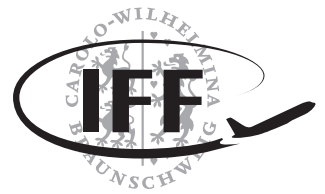




Technische
Universität
Braunschweig

Institut für
Flugführung



Bachelorarbeit

Flugmechanische Untersuchung zum effizienten Aufstieg in die untere Stratosphäre mit elektrischen, propellergetriebenen Fluggeräten

Lucas Schreer

5. Januar 2019

Prüfer: Prof. Dr.-Ing. Peter Hecker

Betreuer: Yannic Beyer, M. Sc.

Technische Universität Braunschweig
Institut für Flugführung
Hermann-Blenk-Str. 27
D-38108 Braunschweig

Seiten: 45
Abbildungen: 5
Tabellen: 7



Bachelorarbeit

für

Herrn Lucas Schreer

Matrikelnummer: 4698027

Flugmechanische Untersuchung zum effizienten Aufstieg in die untere Stratosphäre mit elektrischen, propellergetriebenen Fluggeräten

Hintergrund

Im Rahmen des kürzlich gestarteten Projekts AEROMET_UAV soll ein Flugsystem für die Atmosphärenforschung entwickelt werden, welches in der Lage ist, eine meteorologische Nutzlast auf 10 km oder sogar 15 km Höhe zu bekommen. Es werden Alternativen für Wetterballons gesucht, da diese nicht steuerbar sind und durch Winde einer starken Abdrift unterliegen. Durch im Internet kursierende Videos, welche den Aufstieg mit Quadrocoptern mit einer Gesamtmasse von 1 kg auf 10 km Höhe zeigen, werden in dem Projekt auch elektrische, propellergetriebene Fluggeräte diskutiert.

Ziel der Arbeit / Aufgabenstellung

Nach einer Literaturrecherche zur Analyse der Flugleistungen elektrischer, propellergetriebener Fluggeräte soll ein geeignetes Tool für die Analyse der Flugleistungen ausgewählt und ggf. erweitert werden. Die Auswahl und Erweiterung des Tools soll nach Kriterien der Validität – in der Regel basierend auf Datenbanken – erfolgen.

Mit dem Tool sollen die im Internet kursierenden Daten zum Aufstieg mit einem 1 kg schweren Quadrocopter auf 10 km Höhe überprüft und diskutiert werden.

Durch Untersuchungen mit dem Tool sollen wichtige Parameter des Fluggerätes zur Erfüllung der Mission identifiziert werden. Der hierfür betrachtete Lösungsraum soll möglichst vielfältige Konzepte für Antrieb und Fluggerät enthalten. Schließlich sollen die Parameter so optimiert werden, dass das Fluggerät seine Mission möglichst effizient erfüllt.

Folgende Teilaufgaben sind zu bearbeiten:

- Literaturrecherche zur Analyse der Flugleistungen elektrischer, propellergetriebener Fluggeräte,
- Auswahl und ggf. Erweiterung eines für die Analyse der Flugleistungen geeigneten Tools mit möglichst validen Daten,
- Überprüfung und Diskussion der in [1] angegebenen Flugleistungen mit dem Tool,
- Optimierung eines Fluggeräts zur Erfüllung der Mission mit dem Tool durch Variation geeigneter Parameter,

- Diskussion der Ergebnisse.

Literaturhinweise

- [1] Anderson, C. (DIY Drones), Blouin, C., "10 km high flight with a 1kg quadcopter", Website, URL: <https://diydrones.com/profiles/blogs/10-km-high-flight-with-a-1kg-quadcopter> [abgerufen am 15.10.2018], 2018.
- [2] Scheiderer, J., „Angewandte Flugleistung: Eine Einführung in die operationelle Flugleistung vom Start bis zur Landung“, Springer, 2008.
- [3] Brüning, G., Hafer, X., Sachs, G., „Flugleistungen: Grundlagen, Flugzustände, Flugabschnitte, Aufgaben und Lösungen“, Springer, 1993.
- [4] Yedamale, P., „Brushless DC (BLDC) motor fundamentals“, Microchip Technology Inc, 2003.

Dauer

Die maximale Bearbeitungszeit beträgt 3 Monate.

Sonstige Regelungen:

1. Die Arbeit ist in Absprache mit dem Betreuer durchzuführen. Die Arbeit oder Teile daraus dürfen ohne Rücksprache mit dem Institut nicht veröffentlicht oder an Dritte weitergegeben werden.
2. Es sind die „Richtlinien und Hinweise für die Anfertigung von Studien-, Diplom-, Bachelor- und Masterarbeiten“ des Instituts für Flugführung der TU Braunschweig zu beachten
3. Soweit Geräte und Versuchseinrichtungen des Instituts für Flugführung genutzt werden müssen, dürfen diese nur innerhalb der Dienstzeit oder ausnahmsweise auch darüber hinaus nach Rücksprache und Genehmigung durch den Betreuer genutzt werden. In jedem Fall muss aber aus Sicherheitsgründen mindestens eine weitere Person in Sicht- oder Rufweite sein. Den Sicherheitsanweisungen des verantwortlichen Personals ist unbedingt Folge zu leisten.
4. Der Studierende trägt für vollständige Einhaltung der Prüfungs- bzw. Studienordnung selbst Sorge, er hat den Betreuer die entsprechenden Informationen zu Beginn der Arbeit mitzuteilen.

Betreuung

Yannic Beyer, M.Sc. / Alexander Peuker, M.Sc.

(Prof. Dr.-Ing. P. Hecker)

Ausgabe:

Abgabe:

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

Inhaltsverzeichnis

Abbildungsverzeichnis	VIII
Tabellenverzeichnis	IX
Nomenklatur	X
1. Einleitung	1
1.1. Motivation	1
1.2. Stand der Technik	1
1.3. Ziel der Arbeit	2
2. Programm	3
2.1. Parameter des Fluggeräts	3
2.2. Parameter der Mission	5
2.3. Berechnung weiterer Parameter	6
2.4. Aufbau des Programms	8
2.5. Leistungsberechnung	9
2.5.1. Veränderung der Umgebungsparameter mit der Höhe	9
2.5.2. Schub berechnen	9
2.5.3. Drehzahl und Drehmoment aus Propellerkennfeld interpolieren	12
2.5.4. Motorzustand berechnen	12
2.5.5. Zustand der Motorregler	13
2.5.6. Batteriezustand	13
2.5.7. Wirkungsgrad über das Gesamtsystem	15
2.5.8. Werden Grenzen überschritten?	16
2.6. Vernachlässigungen und Vereinfachungen	17
2.6.1. Einschränkungen	17
2.6.2. Vereinfachungen	17
3. Nachbildung des Quadrocopterfluges in Russland	19
3.1. Komponenten des Quadrocopters	19
3.1.1. Missions und Umgebungsparameter	20
3.2. Nachbildung im Programm	21
3.3. Ergebnisse	21
3.4. Diskussion	24

4. Parameteruntersuchung	26
4.1. Einleitung und Vorgehensweise	26
4.2. Steiggeschwindigkeit	26
4.3. Verstellpropeller	26
5. Zusammenfassung und Ausblick	27
5.1. Zusammenfassung	27
5.2. Ausblick	27
6. Projektmanagement	28
6.1. Projektstrukturplan	29
6.2. Zeitplan	31
A. Blindtext im Anhang	45

Abbildungsverzeichnis

2.1. Struktogramm des MATLAB-Skripts	8
3.1. Restladung der Batterie über der Höhe	21
3.2. Motordrehzahl der Batterie über der Höhe	22
3.3. Entladestrom der Batterie über der Höhe	23
3.4. Pulsweitenmodulation über der Höhe	24

Tabellenverzeichnis

2.1. Motorparameter für technische Grenzen	3
2.2. Propellerparameter für Schub, aerodynamische und technische Grenzen	4
2.3. Batterieparameter zur Berechnung der verbleibenden Restladung sowie der technischen Grenzen	4
2.4. Parameter des Multicopters	5
2.5. Parameter des Flächenflugzeug	5
2.6. Flugparameter	6
2.7. Umgebungsparameter	6
2.8. Berechnung weiterer Parameter	6
3.1. Motorparameter	19
3.2. Batterieparameter	20
3.3. Umgebungs- und Missionsparameter	20

Nomenklatur

1 Einleitung

1.1. Motivation

Im Rahmen des Forschungsprojektes AEROMET_UAV wird nach Alternativen für den Einsatz von Wetterballons zur Atmosphärenmessung geforscht. Wetterballons liefern seither wichtige Messdaten im Bereich der Wetter- und Klimamessung. Allerdings sind die Ballons den Umgebungseinflüssen wie Wind und Temperatur ausgesetzt. Die empfindlichen Außenhülle des Ballons erweist sich zudem als sehr anfällig gegenüber kleinen Beschädigungen, die ein vorzeitiges Platzen des Ballons verursachen können. Daher muss immer mit einer Abdrift und einem möglichen Fehlschlag der Mission gerechnet werden. Nicht zuletzt ist diese Art der Wetter- und Klimamessung wenig nachhaltig, da der Ballon bei jedem Einsatz unwiederbringlich zerstört wird. Dies erzeugt viele Kleinteile, die schwer wiederzufinden sind und somit eine Umweltbelastung darstellen. Ein weiterer Kostenfaktor entsteht durch den Verlust der zum Aufstieg benötigten Gase wie Wasserstoff oder Helium.

Als eine erfolgversprechende Alternative erweisen sich sogenannte Unmanned Aerial Vehicle (UAV). Der Vorteil der UAV's liegt vor allem in ihrer Robustheit, der Steuerbarkeit und der einfachen Bedienung. Im März des Jahres 2018 veröffentlichte der Russe Denis Koriakin ein Video [1], in dem er einen Steigflug eines 1 kg schweren Quadrocopters auf eine Höhe von 10 km zeigt.

1.2. Stand der Technik

Die Bedeutung von unbemannten Fluggeräten in Bereichen wie der Paketzustellung, dem Aufnehmen von Bildern und Videos oder dem Beobachten der Umgebung ist kontinuierlich am Wachsen. Dabei weicht das Flugverhalten der elektrisch angetriebenen, unbemannten Fluggeräte von den konventionell mit Gasturbinen oder Kolbenmotor betriebenen Fluggeräten ab, da sich die Masse nicht durch die Verbrennung von Kraftstoff verringert. Außerdem wird die Wahl des Leistungsverhaltens und der Anforderungen an das Fluggerät stark durch die spezifische Auslegung dieser für konkrete Missionen beeinflusst. Dazu gibt es eine steigende Anzahl an Untersuchungen, die sich mit dem Leistungsverhalten und der optimalen Auslegung von elektrischen, propellergetriebenen Flugsystemen beschäftigen (Quellen). In [5] wird mithilfe von Flugversuchen die Flugzeugpolare von Modellflugzeugen ermittelt. Mit dieser wird im Anschluss die Flugleistung quantifiziert. Wiederum in [6] wird ein anderer Ansatz gewählt. Hier werden entscheidende Leistungs- oder Geometrieparameter der Motoren, Propeller, verschiedener Rahmen und Batterien in Abhängigkeit der Masse gesetzt. In einer anschließenden Trade-Off Untersuchung wird für eine gegebene Mission das optimale Fluggerät entwickelt. Datenbanken von Herstellern verwenden auch diverse Online Tools

[2, 3, 4]. Hier kann aus umfassenden Datenbanken oder durch manuelle Eingabe bekannter Daten das gewünschte Flugobjekt im Tool nachgebildet werden. Dazu werden das Flugobjekt generell, die Akkuzelle, der Motorregler, der Motor und der Propeller vom Anwender ausgewählt und spezifiziert. Anschließend berechnet das Programm das Flugverhalten und das gemeinsame Zusammenwirken aller Antriebskomponenten. (... erste Auslegung ...). Der Höheneinfluss auf das Leistungsverhalten wird in [8] behandelt und wieder anhand von Flugversuchen validiert. Diese Flugversuche wurden auf unterschiedlichen Höhenniveaus durchgeführt. Dabei verweilte das Flugobjekt jeweils pro Versuch auf einem anderen Niveau. Im Anschluss werden die gemessenen Daten im Hinblick auf einen höheren Leistungsverbrauch in größeren Flughöhen ausgewertet. Einen elektrotechnischen Ansatz zur Beschreibung und Berechnung des elektrischen Antriebssystems sowie eines Multicopters als Ganzes wird in [9, 10, 11] verwendet. Stepaniak bestimmt dabei unbekannte Konstanten aus seinem aufgestellten Modell mit Messdaten aus Flugversuchen. Es zeigt sich, dass zunehmend mehr Untersuchungen zur Optimierung von Multicopterentwürfen gemacht werden. Auch das Leistungsverhalten wird verstärkt mit Blick auf eine Optimierung betrachtet. Für einen Steigflug auf 10 km oder sogar 15 km sind noch keine ausreichenden Untersuchungen gemacht worden. Der Höheneinfluss wurde zwar untersucht, allerdings bestand das Missionsprofil aus einem Flug auf konstanter Höhe. Dies beinhaltet nicht die zusätzliche Leistung, die zum Steigen benötigt wird. Zudem fehlt bisher die Untersuchung des Einflusses verschiedener Parameter des Flugsystems auf das Steigvermögen oder die damit maximal erreichbare Höhe. Die Online Tools erweisen sich als nützliche Hilfe, wenn es darum geht eine Vorabauslegung des gewünschten Flugsystems, v.a. des Antriebsstrangs, zu erstellen. Allerdings kann damit nicht das Flugverhalten an sich bestimmt werden. Weiterhin sind die zugrunde gelegten Modelle nicht einsehbar. Einen bisher unbestätigten Steigflug auf mehr als 10 km ist [1] in Russland im Mai 2018 gelungen.

1.3. Ziel der Arbeit

Das Ziel dieser Arbeit ist die Untersuchung der flugmechanischen Eigenschaften von elektrisch, propellergetriebenen Fluggeräten. Dazu wird ein Tool entwickelt, mit dem die Flugleistungen der UAV's berechnet werden können. Ziel des Fluggerätes soll es sein eine Flughöhe von 10 km oder sogar 15 km zu erreichen. Bezogen auf diese Mission soll ein Fluggerät gefunden und optimiert werden. Dazu wird anhand geeigneter Parameter und Variation dieser die bestmöglichen Konstellation der Komponenten des Fluggerätes ermittelt. Dies kann sowohl das Fluggerät an sich betreffen oder Missionsparameter z.B. die Steiggeschwindigkeit.

2 Programm

2.1. Parameter des Fluggeräts

Bei der Auslegung des Fluggeräts werden nicht nur Multicopter betrachtet sondern auch Flächenflugzeuge, sogenannte fixed wing UAVs. Aus diesem Grund werden die Parameter Motor, Propeller, Batterie und Missionsparameter sowie Umgebungsparameter allgemein für beide Arten der UAVs festgelegt. Anschließend werden die Parameter des Multicopters oder des Flächenflugzeugs zur Charakterisierung dieser bestimmt, je nachdem, welches Fluggerät untersucht werden soll. Im Anschluss werden die Formeln der Leistungsberechnung dargelegt. Das Programm und die diesem grundlegende Leistungsberechnung, basieren auf dem internen Bericht "[Leistungsberechnung von Multicoptern](#)" von Y. Beyer (2016) Blub. Aus dieser wurden die Berechnung der Aerodynamik von Multicoptern, die Pulsweitenmodulation und der Batterieentladung sowie die festgelegten Grenzen der fliegbaren Flugzustände übernommen.

Flugsystem

Zu Beginn der Mission muss das Flugsystem festgelegt werden, da die Berechnung der Aerodynamik entscheidend vom Flugsystem abhängt. Die Abfrage erfolgt mit der Variablen `Abfrage_Flugsystem`. Diese kann die Werte 1 für einen Multicopter oder 0 für ein Flächenflugzeug annehmen.

Motor

Die ersten drei Motorparameter sind notwendig, um den Motorzustand zu berechnen. Der vorletzte Parameter dient als technische Grenze, die für ein gut ausgelegtes System nicht überschritten wird. Die Motormasse fließt in Kombination mit der Anzahl der Propeller in die Gesamtmasse des Fluggerätes mit ein.

Tabelle 2.1.: Motorparameter für technische Grenzen

Parameter	Variablenname	Einheit
Innenwiderstand R_i	R_i	Ω
Geschwindigkeitskonstante K_V	K_V	$\frac{RPM}{V}$ bzw. $\frac{U}{V_s}$
Leerlaufstrom I_0	I_0	A
maximaler Dauerstrom I_{max}	I_max	A
Motormasse m_{Mot}	m_Mot	kg

Propeller

Der Propellername wird in der Form 'Durchmesser x Pitch' angegeben. Der Name ist wichtig, um das Propellerkennfeld aus der Propellerdatenbank von APC zu entnehmen. Die Anzahl der Propeller beeinflusst entscheidend die Geometrie des Fluggerätes. Weiterhin wird damit der benötigte Schub auf die Anzahl der Propeller aufgeteilt. Die letzten Parameter dienen zur Bestimmung der Effekte einer Anströmung und damit der Berücksichtigung der Blattelemententheorie.

Tabelle 2.2.: Propellerparameter für Schub, aerodynamische und technische Grenzen

Parameter	Variablenname	Einheit
Propellername	prop_name	—
Anzahl der Propeller n_{Prop}	n_Prop	—
Mittlerer Nullwiderstandsbeiwert c_{d0}	c_d0	0,05
Anstieg des Auftriebsbeiwerts $\frac{dc_a}{dc_\alpha}$	a_alpha	5
Maximaler Anstellwinkel α_{max}	alpha_stall	10°

Batterie

Die aufgeführten Parameter der Batterie bestimmen zum einen die verfügbare Kapazität und zum anderen die Batterieentladung. Bei der Energiedichte handelt es sich um repräsentative Werte für den verwendeten Akkutyp, z.B. Li-Ion oder Li-Po. Die minimale Zellenspannung ist ein Erfahrungswert, der am *Institut für Flugführung* verwendet wird. Um den Energieverlust der Batterie zu berechnen, wird die Peukert-Konstante herangezogen. Diese beträgt für Li-Po-Akkus ca. $1,01 \leq P \leq 1,05$ und für Li-Ion-Akkus ca. 1,05 (**Traub** Blub). Außerdem ist die Peukert-Konstante für Li-Po-Batterien von der Temperatur abhängig. Niedrigere Temperaturen als die Umgebungstemperatur können die angegebene Nennkapazität reduzieren und die Batterieverluste progressiv steigen lassen. Die maximale C-Rate dient als weitere technische Begrenzung, die wiederum für ein gut ausgelegtes System nicht erreicht wird.

Tabelle 2.3.: Batterieparameter zur Berechnung der verbleibenden Restladung sowie der technischen Grenzen

Parameter	Variablenname	Einheit
Energiedichte $\frac{E_{Bat}}{m_{Bat}}$	E_Dichte	J/kg
Anzahl der Batteriezellen $N_{Bat,cell}$	N_bat_cell	—
nominale Spannung pro Batteriezelle $U_{Bat,cell}$	U_bat_nom	V
minimale Spannung pro Batteriezelle $U_{Bat,cell,min}$	U_bat_min	V
Peukert-Konstante P	P_bat_Peukert	1,05
Maximale C-Rate $C_{rate,max}$	C_Rate_max	—
Batteriemasse m_{Bat}	m_bat	kg

Multicopter

Die Parameter für den Multicopter sind in 2.4 aufgeführt. Die Leermasse fließt mit in die Gesamtmasse mit ein und wird für die Berechnung des Schubs und weiterer Parameter benötigt. Die Beiwerte sind reine Schätzwerte. Für die nachfolgenden Berechnungen ist nur die obere Stirnfläche von Bedeutung, da sich auf diese die Beiwerte beziehen. (fraglich ob die Angabe des Seitlichen Widerstandsbeiwertes mit einfließen soll, Stichwort Formfaktor). Die Propeller bleiben bei den Stirnflächen unberücksichtigt.

Tabelle 2.4.: Parameter des Multicopters

Parameter	Variablenname	Einheit
Leermasse des Multicopters m_{Copter}	m_copter	kg
Obere Stirnfläche $A_{\text{copter,oben}}$	A_copter	m^2
seitliche Stirnfläche $A_{\text{copter,seitlich}}$	A_copter_seitlich	m^2
Oberer Widerstandsbeiwert $c_{W,\text{copter,oben}}$	c_W_copter_oben	—
Seitlicher Widerstandsbeiwert $c_{W,\text{copter,seitlich}}$	c_W_copter_seitlich	—
Maximaler Auftriebsbeiwert $c_{A,\text{copter,max}}$	c_A_copter_max	—

Flächenflugzeug

Der erste Parameter des Flächenflugzeugs wird zur Ermittlung des Bahnanstellwinkels γ benötigt. Für den Steigflug wird ein Flug mit optimaler Gleitzahl E vorausgesetzt. Mit der Leermasse wird analog zum Multicopter der Schub berechnet.

Tabelle 2.5.: Parameter des Flächenflugzeug

Parameter	Variablenname	Einheit
Reziproke Gleitzahl ϵ	epsilon	—
Leermasse des Flächenflugzeug m_{Flugzeug}	m_Flugzeug	kg

2.2. Parameter der Mission

Missionsparameter

Innerhalb der Flugparameter kann die Nutzlast m_{Nutz} des Fluggerätes bestimmt werden. Diese Masse fließt mit der Masse des Fluggerätes, der der Motoren sowie der der Batterie in die Gesamtmasse mit ein. Im Rahmen des Projektes AEROMET UAV ist diese auf 250 g festgelegt.

Flugparameter

Die Flugparameter geben für den Multicopter den Steigwinkel sowie die Steigeschwindigkeit vor. Der Steigwinkel ist mit einem Wert von 90° festgelegt, was einem geraden Steigflug nach oben entspricht.

Tabelle 2.6.: Flugparameter

Parameter	Variablenname	Einheit
Bahngeschwindigkeit V_{Kg}	V_Kg	m/s
Bahnneigungswinkel γ	gamma	$^\circ$

Umgebungsparameter und Diskretisierung

Die Erdbeschleunigung und der Adiabatenexponent werden als konstant über der Höhe angenommen. Mit Startwerten für die Höhe, die Temperatur, die Dichte und des Luftdrucks werden die Abflugbedingungen am Abflugort spezifiziert. Die Schrittweite der Höhe legt die Genauigkeit der Höhendiskretisierung fest.

Tabelle 2.7.: Umgebungsparameter

Parameter	Variablenname	Einheit
Erdbeschleunigung g	g	$9,81 m/s^2$
Starthöhe H_0	H_0	m
Schrittweite der Höhe ΔH	Delta_H	m
maximale Höhe H_{max}	H_max	m
Umgebungstemperatur am Start T_0	T_0	K
Luftdruck am Start p_0	p_0	N/m^2
Dichte am Start ρ_0	rho_0	kg/m^3
Adiabatenexponent κ	kappa	$1,4$
Windgeschwindigkeit u_{Wg}	u_Wg	m/s

2.3. Berechnung weiterer Parameter

Tabelle 2.8.: Berechnung weiterer Parameter

Parameter	Variablenname	Gleichung
Nominale Batteriespannung	U_Bat_nom	$U_{Bat,nom} = N_{Bat,cell} \cdot U_{Bat,cell}$
Minimale Batteriespannung	U_Bat_min	$U_{Bat,min} = N_{Bat,cell} \cdot U_{Bat,cell,min}$
Propellerradius	R	$R = D \cdot 0,0254/2$
Fläche eines Propellers	F	$F = \pi \cdot R^2$
Temperatur in 11 km Höhe	T_11	$T_{11} = T_0 - 0.0065 \cdot (11000 - H_0)$
Dichte in 11 km Höhe	rho_11	$\rho_{11} = \rho_0 \cdot \left(1 - 0.0065 \cdot \frac{11000}{T_0}\right)^{4.256}$
Druck in 11 km Höhe	p_11	$p_{11} = p_0 \cdot \left(1 - 0.0065 \cdot \frac{11000}{T_0}\right)^{5.256}$

2.4. Aufbau des Programms

Der Aufbau des MATLAB-Skriptes wird im Struktogramm (Abb.2.1) verdeutlicht.

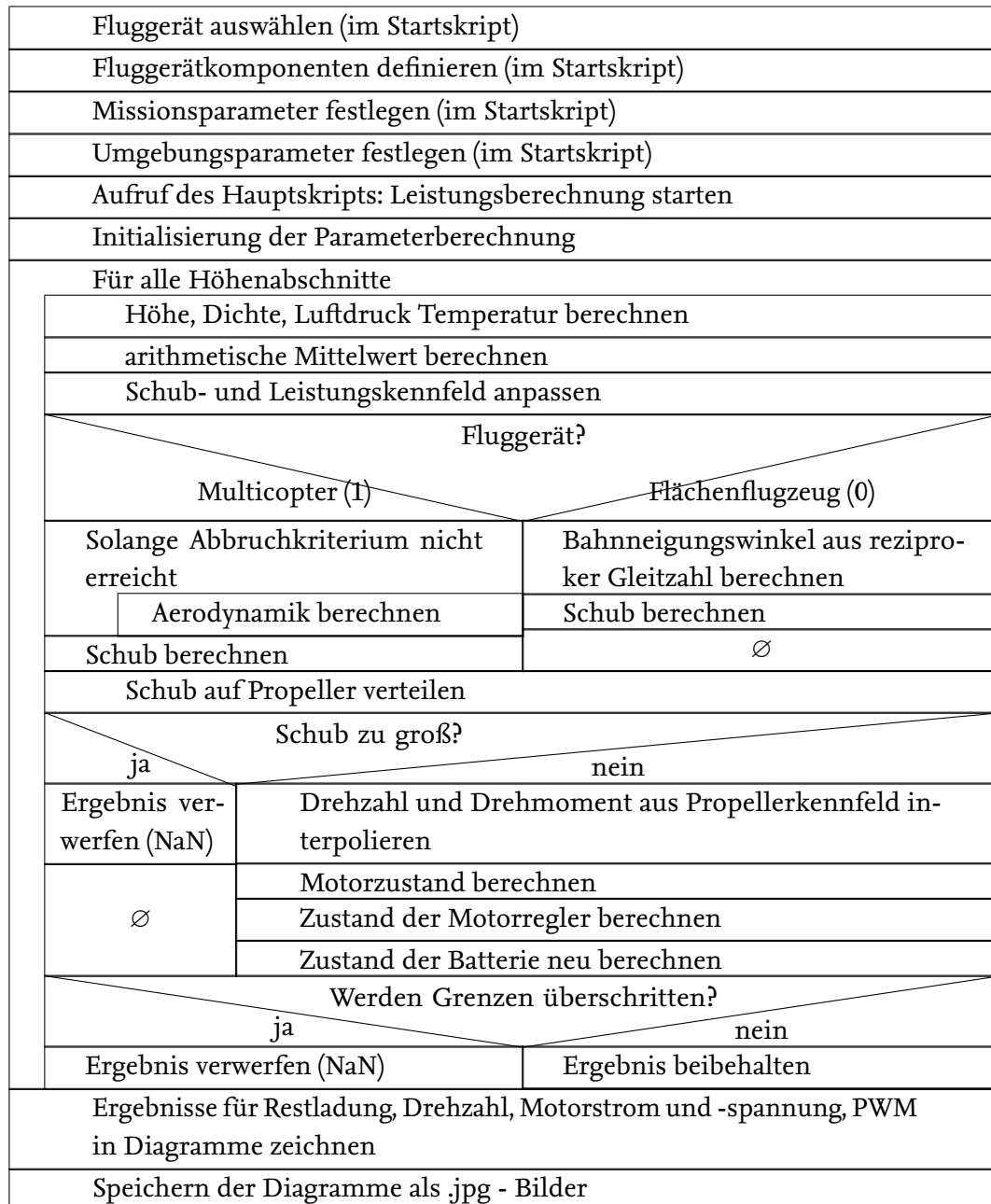


Abbildung 2.1.: Struktogramm des MATLAB-Skripts

2.5. Leistungsberechnung

2.5.1. Veränderung der Umgebungsparameter mit der Höhe

Für Leistungsuntersuchung wird die Internationale Standardatmosphäre vorausgesetzt. Hiernach ist der Temperaturkoeffizient bis zur Tropopause

$$\frac{dT}{dH} = -0,0065 \frac{K}{m} \quad (2.1)$$

und danach in der unteren Stratosphäre bis zu einer Höhe von 20 000 m

$$\frac{dT}{dH} = 0. \quad (2.2)$$

Entsprechend kann der Verlauf der Temperatur, des Druckes und der Dichte von einer Höhe ab 0 m bis zur Tropopause (11 000 m mit

$$T_{0-11} = T_0 - \frac{dT}{dH} \cdot H, \quad (2.3)$$

$$p_{0-11} = p_0 \cdot \left[1 - 0,0065 \frac{K}{m} \cdot \frac{H}{T_0}\right]^{5,256}, \quad (2.4)$$

$$\rho_{0-11} = \rho_0 \cdot \left[1 - \frac{dT}{dH} \cdot \frac{H}{T_0}\right]^{4,256} \quad (2.5)$$

beschrieben werden. Ab 11 000 m ist der Verlauf von Druck und Dichte durch die Gleichungen

$$p = p_{11} \cdot e^{\frac{g}{R \cdot T_{11}} \cdot (H - H_{11})}, \quad (2.6)$$

$$\rho = \rho_{11} \cdot e^{\frac{g}{R \cdot T_{11}} \cdot (H - H_{11})} \quad (2.7)$$

gegeben. Um den Einfluss der Flughöhe in der Leistungsberechnung festzuhalten, werden für jedes Höhenintervall die Umgebungsparameter an den oberen und unteren Intervallgrenzen berechnet. Durch Bildung des arithmetischen Mittelwertes ergeben sich daraus durchschnittliche Parameter für den jeweiligen Höhenabschnitt.

2.5.2. Schub berechnen

Multicopter

Der Schub des Multicopters setzt sich zusammen aus dem zu kompensierenden Gewicht und dem Luftwiderstand durch eine Fluggeschwindigkeit. Dazu kommt noch indirekt der ebenfalls zu kompensierende Seitenwind. Innerhalb eines iterativen, aerodynamischen Modells wird der Schub berechnet. Hierbei sind der Auftriebs- und Widerstandsbeiwert Funktionen des modifizierten Anstellwinkels α_M (der Schiebewinkel gibt lediglich die Himmelsrichtung der resultierenden Kraft an, welche in diesem Bericht keine Rolle spielt). Die Idee des Aerodynamischen Modells entstammt

aus [Beyer, Y. 2016b](#). Die Gesamtmasse des Multicopters setzt sich aus der Masse des Rahmens, der Masse der Batterie, der Masse der Motoren und der Nutzlast

$$m = m_{\text{copter}} + m_{\text{Bat}} + m_{\text{Mot}} \cdot n_{\text{Prop}} + m_{\text{Nutz}} \quad (2.8)$$

zusammen. Die absolute Fluggeschwindigkeit setzt sich zusammen aus Seitenwindgeschwindigkeit und Bahngeschwindigkeit

$$V_A = \sqrt{(u_{Kg} + u_{Wg})^2 + w_{Kg}^2} \quad (2.9)$$

mit

$$\begin{pmatrix} u_{Kg} \\ w_{Kg} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \cos \gamma \\ -\sin \gamma \end{pmatrix} \cdot V_{kg} \quad (2.10)$$

Die am Multicopter angreifenden Kräfte werden in Abbildung(einfügen) dargestellt.



Für die spätere Koordinatentransformation wird der Windanstellwinkel

$$\gamma_a = \arctan \left(\frac{-w_{Kg}}{u_{Kg} + u_{Wg}} \right) \quad (2.11)$$

berechnet. Die iterative Berechnung des modifizierten Anstellwinkels

$$\alpha_M = \Theta' - \gamma_a \quad (2.12)$$

beginnt mit dem Startwert für den Steigungswinkel $\Theta'_0 = 0$.

Im Anschluss werden die aerodynamischen Beiwerte

$$c_W = \frac{c_{W, \text{copter, oben}} - c_{W, \text{copter, seitlich}}}{2} \cdot \cos(2 \cdot \alpha_M) + \frac{c_{W, \text{copter, oben}} + c_{W, \text{copter, seitlich}}}{2} \quad (2.13)$$

und

$$c_A = c_{A, \text{max}} \cdot \sin(2 \cdot \alpha_M) \quad (2.14)$$

berechnet. Auf diese folgt die Berechnung der aerodynamischen Kräfte

$$W = c_W \cdot \frac{\rho}{2} \cdot A_{\text{copter, oben}} \cdot V_{A'}^2 \quad (2.15)$$

$$A = c_A \cdot \frac{\rho}{2} \cdot A_{\text{copter, oben}} \cdot V_{A'}^2 \quad (2.16)$$

Die aerodynamischen Kräfte werden dann vom aerodynamischen Koordinatensystem in das geodätische Koordinatensystem transformiert:

$$\begin{pmatrix} X^A \\ Y^A \\ Z^A \end{pmatrix}_g = \begin{pmatrix} \cos \gamma_a & 0 & -\sin \gamma_a \\ 0 & 1 & 0 \\ \sin \gamma_a & 0 & \cos \gamma_a \end{pmatrix}^T \cdot \begin{pmatrix} -W \\ 0 \\ -A \end{pmatrix}_a = \begin{pmatrix} -W \cdot \cos \gamma_a - A \cdot \sin \gamma_a \\ 0 \\ W \cdot \sin \gamma_a - A \cdot \cos \gamma_a \end{pmatrix}_g. \quad (2.17)$$

Der Neigungswinkel kann aus dem Kräftegleichgewicht

$$\Theta'_i = -\arctan\left(\frac{-X_g^A}{Z_g^A + m \cdot g}\right), \quad i = 1, 2, 3, \dots \quad (2.18)$$

neu berechnet werden und geht als Startwert in den nächsten Iterationsschritt ein. Die Iteration erfolgt solange bis das Abbruchkriterium

$$\Delta\Theta' = \Theta_i - \Theta_{i-1} \stackrel{!}{<} 0,001^\circ \quad (2.19)$$

erfüllt wird. Ist das Abbruchkriterium erreicht, kann der erforderliche Schub mit dem Satz des Pythagoras aus den Kraftanteilen in x_g - und z_g -Richtung

$$S = \sqrt{X_g^2 + (Z_g^A + m \cdot g)^2} \quad (2.20)$$

bestimmt werden. Für den Fall, dass der errechnete Schub größer als der zur Verfügung stehende Schub ist, wird das Ergebnis verworfen und als NaN (Not a Number) gespeichert.

Flächenflugzeug

Der Schub für ein Flächenflugzeug berechnet sich aus der Kompensation des Widerstandes und des Anteils der zu kompensierenden Gewichtskraft. Analog zum Multicopter setzt sich die Gesamtmasse des Flächenflugzeugs aus der Summe aller Komponenten zusammen

$$m = m_{\text{Flugzeug}} + m_{\text{Bat}} + m_{\text{Mot}} \cdot n_{\text{Prop}} + m_{\text{Nutz}}. \quad (2.21)$$

Aus dem Kräftegleichgewicht aller angreifenden Kräfte am System können folgende Beziehungen

$$F = W + \sin \gamma \cdot G, \quad (2.22)$$

$$A = \cos \gamma G \quad (2.23)$$

entnommen werden. Mit

$$E = \frac{A}{W} \quad (2.24)$$

bzw.

$$\varepsilon = \frac{W}{A} = \frac{c_W}{c_A} \quad (2.25)$$

können die Gleichungen (2.22) und (2.23) umgeformt werden zu

$$F = G \cdot \cos \gamma \cdot \left(\frac{1}{E} + \tan \gamma \right) = G \cdot (\sin \gamma + \varepsilon \cdot \cos \gamma). \quad (2.26)$$

2.5.3. Drehzahl und Drehmoment aus Propellerkennfeld interpolieren

In der Propellerdatenbank vom Propellerhersteller APC sind zu jedem Propeller dieser Marke die Kennfelder aus Standschubversuchen aufgeführt. Die Art der Aufführung lässt allerdings keine Interpolation der Drehzahl bzw. des Drehmomentes in Abhängigkeit des Schubes und der absoluten Fluggeschwindigkeit zu. Aus diesem Grund muss das Kennfeld auf äquidistante Geschwindigkeitsabstände transformiert werden. Dazu wird ein Geschwindigkeitsvektor mit Abständen von 1 m/s gebildet. Die Funktion `Propeller_map` (entommen aus Beyer, Y. (2016)) interpoliert danach das Schub- und Leistungskennfeld neu über der Geschwindigkeit und Drehzahl. Mit dem zuvor berechneten Schub und der absoluten Fluggeschwindigkeit kann schließlich mit der Funktion `Propeller` die Drehzahl und das Drehmoment mittels linearer Interpolation ermittelt werden. Die Kennfelder wurden in Versuchen ermittelt, die keine ändernde Dichte berücksichtigen. Um den Einfluss der sich verringernden Dicht mit zunehmender Flughöhe trotzdem zu beachten, müssen die Kennfelder angepasst werden. Gemäß der Strahltheorie setzt sich der Schub aus dem Massenstrom und der Geschwindigkeit im voll ausgebildeten Abstromzylinder

$$T = \dot{m} \cdot v_{\infty} = \rho \cdot A_{\text{Propeller}} \cdot v_i \cdot v_{\infty} \quad (2.27)$$

zusammen. Unter der Annahme vernachlässigbar kleiner Differenzen von induzierten Geschwindigkeiten v_i und Geschwindigkeiten im voll ausgebildeten Abstrom v_{∞} kann das Schubfeld des Propellers an den Höheneinfluss

$$\frac{T_1}{T_2} = \frac{\rho_1}{\rho_2} \quad (2.28)$$

angepasst werden.

2.5.4. Motorzustand berechnen

Mit dem Drehmoment und der Drehzahl des Propellers berechnet sich der Motorzustand, genauer der Motorstrom und die Motorspannung. Dies erfolgt nach einem einfachen Motormodell [7]. Der Motorstrom berechnet sich aus

$$I_{\text{Mot}} = Q \cdot K_v + I_0. \quad (2.29)$$

Mit dem Strom ergibt sich die Spannung zu

$$U_{\text{Mot}} = \frac{\omega}{K_v} + R_i \cdot I_{\text{Mot}}. \quad (2.30)$$

2.5.5. Zustand der Motorregler

Das Modell der Wirkungsgradsberechnung von bürstenlosen Gleichstrom-Motorreglern (Electronic Speed Control (ESC)) stammt aus [Lubrano 2016](#) und wird auch in [Beyer 2016b](#) verwendet. Hiernach berechnet sich der Wirkungsgrad

$$\eta_{ESC} = \begin{cases} 0,7 \cdot PWM + 0,50 & \text{wenn } 0 < PWM \leq 0,5 \\ 0,2 \cdot PWM + 0,75 & \text{wenn } 0,5 < PWM \leq 1 \\ \text{undefiniert} & \text{sonst} \end{cases} \quad (2.31)$$

mit der Pulsweitenmodulation (PWM)

$$PWM = \frac{U_{mot}}{U_{Bat}}, \quad (2.32)$$

die sich aus dem Spannungsverhältnis des ESCs zusammensetzt.

2.5.6. Batteriezustand

Die wesentliche Zustandsgröße der Batterie ist der Entladestrom I_{Bat} . Dieser setzt sich aus den Motorströmen zusammen und zusätzlich dem Wirkungsgrad der Pulsweitenmodulation.

$$I_{Bat} = I_{Mot} \cdot \frac{PWM}{\eta_{PWM}} \cdot n_{Prop}. \quad (2.33)$$

Die C-Rate \dot{C} [1/h] berechnet sich nach

$$\dot{C} = \frac{I_{Bat}[A]}{C_{Bat}[A]} \cdot n_{Prop} \quad (2.34)$$

und wird zur Verlustberechnung sowie zur Begrenzung benötigt. Die nutzbare Kapazität der Batterie sinkt mit steigender Entladerate nach

$$C_{Bat,Peukert} = C_{Bat} \cdot \left(\frac{1}{\dot{C}}\right)^{P_{Bat}-1} \quad \text{mit } P_{Bat} \geq 1, \quad (2.35)$$

wobei die Verluste für eine Peukertkonstante von 1 Null sind und mit steigender P_{Bat} größer werden. Mit der Flugzeit t_{Flug} berechnet sich die entnommene Kapazität nach dem i -ten Höhenschrittschritt mit:

$$\Delta C_{Bat,i} = I_{Bat} \cdot t_{Flug} + \Delta C_{Bat,i-1} \quad \text{mit } \Delta C_{Bat,0} = 0. \quad (2.36)$$

Nach

$$\text{Restladung}_i [\%] = \frac{C_{bat,Peukert} - \Delta C_{Bat,i}}{C_{Bat,Peukert}} \cdot 100\% \quad (2.37)$$

berechnet sich die Restladung _{i} nach der i -ten Flugphase. Diese ist vor allem für die erfliegbaren Grenzen interessant.

Bei Batterien, hier vor allem Li-Ion und Li-Po, ist die Batteriespannung abhängig von der Entladerate und der Zeit. Hierzu hat [12] ein einfaches Modell aufgestellt, in welchem dieser Zusammenhang berücksichtigt wird [Vgl. Abb. Blub.](#)



Die Batteriespannung errechnet sich nach

$$V_{bat} = E_0 - K \cdot \frac{Q}{Q - \int I_{bat} dt} \cdot \int I_{bat} dt - R \cdot I_{bat} + A \cdot e^{-3 \cdot \int I_{bat} dt} - K \cdot \frac{Q}{Q - \int I_{bat} dt} \cdot i^*. \quad (2.38)$$

Danach können die unbekannten Batterieparameter einfach mit 3 diskreten Punkten nach folgendem Schema

$$\begin{pmatrix} E_0 \\ A \\ K \end{pmatrix} = A^{-1} \cdot \begin{pmatrix} V_{full} + R \cdot I_{bat} \\ V_{exp} + R \cdot I_{bat} \\ V_{nom} + R \cdot i \end{pmatrix} \quad (2.39)$$

mit

$$A = \begin{pmatrix} 1 & 1 & 0 \\ 1 & e^{-3} & -\frac{Q \cdot (Q_{exp} + I_{bat})}{Q - Q_{exp}} \\ 1 & e^{-3 \cdot \frac{Q_{nom}}{Q_{exp}}} & -\frac{Q \cdot (Q_{exp} + I_{bat})}{Q - Q_{exp}} \end{pmatrix} \quad (2.40)$$

bestimmt werden. Um eine möglichst einfache Handhabung zu gewährleisten und eine Batteriezellen unabhängig vom Hersteller, der Kapazität und der maximalen Entladerate verwenden zu können, ist die Erstellung einer Normzelle von Interesse. Aus [Beyer2016a Blub](#) existiert bereits eine Datenbank mit mehreren Batterien unterschiedlicher Herstellern, in der alle benötigten Daten zur Erstellung dieser Zelle vorhanden sind. Benötigt werden folgende Punkte:

- die Kapazität Q
- die Q_{exp} , Q_{nom} , V_{full} , V_{exp} , V_{nom} , R und i

Hierbei sind schon V_{full} , V_{exp} und V_{nom} auf eine Zelle normiert, allerdings die anderen Parameter nicht. Aus diesem Grund werden alle übrigen Parameter mit 1 Ah normiert und der arithmetische Mittelwert über alle Batterien gebildet. Der Entladestrom entspricht dabei dem 1/100 der Batteriekapazität also 1 Ah. Für den auf 1 Ah genormten Innenwiderstand lässt sich ein hyperbolischer Verlauf über der Kapazität feststellen. Mittels einer Regression kann der Innenwiderstand für eine Zelle mit 1 Ah ermittelt werden. Der Vergleich der berechneten Normzelle mit originalen Batterien teils starke Abweichungen von über 100% von der ursprünglichen Batteriezelle. Zusätzlich wird der Einfluss der C-Rate auf diese Abweichungen mit berücksichtigt. Dabei kam heraus, dass gewisse Batterien signifikant von der angenäherten Zelle abweichen (z.B. Batterienummer 14,30,40 und 63). Diese wiesen deutliche Abweichungen von der mittleren Abweichung aller Zellen auf. Aus diesem Grund sind diese Batterien aus der Betrachtung entfernt und die Mittelwerte neu berechnet worden.

- Es ist eine Datenbank von Elektromodellflug vorhanden, in der die lastabhängige Entladekurve verschiedener Batterien unterschiedlicher Hersteller und unterschiedlichen Kapazitäten, Massen etc. dargestellt sind
- Ziel ist, unabhängig vom Hersteller, der Kapazität, der Masse, der max. Dauerentladerate, etc. ein Batteriemodell aufzustellen für eine Zelle
- Dazu muss eine Normzelle hergestellt werden <- anders formulieren
- Entstprechung wurden alle Batterien der Datenbank auf eine 1 Ah normiert.
- dazu arithmetischer Mittelwert von Q, Qexp und Qnom bezogen auf eine Ah, die Angaben V, Vexp, Vfull waren entsprechend genormt, nur Mittelwert berechnen
- Der Strom i ist auf 1/100 der Kapazität oder Entladerate bezogen
- für Innenwiderstand ist auch genormt auf 1Ah. Es lässt sich ein hyperbolischer Verlauf der des Widerstandes über der Kapazität feststellen.
- -> Regression durch die Punkte legen mit lsqcurvefit.
- Vergleich aufgestellten Modells zu Originalzellen.
- Feststellung der Abweichungen des Modells von der Originalzelle, dazu Bestimmung starker Diskrepanzen einzelner Zellen von der Normzelle und Bestimmung einer Tendenz der Abweichung.
- Korrektur dieser durch Errechnung der Standardabweichung und Festlegung des Konfidenzintervalls

2.5.7. Wirkungsgrad über das Gesamtsystem

Zur Berechnung des Wirkungsgrads kann das Verhältnis der Leistung, die in Schub gewandelt wird zu der Leistung, die der Batterie entzogen wird, herangezogen werden

$$\eta_{ges} = \frac{P_{Strahl}}{P_{Bat}}. \quad (2.41)$$

Die Strahlleistung

$$P_{Strahl} = T \cdot (v_i + V_c) \quad (2.42)$$

setzt sich aus dem Schub T, der induzierten Geschwindigkeit v_i und der Steiggeschwindigkeit V_c zusammen. Zur Berechnung der induzierten Geschwindigkeit im Steigflug wird das Newton-

Raphson-Verfahren herangezogen. Mit diesem lässt sich innerhalb weniger Iterationsschritte die induzierte Geschwindigkeit im Steigflug ermitteln [13]:

$$f(v) = v - \mu_z - \frac{v_h^2}{\sqrt{\mu^2 + v^2}} \quad (2.43)$$

$$f'(v) = 1 + v \cdot \frac{v_h^2}{\sqrt{\mu^2 + v^2}^3} \quad (2.44)$$

$$v_{n+1} = v_n - \frac{f(v_n)}{f'(v_n)} \quad n = 0, 1, 2, \dots \quad (2.45)$$

An dieser Stelle sei angemerkt, dass van der Wall mit dimensionslosen Durchflussgraden λ rechnet. In dieser Arbeit wird aber mit den dimensionsbehafteten Geschwindigkeiten gerechnet. Der Startwert der Iteration ist die induzierte Geschwindigkeit im Schwebeflug

$$v_h = \sqrt{\frac{m \cdot g}{2 \cdot \rho \cdot A_{\text{Rotor}} \cdot n_{\text{Prop}}}}. \quad (2.46)$$

Die der Batterie entzogene Leistung

$$P_{\text{Bat}} = U_{\text{Bat}} \cdot I_{\text{Bat}} \quad (2.47)$$

ist das Produkt aus der Batteriespannung und -strom.

2.5.8. Werden Grenzen überschritten?

Für den Fall, dass technisch und aerodynamisch unmögliche Flugzustände erreicht werden, sind folgende technische und aerodynamische Grenzen festgelegt:

- Die Restladung im Steigflug ist kleiner als Null oder kleiner als eine vorher festgelegte, minimale Restkapazität (Kapazität der Batterie reicht nicht aus oder zu hohe Flugzeit)
- Die Motorspannung ist größer als die nominelle Spannung der Batterie (zu hohe Winkelgeschwindigkeit im Steigflug erforderlich)
- Die Motorspannung ist kleiner/gleich Null (zu schneller Sinkflug, diese Grenze kann in einem Steigflug nicht erreicht werden, ist der Vollständigkeit halbe trotzdem mit berücksichtigt)
- Die C-Rate ist größer als die maximal zulässige C-Rate der Batterie (Batterieentladestrom ist höher als zulässig)
- Der Motorstrom ist höher als der maximal zulässige Dauerstrom des Motors unter Last (zu hohes Drehmoment gefordert)
- Der lokale Anstellwinkel überschreitet den festgelegten Grenzwert von α_{max} (Strömungsabriss)
- Die Blattspitzengeschwindigkeit überschreitet $M_{\text{tip}} = 1$ (transsonische Strömung)

2.6. Vernachlässigungen und Vereinfachungen

2.6.1. Einschränkungen

Für die Leistungsberechnung sind mehrere Vernachlässigungen vorzunehmen. Zuerst wurden keinerlei dynamische Effekte und Verhalten berücksichtigt. Dies beinhaltet translatorische Beschleunigungen des Multicopters, rotatorische Beschleunigungen der Rotoren zum Störausgleich sowie und rotatorische Beschleunigungen des Multicopters durch Ungenauigkeiten des Lagereglers. Das gleiche gilt für das Flächenflugzeug. Die Störgrößen, in diesem Fall vor allem der laterale Seitenwind, werden als statisch und konstant vorausgesetzt. Hierbei werden jegliche Veränderungen des Windes und Böen mit der Höhe vernachlässigt. Auf- und Abwinde entziehen sich auch der Betrachtung. Hinzu kommt die Vernachlässigung der Totzeit des Reglers. Weiterhin nicht berücksichtigt bleiben Reynoldszahl- und Machzahleffekte. Transonische Strömung unterhalb einer Blattspitzengeschwindigkeit von $M_{tip} = 1$ kann aus diesem Grund nicht ausgeschlossen werden. Die ganze Leistung der Batterie geht in diesem Modell ausschließlich in die Schuberzeugung. Das heißt, dass die Regler und sonstige elektrische Komponenten keinen zusätzlichen Strom verbrauchen. Das Flächenflugzeug wird in dem Programm als eine Punktmasse ohne Abmaße betrachtet. Um eine möglichst allgemeine Dimensionierung eines Flugsystems mit fixed wings zu ermöglichen wird sich hier jeglicher genauerer Beschreibungen des Systems verwehrt. So wird auf Kennzahlen wie die Streckung, die Flügelfläche oder z.B. Auftriebs- und Widerstandsbeiwerten verzichtet. Dies zieht eine derartige Betrachtung des Systems mit sich, dass nur der Einfluss von Gleitzahl, Motorisierung und anderen Einflussfaktoren betrachtet werden. Eine exakte Auslegung kann deshalb nur im Anschluss vorgenommen werden. Diese Vereinfachungen müssen in der Auswertung berücksichtigt werden.

2.6.2. Vereinfachungen

Schub

Der Schub wird innerhalb eines sehr einfachen Modells berechnet. Das gilt sowohl für den Multicopter als auch für das Flächenflugzeug. Der Multicopter ist als eine Art Rotationsellipsoid und das Flächenflugzeug als Punktmasse vereinfacht

Propeller und Kennfeld

Bei der Transformation der Propellerkennfelder auf äquidistante Geschwindigkeitsabstände ist der Bereich von -10 m/s bis 0 m/s extrapoliert. Das reale Verhalten der Propeller kann folglich von dem errechneten abweichen. Weiterhin beziehen sich alle Auslegungen auf die Datenbank von APC. Die Modellierung eines Propellers mit gleichem Durchmesser und gleicher Steigung eines anderen Herstellers kann aus diesem Grund abweichen. Gründe dafür können eine unterschiedliche Profilierung, Verwindung oder Profiltiefenverteilung sein.

Motor

Jeglicher Einfluss der Temperatur auf die Leistung des Motors bleibt in dem einfachen Motormodell unberücksichtigt. Außerdem werden der Motorstrom und der der Innenwiderstand als konstant angenommen.

Motorregler

Für den Motorregler wurde ein sehr einfaches Modell verwendet, in dem der Wirkungsgrad ausschließlich eine Funktion der PWM ist.

Batterie

Die Berechnung der Batterie vernachlässigt zwei wichtige Einflussfaktoren. Das ist der Temperatureinfluss und der Einfluss der Alterung auf die Kapazität. Dies kann jedoch durch eine Anpassung der Peukert-Konstante kompensiert werden. Weiterhin wird ein Einbruch der Batteriespannung in Abhängigkeit der Entladerate nicht berücksichtigt.

Wirkungsgrad

Die Berechnung der Strahlleistung beruht auf der Berechnung der induzierten Geschwindigkeit innerhalb der Strahltheorie. Hier wird ein idealer Rotor zugrunde gelegt. Beruhend auf dieser Annahme bleiben viele Effekte wie Blattspitzeffekte an der Rotorblattspitze und im Bereich der Rotorblattaufhängung, Strömungsablösungen, Blattwirbelinteraktionen usw. unberücksichtigt. Zudem wird eine über den Radius konstante induzierte Geschwindigkeit in der Rotorebene angenommen. Dies ist im Vorwärtsflug und bei Schräganströmung zu relativieren [13].

3 Nachbildung des Quadrocopterfluges in Russland

Mithilfe des Videos [1] und den in der Beschreibung gemachten Angaben, soll der Flug eines Quadrocopters auf 10,2 km Höhe im erstellten Tool nachgebildet werden. Es soll dabei die Validität des Modells und die Glaubwürdigkeit des Fluges an sich überprüft werden.

3.1. Komponenten des Quadrocopters

Im Folgenden sind alle technischen Daten, die im Programm eingebracht wurden aufgelistet. Diese sind aus dem Video und den Beschreibungen zu dem Quadrocopter entnommen worden. Fehlende Daten wurden geschätzt oder sind beim Piloten nachgefragt worden.

Motor

Die technischen Spezifikation des Motors sind in Tab.3.1 aufgelistet. Es wurden kleine, sehr schnell drehende Brushless DC Motoren verwendet in Bezug auf den K_V -Wert und das Motorgewicht.

Tabelle 3.1.: Motorparameter

Parameter	Variablenname	Wert
Innenwiderstand R_i	R_i	0,123 Ω
Geschwindigkeitskonstante K_v	K_V	1400 RPM/V
Leerlaufstrom I_0	I_0	0,52 A
maximaler Dauerstrom I_{max}	I_max	40 A
Motormasse m_{Mot}	m_Mot	0,0365 kg

Propeller

Die Abmaße des Propellers betragen 7 in im Durchmesser mit einem Pitch von 3,8 in. Für diesen Propeller wurde in der Leistungsberechnung ein äquivalenter Propeller aus der APC Datenbank mit den gleichen Abmessungen verwendet.

Batterie

Die Batterie ist eine selbst gebaute LiIon Batterie in der Bauform 4s3p. Das Gewicht einer Zelle beträgt ca. 46 g. Mit dieser Angabe, kann das Gesamtgewicht der Batterie sehr gut abgeschätzt werden. Die nominale und die minimale Spannung pro Batteriezelle konnten aus den zusätzlichen Angaben berechnet werden. So betrug die Spannung der Batterie zu Beginn des Fluges ca. 15,6 V und am Ende ca. 11,5 V. Hierbei ergibt sich die nominale Spannung für eine 4-Zellen-Batterie zu 3,9 V und eine minimale Spannung einer Zelle zu 2,875 V. Alle weiteren notwendigen Spezifikationen sind in Tab.3.2 festgehalten.

Tabelle 3.2.: Batterieparameter

Parameter	Variablenname	Wert
Anzahl der Batteriezellen $N_{Bat,cell}$	N_bat_cell	4
nominelle Kapazität einer Batteriezelle $C_{Bat,cell}$	U_Bat_cell	3120 mAh
nominale Spannung pro Batteriezelle $U_{Bat,cell}$	U_bat_nom	3,9 V
minimale Spannung pro Batteriezelle $U_{Bat,cell,min}$	U_bat_min	2,875 V
Peukert-Konstante P	P_bat_Peukert	1,05
Maximale C-Rate $C_{rate,max}$	C_Rate_max	30
Batteriemasse m_{Bat}	m_bat	0,55 kg

Quadrocopterabmaße

Die Maße des Rahmens und somit auch die Gesamtmaße konnten nur mit Bildern abgeschätzt werden. An dieser Stelle sind die vier Arme des Quadrocopters auf 12 cm x 2 cm und der Rumpf auf 15 cm x 5 cm angenähert worden.

3.1.1. Missions und Umgebungsparameter

Weitere Startbedingungen und Missionsparameter sind in Tab.3.3 dargelegt. In dem Video ist deutlich zu erkennen, dass die Steiggeschwindigkeit über der Höhe nicht konstant bleibt sondern zwischen 15 m/s und 0 m/s schwankt. Der Luftdruck und die Dichte am Abflugtag sind unbekannt und werden hier entsprechend der Standardatmosphäre angenommen.

Tabelle 3.3.: Umgebungs- und Missionsparameter

Parameter	Variablenname	Wert
Steiggeschwindigkeit V_{Kg}	V_Kg	10 m/s
Erdbeschleunigung g	g	9,81 m/s ²
Starthöhe H_0	H_0	0 m
Schrittweite der Höhe ΔH	Delta_H	50 m
maximale Höhe H_{max}	H_max	20 000 m
Umgebungstemperatur am Start T_0	T_0	263,15 K bzw. -10°
Luftdruck am Start p_0	p_0	101 325 Pa
Dichte am Start ρ_0	rho_0	1,225 kg/m ³
Adiabatenexponent κ	kappa	1,4
Windgeschwindigkeit u_{Wg}	u_Wg	10 m/s

3.2. Nachbildung im Programm

3.3. Ergebnisse

Im Nachfolgenden sind die Ergebnisse des Programms in Graphen dargestellt. Aus allen Diagrammen ist zu entnehmen, dass der Quadrocopter eine Höhe von mehr als 14 000 m erreichen kann. Das ist mehr als 4000 m höher als die Höhe, die der Quadrocopter im Video erreicht. Die Restladung der Batterie nimmt mit der Höhe linear ab (Vgl. Abb.3.3).

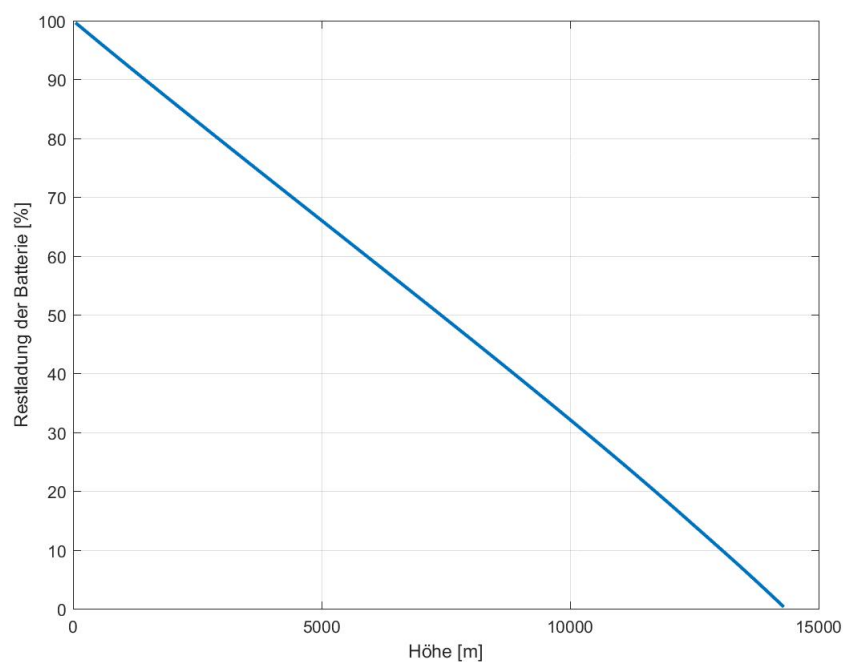


Abbildung 3.1.: Restladung der Batterie über der Höhe

Diese erweist sich auch als begrenzender Faktor für die maximale Flughöhe, da ab der maximalen Flughöhe die Batterierestladung Null wird. Im Video ist weiterhin die verbrauchte Kapazität in mAh gegeben. Mit dieser und der Gesamtkapazität von aller Zellen kann daraus geschlossen werden, dass der Quadrocopter noch eine Restladung von etwas weniger als 29 % unter idealen Bedingungen am Top Of Climb (TOC) hat. Dieses stimmt beim Ablesen der Restkapazität in % bei 10 260 m aus dem Diagramm annähernd überein. Die berechnete liegt um ein paar Prozentpunkte über realen. Hiergegen nimmt die Motordrehzahl und damit auch die Propellerdrehzahl leicht quadratisch zu und erreicht am TOC fast 17 000 U/min (Vgl. Abb.3.3).

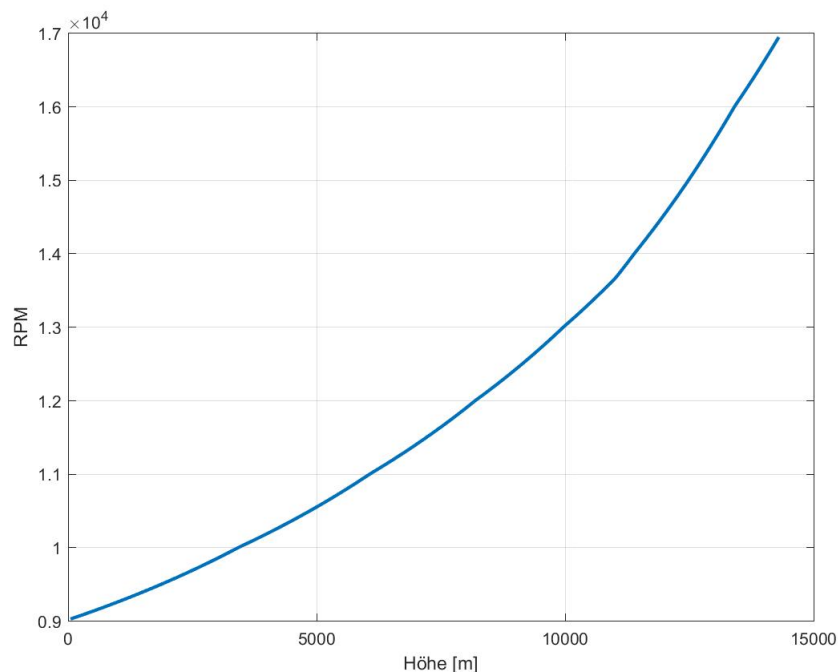


Abbildung 3.2.: Motordrehzahl der Batterie über der Höhe

Dies entspricht auch der maximalen Drehzahl des APC-Kennfeldes. Trotz der hohen Propellerdrehzahl erreicht die Blattspitzengeschwindigkeit M_{tip} mit 0,0001 Ma keine $Ma = 1$. Bemerkenswerterweise erreichen die Restladung und die Propeller-/Motordrehzahl simultan die vorher festgelegten Grenzen.

Der aus der Batterie entnommene Strom I_{Bat} bleibt innerhalb von 22 A und 25 A relativ konstant.

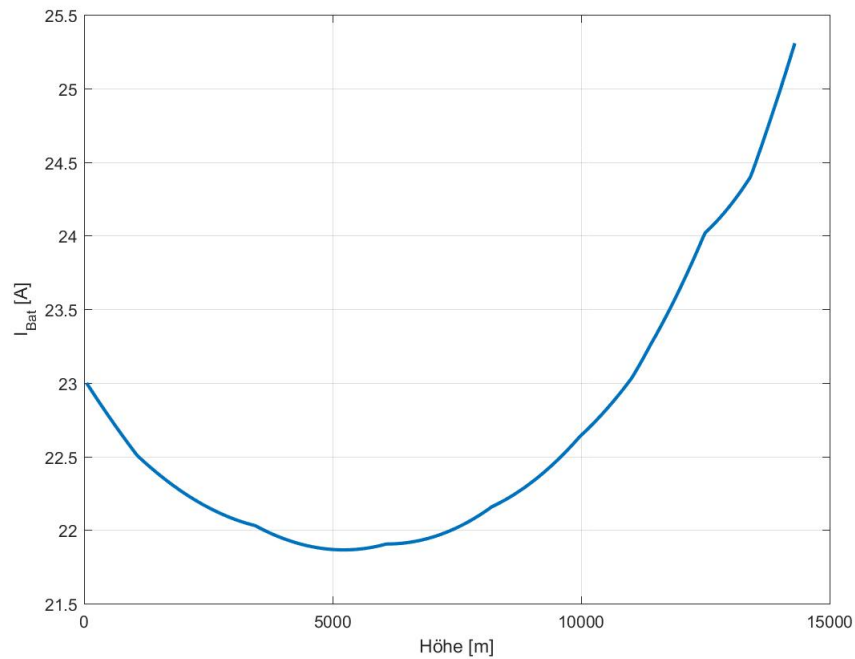


Abbildung 3.3.: Entladestrom der Batterie über der Höhe

Dies stimmt mit den Beobachtungen aus [1] gut überein. In diesem schwankt der Entladestrom zwischen 21,5 A und 25 A. Stimmen die oben genannten Größen mit denen im Video noch relativ gut überein, zeigen sich bei der PWM große Diskrepanzen. Die ermittelte PWM über der Höhe ist beim Start etwa 50 % und steigt im Laufe des Fluges auf ca. 82,5 % am TOC.

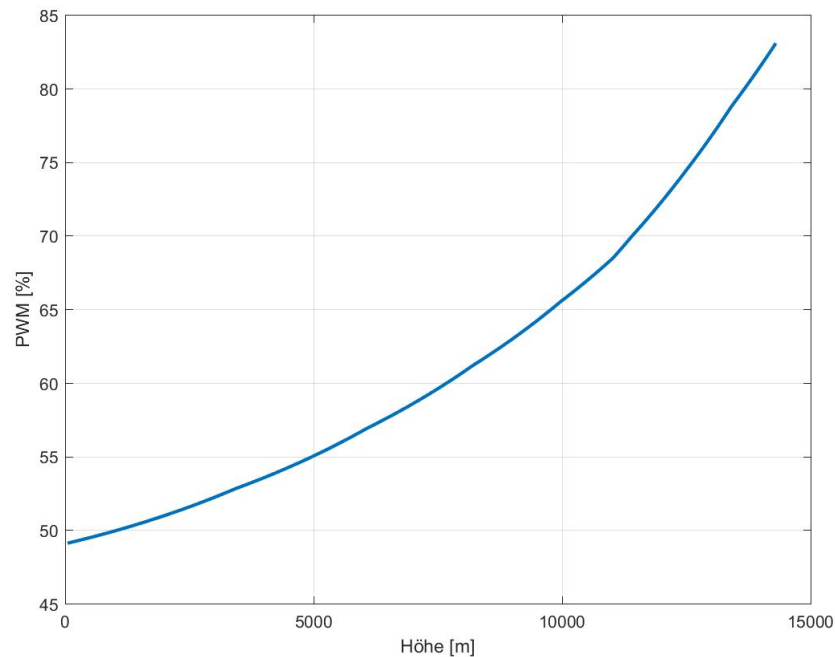


Abbildung 3.4.: Pulsweitenmodulation über der Höhe

Der Vergleich mit dem realen Quadrocopterflug zeigt deutlich, dass die errechnete PWM im Durchschnitt etwa 20 % unterhalb der realen liegt.

3.4. Diskussion

Zusammengenommen wird der Quadrocopterflug in Russland sehr gut in dem Programm wiedergegeben. Die Flughöhe ist um 4000 m höher als die tatsächlich geflogene, jedoch wird in dem Programm die Batterie komplett entladen. Nichtsdestotrotz gibt es auch Abweichung.

Die verbleibende Kapazität im TOC im Programm ist um ein bis drei Prozent höher als im TOC in Russland. Dies lässt sich unter anderem auf die Vernachlässigung des Stromverbrauches zusätzlicher Geräte wie den Motorregler, die Kamera, den Empfänger etc. zurückführen. Außerdem werden dynamische Effekte (Vgl Kap.2.6) zum Ausgleich von Störungen verursacht durch Böen vernachlässigt. Diese sind in [1] deutlich zu sehen. Generell wurden die Umgebungsbedingungen, was vor allem die Windgeschwindigkeit und die Atmosphäre betrifft, vereinfacht. Die Windgeschwindigkeit ist in der Nachbildung auf konstante 10 m/s gesetzt worden. Auch wurde eine Standardatmosphäre vorausgesetzt wohingegen die reale Atmosphäre abweichen kann. Aus dem Video lässt sich jedoch entnehmen, dass relative Windstille am Flugtag herrschte und lediglich vereinzelt Böen in größeren Höhen in Erscheinung traten. Der Einfluss dieser kann trotzdem als gering eingestuft werden, gerade da die Standardatmosphäre und die konstante Windgeschwindigkeit eine gute Näherung liefern.

Weiterhin ist anzumerken, dass Koriakin mit deutlich abweichenden Steiggeschwindigkeit zu 10 m/s

aufgestiegen ist. In Programm wurde der Endzustand erreicht, wenn 10 m/s nicht mehr fliegbar sind. Dabei werden geringere, eventuell noch fliegbare Geschwindigkeiten außer Acht gelassen. Eine kontinuierliche Verringerung der Geschwindigkeit auf 0 m/s fand deshalb nicht statt. Unabhängig davon ist die Annahme einer Steiggeschwindigkeit von 10 m/s akkurat. Der Steigflug mit dieser Steiggeschwindigkeit auf 10 260 m dauert 17 min und 6 sec. Dies ist gerade einmal 11 sec kürzer als die tatsächliche Flugzeit von 17 min und 17 sec zum TOC in [1].

Die signifikantesten Unterschiede zwischen Realität und Video sind bei der PWM gegeben, also dem Verhältnis zwischen Motorspannung und nomineller Batteriespannung. Die ermittelte PWM weicht im Schnitt um mehr als 20 % von der realen ab. Eine Ursache kann in dem Verhalten der Batteriespannung unter Last gefunden werden. In dem verwendeten Batteriemodell wird die nominelle Batteriespannung als konstant angesehen. Dieses berücksichtigt nicht den Spannungseinbruch unter Last oder die Spannung in Abhängigkeit des Entladezustandes. Diese Einflüsse beschreibt [12] in seinem Batteriemodell. Durch diesen Einfluss ist die tatsächliche Spannung geringer als die nominelle. Das könnte erklären, warum die PWM so bedeutend geringer ausfällt als in Wirklichkeit. Als weitere Einflüsse für die Abweichungen können die in Kap. 2.6 genannten Vernachlässigungen und Vereinfachungen aufgelistet werden. Ihr Einfluss auf die Gesamtabweichung kann allerdings als gering eingeschätzt werden.

4 Parameteruntersuchung

4.1. Einleitung und Vorgehensweise

4.2. Steiggeschwindigkeit

- Abhängigkeit des Widerstandes von V_{Kg} muss gegeben sein
- Krit. für Auswahl optimaler Steiggeschwindigkeit notwendig, alleine min. Batteriekapazitätentnahme nicht mgl., da sonst zu geringe Steiggeschwindigkeiten herauskommen
- Struktogramm folgt

4.3. Verstellpropeller

- Auswahl nach

$$\eta_{Prop} = \frac{T \cdot \tilde{V}}{P} = \frac{T \cdot (\mu_z + v_i)}{M \cdot \omega} \quad (4.1)$$

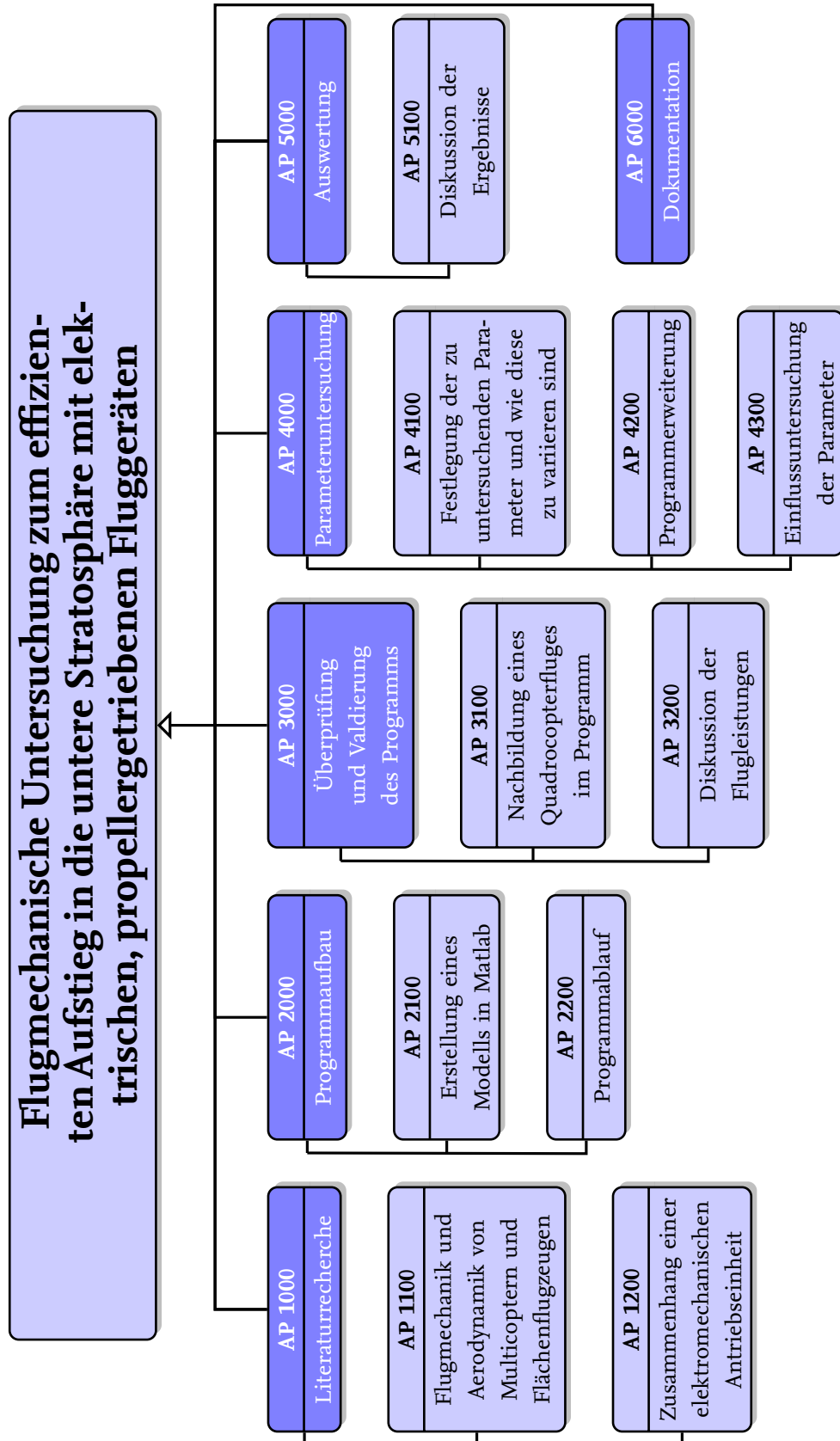
5 Zusammenfassung und Ausblick

5.1. Zusammenfassung

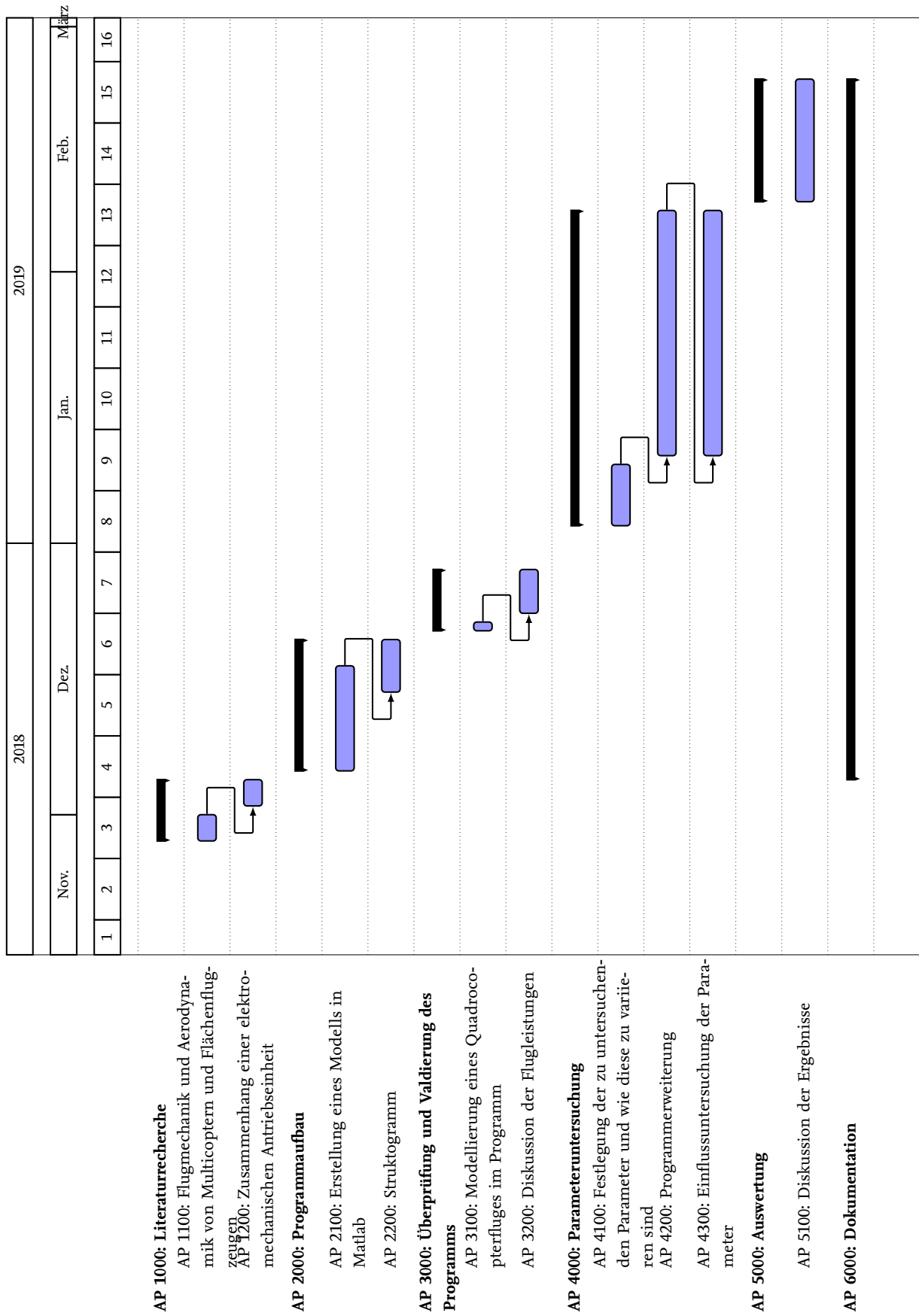
5.2. Ausblick

6 Projektmanagement

6.1.1. Projektstrukturplan



6.2. Zeitplan



		AP 1100
Titel	Flugmechanik und Aerodynamik von Multicoptern und Flächenflugzeugen	Seite: 1 von 11
Verantwortlicher	Lucas Schreer	Version: 1.0
		Datum: 26.11.2018
Start	27.11.2018	
Ende	31.11.2018	Dauer: 5 Tage
Bearbeiter	Lucas Schreer	
Ziele: <ul style="list-style-type: none">■ grundlegende Berechnung der Flugleistungen eines Multicopters■ vereinfachte Berechnung der Flugleistungen eines Flächenflugzeugs■ Kenntnis über flugmechanische Zusammenhänge Input: <ul style="list-style-type: none">■ Literaturrecherche bezüglich der Flugmechanik und Aerodynamik von Hubschraubern und Flächenflugzeugen Schnittstellen zu anderen APs: <ul style="list-style-type: none">■ AP 2100■ AP 5200 Aufgaben: <ul style="list-style-type: none">■ Literaturrecherche■ Einlesen in die Thematik der Aerodynamik von Hubschraubern sowie Flächenflugzeugen Ergebnisse: <ul style="list-style-type: none">■ Kenntnis über grundsätzliche flugmechanische und aerodynamische Zusammenhänge von Multicoptern bzw. Flächenflugzeugen■ Wissen über die Genauigkeit der getroffenen Annahmen sowie die Grenzen der Genauigkeit		

		AP 1200
Titel	Zusammenhang einer elektromechanischen Antriebseinheit	Seite: 2 von 11
Verantwortlicher	Lucas Schreer	Version: 1.0
		Datum: 26.11.2018
Start	01.12.2018	
Ende	04.12.2018	Dauer: 4 Tage
Bearbeiter	Lucas Schreer	
Ziele: <ul style="list-style-type: none">■ Kenntnis über elektromechanische Antriebseinheiten■ Wissen über die gegenseitige Beeinflussung der Antriebseinheiten Input: <ul style="list-style-type: none">■ Literaturrecherche bezüglich Brushlessmotoren, Reglern, Batterien , etc. Schnittstellen zu anderen APs: <ul style="list-style-type: none">■ AP 2100, AP 4000 Aufgaben: <ul style="list-style-type: none">■ Auseinandersetzung mit der Thematik■ Kenntnis über die Grundlagen eines elektromechanischen Antriebs Ergebnisse: <ul style="list-style-type: none">■ Kenntnis über den Zusammenhang und die Berechnung einzelner Komponenten der elektrischen Antriebseinheit■ Wissen über die Grenzen der elektromechanischen Einheiten		

		AP 2100
Titel	Erstellung eines Modells in Matlab	Seite: 3 von 11
Verantwortlicher	Lucas Schreer	Version: 1.0
		Datum: 27.11.2018
Start	05.12.2018	
Ende	17.12.2018	Dauer: 2 Wochen
Bearbeiter	Lucas Schreer	
Ziele: <ul style="list-style-type: none">■ Implementierung der Flugmechanik und Aerodynamik von Multicoptern und Flächenflugzeugen in Matlab■ Implementierung des elektromechanischen Antriebsstrangs		
Input: <ul style="list-style-type: none">■ Ergebnisse aus AP 1100 und AP 1200		
Schnittstellen zu anderen APs: <ul style="list-style-type: none">■ AP 4300		
Aufgaben: <ul style="list-style-type: none">■ Implementierung der Zusammenhänge zwischen Aerodynamik, Flugmechanik und der elektrischen Antriebseinheit■ Anfertigen eines organisierten Programmablaufs von der Aerodynamik zur Batterieentladung■ Darstellung der Ergebnisse in geeigneten Diagrammen		
Ergebnisse: <ul style="list-style-type: none">■ Ein geeignetes Programm für fortlaufende Untersuchungen und anschließende Programmerweiterung■ Fertiges Matlab Programm zur Durchführung einer ersten Simulationen von elektrisch angetriebenen Flugsystemen mit einer Bandbreite von Parametern sowie deren Auswertung		

		AP 2200
Titel	Struktogramm	Seite: 4 von 11
Verantwortlicher	Lucas Schreer	Version: 1.0
		Datum: 26.11.2018
Start	14.12.2018	
Ende	20.12.2018	Dauer: 7 Tage
Bearbeiter	Lucas Schreer	
Ziele: <ul style="list-style-type: none">■ Erstellen eines Struktogramms für das Programm zur Leistungsberechnung Input: <ul style="list-style-type: none">■ Ergebnisse aus AP 2100 Schnittstellen zu anderen APs: <ul style="list-style-type: none">■ AP 6000 Aufgaben: <ul style="list-style-type: none">■ Erstellen eines Struktogramms für die einzelnen Programmabläufe■ Überprüfung des Programmablaufs auf Optimierungspotenzial Ergebnisse: <ul style="list-style-type: none">■ Strukturiertes Ablaufdiagramm, welches die entsprechenden Abläufe ohne Quelltext darstellt■ Optimierung der Programmablaufstruktur		

		AP 3100
Titel	Nachbildung eines Quadrocopterfluges im Programm	Seite: 5 von 11
Verantwortlicher	Lucas Schreer	Version: 1.0
		Datum: 26.11.2018
Start	21.12.2018	
Ende	22.12.2018	Dauer: 2 Tage
Bearbeiter	Lucas Schreer	
Ziele: <ul style="list-style-type: none">■ Überprüfung der Validität des Quadrocopterfluges in Russland■ Validierung des aufgestellten Modells Input: <ul style="list-style-type: none">■ Ergebnisse aus AP 2100 Aufgaben: <ul style="list-style-type: none">■ Internetrecherche aller benötigten Parameter zur Nachbildung des Fluges im Programm■ Darstellung der nachgebildeten Flugleistungen in Diagrammen Ergebnisse: <ul style="list-style-type: none">■ Nachgebildeter Flug im Programm		

		AP 3200
Titel	Diskussion der Flugleistungen	Seite: 6 von 11
Verantwortlicher	Lucas Schreer	Version: 1.0
		Datum: 26.11.2018
Start	23.12.2018	
Ende	28.12.2018	Dauer: 3 Tage
Bearbeiter	Lucas Schreer	
Ziele: <ul style="list-style-type: none">■ Überprüfung der angegebenen Flugleistungen mit dem Programm■ Validierung des aufgestellten Modells		
Input: <ul style="list-style-type: none">■ Ergebnisse aus AP 3100		
Schnittstellen zu anderen APs: <ul style="list-style-type: none">■ AP 3100		
Aufgaben: <ul style="list-style-type: none">■ Abgleichen der Flugleistungen des Programms mit den im Video gezeigten■ Logische Prüfung der Ergebnisse in Bezug auf die Umsetzung■ Nachvollziehen und Klären der Plausibilität der im Video gezeigten Flugleistungen		
Ergebnisse: <ul style="list-style-type: none">■ Aussagen zur Validität des aufgestellten Modells		

		AP 4100
Titel	Festlegung der zu untersuchenden Parameter und wie diese zu variieren sind	Seite: 7 von 11
Verantwortlicher	Lucas Schreer	Version: 1.0
		Datum: 26.11.2018
Start	02.01.2019	
Ende	09.01.2019	Dauer: 1 Woche
Bearbeiter	Lucas Schreer	
Ziele: <ul style="list-style-type: none">■ Liste mit allen zu untersuchenden und variierenden Parametern■ Wissen um die Implementierung im Modell Input: <ul style="list-style-type: none">■ Ergebnisse aus AP100, AP 2000 und AP 3000 Schnittstellen zu anderen APs: <ul style="list-style-type: none">■ AP 4200 und AP 4300 Aufgaben: <ul style="list-style-type: none">■ Herausfiltern relevanter Parameter■ Suchen nach Möglichkeiten zur Variation der Parameter■ Vorabschätzung der Relevanz für die Flugleistungen■ Klärung eventueller Interferenzen Ergebnisse: <ul style="list-style-type: none">■ Anzahl an zu untersuchenden Parameter und sinnvolle Variation dieser■ mögliche Zusammenhänge einzelner Parameter■ grobe Programmablaufsequenzen zur Untersuchung der Parameter		

		AP 4200
Titel	Programmerweiterung	Seite: 8 von 11
Verantwortlicher	Lucas Schreer	Version: 1.0
		Datum: 26.11.2018
Start	10.01.2019	
Ende	07.02.2019	Dauer: 4 Wochen
Bearbeiter	Lucas Schreer	
Ziele: <ul style="list-style-type: none">■ Erweiterung und Anpassung des Programms um neue Aspekte der Parameteruntersuchung		
Input: <ul style="list-style-type: none">■ Ergebnisse aus AP 2000 und AP 4100		
Schnittstellen zu anderen APs: <ul style="list-style-type: none">■ AP 2100		
Aufgaben: <ul style="list-style-type: none">■ Einbau weiterer Programmstrukturen, die die Untersuchung der in AP 4100 aufgestellten Parameter ermöglichen■ Erweiterung des Programms um Strukturen zur Visualisierung der Ergebnisse		
Ergebnisse: <ul style="list-style-type: none">■ Erweitertes und an die Untersuchung angepasstes Programm■ Funktionen und Iterationen, die eine Parameteruntersuchung ermöglichen		

		AP 4300
Titel	Einflussuntersuchung der Parameter	Seite: 9 von 11
Verantwortlicher	Lucas Schreer	Version: 1.0
		Datum: 26.11.2018
Start	10.01.2019	
Ende	07.02.2019	Dauer: 4 Wochen
Bearbeiter	Lucas Schreer	
Ziele: <ul style="list-style-type: none">■ Untersuchung des Einflusses der in AP 4100 festgelegten Parameter Input: <ul style="list-style-type: none">■ Ergebnisse aus AP 4100 und AP 4200 Schnittstellen zu anderen APs: <ul style="list-style-type: none">■ AP 2000 Aufgaben: <ul style="list-style-type: none">■ Untersuchung des Parametereinflusses auf die Flugleistungen des Flugsystems■ Darstellung dieses Einflusses in dafür geeigneten Diagrammen, Graphen, Bildern, etc. Ergebnisse: <ul style="list-style-type: none">■ Aufzeigen des Einflusses auf die Flugleistungen■ Ermittlung des Optimums für die Flugleistung		

		AP 5100
Titel	Diskussion der Ergebnisse	Seite: 10 von 11
Verantwortlicher	Lucas Schreer	Version: 1.0
		Datum: 26.11.2018
Start	08.02.2019	
Ende	22.02.2019	Dauer: 2 Woche
Bearbeiter	Lucas Schreer	
Ziele: <ul style="list-style-type: none">■ Festhalten der optimalen Parameter zur Erfüllung der Mission■ Bewertung der Ergebnisse im Hinblick auf Korrektheit und technischer Realisierbarkeit■ Empfehlungen für die optimale Auslegung eines Flugsystems für einen Steigflug auf 10 km Höhe		
Input: <ul style="list-style-type: none">■ Ergebnisse aus AP 4200 und AP 4300		
Schnittstellen zu anderen APs: <ul style="list-style-type: none">■ AP 4000		
Aufgaben: <ul style="list-style-type: none">■ Kritische Betrachtung der Ergebnisse und der gemachten Angaben■ Auswertung der Ergebnisse im Hinblick auf die bestmöglichen Flugeigenschaften		
Ergebnisse: <ul style="list-style-type: none">■ Aussagen über eine bestmögliche Konstellation der Flugsystemparameter zum Erreichen einer Höhe von 10 km oder sogar 15 km■ Aussagen über die Realisierbarkeit■ Wissen um die Abweichungen von der Realität und deren Einfluss■ Ausblick auf zukünftige Entwicklungen		

		AP 6000
Titel	Dokumentation	Seite: 11 von 11
Verantwortlicher	Lucas Schreer	Version: 1.0
		Datum: 26.11.2018
Start	04.12.2018	
Ende	22.02.2019	Dauer: 11 Wochen
Bearbeiter	Lucas Schreer	
Ziele: <ul style="list-style-type: none">■ Schriftliche Dokumentation der Arbeit		
Input: <ul style="list-style-type: none">■ AP 1000■ AP 2000■ AP 3000■ AP 4000■ AP 5000		
Aufgaben: <ul style="list-style-type: none">■ Einarbeitung in Zeichensatzprogramme, wie \LaTeX, TikZ, PGF und Gnuplot■ Schriftliche Ausarbeitung der Arbeit		
Ergebnisse: <ul style="list-style-type: none">■ Bachelorarbeit		

Literatur

- [1] C. (DIY Drones) Anderson und C. Blouin. *10 km high flight with a 1kg quadcopter*. 2018. URL: <https://diydrones.com/profiles/blogs/10-km-high-flight-with-a-1kg-quadcopter>.
- [2] *Drive Calculator*. 7.05.2018. URL: <http://www.drivecalc.de/>.
- [3] *eCalc - the most reliable electric Motor Calculator on the Web for RC Pilots*. 23.12.2018. URL: <https://www.ecalc.ch/>.
- [4] *flyeval - Flight Performance Evaluation of UAVs|estimate performance of UAV|multicopter|multirotor|quadcopter|quadcopter performance evaluation|endurance calculation*. 7.12.2018. URL: <https://flyeval.com/>.
- [5] Jon N. Ostler. "Flight Testing Small, Electric Powered Unmanned Aerial Vehicles". Thesis. Provo, Utah: Brigham Young University, 17.03.2006. URL: <http://hdl.lib.byu.edu/1877/etd1223>.
- [6] Minwoo Kim, Heejin Joo und Byungwook Jang. "Conceptual multicopter sizing and performance analysis via component database". In: *2017 Ninth International Conference on Ubiquitous and Future Networks (ICUFN)*. IEEE, 4.07.2017 - 07.07.2017, S. 105–109. ISBN: 978-1-5090-4749-9. DOI: 10.1109/ICUFN.2017.7993756.
- [7] Mark Drela. "First-Order DC Electric Motor Model". In: (2007).
- [8] Juan Augusto Paredes u. a. "Study of effects of high-altitude environments on multicopter and fixed-wing UAVs' energy consumption and flight time". In: *2017 13th IEEE Conference on Automation Science and Engineering (CASE)*. IEEE, 20.08.2017 - 23.08.2017, S. 1645–1650. ISBN: 978-1-5090-6781-7. DOI: 10.1109/COASE.2017.8256340.
- [9] Quan Quan. *Introduction to Multicopter Design and Control*. Singapore: Springer Singapore, 2017. ISBN: 978-981-10-3381-0. DOI: 10.1007/978-981-10-3382-7.
- [10] Dongjie Shi u. a. "A Practical Performance Evaluation Method for Electric Multicopters". In: *IEEE/ASME Transactions on Mechatronics* 22.3 (2017), S. 1337–1348. ISSN: 1083-4435. DOI: 10.1109/TMECH.2017.2675913.
- [11] Michael J. Stepaniak, Frank van Graas und Maarten Uijt de Haag. "Design of an Electric Propulsion System for a Quadrotor Unmanned Aerial Vehicle". In: *Journal of Aircraft* 46.3 (2009), S. 1050–1058. ISSN: 0021-8669. DOI: 10.2514/1.38409.
- [12] Olivier Tremblay und Louis-A. Dessaint. "Experimental Validation of a Battery Dynamic Model for EV Applications". In: *World Electric Vehicle Journal* 3.2 (2009), S. 289–298. DOI: 10.3390/wevj3020289.
- [13] Berend Gerdes Wall. *Grundlagen der Hubschrauber-Aerodynamik*. Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg, 2015. ISBN: 978-3-662-44399-6. DOI: 10.1007/978-3-662-44400-9.

A Blindtext im Anhang