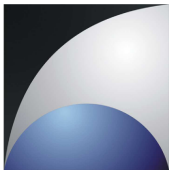




Technische
Universität
Braunschweig

Institut für
Raumfahrtssysteme



R XXXX X (beim Betreuer beantragen!) Auslegung einer Grid Fin Aktuatorik für wiederverwendbare Raketen

Institut für Raumfahrtssysteme

Ole Scholz

3. Mai 2021

Aufgabenstellung

Die Originalaufgabenstellung ist bei Studienarbeiten dem ungebundenen Institutsexemplar beizufügen, bei Bachelor-, Master- und Diplomarbeiten dem gebundenen Exemplar zur Vorlage bei der Fakultät. Die Aufgabenstellung bei Bachelor-, Master- und Diplomarbeiten wird vom Fachbereich ausgegeben (bei CSE-Masterarbeit vom CSE Office), dieser registriert den Beginn und die Abgabe der Arbeit und stempelt diese Angaben auf das letzte Blatt der Original-Aufgabenstellung.

Eine Diplom-, Studien-, Bachelor- bzw. Masterarbeit soll zeigen, dass man in der Lage ist, in begrenzter Frist eine Aufgabe nach wissenschaftlichen Methoden selbständig zu bearbeiten.

Die Aufgabenstellung kann Literaturhinweise enthalten, die als Einstieg in die Aufgabe gedacht sind. Es wird erwartet, daß weitere Literatur selbständig gesammelt wird (Bibliotheken der TU, des Instituts, etc.).

Wichtig: Schriftverkehr mit Dritten bei Nennung des die Arbeit betreuenden Instituts bedarf der vorherigen Genehmigung.

In der Abgabeverision dann dieses Blatt entfernen und an dieser Stelle durch die Aufgabenstellung ersetzen!

Eidesstattliche Erklärung

Ich erkläre hiermit an Eides Statt, dass ich die nachfolgende Arbeit selbständig und nur unter Zuhilfenahme der angegebenen Literatur angefertigt habe.

Datum, Unterschrift

Übersicht

Die Übersicht enthält kurz gefasste Angaben über die Zielsetzung, die angewandten Methoden und die gewonnenen Ergebnisse. Sie soll das Wesentliche aus dem Inhalt der Arbeit in wenigen Sätzen zusammenfassen und ist der eigentlichen Arbeit voranzustellen (höchstens 1/2 bis 1 Seite). Sie soll also nicht lediglich die Aufgabenstellung wiedergeben.

Inhaltsverzeichnis

1. Einleitung	8
1.1. Motivation	9
1.2. Ziele der Arbeit	11
1.3. Struktur der Arbeit	11
2. Grundlagen	13
2.1. Grid Fins als Steuerelement von Flugkörpern im Hyperschall	13
2.1.1. Aufbau	13
2.1.2. Strömung durch Grid Fins	15
2.1.3. Aerodynamische Beiwerte und Vergleich zu planaren Finnen	16
2.1.4. Bisherige Implementierung/ Grid Fin Varianten	16
2.2. Wiedereintrittsbedingungen	16
2.3. Das Air-Launchsystem Valkyrie	16
3. Modellentwurf	17
3.1. Systemanforderungen	17
3.1.1. Leistungsanforderungen	17
3.1.2. Anforderungen an die Kosten	17
3.1.3. Thermische Anforderungen	17
3.1.4.	17
3.2. Morphologischer Kasten	17
3.3. Komponentenrecherche und -auswahl	17
3.3.1. Gitterdesign	17
3.3.2. Aktuator	17
3.3.3. Getriebe	17
3.3.4. Peripherie	17
3.4. Festlegung des Modelldesigns	17
3.5. Modellierung des Modells	17
4. Systemanalyse	18
4.1. FEM-Analyse	18
4.2. Betriebssimulation	18
4.3. Systemoptimierung	18
4.4. Systembewertung	18
4.5. Fazit	18
5. Zusammenfassung und Ausblick	19
Literaturverzeichnis	20

Abbildungsverzeichnis	20
Tabellenverzeichnis	22
Symbolverzeichnis	23
A. Projektmanagement	24
A.1. Work Breakdown Structure	24
A.2. Zeitplan	26
A.3. Work Package Description	28

1. Einleitung

In den letzten Jahrzehnten konnten sich einige private Unternehmen erfolgreich in der Raumfahrt etablieren. Hierbei wird diese NewSpace Szene hauptsächlich von großen US-Firmen wie SpaceX, Virgin Galactic, Blue Origin dominiert, um nur ein paar zu nennen. Viele mehr versuchen auch noch weiterhin in dieser sich rasant entwickelnden Branche Fuß zu fassen. Bei so viel Konkurrenz sind Kosten ein wichtiger Faktor. Firmen wie SpaceX versuchen möglichst wirtschaftlich zu werden, indem sie immer größere Raketen bauen, die höhere Lasten auf einmal ins Weltall bringen können. So soll das Starship mehr als 100 Tonnen in den Low Earth Orbit (LEO) [1] bringen können. Das bringt aber auch einige Nachteile mit sich. Ein Start so großer Raketen ist nur mir sehr viel Beladung wirtschaftlich. So müssen sich mehrere Kunden einen Start teilen und sind somit sowohl in Bezug auf die Umlaufbahn als auch den Starttermin eingeschränkt. Gerade für einzelne, kleinere Satelliten ist das nicht ideal. Dies führt zur Ergründung eines weiten Bereiches der NewSpace Branche, den Microlaunchern. Mit ihren relativ kleinen Nutzlasten bieten sie die Möglichkeit flexibel die individuellen Ansprüche kleiner Satelliten, wie zum Beispiel CubeSats, zu berücksichtigen.

Ein weiteres Potenzial die Kosten zu senken bietet die Bergung und Wiederverwendung von Raketenstufen und Nutzlastverkleidungen. Auch wenn sich ältere Projekte, wie das Space Shuttle, als nicht rentabel herausgestellt haben, können neuere Konzepte mehr Erfolge verbuchen. Ein modernes Beispiel bieten die erste Stufe der Falcon 9 oder auch die Booster der Falcon Heavy von SpaceX. Nach einem Reentry Burn, um beim Wiedereintritt in die Atmosphäre nicht zerstört zu werden, und einer Flugphase in der die Raketensegmente aerodynamisch zu einem Landeplatz gesteuert werden, kommt es zu einer erneuten Zündung der Triebwerke. Dadurch wird die Geschwindigkeit weit genug abgebremst, dass ein unversehrtes Aufsetzen möglich ist [2]. Rocket Lab verfolgt einen anderen Einsatz. Bei ihrer Electron Rakete soll die erste Stufe erst mit einem Ballute in den Unterschall und dann mit einem konventionellen Fallschirm weiter abgebremst werden. Dann kann diese entweder aus dem Wasser geborgen oder sogar direkt in der Luft von einem Hubschrauber eingefangen werden [3]. Auch wenn diese Methode auf Grund des Bedarfs einer dichten Atmosphäre nur auf der Erde Anwendung findet und nur vergleichsweise kleine Raketenstufen von einem Hubschrauber getragen werden können, ist sie dank einer leichten Implementierung für simple Systeme vorzuziehen, da für sie der komplizierte Teil, die aktive Landung, sowie die Notwendigkeit weitere Masse für die Landebeine mitzunehmen wegfällt.

Nun stellt sich die Frage, warum Europa und somit auch Deutschland, als eigentlich technologisch fortgeschrittener Standort, in dieser Branche nur spärlich vertreten ist. Ein großes Problem stellt hier die Wetterlage dar. Gerade im Norden Europas sind Gewitter das ganze Jahr über möglich und besonders im Herbst und Winter kann starker Wind und schwerer Schneefall potenziellen Starts im Wege stehen. Das begrenzt stark die Kapazität von Spaceports. Ein weiterer Nachteil des Standorts Europa ist die hohe Bevölkerungsdichte. Gerade im Westen ist somit kaum ein Start möglich, der genug Abstand zu besiedeltem Gebiet hält.

1.1. Motivation

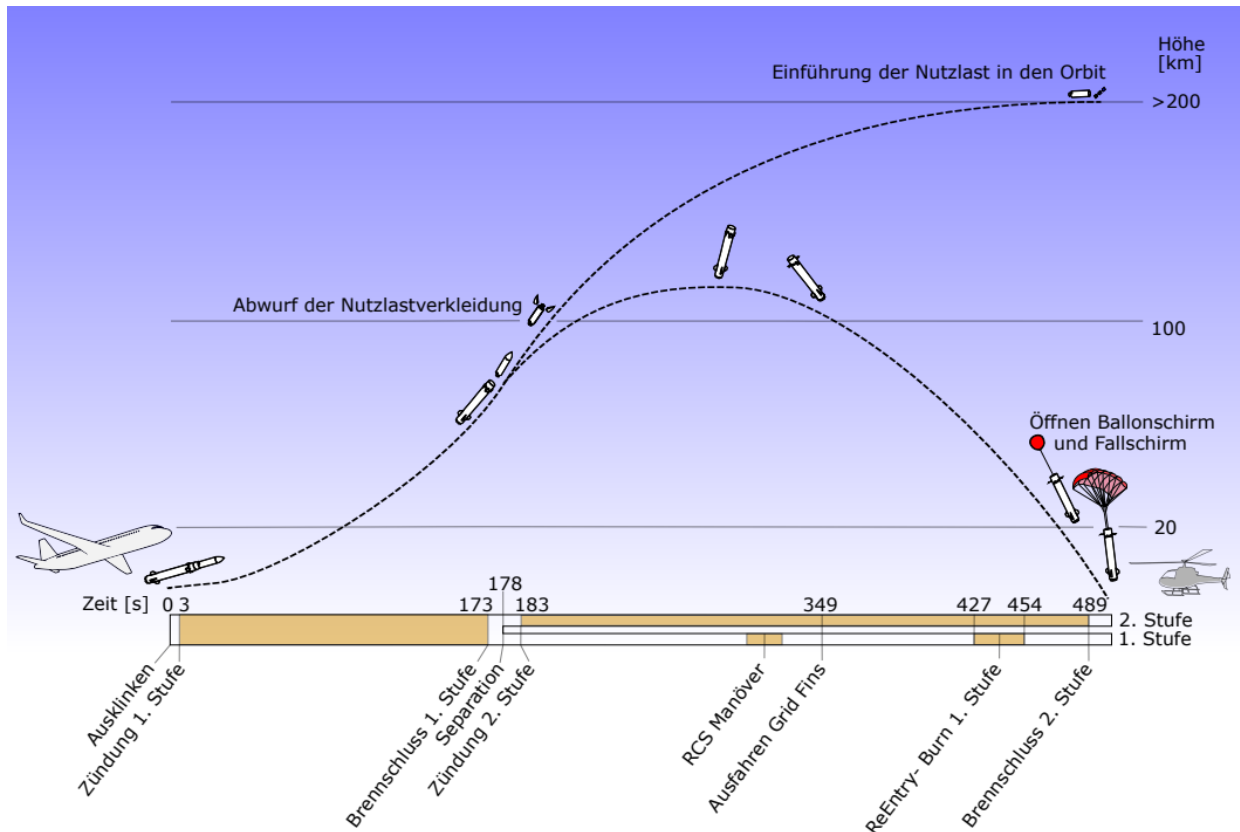


Abbildung 1.1.: Ablauf einer Valkyrie-Mission [4]

Als Antwort auf diese Probleme entwickelt die German Association for Intercontinental Astronautics e.V. (GAIA Aerospace) das Valkyrie System. Hierbei handelt es sich um eine zweistufige AirLaunch-Trägerrakete, die als Nanolauncher kleine CubeSat aus Deutschland heraus in den LEO bringen soll [5]. Mit AirLaunch werden Raketen betitelt, die im Gegensatz zu klassischen Systemen nicht vertikal von der Erdoberfläche starten, sondern an einem Flugzeug befestigt in höhere Luftschichten gebracht werden und dort nach dem Ausklinken aus der Halterung, dem sogenannten Pylon, erst die Triebwerke zünden. Somit lässt sich sowohl das Problem des besiedelten Gebietes, indem die Trägerrakete zum Beispiel über die Nordsee gebracht wird, als auch die meisten störenden Wetterbedingungen umgehen. Die Valkyrie wird auf eine Höhe von 11 Kilometern gebracht [4] und ist somit über dem Wettergeschehen der Troposphäre. Eine hohe Wirtschaftlichkeit soll durch eine wiederverwendbare Erststufe gewährleistet werden. Beim Wiedereintritt soll sich diese, zusätzlich zu einer aerodynamischen Flugphase wie bei der Falcon 9, wie die Electron soweit in den Unterschall abbremesen, dass sich ein Fallschirm öffnen kann. Somit ist es dann möglich, dass ein Hubschrauber die Raketenstufe aus der Luft heraus auffängt und sicher an Land bringt.

Für eine erfolgreiche Bergung der Erststufe der Valkyrie ist die aerodynamische Steuerung während der Flugphase von großer Bedeutung. So kann das Raketensegment sicher dorthin gelenkt werden, wo der Helikopter sie auch rechtzeitig erreichen kann, bevor diese ins Wasser fällt. Stati-

sche Stabilität im Flug herrscht immer dann, wenn der Druckpunkt hinter dem Schwerpunkt des Flugobjekts liegt. Beim Start sorgen hierfür vier Finnen am unteren Ende der Rakete. Im Apogäum führt die Erststufe eine Drehung um die eigene Achse durch, sodass die Triebwerke in Flugrichtung zeigen. Dadurch haben nun die Finnen einen negativen Effekt auf die Stabilität und versuchen die Raketenstufe wieder zurück zu drehen. Um dem entgegen zu wirken sollen am oberen Ende zusätzlich ein weiteres Quartett an Steuerflächen angebracht werden. Damit diese beim Start nicht ebenso eine negative Wirkung zeigen, soll hier ausklappbare Grid Fins (dt. Gitterflossen) verwendet werden.



Abbildung 1.2.: Grid Fins am CRS-5 Falcon 9 Booster, Quelle: SpaceX

Grid Fins sind unkonventionelle Steuerelemente, die im Gegensatz zu ihrem planaren Gegenstück nicht parallel zur Strömung, sondern senkrecht dazu ausgerichtet sind. Sie bestehen aus einem dünnen äußeren Rahmen mit einer inneren Gitterstruktur. Die Möglichkeit sie einzuklappen hilft hier nicht nur ihre unerwünschte Wirkung bei Start zu umgehen, sondern erlaubt auch einen einfacheren Transport, wie zum Beispiel am Bug eines Flugzeuges. Ein geringes Moment um das Steuergelenk, so wie gute Auftriebserzeugung über einen großen Bereich von Anstellwinkeln und Machzahlen [6], machen Grid Fins zu attraktiven Steuerelementen von Flugkörpern bei hohen Machzahlen.

Seit ihrer Entwicklung in den späten 50er-Jahren in der ehemaligen Sowjetunion, wurden sie in vielen ballistischen Raketen, wie zum Beispiel die Adder AA-12, SS-12 oder auch von der USA bei der Massive Ordnance Air Blast (MOAB) verwendet [7]. Einen großen Nachteil der Grid Fins, ihren hohen Widerstand, hat sich das Launch Escape Vehicle der Soyuz zu Nutze gemacht, indem sie als Drag Breaks genutzt werden [7]. Auch SpaceX bedient sich dieser Technologie, um die Falcon 9 sicher zur Landeplattform zu steuern [7].

Somit bieten es sich auch für die Valkyrie an, Grid Fins zu verwenden. Selbst bei den extremen Bedingungen des Wiedereintritts bieten sie Stabilität und Steuerbarkeit. Zusätzlich können sie auch

dazu beitragen, die dabei auftretenden Geschwindigkeiten weiter zu verringern. All das ohne beim Start und Transport ein störender Faktor zu sein oder viel Masse und Leistung für ihre Aktuatorik zu benötigen.

Für diesen speziellen Fall gibt es bisher noch keine Grid Fins mit entsprechender Aktuatorik, sodass es nun nötig ist zu untersuchen, welche die Anforderungen an ein solches Steuersystem zu stellen sind und wie man diese umsetzen kann.

1.2. Ziele der Arbeit

Das Ziel dieser Arbeit ist es, ein Grid Fin Modul samt der zugehörigen Aktuatorik zu entwickeln, dass den Ansprüchen einer wiederverwendbaren Erststufe eines AirLaunch-Systems gerecht wird. Hierbei wird konkret das Fallbeispiel der Valkyrie zur Hand genommen. Hierfür soll in dieser Arbeit die notwendigen Anforderungen an ein solches Modul zusammengetragen werden.

Der wichtigste Punkt ist hierbei die Stabilität und Steuerbarkeit während des Wiedereintritts. Das heißt Kräfte, Momente und Stellgeschwindigkeit müssen bestimmte Mindestleistungen liefern. Wie bei jedem Projekt der Raumfahrt ist natürlich auch hier auf eine Minimierung des Gewichts zu achten. Damit dieser Grid Fin für einen Microlauncher in Frage kommt, ist auch auf einen günstigen Preis zu achten. Dies soll zum einen dadurch erreicht werden, dass nach Möglichkeit COTS (Commercial off-the-shelf) Produkte verwendet werden. In dieser Arbeit wird zu diesen Zwecken besonders auf eine Fertigung durch additive Verfahren Wert gelegt. Diesen Anforderungen entsprechend sollen Lösungsmöglichkeiten zusammengetragen werden, aus denen dann die am besten geeigneten gewählt werden können. Zu diesem Zweck soll am Ende dieser Arbeit ein CAD-Modell stehen, mit welchem sich ein 3D-Druck anfertigen lässt. Bei der Minimierung der Kosten sei trotzdem noch darauf zu achten, dass eine ausreichende Lebensdauer mehrere Missionen zulässt, um auch dem Aspekt der Wiederverwendbarkeit zur Genüge zu kommen.

1.3. Struktur der Arbeit

Im folgenden Kapitel werden zunächst die für diese Arbeit notwendigen Grundlagen dargelegt. Zu Beginn wird auf die Eigenschaften von Grid Fins eingegangen, sowohl in Bezug auf ihr aerodynamisches Verhalten, als auch unter Betrachtung ihrer Vor- und Nachteile gegenüber konventionellen planaren Steuerflächen. Als nächstes werden dann die Wiedereintrittsbedingungen bei einer sub-orbitalen Flugbahn am Beispiel des AirLaunch-Systems Valkyrie erläutert.

Nachdem die Grundlagen geklärt sind, werden in Kapitel 3 die Anforderungen an das System definiert. Unter Berücksichtigung dieser folgt eine Vorstellung verschiedener Teillösungen für die einzelnen Elemente von Steuerflächen und Aktuatorik. Auf Basis eines morphologischen Kastens, in dem diese Teillösungen zusammengetragen werden, wird begründet ein erster Demonstrator entworfen und in einem CAD-Programm erstellt.

Daraufhin wird dieses Modell in Kapitel 4 mittels einer Finiten Elementen Berechnung auf Stabilität und Festigkeit untersucht und mit einer Betriebssimulation in Matlab auf eine genügende Leitungsfähigkeit im Betrieb geprüft. Auf Basis dieser Simulationen wird das Modell verbessert und anschließend kritisch bewertet. Zuletzt werden noch einmal alle Ergebnisse zusammengefasst

und ein Ausblick auf eine mögliche weitere Vorgehensweise gegeben.

2. Grundlagen

2.1. Grid Fins als Steuerelement von Flugkörpern im Hyperschall

2.1.1. Aufbau

In der simpelsten Konfiguration bestehen Grid Fins aus einem äußeren Rahmen, der die innere Struktur von sich kreuzenden planaren Flächen stützt. Dieser einfache Aufbau gewährt hohe Stabilität bei vergleichsweise geringem Gewicht [8] und lässt sich mittels 5 Parameter, wie in Abbildung 2.1 zu sehen, beschreiben. Die Wanddicke d kann sich für den Rahmen (d_R) von der für das Gitter (d_G) unterscheiden. Aber auch innerhalb dieser Einteilung kann der Wert variieren, so ist häufig die Wandstärke in der Nähe der Einspannung zu erhöhen, um die dort auftretenden höheren Beanspruchungen zu ertragen. Ein umrahmtes Segment des Gitters wird als Zelle bezeichnet und ihre Dimension kann mit der Zellgröße g beschrieben werden. Die Ausmaße der Grid Fins wird maßgeblich durch die Spannweite b und die Höhe h bestimmt. Die Querschnittsfläche A steht in der Ausgangsstellung senkrecht zur Anströmung und wird vom Rahmen begrenzt. Normal zu dieser Fläche steht die Sehne mit einer im Vergleich zur planaren Finne deutlich kürzeren Länge s .

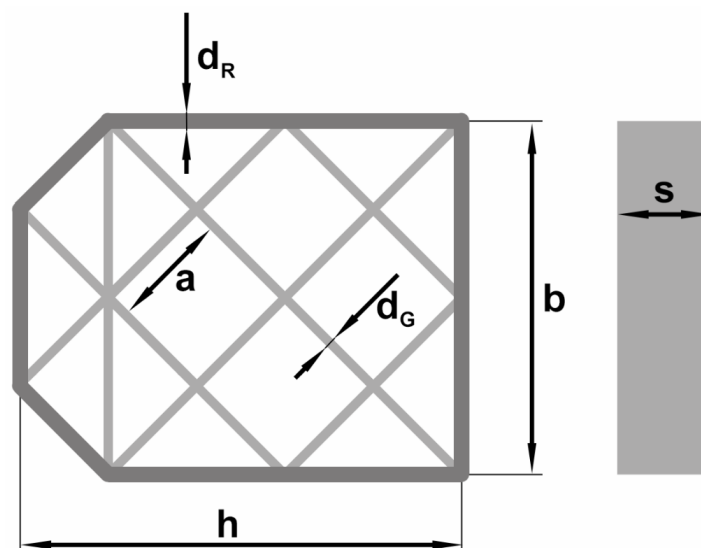


Abbildung 2.1.: Aufbau eines einfachen Grid Fins

Grid Fins müssen nicht starr an einem Körper befestigt werden, sondern können um mehrere Achsen drehbar sein. Um sie für den Transport kompakt zu lagern, lassen sie sich an den Körper anlegen. Der Klappwinkel Λ beschreibt den Ausschlag um eine den Körper an der Anbringung tangierende Achse. Ein Klappwinkel von 0° entspricht hierbei den normalen in den Strömung ra-

genden Zustand und 90° den eingeklappten. Zur Steuerung lassen sich die Grid Fins um eine Achse, die senkrecht aus dem Körper durch die Mitte des Grid Fins zeigt, verstellen. Ein Steuerwinkel von $\eta = 0^\circ$ ist auch hier wieder die Ausgangsstellung, die Sehne ist parallel zur Strömung. Bei $\eta = 90^\circ$ würde also die Seitenkante zur Anströmung zeigen, die Querschnittsfläche A , also das Gitter, wird nicht durchströmt.

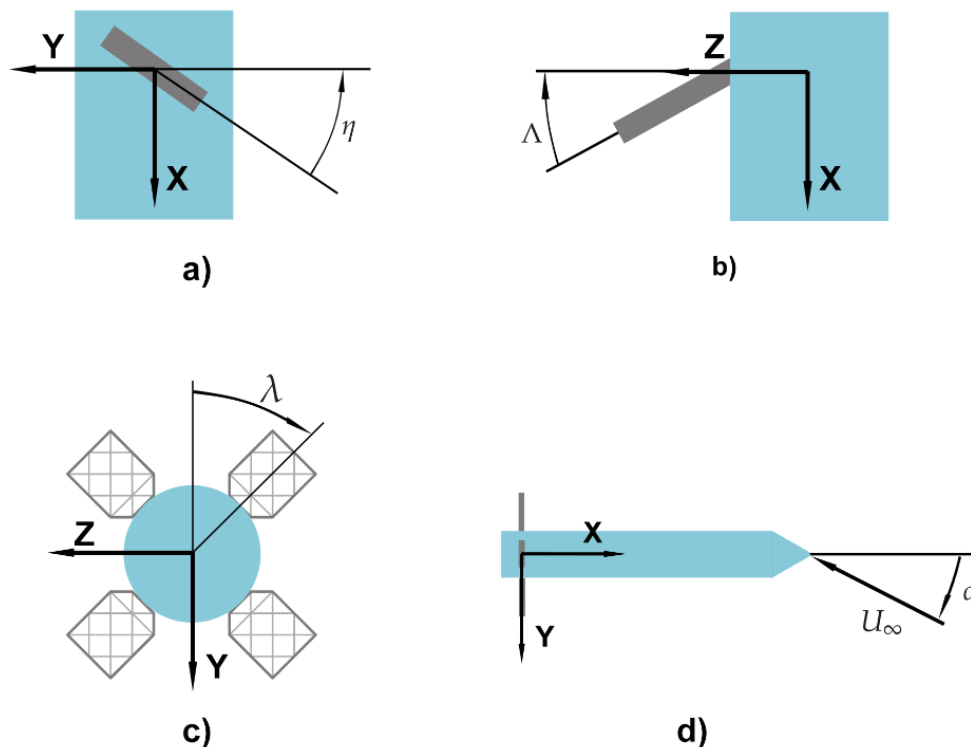


Abbildung 2.2.: Winkel zur Beschreibung der Orientierung der Grid Fins zum Körper

a) Steuerwinkel, b) Klappwinkel, c) Drehwinkel, d) Neigungswinkel des Körpers zur Anströmung

Um die Aerodynamik zu untersuchen reichen diese Winkel nicht aus, da die Anströmung nicht parallel zur Rakete liegen muss. Der Neigungswinkel des gesamten Moduls zur Anströmung σ setzt sich unter realen Bedingungen aus dem Schiebewinkel und dem Bahnneigungswinkel, unter Vernachlässigung des Windes, zusammen. Für die in dieser Arbeit durchgeführten Untersuchungen ist eine solche Aufteilung aber irrelevant. Damit aber keine Informationen und somit Genauigkeit verloren geht, wird stattdessen die Orientierung der Grid Fins auf dem Umfang betrachtet. Verwendet wird hier eine Anordnung von vier gleichmäßig verteilten Steuerelementen. Das Koordinatensystem ist so definiert, dass es seinen Ursprung genau in der Mitte dieser Konfiguration hat und die positive X-Achse zur Spitze des Flugkörpers, also entgegen der Anströmung, zeigt. Bei $\sigma \neq 0$ zeigt auch die Y-Achse einem Anteil der Strömung entgegen. Die Z-Achse ist folglich nach dem Rechtssystem orthogonal zu den anderen beiden ausgerichtet. Um nun die Orientierung der Grid Fins um die X-Achse herum beschreiben zu können wird der Rollwinkel λ eingeführt. Wenn eine '+'-Konfiguration vorliegt, befinden sich die einzelnen Finnen auf den Koordinatenachsen (X,

Y) und der Rollwinkel ist gleich null. Im Gegensatz dazu bei der 'x'-Konfiguration sind sie um einen Winkel von $\lambda = 45^\circ$ verdreht. Der Anstellwinkel α , den ein einzelner Grid Fin erfährt, lässt sich aus dem Anstellwinkel des Körpers und, in Abhängigkeit vom Rollwinkel und welcher der Finnen überhaupt betrachtet wird, aus dem Klapp- und Steuerwinkel bestimmen.

2.1.2. Strömung durch Grid Fins

Bei niedrigen Strömungsgeschwindigkeiten im Unterschall haben Grid Fins auf Grund ihrer geringen Dicke keinen großen Einfluss auf das Fluid, welches nahezu ungestört durch das Gitter fließen kann [9]. Mit steigenden Machzahlen tritt aber zunehmend der Effekt auf, dass die Strömung um die stumpfe Vorderkante des Gitters in die Zelle hinein expandiert. Zusammen mit der Grenzschichtbildung an den Zellwänden, die effektiv zu Verengung der durchströmten Fläche führt, wird die Strömung innerhalb der Zellen auf Geschwindigkeiten beschleunigt, die über der der Anströmung liegen [10].

Der transsonische Bereich wird ab einer Anströmungsmachzahl von circa $Ma_\infty = 0,8$ erreicht [11] und ist für die Aerodynamik der Grid Fins eine sehr kritische Problematik. Sobald die Strömung innerhalb des Gitters eine Machzahl von 1 überschreitet, kommt es zu einem Verdichtungsstoß am Ausgang der Zellen, der mit steigender Machzahl an Stärke zunimmt. Dieser führt zu einer Drosselung der Strömung, was den Effekt hat, dass ein Teil der Strömung verdrängt wird und sich stattdessen um den Grid Fin herum bewegt. Steigt nun auch Ma_∞ über 1 löst sich der Stoß von den Gitterwänden und verbindet sich zu einer unregelmäßigen 3D-Struktur in der Abströmung [12]. Wächst Ma_∞ weiter an, so kommt es zu einem Verdichtungsstoß vor dem Grid Fin. Dies führt dazu, dass innerhalb der Zellen keine Drosselung mehr vorliegt [12], stattdessen wird die Strömung schon durch den Stoß vor dem Gitter um dieses herum verdrängt [10]. Von den Vorderkanten gehen Schockwellen aus, die auf die benachbarten Wände treffen und mit ihnen interagieren [10]. Steigt die Machzahl weiter an, so befinden sich diese Wellen auf steileren Bahnen bis sie gar nicht mehr auf die anderen Wände treffen. Des weiteren nähert sich der Verdichtungsstoß vor dem Grid Fin diesem immer weiter mit größer werdenden Strömungsgeschwindigkeiten an, bis es abgesehen von der direkten Umgebung der Wände gar nicht mehr zum Stoß kommt. Die einzelnen Zellen fungieren nun als Überschalldüse [12], sodass die Strömung in den meisten Bereichen nicht mehr auf den Unterschall abgebremst wird. Der Stoß wurde vom Gitter "verschluckt".

Als ein besonderer Bereich ist noch die Ansatzregion zu betrachten, in der der Grid Fin an der Rakete angebracht ist. Schnittstellen von Wänden stellen ein erhöhtes Potenzial für blockierte Strömung dar. In der Ansatzregion befinden sich nicht nur vielen von diesen Schnittstellen, sondern auch die Dicke ist hier meistens am größten. Dies in Kombination mit einer schon durch die Grenzschichtwirkung des Körpers verzögerte Strömung, führt zu einer relativ großen Region verlangsamter Strömung oder gar Rückströmung, die mit der Machzahl an Größe gewinnt [12]. Bei einer Machzahl von ungefähr $Ma_\infty = 2$ erreicht diese jedoch ein Maximum, da die Strömung bei weiter steigenden Geschwindigkeiten von der umgebenden mitgerissen wird und diese Region somit wieder an Größe und Bedeutung verliert [12].

2.1.3. Aerodynamische Beiwerte und Vergleich zu planaren Finnen

2.1.4. Bisherige Implementierung/ Grid Fin Varianten

2.2. Wiedereintrittsbedingungen

2.3. Das Air-Launchsystem Valkyrie

3. Modellentwurf

3.1. Systemanforderungen

3.1.1. Leistungsanforderungen

3.1.2. Anforderungen an die Kosten

3.1.3. Thermische Anforderungen

3.1.4. ...

3.2. Morphologischer Kasten

3.3. Komponentenrecherche und -auswahl

3.3.1. Gitterdesign

3.3.2. Aktuator

3.3.3. Getriebe

3.3.4. Peripherie

z.B. Energieversorgung

3.4. Festlegung des Modelldesigns

3.5. Modellierung des Modells

4. Systemanalyse

4.1. FEM-Analyse

4.2. Betriebssimulation

4.3. Systemoptimierung

4.4. Systembewertung

4.5. Fazit

5. Zusammenfassung und Ausblick

In der Zusammenfassung (mindestens 1,5 Seiten) sollen die theoretische Herleitung und die wesentlichen Ergebnisse so aufgelistet werden, dass sie ohne Kenntnis der vorherigen Abhandlung verständlich sind. Dabei wird in der Vergangenheit geschrieben und die wichtigsten Ergebnisse der Arbeit wiedergegeben.

Literaturverzeichnis

- [1] SpaceX. Star Ship User's Guide. https://www.spacex.com/media/starship_users_guide_v1.pdf, 2020. Zugriff: 25.04.2021.
- [2] SpaceX. Falcon User's Guide. https://www.spacex.com/media/Falcon_Users_Guide_082020.pdf, 2020. Zugriff: 25.04.2021.
- [3] Rocket lab launches electron flight 8. company previews first stage recovery. <https://www.nasaspaceflight.com/2019/08/rocket-lab-electron-flight-8-towards-first-stage-recovery>, 2019. Zugriff: 25.04.2021.
- [4] Ina Barz. Untersuchung effizienter Algorithmen zur Trajektorienoptimierung von AirLaunch-Raketen. Studienarbeit, TU Braunschweig, April 2021.
- [5] GAIA Aerospace. Valkyrie, Die erste wiederverwendbare AirLaunch-Rakete. <https://www.gaia-aerospace.com/research/>. Zugriff: 25.04.2021.
- [6] Salman Munawa. Analysis of Grid Fins as Efficient Control Surface in Comparison to Conventional Planar Fins. In *27th international congress of the aeronautical sciences*, 2009.
- [7] M. Tripathi, M.M. Sucheendran, and A. Misra. Effect of aspect ratio variation on subsonic aerodynamics of cascade type grid fin at different gap-to-chord ratios. *The Aeronautical Journal*, 124(1274):472–498, 2020.
- [8] Fumiya Hiroshima and Kaoru Tatsumi. Grid pattern effects on aerodynamic characteristics of grid fins. In *24th International Congress of Aeronautical Sciences*, 2004.
- [9] Marco Debiasi, Zeng Yan, and Tat Chng. Swept-back grid fins for transonic drag reduction. 06 2010.
- [10] Mark S. Miller and Wm. David Washington, 1998.
- [11] Mark S. Miller and Wm. David Washington, 1998.
- [12] Montgomery Hughson, Eric Blades, Edward Luke, and Gregg Abate. Analysis of lattice grid tailfin missiles in high-speed flow. 06 2007.

Abbildungsverzeichnis

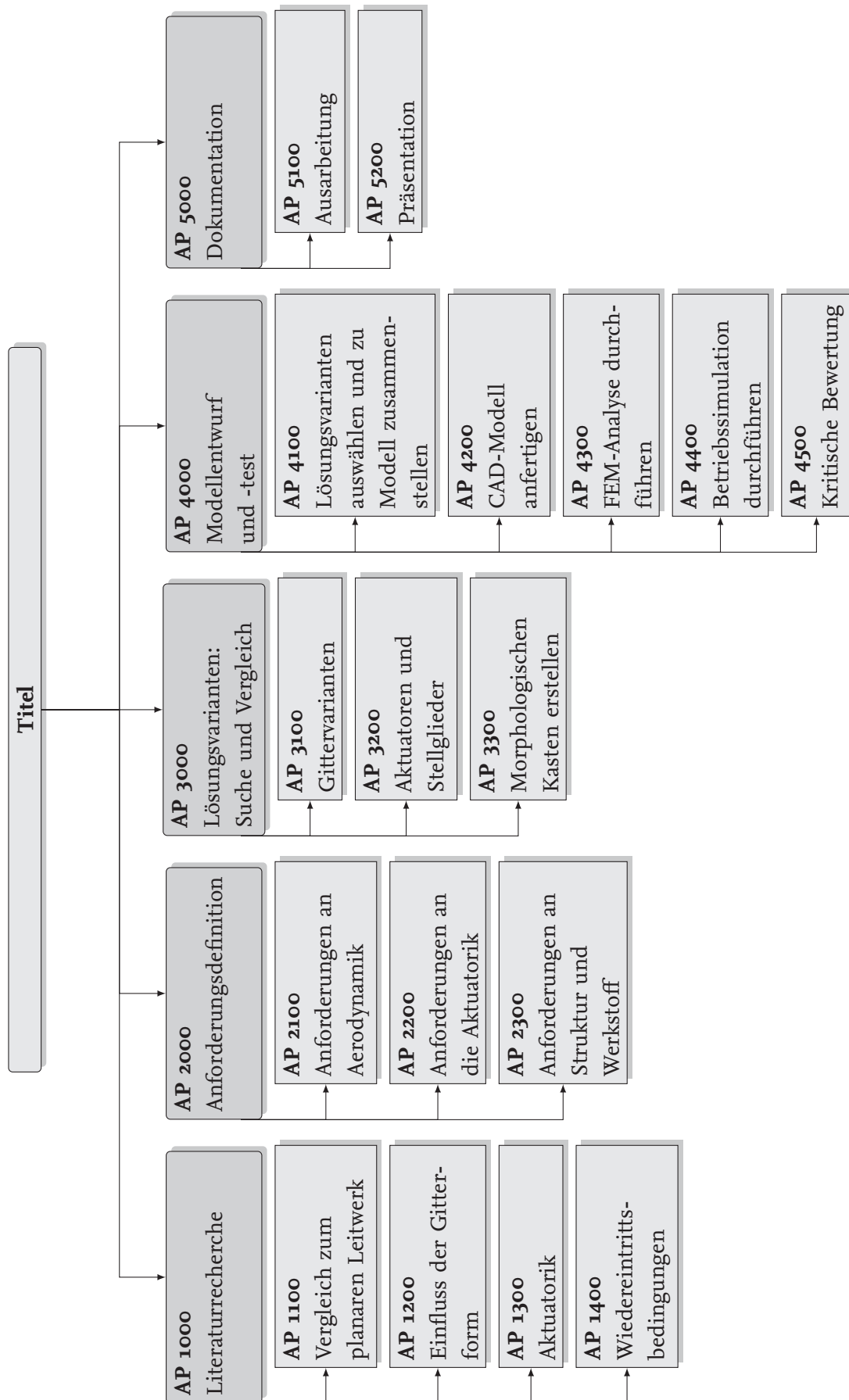
1.1.	Ablauf einer Valkyrie-Mission [4]	9
1.2.	Grid Fins am CRS-5 Falcon 9 Booster, Quelle: SpaceX	10
2.1.	Aufbau eines einfachen Grid Fins	13
2.2.	Winkel zur Beschreibung der Orientierung der Grid Fins zum Körper a) Steuerwinkel, b) Klappwinkel, c) Drehwinkel, d) Neigungswinkel des Körpers zur Anströmung	14

Tabellenverzeichnis

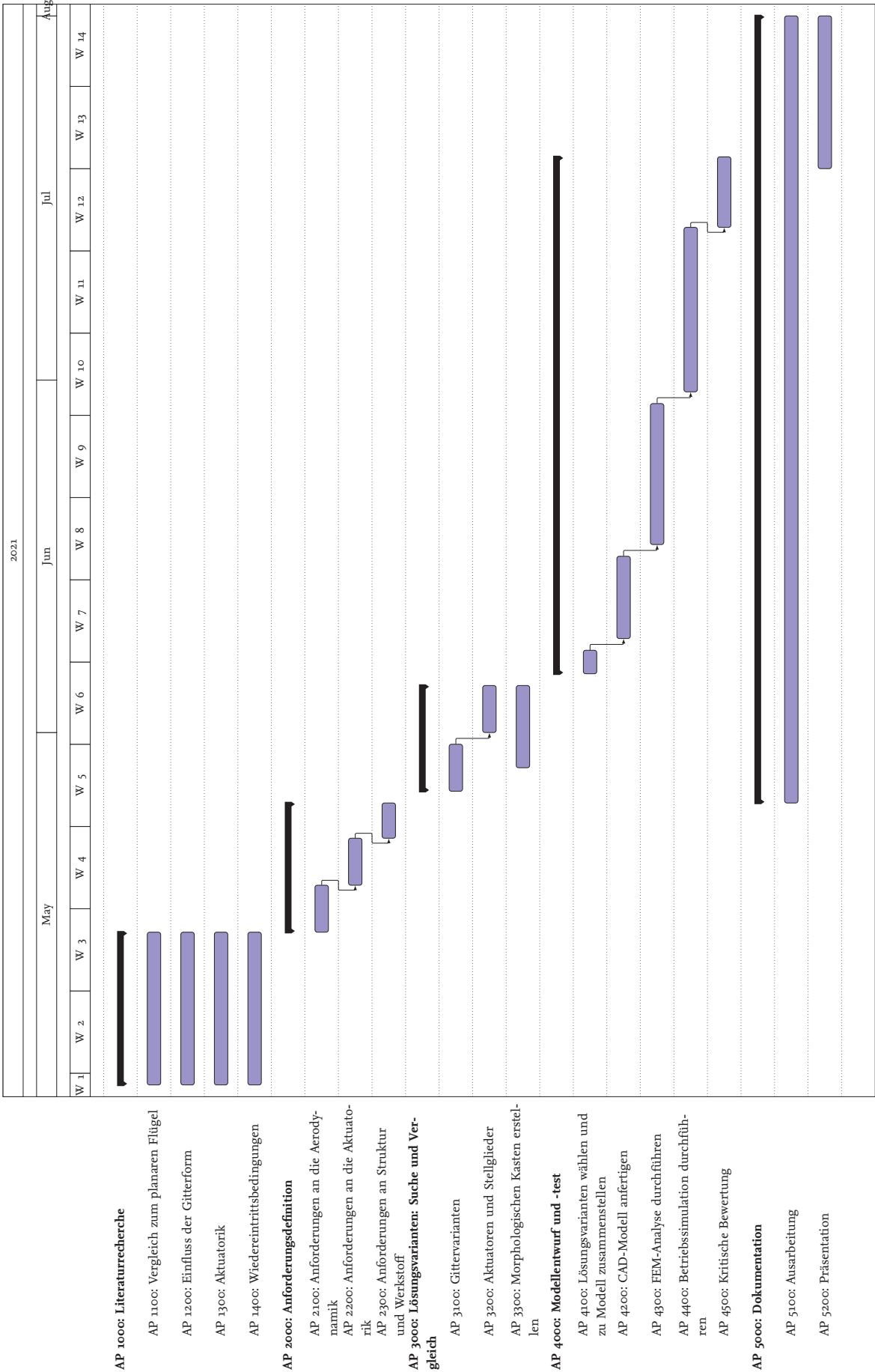
Symbolverzeichnis

A. Projektmanagement

A.1. Work Breakdown Structure



A.2. Zeitplan



A.3. Work Package Description

		AP 1100
Titel	Vergleich zum planaren Leitwerk	Seite: 1 von 1
Verantwortlicher	Ole Scholz	Version: 1.0
		Datum: DD.MM.YYYY
Beginn	T ₀	
Ende	T ₀ +2 Wochen	Dauer: 2 Wochen
Bearbeiter	Ole Scholz	
Ziele: <ul style="list-style-type: none">• Kenntnisse über Vor- und Nachteile von Grid Fins im Vergleich zu planaren Leitwerken bezüglich<ul style="list-style-type: none">- Aerodynamik, bei unterschiedlichen Anströmungsbedingungen- Strukturmechanische Eigenschaften- Allgemeine Unterschiede		
Input: <ul style="list-style-type: none">• Literatur zum Vergleich der beiden		
Schnittstellen zu anderen APs: <ul style="list-style-type: none">• AP 2200 zur Bestimmung aerodynamischen Einflüsse		
Aufgaben: <ul style="list-style-type: none">• Literatur zur Thematik lesen		
Ergebnisse: <ul style="list-style-type: none">• Vor- und Nachteile von Grid Fins kennen• Wissen, wo und wie sie entsprechend ihrer Eigenschaften einzusetzen sind		

		AP 1200
Titel	Einfluss der Gitterform	Seite: 1 von 1
Verantwortlicher	Ole Scholz	Version: 1.0
		Datum: DD.MM.YYYY
Beginn	T ₀	
Ende	T ₀ +2 Wochen	Dauer: 2 Wochen
Bearbeiter	Ole Scholz	
Ziele: <ul style="list-style-type: none">• Kenntnisse über verschiedene Gitterformen und ihren Einfluss auf das aerodynamische Verhalten und die Struktur		
Input: <ul style="list-style-type: none">• Literatur zu den verschiedenen Formen		
Schnittstellen zu anderen APs: <ul style="list-style-type: none">• AP 2200 zur Berücksichtigung der Gitterform auf die Aerodynamik• AP 2300 zum Einfluss der Gitterform auf die Struktur		
Aufgaben: <ul style="list-style-type: none">• Literatur zur Thematik lesen		
Ergebnisse: <ul style="list-style-type: none">• Vor- und Nachteile unterschiedlicher Gitterformen kennen		

		AP 1300
Titel	Aktuatorik	Seite: 1 von 1
Verantwortlicher	Ole Scholz	Version: 1.0
		Datum: DD.MM.YYYY
Beginn	T ₀	
Ende	T ₀ +2 Wochen	Dauer: 2 Wochen
Bearbeiter	Ole Scholz	
Ziele: <ul style="list-style-type: none">• Kenntnisse über Aktuatoren zur Steuerung der Grid Fins		
Input: <ul style="list-style-type: none">• Literatur zur Aktuatorik• Kataloge von Herstellern		
Schnittstellen zu anderen APs: <ul style="list-style-type: none">• AP 3200 zur Auswahl stehende Aktuatoren		
Aufgaben: <ul style="list-style-type: none">• Literatur zur Thematik lesen• sich bei Herstellern informieren		
Ergebnisse: <ul style="list-style-type: none">• Überblick über mögliche Aktuatorik		

		AP 1400
Titel	Wiedereintrittsbedingungen	Seite: 1 von 1
Verantwortlicher	Ole Scholz	Version: 1.0
		Datum: DD.MM.YYYY
Beginn	T_0	
Ende	T_0+2 Wochen	Dauer: 2 Wochen
Bearbeiter	Ole Scholz	
Ziele: <ul style="list-style-type: none">• Kenntnisse zu den Bedingungen beim Wiedereintritt		
Input: <ul style="list-style-type: none">• Literatur zum Wiedereintritt		
Schnittstellen zu anderen APs: <ul style="list-style-type: none">• AP 2100 Aerodynamische Einflüsse des Wiedereintritts• AP 2300 Strukturmechanische Einflüsse des Wiedereintritts		
Aufgaben: <ul style="list-style-type: none">• Literatur zur Thematik lesen		
Ergebnisse: <ul style="list-style-type: none">• Kenntnisse zu Bedingungen beim Wiedereintritt		

		AP 2100
Titel	Anforderungen an die Aerodynamik	Seite: 1 von 1
Verantwortlicher	Ole Scholz	Version: 1.0
		Datum: DD.MM.YYYY
Beginn	T ₀ +2 Wochen	
Ende	T ₀ +2,5 Wochen	Dauer: 0,5 Wochen
Bearbeiter	Ole Scholz	
Ziele: <ul style="list-style-type: none">• Sammlung aller aerodynamischen Anforderungen an die Grid Fins		
Input: <ul style="list-style-type: none">• Vorgaben aus Gespräch mit Betreuer		
Schnittstellen zu anderen APs: <ul style="list-style-type: none">• AP 2200 Aerodynamische Kräfte bestimmen Leistung des Aktuators• AP 2200 Aerodynamische Kräfte bestimmen Belastung der Konstruktion		
Aufgaben: <ul style="list-style-type: none">• Aerodynamische Anforderungen definieren• Ggf. nach Wichtigkeit sortieren und in Pflicht und Wunschbedingungen einteilen		
Ergebnisse: <ul style="list-style-type: none">• Liste aerodynamischer Anforderungen		

		AP 2200
Titel	Anforderungen an die Aktuatorik	Seite: 1 von 1
Verantwortlicher	Ole Scholz	Version: 1.0
		Datum: DD.MM.YYYY
Beginn	T ₀ +2,5 Wochen	
Ende	T ₀ +3 Wochen	Dauer: 0,5 Wochen
Bearbeiter	Ole Scholz	
Ziele: <ul style="list-style-type: none">• Sammlung aller Anforderungen an die Aktuatorik der Grid Fins		
Input: <ul style="list-style-type: none">• Vorgaben aus Gespräch mit Betreuer• Kennwerte der Aktuatorik aus Verwendungsbeispielen von Grid Fins als Orientierungswerte		
Schnittstellen zu anderen APs: <ul style="list-style-type: none">• AP 4400 Anforderungen müssen in Betriebssimulation erfüllt werden		
Aufgaben: <ul style="list-style-type: none">• Anforderungen an Aktuatorik definieren• Ggf. nach Wichtigkeit sortieren und in Pflicht und Wunschbedingungen einteilen		
Ergebnisse: <ul style="list-style-type: none">• Liste der Anforderungen an die Aktuatorik		

		AP 2300
Titel	Anforderungen an Struktur und Werkstoff	Seite: 1 von 1
Verantwortlicher	Ole Scholz	Version: 1.0
		Datum: DD.MM.YYYY
Beginn	T ₀ +3 Wochen	
Ende	T ₀ +3,5 Wochen	Dauer: 0,5 Wochen
Bearbeiter	Ole Scholz	
<p>Ziele:</p> <ul style="list-style-type: none"> • Sammlung aller Anforderungen an die Struktur und dem Werkstoff im Bezug auf die Festigkeit und thermische Belastbarkeit <p>Input:</p> <ul style="list-style-type: none"> • Angaben von 3D-Druck-Anbietern • AP 1400 <p>Schnittstellen zu anderen APs:</p> <ul style="list-style-type: none"> • AP 4100 Anforderungen müssen vom Modell erfüllt werden • AP 1400 Wiedereintrittsbedingungen müssen ausgehalten werden <p>Aufgaben:</p> <ul style="list-style-type: none"> • Anforderungen Werkstoff und Struktur definieren • Ggf. nach Wichtigkeit sortieren und in Pflicht und Wunschbedingungen einteilen <p>Ergebnisse:</p> <ul style="list-style-type: none"> • Liste der Anforderungen an Werkstoff und Struktur 		

		AP 3100
Titel	Gittervarianten	Seite: 1 von 1
Verantwortlicher	Ole Scholz	Version: 1.0
		Datum: DD.MM.YYYY
Beginn	T ₀ +3,5 Wochen	
Ende	T ₀ +4 Wochen	Dauer: 0,5 Wochen
Bearbeiter	Ole Scholz	
Ziele: <ul style="list-style-type: none">• Überblick über die verschiedenen Gittervarianten und ihre Unterschiede haben		
Input: <ul style="list-style-type: none">• Bisher verwendete Gittervarianten in der Raketentechnik		
Schnittstellen zu anderen APs: <ul style="list-style-type: none">• AP 3400 Varianten in Morphologischen Kasten eintragen		
Aufgaben: <ul style="list-style-type: none">• Gittervarianten sammeln• Unterschiede untersuchen		
Ergebnisse: <ul style="list-style-type: none">• Liste von Gittervarianten		

		AP 3200
Titel	Aktuatoren und Stellglieder	Seite: 1 von 1
Verantwortlicher	Ole Scholz	Version: 1.0
		Datum: DD.MM.YYYY
Beginn	T ₀ +4 Wochen	
Ende	T ₀ +4,5 Wochen	Dauer: 0,5 Wochen
Bearbeiter	Ole Scholz	
Ziele: <ul style="list-style-type: none">• Überblick über die verschiedenen Aktuatoren und Stellglieder so wie ihre Unterschiede haben		
Input: <ul style="list-style-type: none">• Bisher verwendete Steuervarianten für Grid Fins		
Schnittstellen zu anderen APs: <ul style="list-style-type: none">• AP 3400 Varianten in Morphologischen Kasten eintragen		
Aufgaben: <ul style="list-style-type: none">• Akuatoren- und Stellgliedervarianten sammeln• Unterschiede untersuchen		
Ergebnisse: <ul style="list-style-type: none">• Liste von Aktuatoren und Stellgliedern		

		AP 3300
Titel	Morphologischen Kasten erstellen	Seite: 1 von 1
Verantwortlicher	Ole Scholz	Version: 1.0
		Datum: DD.MM.YYYY
Beginn	T ₀ +4 Wochen	
Ende	T ₀ +5 Wochen	Dauer: 1 Woche
Bearbeiter	Ole Scholz	
Ziele: <ul style="list-style-type: none">• Überblick über alle Lösungsvarianten haben		
Input: <ul style="list-style-type: none">• Lösungsvarianten aus den APs 3100, 3200, 3300		
Schnittstellen zu anderen APs: <ul style="list-style-type: none">• AP 4100 Modell mit Lösungsvarianten aus Morphologischen Kasten zusammen stellen		
Aufgaben: <ul style="list-style-type: none">• Aus den vorher erarbeiteten Lösungsvarianten Morphologischen Kasten erstellen		
Ergebnisse: <ul style="list-style-type: none">• Morphologischer Kasten		

		AP 4100
Titel	Lösungsvarianten auswählen und zu Modell zusammen stellen	Seite: 1 von 1
Verantwortlicher	Ole Scholz	Version: 1.0
		Datum: DD.MM.YYYY
Beginn	T ₀ +5 Wochen	
Ende	T ₀ +5,5 Wochen	Dauer: 0,5 Wochen
Bearbeiter	Ole Scholz	
<p>Ziele:</p> <ul style="list-style-type: none"> • Vollständiges Modell für eine spätere Fertigung <p>Input:</p> <ul style="list-style-type: none"> • Morphologischer Kasten aus AP 3400 • In AP 2000 definierte Anforderungen <p>Schnittstellen zu anderen APs:</p> <ul style="list-style-type: none"> • AP 2000 definierte Anforderungen erfüllen • AP 3400 Lösungsvarianten aus Morphologischen Kasten auswählen • AP 4200 gewählte Lösungsvarianten ins CAD-Modell einbauen • AP 4400 in Betriebssimulation einbinden <p>Aufgaben:</p> <ul style="list-style-type: none"> • Nicht anforderungsgerechte Lösungsvarianten ausschließen • Beste und kombinierbare Varianten auswählen • Gewählte Lösungen zu einem Modell zusammen fassen <p>Ergebnisse:</p> <ul style="list-style-type: none"> • Prototyp 		

		AP 4200
Titel	CAD-Modell anfertigen	Seite: 1 von 1
Verantwortlicher	Ole Scholz	Version: 1.0
		Datum: DD.MM.YYYY
Beginn	T ₀ +5,5 Wochen	
Ende	T ₀ +6,5 Wochen	Dauer: 1 Woche
Bearbeiter	Ole Scholz	
Ziele: <ul style="list-style-type: none">• CAD-Modell für<ul style="list-style-type: none">-Import in FEM-Programm-Fertigung mit 3D-Drucker		
Input: <ul style="list-style-type: none">• Modell aus AP 4100		
Schnittstellen zu anderen APs: <ul style="list-style-type: none">• AP 4100 CAD-Modell aus gewählten Teillösungen erstellen• AP 4300 CAD-Modell in FEM-Programm importieren		
Aufgaben: <ul style="list-style-type: none">• Vorher gewähltes Modell in CAD-Programm implementieren		
Ergebnisse: <ul style="list-style-type: none">• CAD-Modell		

		AP 4300
Titel	FEM-Analyse durchführen	Seite: 1 von 1
Verantwortlicher	Ole Scholz	Version: 1.0
		Datum: DD.MM.YYYY
Beginn	T ₀ +6,5 Wochen	
Ende	T ₀ +8,5 Wochen	Dauer: 2 Wochen
Bearbeiter	Ole Scholz	
Ziele: <ul style="list-style-type: none">• Strukturelle Optimierung des Modells• Numerische Bestätigung der Festigkeit einer optimierten Konstruktion		
Input: <ul style="list-style-type: none">• CAD-Modell aus AP 4200		
Schnittstellen zu anderen APs: <ul style="list-style-type: none">• AP 4200 CAD-Modell analysieren und anpassen		
Aufgaben: <ul style="list-style-type: none">• Beanspruchung unter Last untersuchen• Über-/unterbeanspruchte Teile der Konstruktion lokalisieren• CAD-Modell rekursiv anpassen und erneut testen		
Ergebnisse: <ul style="list-style-type: none">• Für Festigkeit optimiertes und überprüftes Modell		

		AP 4400
Titel	Betriebssimulation durchführen	Seite: 1 von 1
Verantwortlicher	Ole Scholz	Version: 1.0
		Datum: DD.MM.YYYY
Beginn	T ₀ +8,5 Wochen	
Ende	T ₀ +10,5 Wochen	Dauer: 2 Wochen
Bearbeiter	Ole Scholz	
Ziele: <ul style="list-style-type: none">• Bestätigung der anforderungsgerechten Auslegung der Aktuatorik		
Input: <ul style="list-style-type: none">• Anforderungen aus AP 2200• Modell aus AP 4100		
Schnittstellen zu anderen APs: <ul style="list-style-type: none">• AP 2200 Erfüllung der Anforderungen• AP 4100 Analyse des Modells		
Aufgaben: <ul style="list-style-type: none">• Verhalten der Steuerung unter Betriebsbedingungen mittels Matlab/Simulink untersuchen• Erfüllung der Anforderungen überprüfen• Eventuelle Anpassung der Aktuatorik		
Ergebnisse: <ul style="list-style-type: none">• Angemessene und überprüfte Aktuatorik der Grid Fins		

		AP 4500
Titel	Kritische Bewertung	Seite: 1 von 1
Verantwortlicher	Ole Scholz	Version: 1.0
		Datum: DD.MM.YYYY
Beginn	T ₀ +10,5 Wochen	
Ende	T ₀ +11,5 Wochen	Dauer: 1 Woche
Bearbeiter	Ole Scholz	
Ziele: <ul style="list-style-type: none">• Kritische Auseinandersetzung mit den Ergebnissen der Arbeit		
Input: <ul style="list-style-type: none">• Anforderungen aus AP 2000• Simulationsergebnisse von AP 4300 und AP 4400		
Schnittstellen zu anderen APs: <ul style="list-style-type: none">• AP 4300, AP 4400 Simulationsergebnisse im Abgleich mit:• AP 2000 Anforderungen		
Aufgaben: <ul style="list-style-type: none">• Kritische Einschätzung der Ergebnisse• Eventuelle Fehler und Verbesserungsmöglichkeiten der Grid Fins aufzeigen		
Ergebnisse: <ul style="list-style-type: none">• Bewertung des Modells		

		AP 5100
Titel	Ausarbeitung	Seite: 1 von 1
Verantwortlicher	Ole Scholz	Version: 1.0
		Datum: DD.MM.YYYY
Beginn	T ₀ +3,5 Wochen	
Ende	T ₀ +13 Wochen	Dauer: 9,5 Wochen
Bearbeiter	Ole Scholz	
Ziele: <ul style="list-style-type: none">• Vollständige Dokumentation der Vorgehensweise und Ergebnisse		
Input: <ul style="list-style-type: none">• APs 1000, 2000, 3000, 4000		
Schnittstellen zu anderen APs: <ul style="list-style-type: none">• Ausarbeitung umfasst alle vorherigen APs		
Aufgaben: <ul style="list-style-type: none">• Alle Arbeitsschritte und Gedankengängen in fachlich korrekter Form schriftlich festhalten		
Ergebnisse: <ul style="list-style-type: none">• PDF-Dokument mit dem gesamten Inhalt dieser Arbeit		

		AP 5200
Titel	Präsentation	Seite: 1 von 1
Verantwortlicher	Ole Scholz	Version: 1.0
		Datum: DD.MM.YYYY
Beginn	T ₀ +11 Wochen	
Ende	T ₀ +13 Wochen	Dauer: 2 Wochen
Bearbeiter	Ole Scholz	
Ziele: <ul style="list-style-type: none">• Vorstellung der Arbeitsergebnisse		
Input: <ul style="list-style-type: none">• APs 2000, 3000, 4000		
Schnittstellen zu anderen APs: <ul style="list-style-type: none">• über die Inhalte der APs 2000, 3000, 4000		
Aufgaben: <ul style="list-style-type: none">• PowerPoint-Präsentation• Präsentation über gesamte Arbeit halten		
Ergebnisse: <ul style="list-style-type: none">• Mit Poster unterstützte verbale Vorstellung der Arbeitsergebnisse		

		AP 1200
Titel	Titel des Arbeitspakets	Seite: X von Y
Verantwortlicher	Dein Name	Version: 1.1
		Datum: DD.MM.YYYY
Beginn	T_0	
Ende	$T_0 + X$ Wochen	Dauer: X Wochen
Bearbeiter	Dein Name	
<p>Ziele:</p> <ul style="list-style-type: none">• Ziel 1• Ziel 2• ... <p>Input:</p> <ul style="list-style-type: none">• Input 1• ... <p>Schnittstellen zu anderen APs:</p> <ul style="list-style-type: none">• AP XXXX Beschreibung• AP <p>Aufgaben:</p> <ul style="list-style-type: none">• Aufgabe 1• ... <p>Ergebnisse:</p> <ul style="list-style-type: none">• Ergebnis 1• ...		

