Analyse Klemme.....	47
Abbildung 46 Lastfall Plattform Mitte.....	47
Abbildung 47 Anordnung der Befestigungsschrauben	48
Abbildung 48 Grafik zu Formel 8.49 [10]	48
Abbildung 49 Grösste Zugkraft in einer Schraube [10]	49
Abbildung 50 Lastannahmen für Achse Elevation	49
Abbildung 51 Lastfall Winkelfixierung.....	50
Abbildung 52 Standartlastfall zur Berechnung der Biegelinie [3]	53
Abbildung 53 Lastfall Verbindung Turm - Führung	54

Tabellenverzeichnis

Tabelle 1 Betriebsfälle.....	8
Tabelle 2 Risiken bei Standardbetriebsfällen.....	9
Tabelle 3 Risikomatrix vor Risikominderung.....	9
Tabelle 4 Massnahmen zur Risikominderung	10
Tabelle 5 Risikomatrix nach Risikominimierung	11
Tabelle 6 Bewertung der Lösungskombinationen	22
Tabelle 7 Liste der als kritisch angenommenen Bauteile.....	38
Tabelle 8 Daten und Vereinfachungen für Lastfälle.....	39

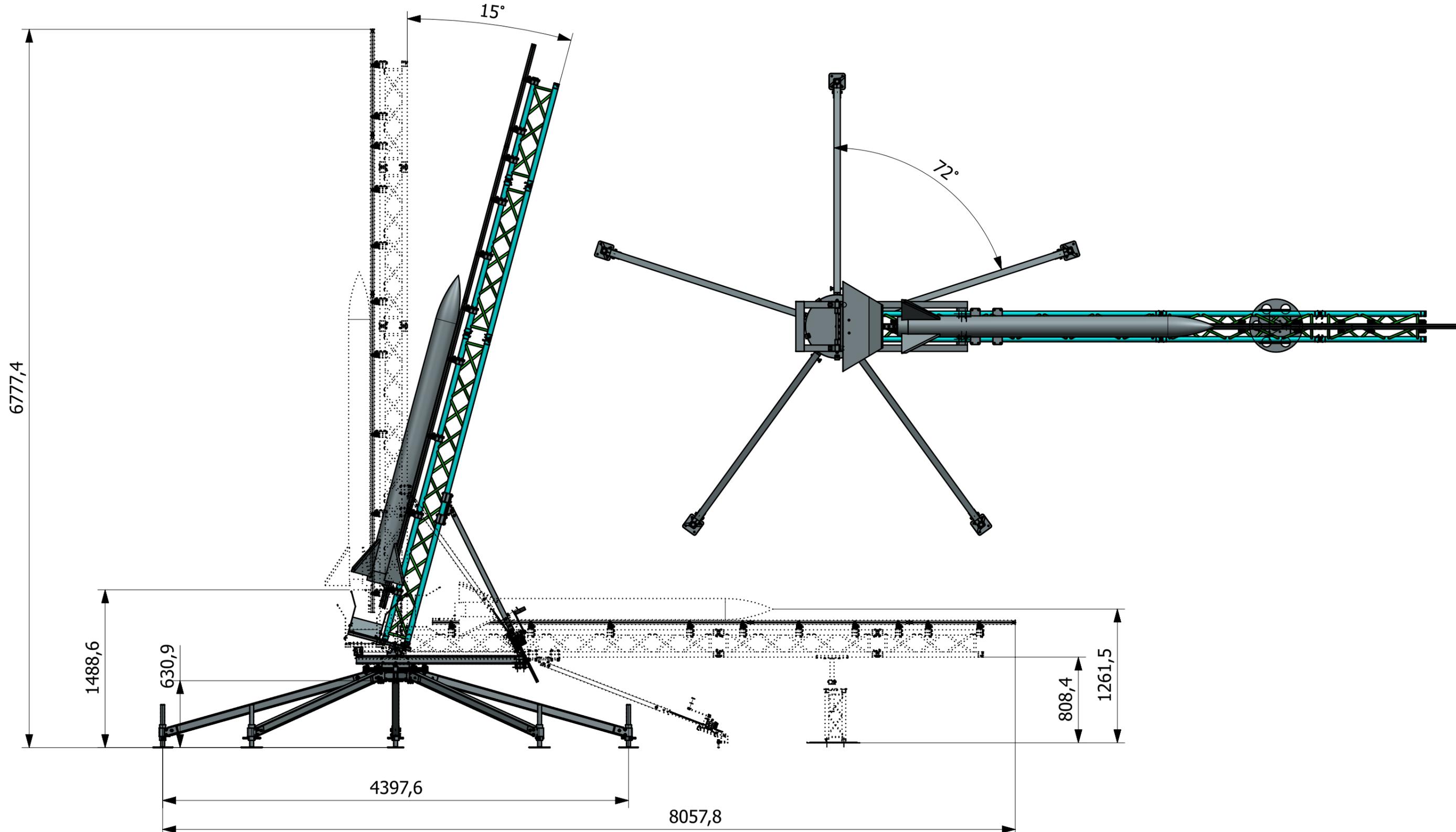
Anhang 1 Anforderungskatalog

Anforderungskatalog Startrampe ARIS

#	Anforderung	Werte	Pflicht / Wunsch / Fixwert	Anforderungsart	Bemerkung	Verifikation
Funktionelle Anforderungen						
10	Rakete wird bei Aufbau und Start nicht beschädigt		P	Funktion		Erfüllt
20	Startrampe ist wiederverwendbar		P	Funktion		Erfüllt
30	Startrampe ist einfach zu reinigen		W	Funktion		Nicht geprüft
40	Startrampe ist korrosionsbeständig wo nötig		P	Eigenschaft	HCL Ausstoss der Feststoffmotoren, Alu oberflächenbehandelt sein	Erfüllt
50	Rakete kann horizontal in die Führung eingefahren werden		P	Funktion		Erfüllt
60	Rakete befindet sich in horizontaler Positon auf günstiger Arbeitshöhe	0.7 m - 1.5 m	W	Funktion		Erfüllt
70	Die Rakete kann mit der Führung aufgerichtet werden		P	Funktion		Erfüllt
80	Die Führung ist vertikal einstellbar (Elevation)	0°-15°	P	Funktion	0° ist vertikal	Erfüllt
90	Die Ausrichtung der Rakete ist drehbar (Azimut)	>90°	P	Funktion	Zur Anpassung an ändernde Windverhältnisse, gem Hr Thüring sind 90° ausreichend	Erfüllt
100	Die Startrampe kann innert 30' aufgebaut werden		W	Funktion	Durch zwei Personen	Nicht geprüft
110	Die Startrampe kann innert 30' abgebaut werden		W	Funktion	Durch zwei Personen	Nicht geprüft
120	Vorrichtungen zur Videodokumentation		P	Funktion		Nicht erfüllt
130	Mitgeführte Kamera		P	Funktion		Nicht erfüllt
140	Stationäre Kamera		P	Funktion		Nicht erfüllt
Dimensionen & Grössen						
150	Maximale Länge der Rakete	3 m	F	Randbedingung		Erfüllt
160	Maximaler Durchmesser der Rakete	200 mm	F	Randbedingung	minimal 100mm	Erfüllt
170	Maximales Gewicht der Rakete	30 kg	F	Randbedingung		Erfüllt
180	Anzahl Finnen	3 oder 4	F	Randbedingung	Aktuell 3 Finnen, Start mit 4 muss möglich sein	Erfüllt
190	Position der Rail Guides an der Rakete	Winkelhalbieren zwischen zwei F	F	Randbedingung		Erfüllt
200	Rampenabgangsgeschwindigkeit der Rakete	>15 m/s	F	Randbedingung		Randbedingung
204	Maximale Schubkraft beim Start	3000 N			Tell: M2400	Randbedingung
205	Durchmesser und Länge des Abgasstrahls	~ Raketendurchmesser, ~ 1 m			Gemäss Bildmaterial	Randbedingung
210	Länge der Finnen	240 mm	F	Randbedingung	Wie Tell *1.5	Erfüllt
220	Führungsprofil	Item Profil 6 / Item Profil 8	P	Randbedingung	Gemäss alexschm_US_Rail_Assy_dwg_1-1.pdf	Erfüllt
230	Führungslänge maximal	17 ft (5.2 m)	P	Randbedingung	Vorschlag Hr. Thüring: 4.5m	Erfüllt
240	Führungslänge modular	2 m / 3.5 m / 5.2 m	W	Randbedingung		Erfüllt
250	Maximale Transportdimensionen der Rampe		?	Randbedingung	Transport in Anhänger. Masse anhängen unbekannt.	Nicht geprüft
260	Einzelteile in EU Palette Lager- & Transportierbar	1.2 m x 0.8 m	W	Randbedingung		Nicht erfüllt
270	Gewicht der Rampe	Keine transportierte BG > 20 kg	W	Randbedingung	Einzelne Elemente müssen von einer Person getragen werden können	Nicht erfüllt
Umwelt & Sicherheit						
280	Einsatztemperaturen	- 5°C bis + 35°	P	Randbedingung	Einsatzstandorte: Kaltbrunn, Val-de-Ruz	Erfüllt
290	Untergrund Rampe	Acker, Asphalt	P	Randbedingung		Erfüllt
300	Befestigungsmöglichkeiten am Boden	Keine	P	Randbedingung	Bohrungen für Verankerungen werden vorgesehen, aber nicht zur Standsicherheit gezählt	Erfüllt
310	Keine Brandspuren am Boden		P	Funktion	Strahlabweiser ARGOS: Stahl 6 mm	Nicht geprüft
320	Elektrische Erdung		P	Funktion		Erfüllt
330	Beim Aufbau und Betrieb der Rampe werden keine Personen verletzt		P	Randbedingung		Erfüllt
340	Standsicherheit		P	Funktion	Die Rampe kann bei ordnungsgemäsem Betrieb und vorhersehbaren Szenarien nicht kippen	Erfüllt
350	Maximale Windstärke für Start	30 km/h	P	Randbedingung		Randbedingung
360	Maximale Windstärke für Rakete vertikal	40 km/h	P	Randbedingung	Beaufort 6	Randbedingung
Übrige Bedinungen						
370	Budget für Einkaufsteile				Keine Budgetvorgabe	
380	Fertigung				maxon motor, Kontakt: Thomas.Mueller@maxonmotor.com	

Anhang 2 Baugruppenzeichnungen

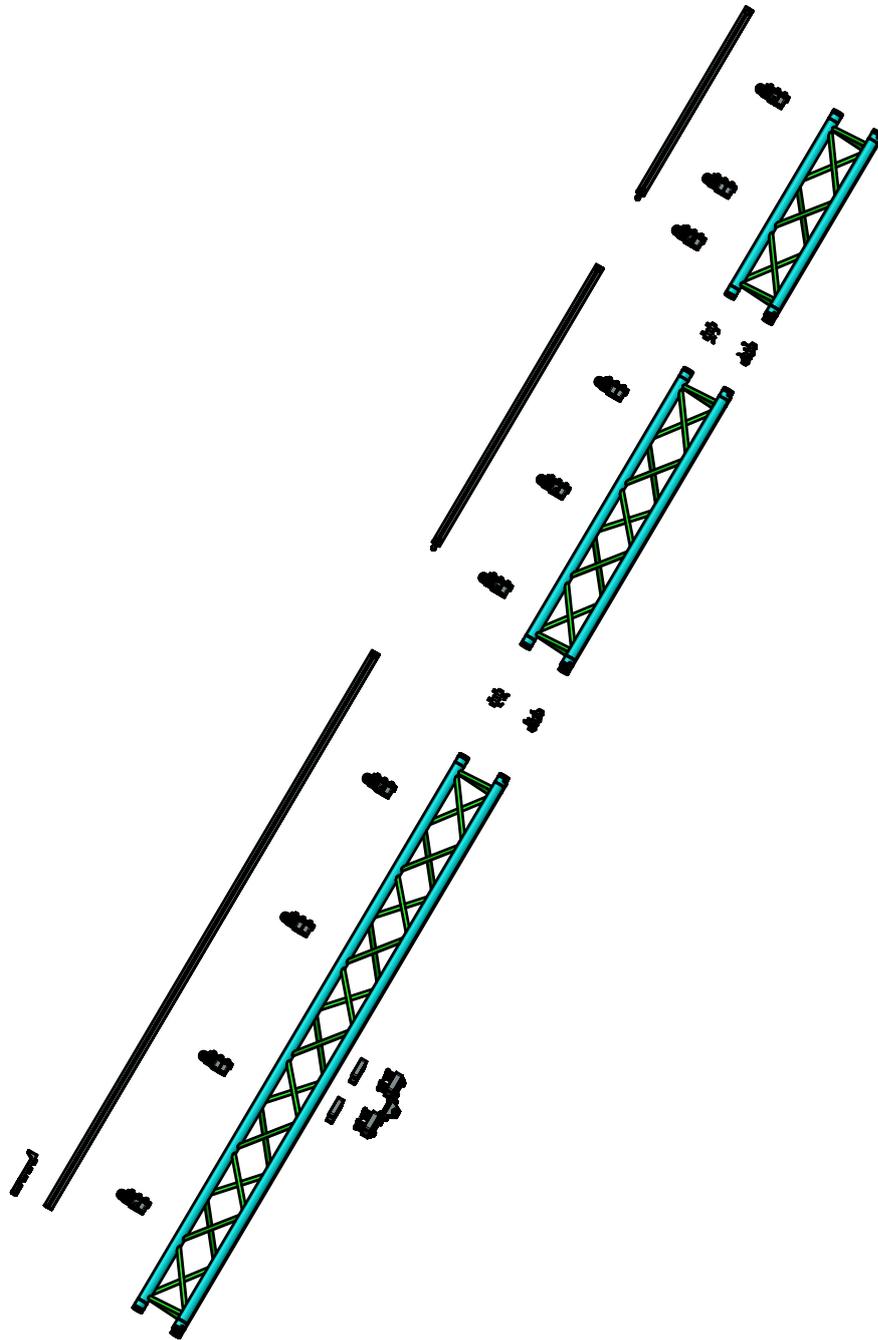
Die Baugruppenzeichnungen dienen lediglich zur Orientierung und dienen nicht zur Montage oder Fertigung.



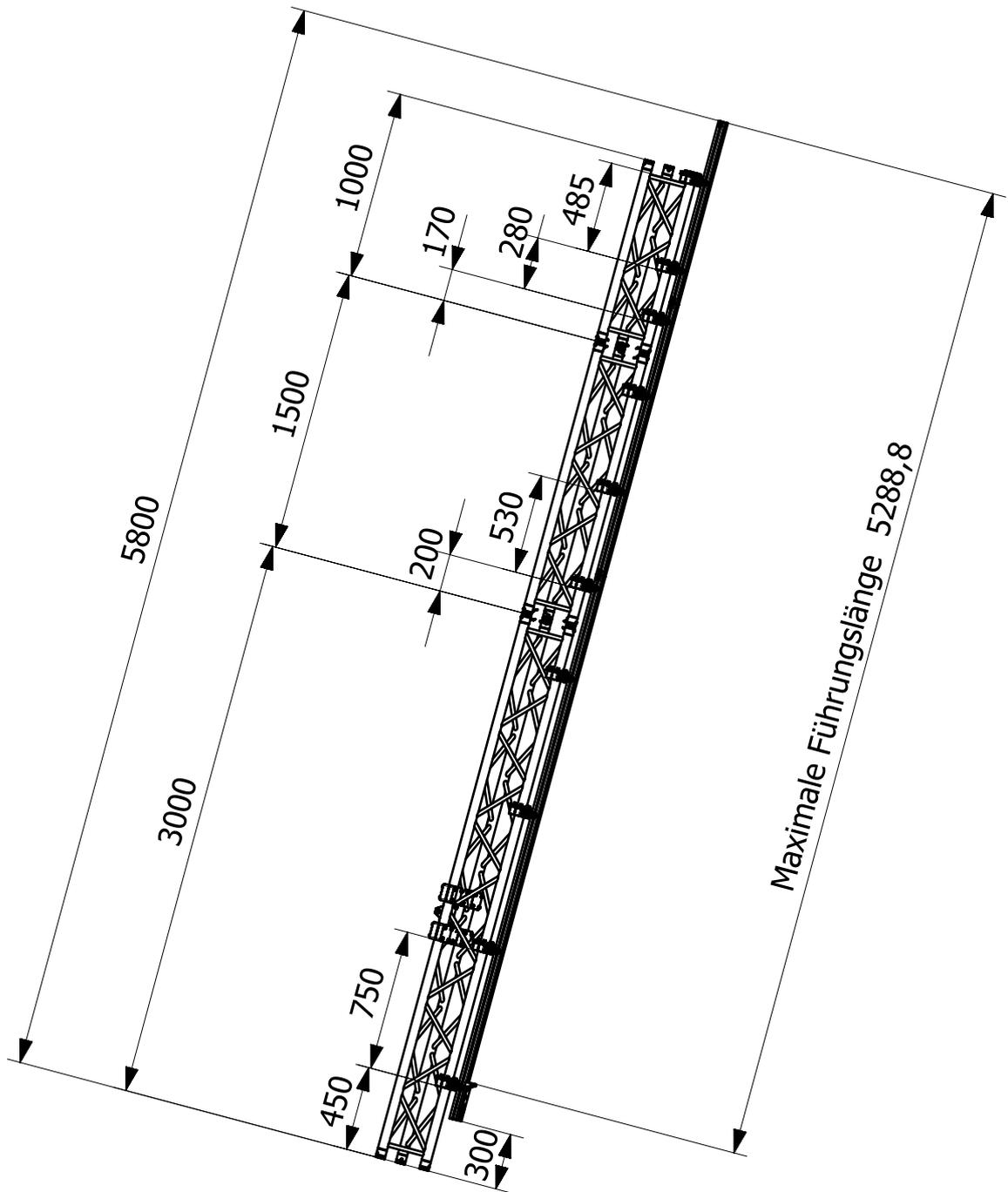
Max. Rauheit (Ra in um) der N-Klassen Max. Roughness (Ra in um) of N-Classes					
N12	50	N8	3.2	N4	0.2
N11	25	N7	1.6	N3	0.1
N10	12.5	N6	0.8	N2	0.05
N 9	6.3	N5	0.4	N1	0.025
Metr. ISO-Gew.: Mutter , Bolzen			6H 6g		
Metr. ISO threads: nut , bolt			6H 6g		

Allgemeintoleranzen für spanabnehmende Bearbeitung / General tolerances for untoleranced dimensions							
Laengenmasse Lineardimensions	0,5..6	> 6..30	> 30..120	> 120..400	> 400..1000	> 1000..2000	> 2000..4000
	± 0,1	± 0,2	± 0,3	± 0,5	± 0,8	± 1,2	± 2
Radien, Fasen Radii, Chamfers	0,2..0,5	> 0,5..3	> 3..6	> 6..30	> 30..120	> 120..400	
	± 0,1	± 0,2	± 0,5	± 1	± 2	± 4	
Winkel/Angles mm / 100mm	≤ 10	> 10..50	> 50..120	> 120..400	> 400		
	± 1,8 / ± 1	± 0,9 / ± 30'	± 0,6 / ± 20'	± 0,3 / ± 10'	± 0,15 / ± 5'		
Allgemeintoleranzen fuer Blechteile General tolerances for sheet metal parts	≤ 15	> 15... ≤ 100	> 100... ≤ 500	> 500... ≤ 1000	≤ 1000		
	± 0,5	± 1,0	± 1,2	± 1,5	± 2,0		

Index	Werkstoff		Ersatz fuer		
Datum	Gewicht		Ersetzt durch		
Benennung		Massstab 1:35	Datum	Name	
Startrampe ARIS Gesamtübersicht			Gezeichnet	02.02.2012	rbalzarini
			Gepueft	03.01.2019	
			Freigeg,		
		Format	Zeichnungs-Nr.	Blatt	
		A3	/	1/1	

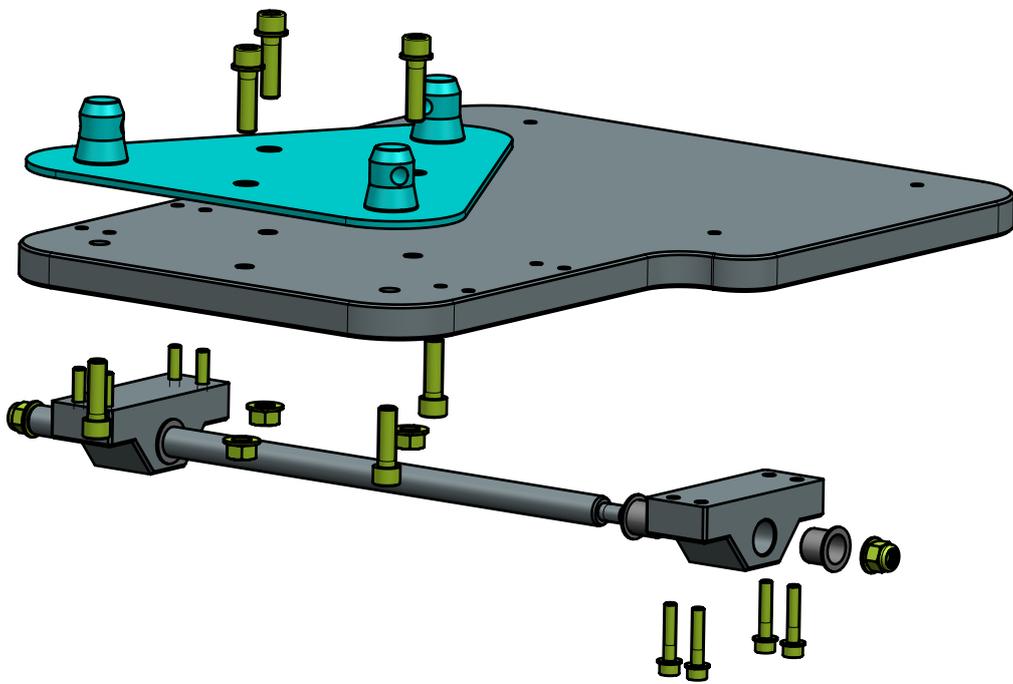


Index 01 Tower_bg_00	Werkstoff		Ersatz fuer			
Datum	Gewicht 0.00 kg		Ersetzt durch			
Benennung Turm Explosionsansicht		Massstab	Datum	Name		
			Gezeichnet	02.02.2012	rbalzarini	
			Geprueft	06.01.2019		
			Freigeg,			
		Format	Zeichnungs-Nr.		Blatt	
		A4	01 Tower_bg / 01 ² Tow			

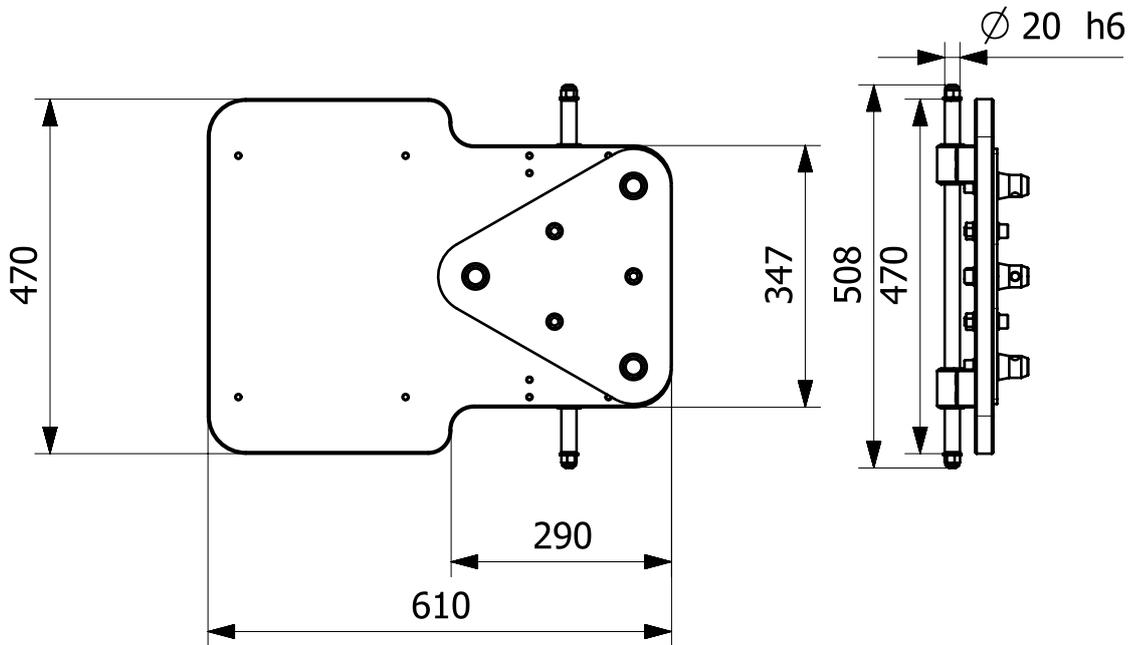
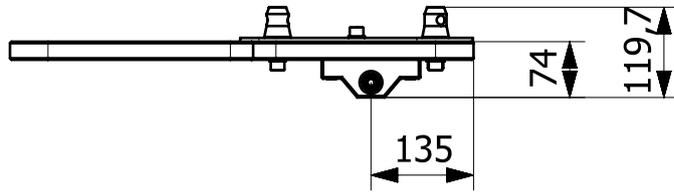


Maximale Führungslänge 5288,8

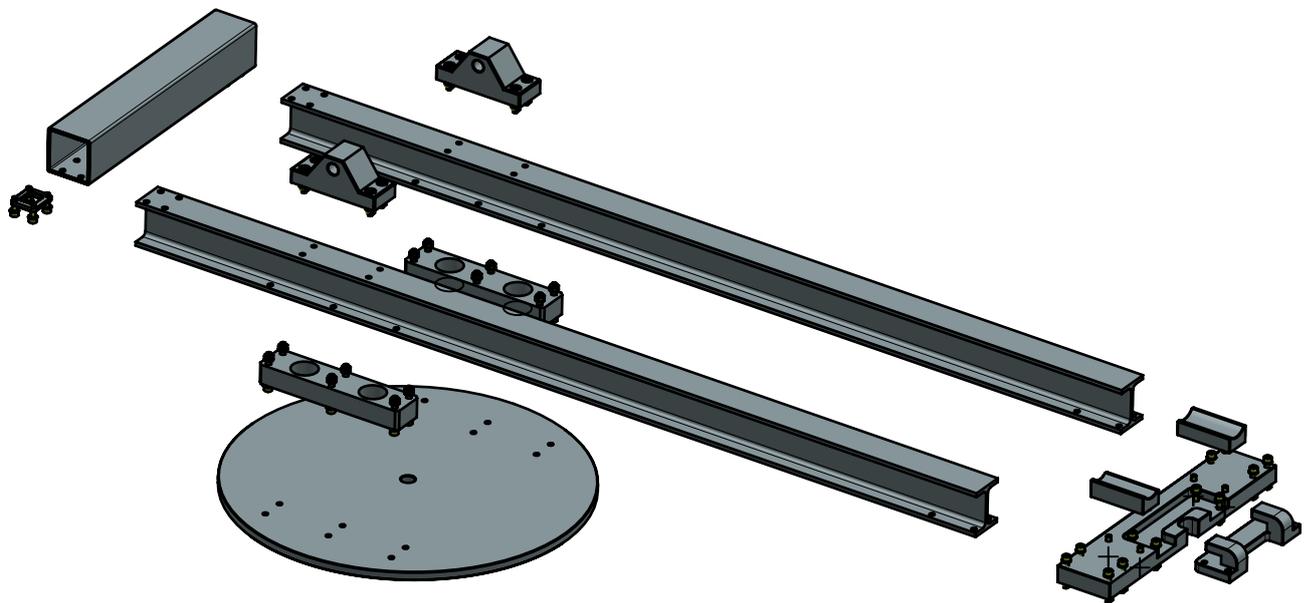
Index 01 Tower_bg_00	Werkstoff		Ersatz fuer			
Datum	Gewicht 0.00 kg		Ersetzt durch			
Benennung Turm Explosionsansicht		Massstab	Datum	Name		
			Gezeichnet	02.02.2012	rbalzarini	
			Geprueft	06.01.2019		
			Freigeg,			
 Lucerne University of Applied Sciences and Arts Technik & Architektur Engineering & Architecture		Format	Zeichnungs-Nr.	Blatt		
		A4	01 Tower_bg / 01	1/Tow		



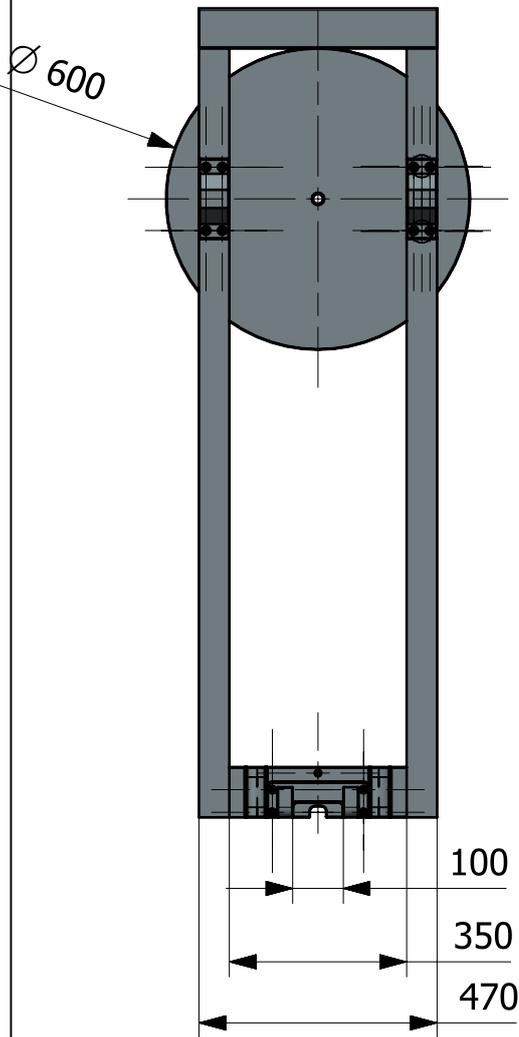
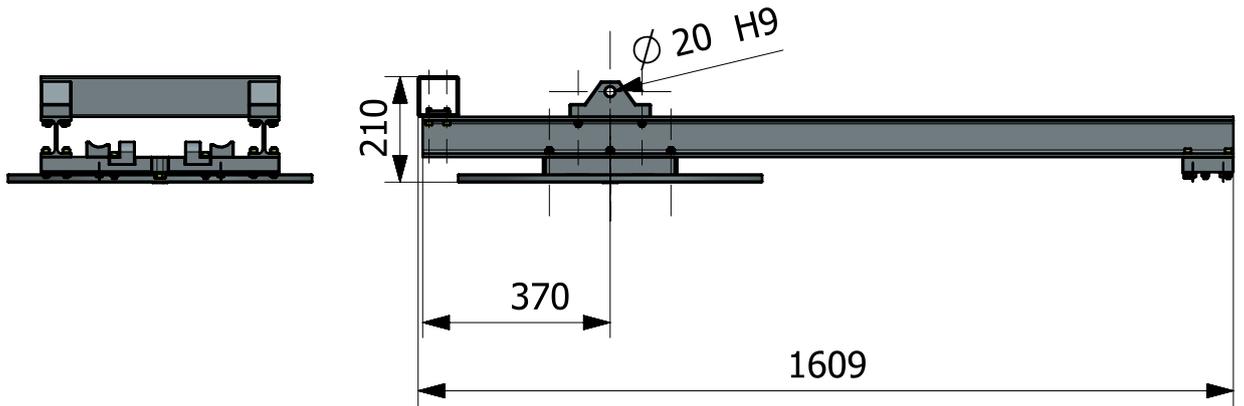
Index	00	Werkstoff		Ersatz fuer		
Datum		Gewicht kg		Ersetzt durch		
Benennung			Masstab	Datum	Name	
Plattform oben Explosionsansicht			1:5	Gezeichnet	02.02.2012	rbalzarini
				Geprueft		
				Freigeg,		
			Format	Zeichnungs-Nr.		Blatt
			A4	02 Plattform_oben		2/1



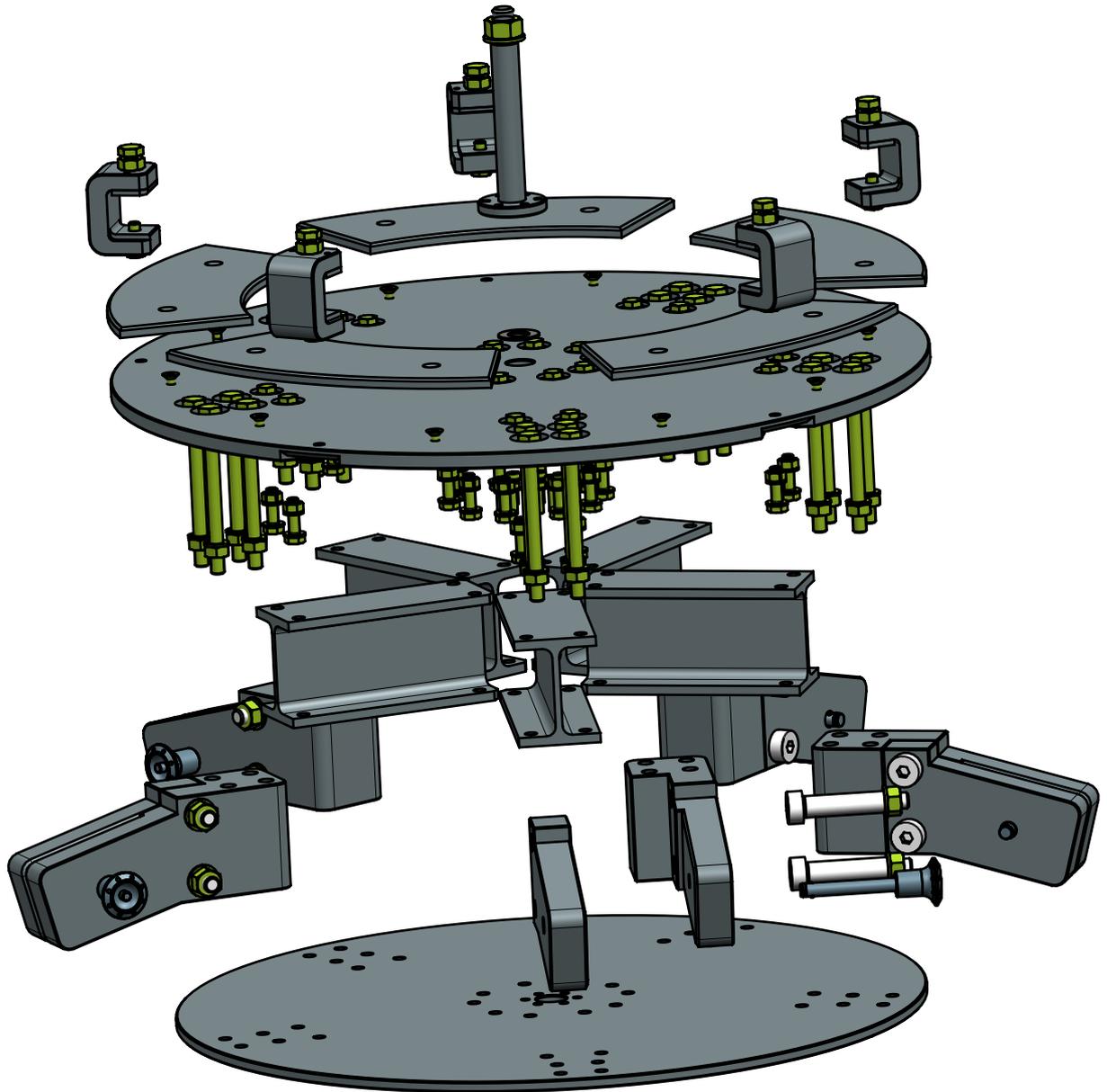
Index	00	Werkstoff		Ersatz fuer		
Datum		Gewicht kg		Ersetzt durch		
Benennung			Massstab	Datum	Name	
Plattform oben			1:5	Gezeichnet	02.02.2012	rbalzarini
Explosionsansicht				Geprueft		
				Freigeg,		
			Format	Zeichnungs-Nr.		Blatt
			A4	02 Plattform_oben		1/1



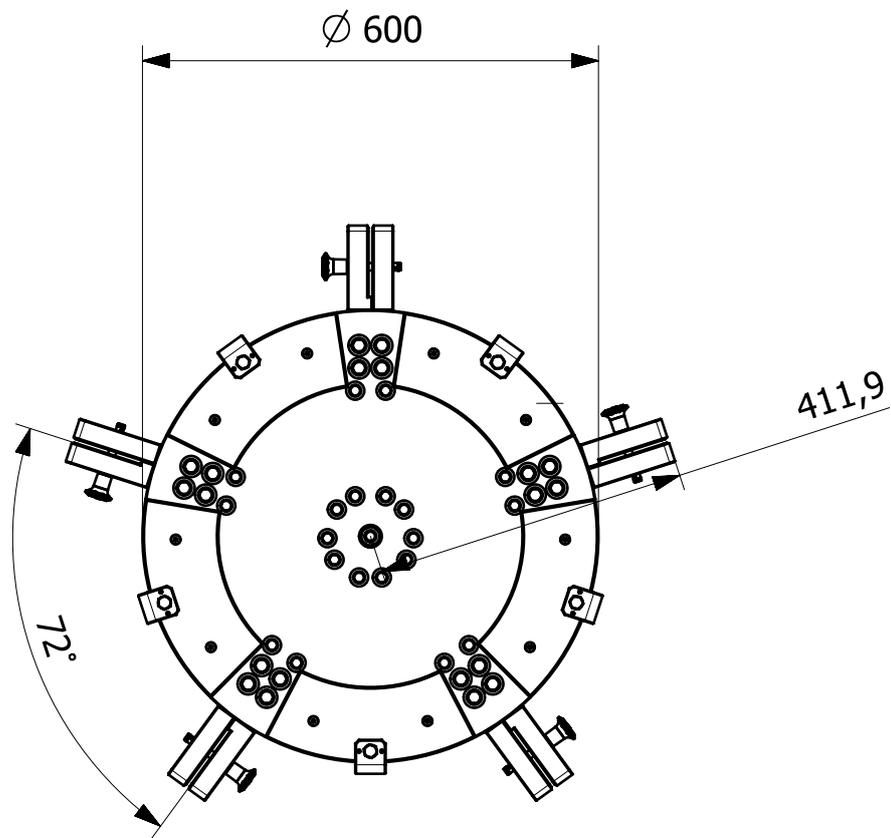
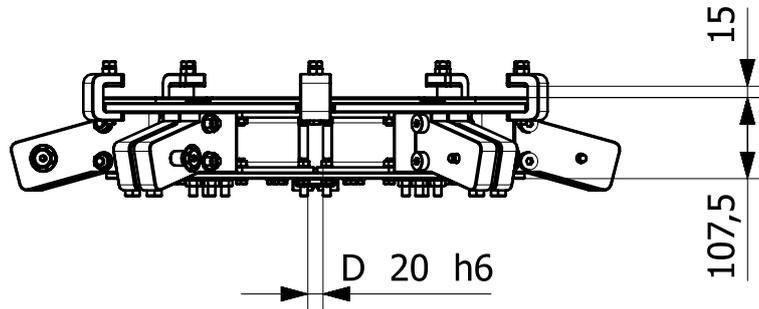
Index	00	Werkstoff		Ersatz fuer		
Datum		Gewicht 0.00 kg		Ersetzt durch		
Benennung Plattform Mitte Explosionsansicht			Massstab	Datum	Name	
				Gezeichnet	02.02.2012	rbalzarini
				Geprueft		
			Freigeg,			
 Lucerne University of Applied Sciences and Arts Technik & Architektur Engineering & Architecture			Format	Zeichnungs-Nr.	Blatt	
			A4	03 Plattform_mitte	2/1	



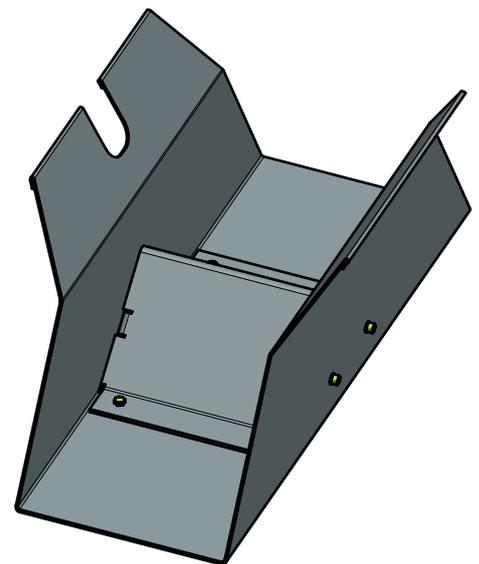
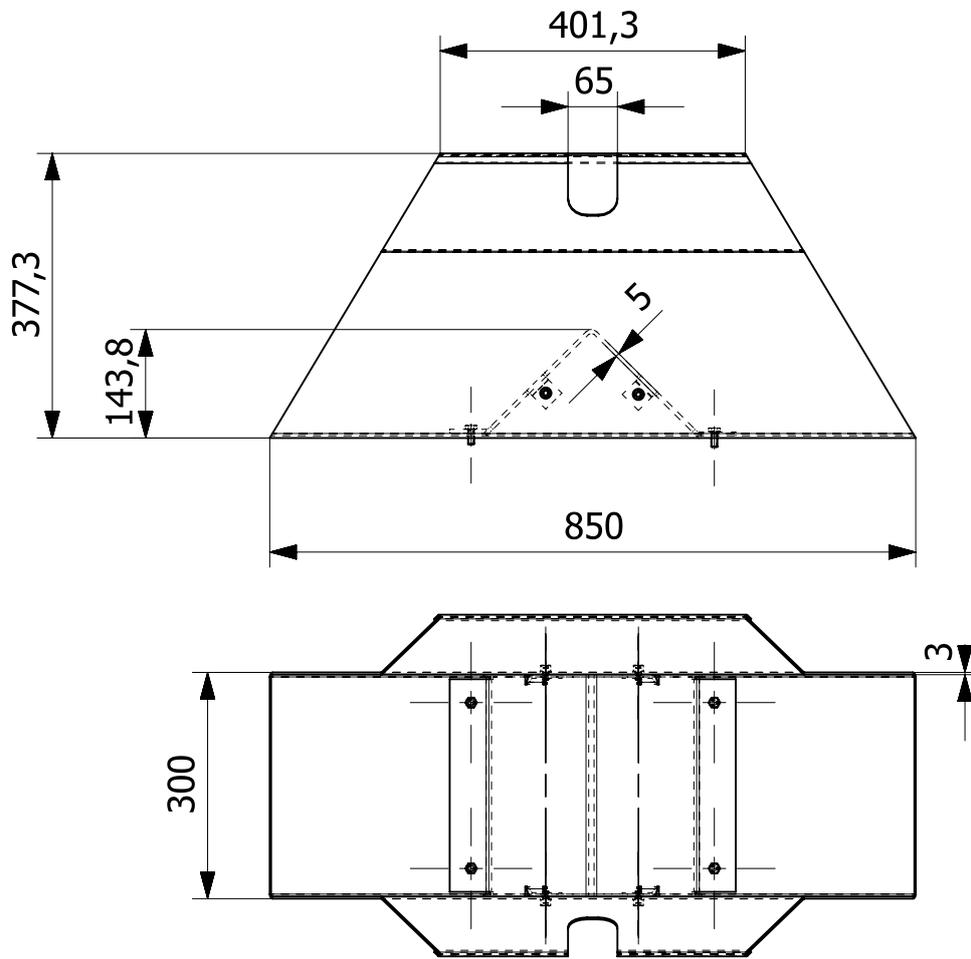
Index	00	Werkstoff		Ersatz fuer		
Datum		Gewicht 0.00 kg		Ersetzt durch		
Benennung Plattform Mitte Explosionsansicht			Massstab	Datum	Name	
				Gezeichnet	02.02.2012	rbalzarini
				Geprueft		
			Freigeg,			
 Lucerne University of Applied Sciences and Arts Technik & Architektur Engineering & Architecture			Format	Zeichnungs-Nr.		Blatt
			A4	03 Plattform_mitte		1/1



Index	00	Werkstoff		Ersatz fuer			
Datum		Gewicht 0.00 kg		Ersetzt durch			
Benennung			Massstab Datum Name	Gezeichnet		02.02.2012	rbalzarini
Plattform unten Explosionsansicht				Geprueft			
				Freigegeben			
			Format	Zeichnungs-Nr.		Blatt	
			A4	04 Plattform_unten		26 /	



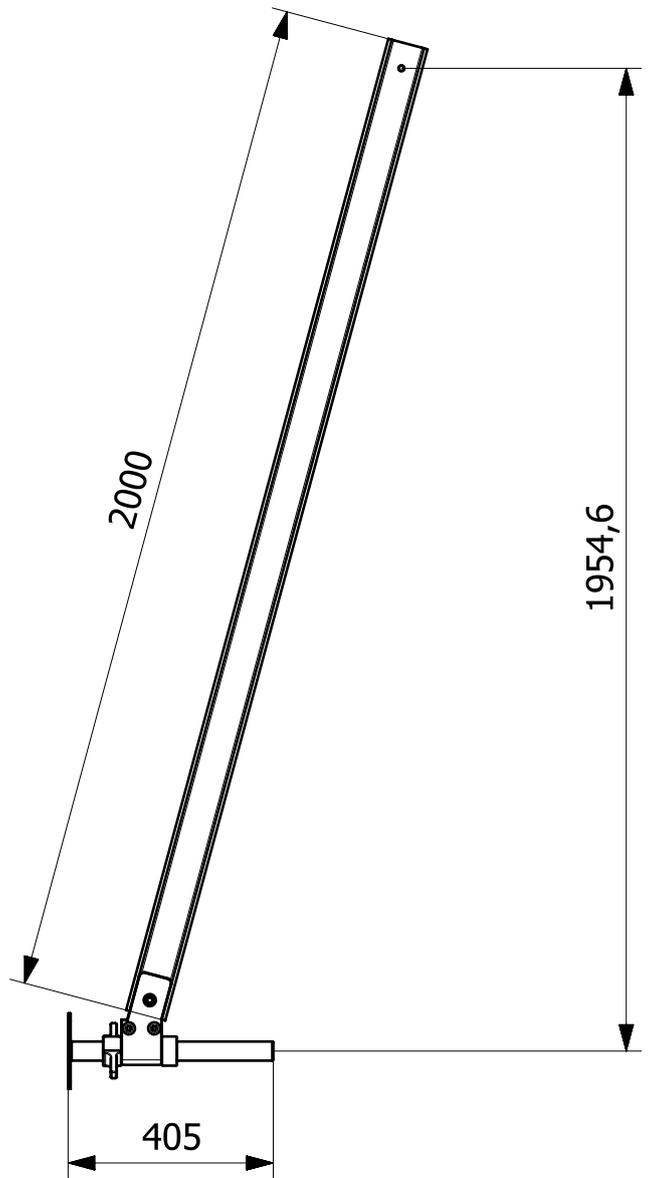
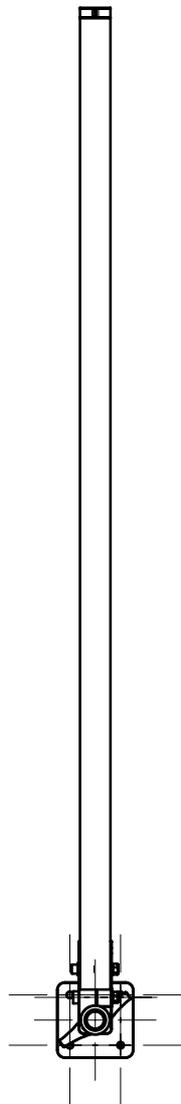
Index	00	Werkstoff		Ersatz fuer			
Datum		Gewicht 0.00 kg		Ersetzt durch			
Benennung Plattform unten Explosionsansicht				Massstab	Datum	Name	
					Gezeichnet	02.02.2012	rbalzarini
					Geprueft		
				Freigeg,			
				Format	Zeichnungs-Nr.	Blatt	
				A4	04 Plattform_unten	1	



Index	00	Werkstoff		Ersatz fuer		
Datum		Gewicht 0.00 kg		Ersetzt durch		
Benennung			Massstab Gezeichnet Geprueft Freigegeben	Datum	Name	
Abstrahlplatte				02.02.2012	tdlusten	
Übersicht						
			Format	Zeichnungs-Nr.	Blatt	
			A4	06 Abstrahlplatte	1/1	



Index	00	Werkstoff		Ersatz fuer		
Datum		Gewicht 0.00 kg		Ersetzt durch		
Benennung			Masstab	Datum	Name	
Standbein Explosionsansicht			1:15	Gezeichnet	02.02.2012	rbalzarini
				Geprueft		
				Freigegeben		
			Format	Zeichnungs-Nr.	Blatt	
			A4	05 Standbein /	00/1	



I-Profil DIN 1025-2 80x60 t5

Index	00	Werkstoff		Ersatz fuer		
Datum		Gewicht 0.00 kg		Ersetzt durch		
Benennung			Masstab	Datum	Name	
Standbein Explosionsansicht			1:15	Gezeichnet	02.02.2012	rbalzarini
				Gepueft		
				Freigeg,		
 <small>Lucerne University of Applied Sciences and Arts Technik & Architektur Engineering & Architecture</small>			Format	Zeichnungs-Nr.		Blatt
			A4	05 Standbein /		00/1