



Manuel Obernberger

Entwicklung einer Prototypenrakete

BACHELORARBEIT

zur Erlangung des akademischen Grades
Bachelor of Science
Bachelorstudium Maschinenbau / Wirtschaftsingenieurwesen - Maschinenbau

eingereicht an der

Technischen Universität Graz

Betreuer/in
Ao.Univ.-Prof. Dipl.-Ing. Dr.techn. Raimund Almbauer
Institut für Thermodynamik und nachhaltige Antriebssysteme

Graz, Februar 2024



Institut für Thermodynamik und nachhaltige Antriebssysteme
Vorstand: Univ.-Prof. DI Dr. Helmut Eichlseder

Vorwort

Diese Arbeit befasst sich mit der Entwicklung, Fertigung und Testung einer eigens für das Aerospace Team Graz entworfenen Rakete, welche für Testzwecke verwendet wird.

Seit der Gründung des Aerospace Teams Graz im Jahr 2019 ist das Team stetig gewachsen, umso mehr freut es mich als Gründungsmitglied seit dem ersten Tag dabei zu sein und mein Wissen in der Raumfahrt stetig vergrößern zu können. Die Möglichkeit, über das Aerospace Team Graz eine Bachelorarbeit zu schreiben, die die erforderlichen Schritte für die Realisierung einer Testrakete untersucht, ist besonders spannend. Besonders da zum Zeitpunkt der Arbeit noch keine Rakete des Aerospace Teams Graz eine erfolgreiche Landung absolviert hat. Zum Zeitpunkt der Vollendung der Arbeit ist die Testrakete „Spatz“ die zweite Rakete, welche nach einem Flug wiederverwendbar ist und die erste Rakete, welche einen fehlerfreien Flug durchlaufen hat. Somit ist das Hauptziel dieser Arbeit erreicht worden. Weitere Ziele waren eine Grundlage für zukünftige Flugmöglichkeiten zu setzen und die Testmöglichkeiten im Aerospace Team Graz zu vergrößern.

Ohne die Unterstützung anderer wäre diese Arbeit nicht möglich gewesen, deshalb möchte ich mich hier bei allen bedanken, die mir geholfen haben diese Arbeit zu realisieren. Besonderer Dank gilt natürlich dem Aerospace Team Graz und allen Mitgliedern, die mich tatkräftig bei allen Herausforderungen unterstützten und diese Bachelorarbeit erst ermöglichten.

Meinem Betreuer Herrn Ao.Univ.-Prof. Dipl.-Ing. Dr.techn. Raimund Almbauer möchte ich für die Chance danken, für das Aerospace Team Graz eine Bachelorarbeit zu schreiben. Ich möchte außerdem meine Dankbarkeit für die umfassende fachliche Unterstützung, die Hilfe bei der Lösungsfindung und die investierte Zeit zum Ausdruck bringen.

Weiters möchte ich mich beim Institut für Thermodynamik und nachhaltige Antriebssysteme bedanken und vor allem beim Vorstand Herrn Univ.-Prof. Dipl.-Ing. Dr.techn. Helmut Eichseder für das Ermöglichen dieser Arbeit und bei allen Unterstützern des Aerospace Teams Graz, da durch ihr Mitwirken die erfolgreiche Weiterentwicklung des Aerospace Team Graz erst möglich wurde.

Inhaltsverzeichnis

FORMELZEICHEN, INDIZES UND ABKÜRZUNGEN	VI
EIDESSTATTLICHE ERKLÄRUNG	VII
ZUSAMMENFASSUNG	VIII
ABSTRACT.....	IX
1 EINLEITUNG	1
2 THEORETISCHE GRUNDLAGEN	3
2.1 BEGRIFFSERKLÄRUNGEN	3
2.2 RAKETENAUFBAU	3
2.2.1 <i>Avionics</i>	3
2.2.2 <i>Aerostructure</i>	4
2.2.3 <i>Propulsion</i>	5
2.2.4 <i>Recovery</i>	5
2.3 ABLAUF DES FLUGES	6
2.4 AUFBAU AUF BESTEHENDES WISSEN IM ASTG	7
2.4.1 <i>Feststoffbooster</i>	8
2.4.2 <i>Verwendung von Carbonfasern und Glasfasern</i>	8
2.4.3 <i>Fallschirme und Seilmanagement</i>	8
3 EIGENSCHAFTEN UND ANFORDERUNGEN AN DIE RAKETE.....	9
3.1 DIMENSIONIERUNG	9
3.2 MAXIMALES GEWICHT	9
3.3 MAXIMALE ZIELHÖHE	10
3.4 PAYLOAD FLÜGE	10
3.5 TESTEN DER RECOVERY-SYSTEME	10
4 SIMULATIONEN	11
4.1 METEOR.....	11
4.2 OPEN-ROCKET	11
5 KONZEPT, DESIGN UND BAU	13
5.1 HÜLLE	13
5.2 FINNEN	14
5.3 BOOSTER	15
5.4 NOZZLE	17
5.5 GRUNDPLATTEN	18
5.6 AUSWURFSYSTEM.....	18
5.7 FALLSCHIRM.....	19
5.8 FLUGCOMPUTER	20
6 TESTING	21
6.1 HOTFIRE-TESTS	21
6.2 RECOVERY TEST	23
6.3 FLUGCOMPUTER TEST	24
7 FLUG.....	25
7.1 FLUGABLAUF	25
7.2 FLUGBERICHT	26
8 ERGEBNISSE UND DISKUSSION	28
8.1 VERGLEICH MIT ZIELSETZUNG.....	28
8.2 ANALYSE DER FLUGDATEN.....	28
9 FAZIT UND AUSBLICK	30

9.1	FAZIT	30
9.2	AUSBLICK AUF ZUKÜNFTIGE TÄTIGKEITEN.....	30
9.2.1	<i>Gewichtsoptimierung des bestehenden Systems</i>	30
9.2.2	<i>Verbesserungen am Antrieb</i>	31
9.2.3	<i>Drucktests</i>	31
9.2.4	<i>Montageoptimierung</i>	31
10	ABBILDUNGSVERZEICHNIS	33
11	LITERATUR	34
12	FORMELVERZEICHNIS	35
13	ANHANG	36
13.1	CHECKLISTEN	36
13.1.1	<i>Grain manufacturing Spincasting</i>	36
13.1.2	<i>Safety Protokoll Hotfire-Test</i>	42
13.1.3	<i>Safety Protokoll Flug</i>	45
13.2	DIAGRAMME.....	48
13.3	SIMULATIONS DATEN.....	51
13.4	DATENBLÄTTER.....	55
13.4.1	<i>iSi Components 10ml – 8 Gramm CO₂ – Zylinder mit 3/8 UNF Halsgewinde</i>	55
13.4.2	<i>ASTOTEC Fuse Heads F-Type soft</i>	56
13.4.3	<i>Kanirope® Dyneema Seil PRO geflochten</i>	58
13.4.4	<i>Ripstop-Nylon Zeltstoff, silikonbesch., 20den, 36g/qm, Extremtextil</i>	58
13.4.5	<i>KG SN 4 PVC-U Rohr</i>	59

Formelzeichen, Indizes und Abkürzungen

Lateinische Formelzeichen

a	m/s^2	Beschleunigung
A	m^2	Fläche, Oberfläche, Querschnittsfläche
v	m/s	Geschwindigkeit
d	m	Durchmesser
F	N	Kraft
l	m	Länge
m	kg oder mol	Masse
p	bar , Pa	Druck
p^0		Standarddruck / $p^0 = 1 \text{ atm} = 1,013 \text{ bar}$ häufig auch $p^0 = 1 \text{ bar}$
V	m^3	Volumen
c_w	-	Strömungswiderstandkoeffizient

Konstanten

$g = 9,8067$	m/s^2	Normfallbeschleunigung
--------------	----------------	------------------------

Griechische Formelzeichen

ρ	kg/m^3	Dichte
--------	-----------------	--------

Weitere Indices und Abkürzungen

ASTG	Aerospace Team Graz
TU	Technische Universität
AVI	Avionics
PRO	Propulsion
REC	Recovery
AST	Aerostructure

Eidesstattliche Erklärung

Ich erkläre an Eides statt, dass ich die vorliegende Arbeit selbstständig verfasst, andere als die angegebenen Quellen/Hilfsmittel nicht benutzt, und die den benutzten Quellen wörtlich und inhaltlich entnommenen Stellen als solche kenntlich gemacht habe.

I declare that I have authored this thesis independently, that I have not used other than the declared sources/resources, and that I have explicitly indicated all material which has been quoted either literally or by content from the sources used.

Vorname Nachname

Graz, Datum

Zusammenfassung

Das Hauptziel dieser Arbeit stellte die Entwicklung, Fertigung und Testung einer Rakete dar, welche in der Zukunft für das Aerospace Team Graz als wiederverwendbare Testrakete fungieren soll. Dabei wurden Möglichkeiten für leichtes Austauschen der Teile und leichte Integration von neuen, zu testenden, Systemen realisiert werden.

Die Realisierung der Rakete wurde Schritt für Schritt durchgeführt, beginnend mit der Konzeptentwicklung und Simulation des Systems. Hier waren viele Iterationen notwendig, um eine möglichst optimale Version zu erzeugen. Sobald das Modell zufriedenstellend war, wurde das Design und die Materialauswahl durchgeführt. Hierbei mussten erneut Simulationen durchgeführt werden, um bei den Veränderungen der Rakete immer aktuelle Daten bezüglich des Flugverhaltens zu haben. Sobald die letzten Fragen zum Modell geklärt gewesen sind, musste dieses noch realisiert werden. Die ausgewählten Komponenten und Systeme wurden mittels Bodentests überprüft bevor eine Montage durchgeführt wurde.

Speziell bei den Tests mit dem Feststoffantrieb, für den eine neue Gussmethode verwendet wurde, war es wichtig die Sicherheit zu garantieren, weshalb ein Sicherheitskonzept erstellt wurde. Gleiches gilt für den Flug, welcher nach Beendigung aller notwendigen Bodentest möglich war.

Die Simulationen nahmen einen unerwartet großen Teil der Entwicklungszeit in Anspruch, da durch kontinuierliche Veränderungen am Design oder der Werkstoffwahl immer wieder Änderungen auftraten und deshalb die Auslegung des Antriebs erneut simuliert werden musste. Bei der Realisierung hatten vor allem die Tests den meisten Arbeitsaufwand, da jeder Test sorgfältig geplant und durchgeführt werden musste. Zusätzlich musste jede Testvariante immer mehrmals durchgeführt werden, um die Aussagekraft der Tests zu bestärken.

Das Absolvieren von zwei Flügen innerhalb eines Flugtages mit derselben Rakete zeigt, dass das Konzept der wiederverwendbaren Testrakete funktioniert. Nicht zu vernachlässigen sind jedoch die Unterschiede zwischen Simulation und Flug, welche in Zukunft beim Testen von Systemen noch verbessert werden müssen, um wiederholbare und gleichbleibende Flüge zu gewährleisten.

Abstract

The main objective of this work was the development, production and testing of a rocket that would serve as a reusable test rocket for the Aerospace Team Graz in the future. The goal was to realize possibilities for easy exchange of parts and easy integration of new systems to be tested.

The implementation of the rocket was carried out step by step, starting with the concept development and simulation of the system. Many iterations were necessary in order to create the best possible version. As soon as the model was satisfying, the design and material selection were carried out and simulations had to be performed again in order to always have up-to-date data regarding the flight behaviour of the rocket when changes were made. Once the final questions about the model had been clarified, it had to be realized. The selected components and systems were checked by means of ground tests before the assembly was carried out.

It was particularly important to guarantee safety during the tests with the solid-fuel motor booster, for which a new casting method was used, which is why a safety concept was drawn up; the same applies to the flight, which was possible after all the necessary ground tests had been completed.

The simulations took up an unexpectedly large part of the development time, as continuous changes to the design or the choice of materials meant that the simulations kept changing and the design of the propulsion system had to be redone. During realization, the tests in particular required the most work, as each test had to be carefully planned and carried out and each test variant was always performed several times in order to confirm the validity of the tests.

Completing two flights within one flight day with the same rocket shows that the concept of the reusable test rocket works. However, the differences between simulation and flight should not be neglected, which must be improved in the future when testing systems in order to produce repeatable, consistent flights.

1 Einleitung

Das Aerospace Team Graz (ASTG) ist ein interuniversitärer Verein aus Studierenden, ansässig an der TU-Graz, welcher sich das Ziel gesetzt hat, mit eigens entwickelten Raketen an internationalen Wettbewerben teilzunehmen und gegen andere Studierendenteams anzutreten.

Die Zielsetzung dieser Arbeit ist die Entwicklung einer Testrakete, von der Konzeptphase bis zum Flug. In den vergangenen Jahren sind mehrmalige Fehlfunktionen während der Flüge aufgetreten, wodurch die Notwendigkeit einer solchen Rakete entstanden ist. Um Fehler während des Flugs früher erkennen zu können, ist die Idee einer Testrakete entstanden, mit der einzelne Systeme getestet werden können, schon bevor diese in einer Wettbewerbsrakete verbaut werden.

Dadurch sind die nachfolgenden Anforderungen an die Rakete entstanden. Sie soll kostengünstig in der Produktion sein, für den Fall, dass bei Fehlern im getesteten System die Rakete beschädigt wird. Das System ist darauf ausgerichtet, modular aufgebaut zu sein, um einerseits bei Beschädigung der Teile diese leicht wechseln zu können und andererseits, um einfacher verschiedene Testkomponenten in der Rakete verbauen zu können. Dabei ist die Rakete gleichzeitig so konzipiert, dass sie einfach zu fertigen und leicht zu produzieren ist. Ein weiterer Aspekt der Konstruktionsbedingungen der Rakete, ist die Möglichkeit in Österreich starten zu können. Auf Grund der gesetzlichen Regelungen in Österreich ist es nur möglich, Flugkörper bis 25 kg Gewicht auf eine maximale Höhe von 120 Metern zu fliegen [4].

Die Anwendungsbereiche für diese Versuchsrakete umfassen mehrere Punkte, auf welche während der Entwicklung eingegangen werden muss. Die Rakete soll für den Erhalt des Wissens verwendet werden, denn mit Änderung der Antriebssysteme von Feststoff auf neue Antriebsarten besteht die Gefahr, dass in einigen Jahren das Wissen über Feststoffantriebe verloren geht und neu erarbeitet werden muss. Um dies zu verhindern, kann mit der Versuchsrakete der Prozess des Gießens und der Handhabung eines solchen Antriebes geübt und vertieft werden. Dadurch wird neuen Mitgliedern dieses Wissen weitergegeben und bleibt somit erhalten.

Ein weiterer Punkt ist das Fliegen und damit Testen von Nutzlasten. Das ASTG hat Kooperationen mit mehreren HTLs in Österreich und bietet dort den Schüler*innen die Möglichkeit, im Zuge ihrer Diplomarbeit eine Nutzlast zu entwerfen und zu fertigen. Durch die Testrakete können die Nutzlasten realitätsnah getestet werden und die Schüler*innen bekommen die Möglichkeit ihre Arbeit in Aktion zu sehen.

Darüber hinaus kann die Versuchsrakete auch für das Testen des kompletten Recovery Systems verwendet werden. Einerseits kann das Auswurfssystem der Fallschirme, welches große Unterschiede zu Bodentests aufweist und andererseits auch das Verhalten der Fallschirme im Landevorgang, bezogen auf Landegeschwindigkeit und Stabilität des Systems, untersucht werden.

Zunächst folgt nun eine allgemeine Einführung in das Thema der Raketenwissenschaft, in welcher die theoretischen Grundlagen, der Aufbau einer Rakete und der Ablauf eines Fluges beschrieben werden. Als Zusatz dazu werden noch Entwicklungen des ASTG kurz erläutert, um den Wissensstand, welcher zu Beginn der Bachelorarbeit vorhanden war, darzulegen.

Der zweite Teil befasst sich mit dem theoretischen Aspekt der Bachelorarbeit, in der die Rakete unter Einhaltung aller Anforderungen entwickelt und simuliert wurde. Hier werden Materialauswahl und Art der Realisierung genauer erläutert.

Die darauffolgende Passage beschreibt den praktischen Teil der Arbeit, hierbei werden der Bau und die Tests beschrieben. Es wird auf Schwierigkeiten während dieser Phase hingewiesen und die dafür notwendigen Lösungsansätze beschrieben, um ein funktionierendes System zu

entwickeln.

Zum Schluss werden noch das Ergebnis des Fluges und die daraus resultierenden Schlussfolgerungen dargelegt, sowie die Flugdaten analysiert. Es wird ein Vergleich zwischen den gestellten Erwartungen und den erhobenen Ergebnissen durchgeführt. Weiters gibt es einen Ausblick der Möglichkeiten, wie die Systeme in Zukunft noch verbessert werden können und dadurch neue Anwendungen und Anforderungen auftreten können. Abschließend werden Weiterentwicklungen und die Verwendung von neuen Systemen erwähnt, um weiterführende Forschung für das ASTG aufzuzeigen.