

PROJEKTBERICHT

Im Studiengang Mechatronik/Robotik

MMR3-17: Die FHTW-Drohne **Mechanische und elektrische Auslegung**

Ausgeführt von: Richard Otrebski

Personenkennzahl: 1310331006

BegutachterIn: Dipl.-Ing. Dr. Markus Trenker

Wien, den 20. Januar 2015

Kurzfassung

Kommerziell verfügbare Drohnen werden in zivilen Bereichen, wie der Film- und Spielzeugindustrie, und in militärischen Bereichen zum Kartographieren von Gelände oder Suchen von Personen eingesetzt. Diese Modelle sind jedoch für Studenten und Forscher im Bereich von Schwarmaufgaben nicht interessant, da sie zu viel kosten. Günstige Modelle weisen jedoch nicht den benötigten Funktionsumfang auf um Schwarmexperimente durchzuführen.

Die Drohne selbst ist mit ihren verschiedensten Komponenten ein interessantes mechatronisches System. Sie zeigt Studenten was ein funktionierendes System umfasst, und wie man die einzelnen Teile auslegt. Damit eignet sie sich ideal für Studenten um ihr Wissen zu erweitern und ihre Fertigkeiten praktisch anzuwenden.

In dieser Arbeit wurde die mechanische und elektrische Auslegung einer preiswerten Drohne für Studenten und Schwarmexperimente dokumentiert. Neben einer groben Abschätzung der Antriebsleistung der Motoren und Propeller, wurde auch eine Treiberschaltung konzipiert, die für bürstenbehaftete Motoren verwendet werden kann. Die verwendete Soft- und Hardware ist offen und erlaubt es so jedem sie an seine Bedürfnisse anzupassen.

Schlagworte: Drohne, Quadcopter, Entwicklung, Bausatz

Inhaltsverzeichnis

1. Einleitung	1
2. Stand der Technik	1
2.1. Multicopter	2
2.2. Steuerungen	2
3. Mechanik	3
3.1. Konfiguration	3
3.2. Erster Entwurf	4
3.2.1. Basis	4
3.2.2. Motorhalterung	6
3.3. Zweiter Entwurf	6
3.4. Mechanische Nachrechnung	7
4. Elektronik	13
4.1. Systemarchitektur	13
4.2. Komponentenbeschreibung	15
4.2.1. Flight-Controller	15
4.2.2. Aktorik	16
4.2.3. Kommunikation	17
4.2.4. Individualintelligenz	17
4.2.5. Sensorik	17
4.2.6. Batterie	17
4.3. Komponentenauswahl	18
4.4. Datenübertragung	18
4.4.1. Pulsweitenmodulation	18
4.4.2. Servo-Signal	19
4.4.3. I ² C	19
4.4.4. MultiWii Serial Protocol	20
4.5. Treiberschaltung	20
4.6. Tests	22
4.6.1. Erster Test	22
4.6.2. Zweiter Test	23
4.6.3. Dritter Test	25

4.6.4. Vierter Test	25
5. Programmierung	25
5.1. Framework – Flight-Controller	26
5.2. Framework – Arduino	26
5.3. App	26
6. Zusammenfassung und Ausblick	26
Literaturverzeichnis	28
Abbildungsverzeichnis	29
Tabellenverzeichnis	31
Abkürzungsverzeichnis	32
A. Anhang	33
A.1. CAD-Daten	33
A.2. Quellcode	33

1. Einleitung

Drohnen sind in der heutigen Zeit ein immer wichtiger werdendes Mittel um Personen zu suchen, oder Gebiete zu kartographieren. Dies kann entweder durch einzelne Drohnen, oder effizienter durch einen ganzen Schwarm erfolgen. Bei einer Drohne handelt es sich um ein unbemanntes Luftfahrzeug, dass entweder durch eine Person gesteuert wird, oder eine Aufgabe in einem Schwarm übernimmt.

Ein Schwarm besteht aus mehreren Drohnen, die untereinander kommunizieren und sich Aufgaben teilen können. Dadurch können zum Beispiel Personensuchen in einem Katastrophengebiet bei einer ausreichenden Anzahl an Drohnen schnell und effizient abgeschlossen werden. Da Drohnen nicht nur im militärischen und zivilen Bereich eingesetzt werden, sollten sich auch Studenten mit der Schwarmthematik beschäftigen.

Drohnen kombinieren eine Vielzahl von technischen Disziplinen; Mechanik, Elektronik und Software gehen Hand in Hand. Damit eignet sich die Drohne als ideales Mittel um Studenten im Feld der Mechatronik das Zusammenspiel der verschiedenen Disziplinen zu zeigen. Da die kommerziell verfügbaren Drohnen aber meistens nicht für Studenten und Schwarmexperimente geeignet sind, muss eine Drohne für die FH Technikum Wien entwickelt werden.

Kommerziell verfügbare Drohnen sind entweder zu teuer, oder besitzen einen Funktionsumfang, der nicht ausreichend ist. Aus diesem Grund soll für die FH Technikum Wien eine Drohne entwickelt werden. Diese Drohne soll möglichst preiswert und komplett für Schwarmexperimente konfigurierbar sein. Die Steuerung der Drohne soll über eine Android-App erfolgen. Dies reduziert nochmals den Preis des Systems, da keine eigene Fernsteuerung gekauft werden muss. Die entwickelte Drohne kann nicht nur an der FH zu Forschungszwecken eingesetzt werden, sondern auch kostenneutral an Studenten verkauft werden. Das bietet zusätzlich einen positiven Werbeeffekt für die FH.

In dieser Arbeit wird die mechanische und elektrische Auslegung einer kleinen und preiswerten Drohne betrachtet. Die Programmierung der Drohne ist in der Arbeit von Herrn Spulak zu finden.

2. Stand der Technik

Im folgenden Kapitel wird ein kurzer Überblick über den Stand der Technik präsentiert. Neben einer Auswahl an verfügbaren Multicoptern werden die gängigen Steuerungen vorgestellt.

2.1. Multicopter

Multicopter in Form von Drohnen sind heutzutage sehr weit verbreitet. Sie werden nicht nur im militärischen Bereich zur Aufklärung eingesetzt, sondern auch im zivilen Bereich. Dort kommen sie vor Allem im Filmbereich und im Modellbau vor. campilots GmbH (2014) und DIGICOPTER® Luftaufnahmen & Videoproduktion (2014) stellen neue Wege vor, um kostengünstige Luftaufnahmen zu erstellen. Einen werbetechnisch interessanten Ansatz zeigte Ars Electronica Linz GmbH (2014). Dabei wurden Quadcopter mit LEDs ausgestattet um Figuren an den Nachthimmel zu zeichnen.

In dieser Arbeit werden die kleineren Bauarten der Quadcopter beachtet. Dies kommt daher, da die kleineren Versionen deutlich günstiger sind als die großen. Bei den großen Versionen werden bürstenlose Motoren verwendet. Diese besitzen zwar mehr Leistung, sind aber um einiges teurer und benötigen wieder eine eigene Steuerelektronik.

Ein Beispiel für eine kleine Drohne ist die Hubsan X4. Sie wiegt 36 g, besitzt eine Flugdauer von 9 min und eine Reichweite von ungefähr 100 m (Shenzhen Hubsan Technology Company Limited, 2015). Ein großer Nachteil dieser Drohne ist das geschlossene System. Das bedeutet, dass man keinen Zugang zu den Flugparametern oder auf die Sensordaten besitzt. Deswegen sind diese Drohnen nicht nur nicht für Schwarmexperimente geeignet, sondern auch nicht für Studenten interessant, die selbst die Drohne weiterentwickeln wollen.

Eine andere interessante Drohne ist die Parrot Rolling Spider. Sie wiegt 55 g, besitzt eine Flugdauer von 8 min und eine Reichweite von 20 m (Parrot Public Company, 2015). Diese Drohne besitzt ebenfalls ein geschlossenes System, besitzt jedoch eine größere Funktionalität als die Hubsan X4.

2.2. Steuerungen

Zur Steuerung von Drohnen kommt normalerweise ein Flight-Controller (FC) mit einem Funkempfänger zum Einsatz. Beliebte FCs sind das HobbyKing – KK2.0 Multi-rotor LCD Flight Control Board, und auf der Multiwii basierende Systeme. der KK2.0-FC unterstützt bis zu acht Motoren und besitzt ein LCD-Display, um die Reglerparameter auch ohne Computer einstellen zu können. Ebenso ist ein Gyroskop und ein Beschleunigungsmesser auf dem Board zu finden. Die beiden Sensoren liefern somit sechs Freiheitsgrade. Der verwendete Mikrocontroller ist der Atmel ATmega324-PA.

Die MultiWii-Software ist ein Open-Source-Projekt, dass sich mit der Steuerung verschiedenster funkgesteuerter Fluggeräten beschäftigt. Sie arbeitete ursprünglich mit den Sensoren der Wii-Controllern. Durch ihre große Beliebtheit wurden eine Vielzahl von unterschiedlichen Sensoren in das Projekt aufgenommen und eine Vielzahl von FCs verwendet das MultiWii-Framework. Einer der bekannteren FC ist der Flyduino-NanoWii. Dieser arbeitet mit einem Atmel ATmega 32u4, einem Gyroskop und einem Beschleunigungsmesser. Er unterstützt ebenso bis zu acht Motoren. Zusätzlich können weitere Sensoren über einen Inter-Integrated Cir-

cuit (I²C)-Port angeschlossen werden. Ein vergleichbarer und kostengünstigerer FC ist der HobbyKing – MultiWii 328P Flight Controller w/FTDI & DSM2 PORT. Dieser FC besitzt neben dem Beschleunigungsmesser und dem Gyroskop auch ein Magnetometer und ein Barometer verbaut.

Ein weiterer bekannter FC ist der Ardupilot. Dieser besitzt einen sehr guten Autopiloten, der autonome Missionen mit GPS-Wegmarken fliegen kann. Dieser FC liegt jedoch deutlich außerhalb des Budgets.

3. Mechanik

Die mechanischen Gleichungen wurden Hibbeler (2005), Hibbeler (2006a) und Hibbeler (2006b) entnommen. Neben der Beschreibung der verschiedenen Konfigurationen findet man in diesem Kapitel auch verschiedenen Versionen der Drohne, und die mechanische Nachrechnung der letzten Version. Ebenso wurde eine Abschätzung über die Leistung des Antriebssystems abgegeben.

3.1. Konfiguration

Für eine autonome Drohne gibt es verschiedene Konfigurationen. Diese besitzen verschiedene konstruktive Vorschriften. Die verschiedenen Arten der Konfiguration sind wie folgt:

- Bicopter
Diese Anordnung besitzt zwei Rotoren und benötigt für jeden Rotor einen Servo um diesen schwenken zu können.
- Y-Konfiguration
Die Bezeichnung der Y-Konfiguration beruht auf der Anzahl der Motorausleger. Die drei Motorenausleger besitzen im Normalfall einen Winkelversatz von 120° zueinander. Diese Konfiguration besitzt drei mögliche Konfigurationen: Y3, Y4 und Y6. Bei der Y3-Konfiguration sind drei Rotoren, wovon einer davon schwenkbar sein muss. Bei der Y4-Konfiguration sind auf einem Motorenausleger zwei Motoren angebracht. Der zweite Motor ist auf der Unterseite angebracht. Die Y6-Konfiguration arbeitet mit sechs Motoren, wobei sich drei Motoren auf der Oberseite und drei auf der Unterseite befinden. Im Allgemeinen wird die Y3-Konfiguration auch Tricopter genannt.
- Quadcopter
Quadcopter sind die häufigste Art der nicht kommerziellen Drohnen. Dies liegt vor Allem

daran, dass wenige Komponenten benötigt werden, und diese sehr schnell zu Ergebnissen führen. Der Name Quadcopter rührt daher, dass vier Motoren verwendet werden. Quadcopter gibt es in zwei möglichen Konfigurationen: *Quad+* und *QuadX*. Bei *Quad+* liegt die Vorwärtsrichtung fluchtend mit einem Ausleger für die Motoren. Bei *QuadX* liegt die Vorwärtsrichtung zwischen zwei Auslegern.

- Hexacopter

Hexacopter zeichnen sich durch sechs Motoren aus. Sie bieten eine gewisse Redundanz gegen einen Motorenausfall. Ebenso kann der Hexacopter durch die erhöhte Anzahl an Motoren mehr Gewicht tragen als ein Quadcopter mit den selben Motoren. Wie beim Quadcopter gibt es auch beim Hexacopter zwei Konfigurationen; *HexacopterX* und *Hexacopter+*. Beide Konfigurationen sind analog zu den Quadcopter-Konfigurationen.

- Octocopter

Optocopter sind die letzte der gängigsten Arten von Unmanned Aerial Vehicles (UAVs). Bei einem Optocopter werden acht Motoren verwendet. Die Anordnung dieser Motoren erfolgt am häufigsten in drei Kategorien: *OptocopterX*, *Optocopter+* und *OptocopterX-CoAx*. Die beiden Konfigurationen *OptocopterX* und *Optocopter+* sind analog zu den beiden Konfigurationen des Hexacopters. Bei der *CoAx*-Konfiguration werden lediglich vier Achsausleger benötigt, da auf jedem Ausleger zwei Motoren befestigt werden. Einer auf der Ober- und einer auf der Unterseite der Drohne. Diese Konfiguration wird meistens wie der *QuadX* aufgebaut. Der Optocopter besitzt die höchsten Anschaffungskosten, da die Motoren mit ihrer Steuerelektronik insgesamt acht Mal verwendet werden. Der große Vorteil ist jedoch, dass die Drohne selbst beim Ausfall mehrerer Motoren noch gelandet werden kann und nicht abstürzt.

Aus Gründen der Einfachheit und aus Kostengründen wird ein regulärer Quadcopter in der *Quadcopter X* Konfiguration konzipiert. Das Grundlayout ist in Abbildung 1 ersichtlich. Demnach müssen zur Realisierung der Drohne zwei Komponenten gefertigt werden. Eine Basis, und ein Motorhalter. Auf der Basis muss neben dem Flight-Controller (FC) auch noch die Halterung für die Motoren gefertigt werden.

3.2. Erster Entwurf

Im ersten Entwurf wurde ein faserverstärktes Kunststoffprofil mit 10 mm Kantenlänge als Verbindungselement zwischen der Basis und den Motorhaltern verwendet.

3.2.1. Basis

Die Basis, ersichtlich in Abbildung 2, wurde als Trägerstruktur der Steuerkomponenten entworfen. Deswegen wurde der innere Teil der Drohne komplett entfernt. Damit besitzt die Basis nur

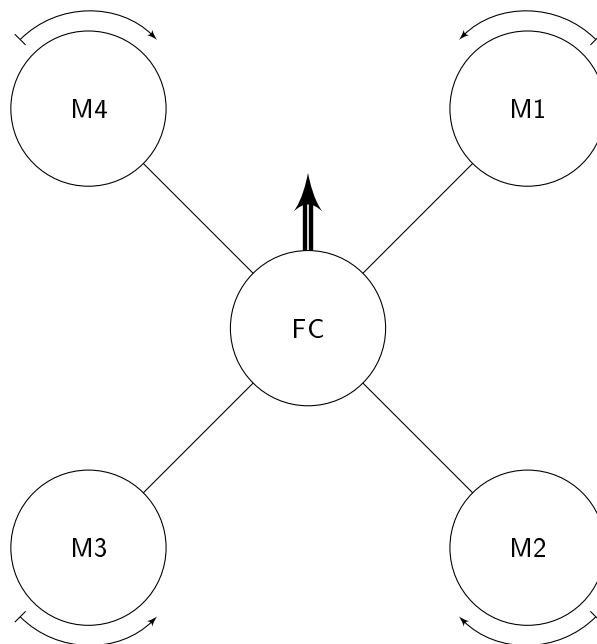


Abbildung 1.: Drohne in der Konfiguration *Quadcopter X*

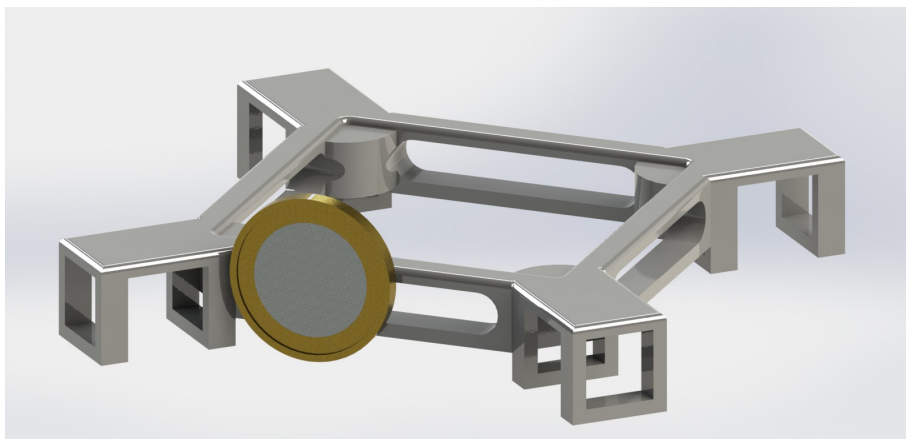


Abbildung 2.: Basis in der ersten Version mit einem Ein-Euro-Stück als Größenvergleich

noch Auflageflächen für den FC und Aufnahmen für die Karbon-Stangen. Innerhalb der Ausnehmung selbst gibt es nur an den Ecken kleine Auflageflächen. Im späteren Verlauf wurde erkannt, dass lediglich drei der vier Auflageflächen verwendet werden können, da der FC an einer Kante Anschlüsse angelötet hat. Die entworfene Basis besitzt ein Gewicht von 11,8 g.

3.2.2. Motorhalterung

Die Motorhalter, ersichtlich in Abbildung 3, besitzen neben der Aufnahme für den Motor auch eine Aufnahme für eine Karbon-Stange. Zusätzlich wurde eine Feder an der Unterseite angebracht. Diese sollen im Fall eines Absturzes einen Teil der Energie aufnehmen und die anderen Komponenten vor Schäden bewahren. Nach einer ersten Evaluierung stellte sich jedoch her-

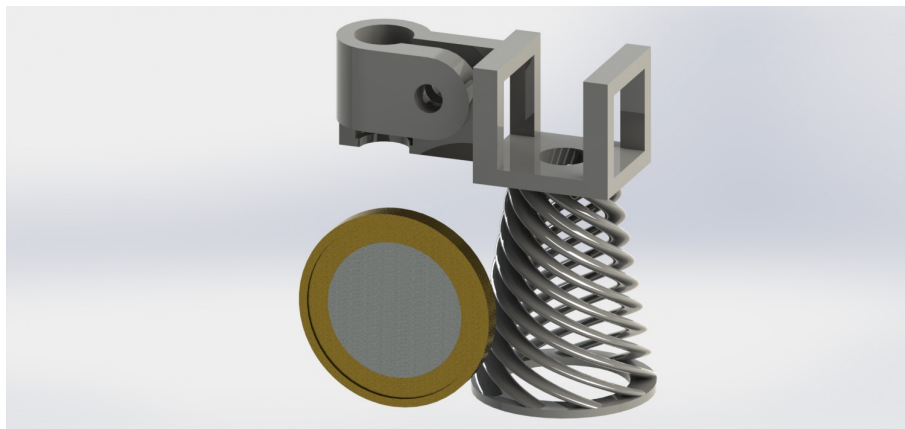


Abbildung 3.: Motorhalterung in der ersten Version mit einem Ein-Euro-Stück als Größenvergleich

aus, dass der erhoffte Nutzen in keinem Verhältnis zum Gewicht steht. Der entworfene Motorhalter besitzt ein Gewicht von 3,7 g

3.3. Zweiter Entwurf

Im zweiten Entwurf, ersichtlich in Abbildung 4, wurde das faserverstärkte Kunststoffprofil verworfen und der Motorhalter direkt in der Basis integriert. Dies bringt mehrere Vorteile. Nicht nur wurde durch das neue Design Gewicht eingespart, sondern die Schubkraft der Propeller wurde besser ausgenutzt. Das neue Gewicht der gesamten Basis beläuft sich auf 7,07 g. Die ausgeschnittenen Träger von der Basis zu den Motoren erlauben das Durchströmen der Luft. Als weiterer Vorteil kann angesehen werden, dass in diesem Bereich der Motortreiber angebracht werden kann und durch den Luftstrom aktiv gekühlt wird. Ebenso wurde in dieser Version an eine Kabeldurchführung von der Basis zu den Motoren gedacht. Damit ist es möglich einen Großteil der Verkabelung in den Korpus der Drohne zu verlegen. Dies bietet den Vorteil, dass die Kabel nur schwer irgendwo hängen bleiben und sich somit schwerer lösen können.

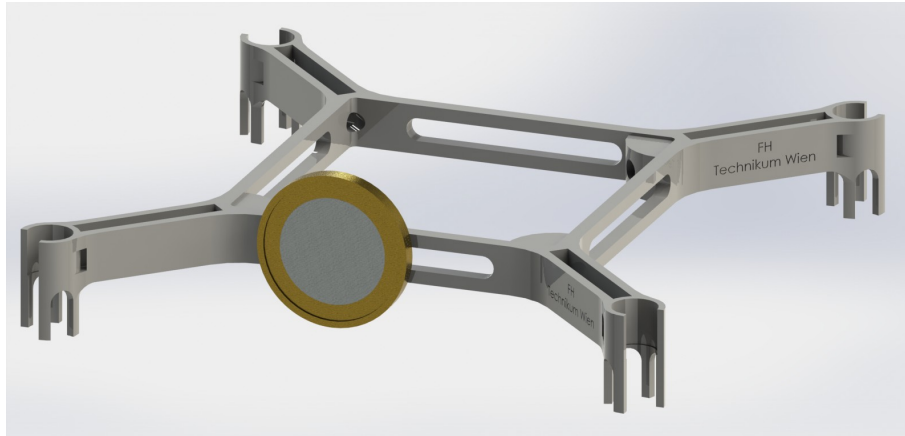


Abbildung 4.: Basis in der zweiten Version mit einem Ein-Euro-Stück als Größenvergleich

3.4. Mechanische Nachrechnung

Für die mechanische Nachrechnung müssen zuerst die Werkstoffdaten des Kunststoffes erhoben werden. Das Material wurde von EOS geliefert und besitzt die in Tabelle 1 aufgelisteten Eigenschaften. Um eine mechanische Nachrechnung durchführen zu können, muss ebenso der

Eigenschaft	Wert
Dichte	$0,9 - 0,95 \text{ g cm}^{-3}$
E-Modul (Zug)	$1\,700 \pm 150 \text{ N mm}^{-2}$
E-Modul (Biegung)	$1\,240 \pm 130 \text{ N mm}^{-2}$
Zugfestigkeit	$45 \pm 3 \text{ N mm}^{-2}$

Tabelle 1.: Materialdaten des Werkstoffes EOSINT P/PA2200 (Quelle: (EOS GmbH, 2014))

Schub des Antriebssystems berechnet werden. Die Nachrechnung des Balkens erfolgt durch das Anwenden der Gleichungen 10–13. Die in diesen Gleichungen benötigten Kräfte werden vom Antriebssystem der Drohne erzeugt. Die allgemeine Formel für den Schub kann aus dem Impulssatz hergeleitet werden.

$$\begin{aligned}
 F &= \frac{d}{dt}(mv) \\
 &= \frac{dm}{dt}v + m\frac{dv}{dt} = \dot{m}v + m\dot{v}
 \end{aligned} \tag{1}$$

Mit der Vereinfachung, dass die Geschwindigkeit konstant sein soll, kann der zweite Teil der Gleichung 1, $m\dot{v}$, vernachlässigt werden. Hierbei muss jedoch berücksichtigt werden, dass es sich bei der Geschwindigkeit v um die Geschwindigkeitsdifferenz zwischen der ausströmenden Geschwindigkeit nach dem Propeller v_P und der Geschwindigkeit der Drohne selbst v . Ebenso muss berücksichtigt werden, dass der Massenstrom \dot{m} mit der Querschnittsfläche des Propellers und der ausströmenden Geschwindigkeit zusammen hängt. Damit ergibt sich die neue

Formel für den Schub. Die Fläche selbst ist von dem Durchmesser des Propellers d und dem Durchmesser der Nabe d_N , die für die Montage des Propellers erforderlich ist, abhängig.

$$\begin{aligned}
 F_{Schub} &= \dot{m}v \\
 &= \dot{m}(v_P - v) \\
 &= \rho A v_P (v_P - v) \\
 &= \rho \frac{\pi}{4} (d^2 - d_N^2) v_P (v_P - v)
 \end{aligned} \tag{2}$$

Um diese Gleichung zu vereinfachen kann angenommen werden, dass die Geschwindigkeit v_P nur von der Steigung p und der Umdrehungszahl n des Propeller abhängig ist. Damit ergibt sich Gleichung 3.

$$F_{Schub} = \rho \frac{\pi}{4} (d^2 - d_N^2) ((pn)^2 - v_P n) \tag{3}$$

Diese Formel ist lediglich eine Annäherung an den tatsächlichen Schub, da viele Annahmen getroffen wurden. So kann beispielsweise nicht ohne weiteres gesagt werden, dass die Austrittsgeschwindigkeit der Luft nach dem Rotor nur von der Steigung und der Umdrehungsgeschwindigkeit abhängig ist. Eine Faustregel besagt, dass der statische Schub ($v = 0$) aller Motoren der Drohne das Doppelte der Gewichtskraft betragen sollte um diese angenehm steuern zu können. Problematisch ist in diesem Fall jedoch, dass in diesem Fall die Propeller ohne jegliche Kennwerte geliefert wurden. Somit muss die Steigung der Propeller empirisch ermittelt werden. Dabei wurden die Drohne komplett zusammen gebaut, und die Motoren mit einem Labornetzgerät versorgt. Danach wurde die Spannung der Motoren soweit erhöht, bis die Drohne sich von selbst in der Luft halten konnte. Mit einem Gewicht von 70 g wurde dies bei einer Spannung von 3,2 V erreicht. Die Propellerdurchmesser d und d_N betragen 47 mm und 4 mm. Die Motoren besitzen laut Datenblatt einen k_V -Wert von $14\,285\text{ V}^{-1}\text{ min}^{-1}$, dies entspricht $60\,000\text{ min}^{-1}$ bei 4,2 V. Dadurch errechnet sich eine Steigung p von 11,84 mm. Damit beträgt der maximale statische Schub der vier Motoren $\approx 1,7\text{ N}$. Mit diesem Werten können zwei unterschiedliche Diagramme angefertigt werden. Zum einen kann die benötigte Motorspannung in Abhängigkeit des Gewichts der Drohne zum Schweben in der Luft berechnet werden. Zum anderen kann die Maximalgeschwindigkeit der Drohne gegen die Erdanziehung berechnet werden. In Gleichung 4 wurde der statische Schub der vier Motoren mit der Gewichtskraft der Drohne gleich gesetzt. Diese Gleichung muss dann lediglich auf die Umdrehungszahl umgeformt werden um das Diagramm 5 zu erhalten.

$$\begin{aligned}
 F_G &= 4F_{Schub} \\
 m_{Drohne}g &= 4\rho \frac{\pi}{4} (d^2 - d_N^2) (pn)^2
 \end{aligned} \tag{4}$$

Damit kann der benötigte Schub zum aufheben der Gewichtskraft berechnet, und daraus die Spannung der Motoren abgeleitet werden. Dies kann dadurch ermittelt werden, da die Umdrehungsgeschwindigkeit n direkt proportional zur angelegten Spannung ist und mit $k_V U_M$ berechnet wird. Der Luftdruck wurde mit $1,233\text{ kg m}^{-3}$ bei 15 °C und $1\,020\text{ hPa}$ angenommen. In Abbildung 5 ist die benötigte Spannung am Motor zum Schweben der Drohne ersichtlich.

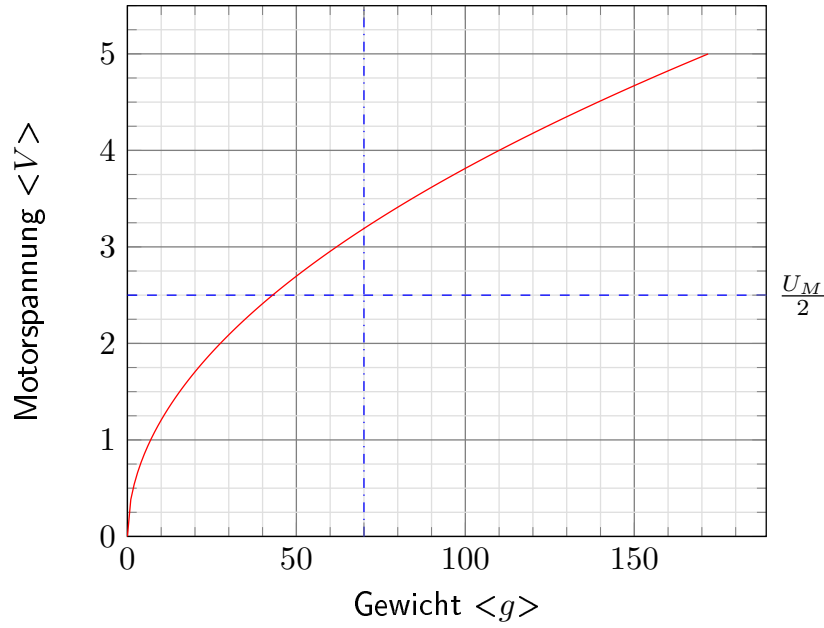


Abbildung 5.: Benötigte Motorspannung zum schweben in der Luft bei gegebenem Gewicht der Drohne. Die strichpunktierte Linie markiert das Gewicht der FH-Technikum Wien Drohne. Die gestrichelte Linie markiert die halbe Versorgungsspannung. Abgeleitet aus Gleichung 4. Die Dichte der Luft wurde mit $1,233 \text{ kg m}^{-3}$ angenommen, die restlichen Parameter sind dem Text zu entnehmen.

Zusätzlich wurde das Gewicht der FH-Technikum Wien Drohne (strichpunktierte Linie) und die halbe Versorgungsspannung der Motoren (gestrichelte Linie) markiert.

Zur Berechnung der Endgeschwindigkeit des Flugzeuges muss die Grunddifferenzialgleichung der Dynamik aufgestellt und gelöst werden.

$$a = \frac{dv}{dt} \quad (5)$$

$$\frac{1}{m_{Drohne}} (4F_{Schub} - F_G) = \frac{dv}{dt}$$

Da die zu erwartenden Geschwindigkeiten relativ klein sein werden, wurde der Luftwiderstand vernachlässigt. Sollte er dennoch berücksichtigt werden, kommt zusätzlich ein negativer, von der Geschwindigkeit abhängiger, Beschleunigungsterm dazu. Nach einsetzen und Umformen der Gleichung ergibt sich Gleichung 6

$$\int_0^t dt = m_{Drohne} \int_0^v \frac{dv}{\rho\pi (d^2 - d_N^2) \left((pn)^2 - v pn \right) - gm_{Drohne}} \quad (6)$$

$$t = \frac{m_{Drohne}}{\rho\pi np (d^2 - d_N^2)} \ln \left(\frac{|gm_{Drohne} - n^2 p^2 (d^2 - d_N^2) \rho\pi|}{|gm_{Drohne} - np (np - v) (d^2 - d_N^2) \rho\pi|} \right) \quad (7)$$

Nachdem die Integrale in Gleichung 6 gelöst wurden, ergab sich Gleichung 7. Diese wurde auf $v = f(t, m_{Drohne})$ umgeformt. Dabei wurden mehrere Restriktionen vorgenommen. Die

Geschwindigkeit v selbst muss positiv sein, die Drehzahl n kann durch $k_V U_M$ ersetzt werden, das Gewicht der Drohne ist durch den statischen Schub beschränkt und kann nicht größer werden als $\frac{\rho}{g} p^2 k_V^2 U_M^2 \pi (d^2 - d_N^2)$. Damit ist das maximale Gewicht der Drohne bei einer Motorspannung U_M von 5 V auf 171,9 g beschränkt. Zusätzlich muss beachtet werden, dass die Geschwindigkeit zum Zeitpunkt 0 ebenfalls 0 m s^{-1} beträgt. Dadurch ergibt sich Gleichung 8.

$$v(t, m_{\text{Drohne}}) = e^{\frac{-p k_V U_M t d^2 \rho \pi}{m_{\text{Drohne}}}} * \left(p k_V U_M - \frac{g m_{\text{Drohne}}}{p k_V U_M \rho \pi (d^2 - d_N^2)} \right) * \left(e^{\frac{p k_V U_M t d^2 \rho \pi}{m_{\text{Drohne}}}} - e^{\frac{p k_V U_M t d_N^2 \rho \pi}{m_{\text{Drohne}}}} \right) \quad (8)$$

Um die Geschwindigkeit in Abhängigkeit von der Zeit und dem Gewicht in einem übersichtlichen Diagramm darzustellen, wurde die Kurvenschar über die verschiedenen Gewichte in einem Diagramm (Abbildung 6) gezeichnet. Um die Endgeschwindigkeit in Abhängigkeit des Gewichts

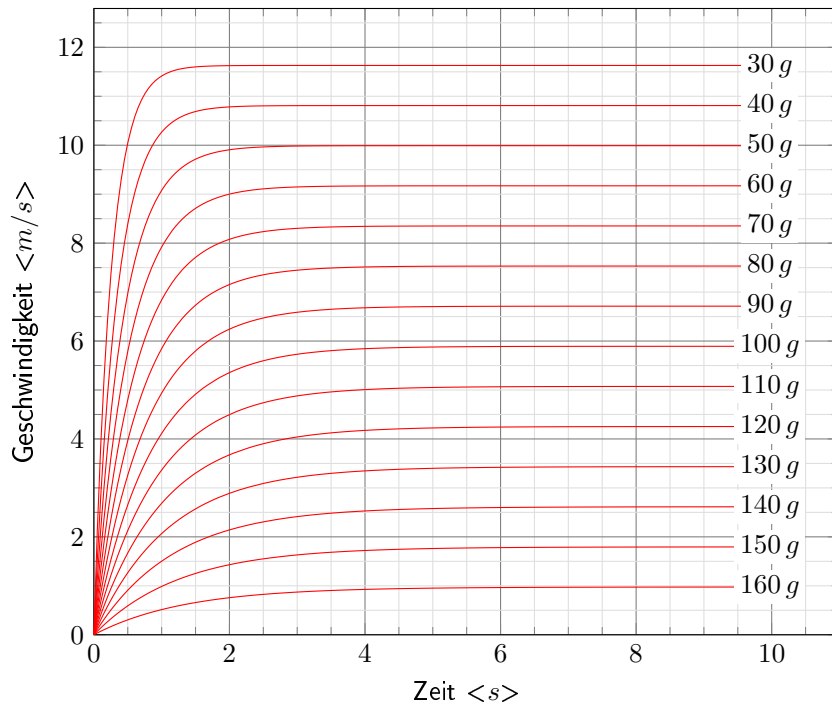


Abbildung 6.: Geschwindigkeitsverlauf über die Zeit entgegen der Erdbeschleunigung bei maximaler Motorspannung in Abhängigkeit vom Gewicht der Drohne. Verwendet wurde Gleichung 8; der Luftwiderstand wurde vernachlässigt.

zu ermitteln, muss Gleichung 8 nochmals genauer untersucht werden. Dies geschieht durch die

Bildung des Grenzwertes für den Fall $t \rightarrow \infty$. Dies ist in Gleichung 9 ersichtlich.

$$\begin{aligned} v_E(m_{Drohne}) &= \lim_{t \rightarrow \infty} v(t, m_{Drohne}) \\ &= pk_V U_M - \frac{gm_{Drohne}}{pk_V U_M \rho \pi (d^2 - d_N^2)} \end{aligned} \quad (9)$$

Die exponentiellen Terme der Gleichung 8 dienen lediglich der Formgebung. Sie konvergieren bei der Grenzwertbildung zu 1. Der Plot der auf diese Weise vereinfachte Term ist in Abbildung 7 ersichtlich. Ersichtlich ist, dass eine Motorspannung von 2 V bei den ermittelten Parametern

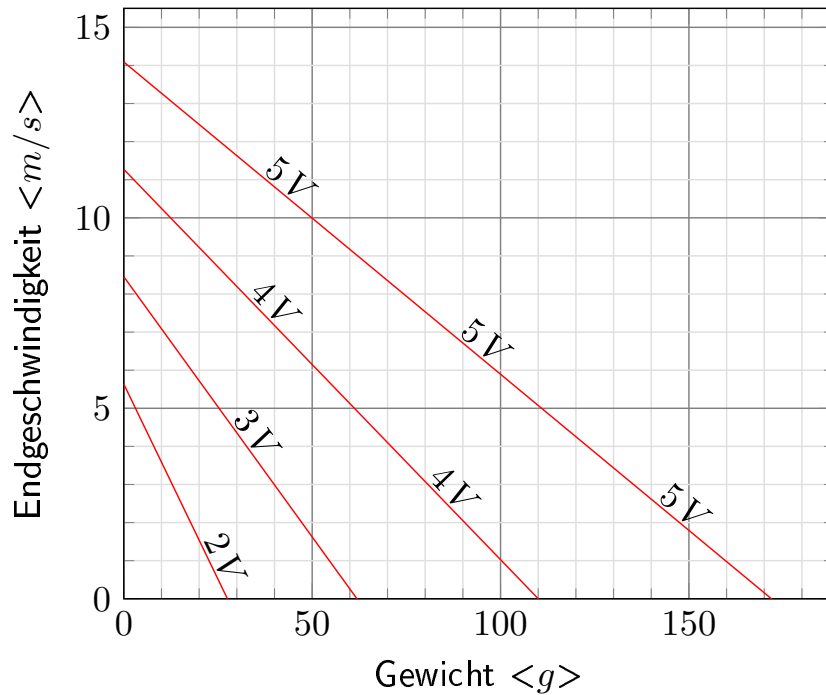


Abbildung 7.: Endgeschwindigkeit entgegen der Erdbeschleunigung bei verschiedenen Motorspannungen in Abhängigkeit vom Gewicht der Drohne. Verwendet wurde Gleichung 9; der Luftwiderstand wurde vernachlässigt.

unrealistisch ist, da das Gewicht der meisten Drohnen zu groß ist um mit dieser Spannung abheben zu können. Die verwendeten Motoren sind in Kapitel 4.2.2 näher beschrieben.

Nachdem die Antriebskräfte ermittelt wurden, muss der Ausleger auf Biegung nachgerechnet werden. Dazu muss das Flächenträgheitsmoment des Trägers ermittelt werden. Die verwendeten Formeln zur Berechnung der Flächenträgheitsmomente bezieht sich Rechtecke. Genauer gesagt, beziehen sich die Formeln auf die Flächenträgheitsmomente um die Hauptträgheitsachsen eines einfachen vollen Rechtecks. Um hohle Rechteckprofile damit berechnen zu können, kann das Flächenträgheitsmoment des äußeren und inneren Rechtecks berechnet werden, und danach das Innere vom Äußeren subtrahiert werden. Die Achsenaufteilung und

Namenskonvention für die Gleichungen 10 und 11 ist in Abbildung 8 ersichtlich.

$$J_{S,x} = \frac{bh^3}{12} \quad (10)$$

$$J_{S,y} = \frac{b^3h}{12} \quad (11)$$

Zur Berechnung der Flächenträgheitsmomente wird der Querschnitt des Trägers als eine Summe von verschiedenen Flächen angenommen. Es wird dazu vom Gesamtquerschnitt ein Rechtecke abgezogen. Dies verhindert, dass das Flächenträgheitsmoment verfälscht wird. Da alle

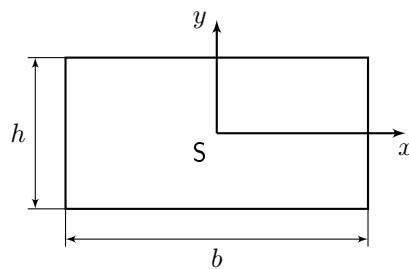


Abbildung 8.: Skizze zu den Gleichungen 10 und 11.

Rechtecke den selben Schwerpunkt besitzen, müssen die einzelne Trägheitsmomente nicht mehr mit dem Satz von Steiner auf eine gemeinsame Bezugsachse transformiert werden. Die

Fläche	b	h	J_{Sx}	J_{Sy}	Anmerkung
A_1	6 mm	7,5 mm	210,94 mm ⁴	135 mm ⁴	+
A_2	3 mm	7,5 mm	105,47 mm ⁴	16,88 mm ⁴	–

Tabelle 2.: Hilfstabelle zur Berechnung des Flächenträgheitsmoment des Motorslegers.

Maße der Flächen sind in Tabelle 2 ersichtlich. Mit den ermittelten Werten ergeben sich die Flächenträgheitsmomente J_{Sx} und J_{Sy} zu 105,47 mm⁴ und 118,12 mm⁴.

Die Gleichungen 12 und 13 berechnen die Biegelinie und die Biegespannung entlang des Trägers. Beachtet wird dabei ein Kragträger.

$$\sigma_{z,b}(y, z) = \frac{M_x(z)y}{J_x} \quad (12)$$

$$w_{B,Max} = - \frac{Ml^2}{3EJ_x} \quad (13)$$

Die maximale Biegespannung tritt in der Randfaser, beim Übergang der Basis in den Träger auf. ebenso kann angenommen werden, dass der Motor eine Kraft erzeugt. Damit können die Gleichungen 12 und 13 umgeformt werden. Zu beachten ist, dass die Länge l 24,21 mm beträgt.

Die maximale Schubkraft eines Motors wurde bereits mit $\approx 0,4 \text{ N}$ ermittelt.

$$M_{Max} = -F_{Max}l \quad (14)$$

$$y = -\frac{h}{2} \quad (15)$$

$$\sigma_{Max} = \frac{F_{Max}lh}{2J_{Sx}} \quad (16)$$

$$w_{B,Max} = \frac{F_{Max}l^3}{3EJ_x} \quad (17)$$

Damit ergibt sich eine maximale Biegespannung von $363\,153 \text{ Pa}$ beziehungsweise von $0,363\,153 \text{ N mm}^{-2}$. Die maximal mögliche Durchbiegung ergibt sich zu $2,9 \times 10^{-5} \text{ mm}$. Dieser Fall betrachtet die mechanische Verformung eines Motorhalters der zweiten Version. In dieser Betrachtung wird lediglich ein Motor mit voller Spannung versorgt. Andere mögliche Berechnungen umfassen die Verformung im Falle eines unausweichlichen Zusammenstoß mit einer Wand oder einem anderen Objekt. Da diese Situationen jedoch nicht der Regel entsprechen sollen, wird in dieser Arbeit auf die Simulation eines Unfalls verzichtet.

4. Elektronik

Die elektronischen Komponenten und deren Auslegung werden in diesem Kapitel erläutert. Es wird neben der Systemarchitektur auch die verschiedenen Arten der Datenübertragung beschrieben die Verwendet werden. Zusätzlich wird die Treiberschaltung zur Ansteuerung der Motoren näher beleuchtet und die verschiedenen Tests ausgeführt.

4.1. Systemarchitektur

Die verschiedenen Systemkomponenten einer regulären Drohne können der Abbildung 9 entnommen werden. Da die einzelnen Komponenten des Flight-Controllers (FCs) teurer sind, als das fertige Produkt, wird davon abgesehen, diesen selbst nach zu bauen. In Abbildung 10 ist das Systemschema für die FHTW-Drohne ersichtlich. Dieser soll es möglich sein sich im Schwarm zu formieren, untereinander zu kommunizieren und verschiedene Peripherie anzusprechen. Dies kann dadurch erreicht werden, dass eine Individualintelligenz zwischen das Kommunikationsmodul und den FC gesetzt wird. Diese Individualintelligenz wird von dem Projektteam durch einen Arduino-Mikrocontroller implementiert und soll verschiedenste Aufgaben übernehmen. Die grundlegendste Aufgabe die als erstes implementiert werden muss, ist das automatisierte Landen. Dadurch muss das Steuerungsprogramm für den FC nur soweit abgeändert werden, dass PWM-Ausgänge unterstützt werden. Auf der Individualintelligenz wird

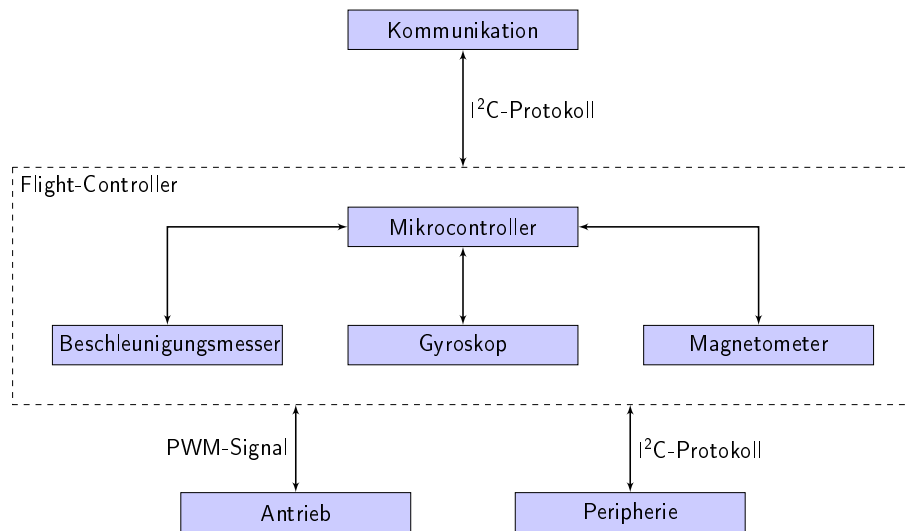


Abbildung 9.: Übersicht über die Systemkomponenten einer regulären Drohne

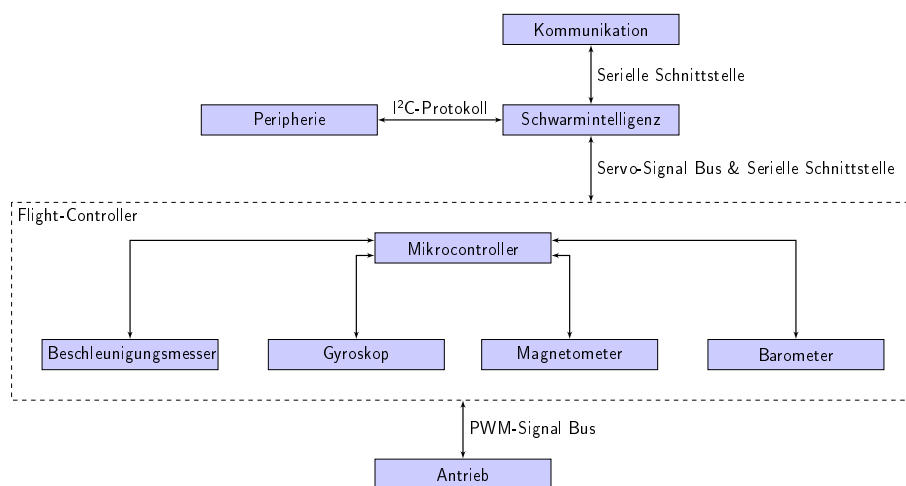


Abbildung 10.: Übersicht über die Systemkomponenten der FHTW-Drohne für Schwamaufgaben

dann lediglich der Input des Benutzers und der anderen Drohnen im Schwarm auf Flugbefehle übersetzt.

4.2. Komponentenbeschreibung

Im folgenden werden die verschiedenen Komponenten der Drohne kurz beschrieben und ein erster Vergleich angestellt.

4.2.1. Flight-Controller

Der FC ist das Herzstück des Unmanned Aerial Vehicle (UAV). Er kombiniert einen Micro-Controller und mehrere Sensoren zu einer funktionalen Einheit.

- Gyroskop: ITG3205 I²C-Adresse:0x68 & ITG3200_LPF_256HZ
- Beschleunigungsmesser: BMA180 I²C-Adresse:0x40
- Kompass: HMC5883L I²C-Adresse:0x1E
- Barometer: BMP085 I²C-Adresse:0x77

Bei dem Layouten des FC sind dem Hersteller jedoch kleinere Fehler unterlaufen. Es wurden zwei Ausgänge des Micro-Controllers nicht mit den korrespondierenden Anschlüssen verbunden. Ebenso ist die Bezeichnung der Anschlüsse nur teilweise korrekt. In Abbildung 11 ist

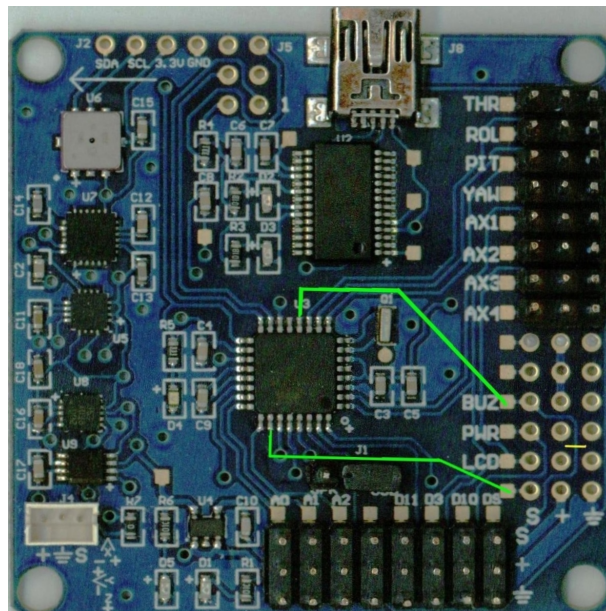


Abbildung 11.: FC mit den benötigten Verbindungen in Grün und einer vorzunehmenden Trennung in Gelb.

ersichtlich, welche Ausgänge des Micro-Controllers mit den korrespondierenden Anschlüssen verbunden werden müssen. Die Trennung in Gelb ist deswegen notwendig, da sonst der Ausgang D9 auf den Pin des Micro-Controllers verbunden ist.

Die Bezeichnung auf der rechten Seite ist von Oben nach Unten wie folgt: Throttle (D2), Roll (D4), Pitch (D5), Yaw (D6), Auxiliary 1 (D7), RX1 (D0), TX0 (D1), Motoranschluss (D3), A7, A6, Motoranschluss (D9, nach der Reparatur: Warnleuchte bei niedrigem Batteriestand; D8), Auxiliary 2 (D12), TX0 (D1), nicht Verbunden (nach der Reparatur: Spannungsüberwachung der Batterie; A3).

Die Bezeichnung auf der unteren Seite des FC ist von Links nach Rechts: Kamera-Pitch (A0), Kamera-Roll (A1), Kamera-Trigger (A2), Auxiliary 2 (D12), Motoranschluss (D11), Motoranschluss (D3), Motoranschluss (D10), Motoranschluss (D9).

Die Anschlüsse auf der oberen Seite des FC umfassen das I²C-Interface (A4 & A5 von Links nach Rechts) und das ISP-Interface. Die Spannungsüberwachung der Batterie kann durch einen Spannungsteiler zwischen den Anschlüssen realisiert werden. Dabei wird der negative Pol der Batterie mit einem 33 k Ω -Widerstand, und der positive Pol mit einem 51 k Ω -Widerstand verbunden. Beide Widerstände werden dann ebenso verbunden und an dem Anschluss A3 angeschlossen. Die Warnleuchte bei niedrigem Batteriestand kann durch eine LED mit einem Vorwiderstand von 330 Ω realisiert werden.

Um die in Abbildung 1 dargestellte Konfiguration erzeugen zu können, müssen die Motoren wie folgt angeschlossen werden: M1 auf D10, M2 auf D9, M3 auf D11 und M4 auf D3. Alle Informationen zu diesem FC können HobbyKing (2015) entnommen werden.

4.2.2. Aktorik

Zur Auswahl für die Aktorik stehen bürstenbehaftete und bürstenlose Motoren. Beide Motorenarten sind Gleichspannungsmotoren. Da die Drohne jedoch nicht nur sehr leicht, sondern auch kostengünstig sein soll, müssen verschiedene Überlegungen angestellt werden. Der Vergleich von bürstenbehafteten zu bürstenlosen Motoren ist in Tabelle 3 ersichtlich. Dadurch ergibt sich,

Bürstenbehaftet	Bürstenlos
Billig	Teuer
Einfache Regelung	Eigener Regler
Niedrige Effizienz	Hohe Effizienz
Wenig Wartung	Keine Wartung
Leichter	Schwerer

Tabelle 3.: Motorenvergleich

dass ein bürstenbehafteter Motor sinnvoll wäre. Dies liegt nicht nur daran, dass diese Motoren günstiger sind, sondern auch daran, dass sie keinen eigenen Speedcontroller benötigen. Da

der Flug-Controller keinen Motor direkt betreiben kann, müssen Treiberschaltungen verwendet werden. Die Treiberschaltung für die bürstenbehafteten Motoren besteht aus sehr wenigen Komponenten und ist in Kapitel 4.5 beschrieben.

Da der das angestrebte Zielgewicht der Drohne sehr nah bei dem Gewicht der Hubsan X4 H107 liegen soll, wurden im ersten Schritt die Ersatzteile des Herstellers bestellt. Die Motoren besitzen ein schwarzes und ein weißes Kabel. Unter der Verwendung der Rotoren müssen damit bei dem Rotortyp A muss die schwarze Litze mit Plus versorgt werden; der andere Rotor muss an der weißen Litze mit Plus versorgt werden.

4.2.3. Kommunikation

Zur Kommunikation der Drohne mit der Steuereinrichtung stehen zwei Möglichkeiten zur Verfügung, WLAN und Bluetooth. Beide Methoden ermöglichen die kabellose Kommunikation zwischen zwei Modulen. Jedoch bietet Bluetooth viele Vorteile für Drohnen, die mit einer stark limitierten Energieversorgung auskommen müssen. Nicht nur die geringe Reichweite von ungefähr 10 m, sondern auch die geringe Sendeleistung sorgen für einen geringen Stromverbrauch. Damit eignet sich das Bluetoothmodul HC 06 ideal für die Verwendung in einer Drohne. Dadurch wird aber auch die maximale Größe der Ausbreitung des Schwarms begrenzt. Da die Module lediglich eine Reichweite von ungefähr 10 m besitzen, darf dieser Abstand nicht überschritten werden.

4.2.4. Individualintelligenz

Um die Individualintelligenz der Drohnen zu erstellen, wird ein Arduino-Mikrocontroller (Arduino Micro) verwendet. Dieser wird zwischen den FC und das Kommunikationsmodul gesetzt. Dadurch können verschiedene Verhalten und Funktionen auf dem Arduino implementiert werden, ohne das Framework des FC überarbeiten zu müssen.

4.2.5. Sensorik

In der aktuellen Version der Drohne sind noch keine Sensoren vorgesehen. Sinnvolle Sensoren wären beispielsweise Abstandssensoren, um bei einer autonomen Aufgaben einen Mindestabstand zu möglichen Hindernissen zu gewährleisten.

4.2.6. Batterie

Eine mögliche Batterie wäre der Lithium-Polymer (LiPo)-Akku der Firma Parrot. Diese kann mit bis zu 8 A entladen werden. Da die Spannung des Akkus nur 3,7 V beträgt, müssen entweder zwei Akkus verwendet werden, oder für die Versorgung des FC und der Individualintelligenz und des Kommunikationsmoduls wird ein DC-DC-Konverter (LTC3401) verwendet.

4.3. Komponentenauswahl

Bei der Komponentenauswahl muss das Hauptaugenmerk auf dem Gewicht der Drohne liegen. In der Tabelle 4 sind die verbauten Komponenten mit dem ungefähren Gewicht angegeben. Der

Komponente	Preis	Gewicht
Flight-Controller	€ 23,45	≈14,00 g
Kommunikationsmodul	€ 3,45	≈10,00 g
Individualintelligenz	€ 22,60	≈13,00 g
Motoren	€ 5,65	≈10,00 g
Propeller	€ 0,89	≈8,00 g
Treiberschaltung	€ ≈3,00	≈3,00 g
Basis	€	≈7,00 g
	€ ≈60,00	≈65 g

Tabelle 4.: Auflistung der verwendeten Komponenten mit Gewicht und Preis

Endpreis der Drohne kann weiter reduziert werden, wenn für den FC und die Individualintelligenz günstigere Varianten aus Asien verwendet werden. Diese scheiterten für den Prototypen aus, da sie teilweise eine sehr lange Lieferzeit besitzen. Ein passender Ersatz für den FC ist bereits für €16,50 erhältlich. Die Ersparnis bei der Individualintelligenz ist sogar noch größer. Passende Schaltungen können bereits für €4,51 erworben werden.

4.4. Datenübertragung

Dieser Abschnitt behandelt die verschiedenen Signale mit denen gearbeitet wird. In den folgenden Abbildungen bedeutet 0 das keine Spannung angelegt ist (logisch Falsch, ausgeschalten), und 1, dass die Spannung angelegt ist (logisch Wahr, eingeschalten).

4.4.1. Pulsweitenmodulation

Bei der Pulsweitenmodulation (PWM) wird ein Rechtecksignal mit hoher Frequenz und einem gewissen *Duty-Cycle* an das Stellglied angelegt. Das Stellglied ist in diesem Fall die in Abschnitt 4.5 dargestellte Treiberschaltung. Bei der PWM kommt es dementsprechend auf das Verhältnis, der Duty-Cycle genannt wird, von T_{on} zu T an. Über PWM können nicht nur Motoren geregelt, sondern auch LEDs gedimmt werden. In Abbildung 12 ist ein PWM-Signal mit einem Duty-Cycle von 12,5 % ersichtlich. Die verwendete PWM-Frequenz des FCs beträgt 490 Hz.

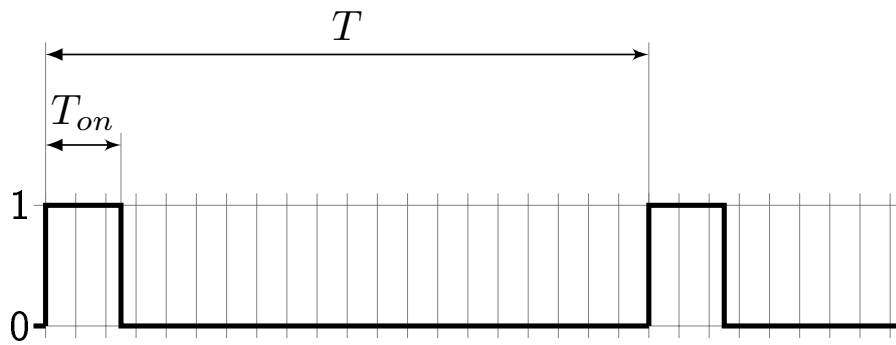


Abbildung 12.: PWM-Signal mit einem Duty-Cycle von 12,5 %.

4.4.2. Servo-Signal

Wie die Pulsweitenmodulation ist auch das Servo-Signal ein Rechteck-Signal. Bei dem Servo-Signal kommt es jedoch nicht auf den Duty-Cycle, sondern auf die Pulsbreite an. Die Periodendauer T liegt im Normalfall zwischen 5 ms und 25 ms. Eine Pulsbreite von 1 ms korrespondiert

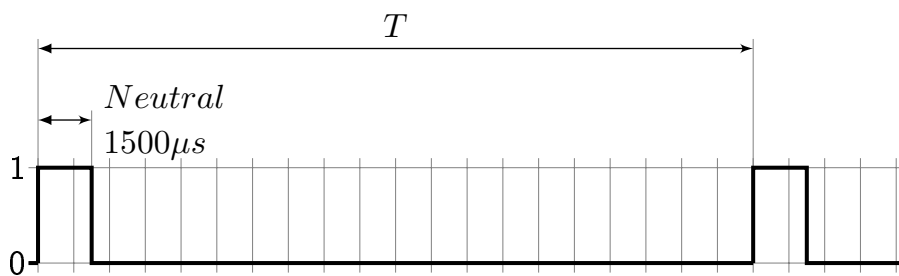


Abbildung 13.: Servo-Signal korrespondierend zur Neutral-Position.

in Normalfall mit der Minimalposition, 1,5 ms mit der Neutralposition und 2 ms mit der Maximalposition. Bei *Throttle* korrespondiert die Pulsweite von 1 ms mit keine Schub, und 2 ms mit dem maximal möglichen Schub.

4.4.3. I²C

Bei Inter-Integrated Circuit (I²C) handelt es sich um einen seriellen Datenbus. Dieser besteht aus einem Master, der alle anderen Komponenten abfragt, und aus einem oder mehreren Slaves. Die Datenübertragung wird immer vom Master initiiert. Die Datenübertragung wird eingeleitet, in dem der Datenkanal auf logisch 0 gezogen wird, während das Clock-Signal logisch 1 liefert. Danach wird, jedes mal wenn das Clock-Signal eine logische 0 liefert, die Datenleitung gesetzt (siehe *Set* in Abbildung 14). Die Daten werden übernommen, wenn Clock eine logische 1 liefert (siehe *Sample* in Abbildung 14). Gestoppt wird die Datenübertragung durch das ziehen der Datenleitung auf logisch 1, während das Clock-Signal ebenfalls logisch 1 sendet.

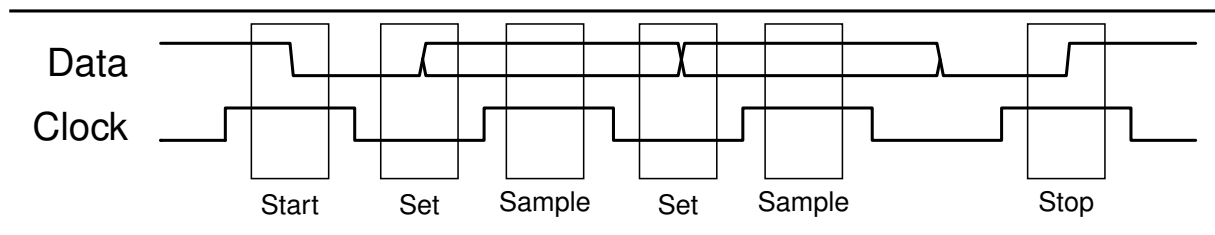


Abbildung 14.: I²C-Signal bei einer Übertragung von 2 Bit.

4.4.4. MultiWii Serial Protocol

Das MultiWii-Framework bietet ein serielles Protokoll zum Auslesen und Setzen verschiedener Werte. Für die FHTW-Drohne bietet sich diese Schnittstelle an, da durch sie sehr einfach die Werte des Beschleunigungsmessers, des Gyroskops des Magnetometers und die geschätzte Flughöhe ermittelt werden können. Die Dokumentation¹ des Protokolls legt offen, dass es 37 Befehle gibt. Davon sind jedoch nur zwei Befehle interessant: `MSP_RAW_IMU` und `MSP_ALTITUDE`. Der erste Befehl gibt die benötigten Daten des Beschleunigungsmessers, des Gyroskops und des Magnetometers aus. Der zweite Befehl gibt die geschätzte Flughöhe in Zentimetern aus.

4.5. Treiberschaltung

Die folgende Treiberschaltung dient dem Betreiben der Gleichstrommotoren für die Drohne. Das Buch Zach (2010) wurden als Literatur verwendet. Die Schaltung des Treibers ist in Abbil-

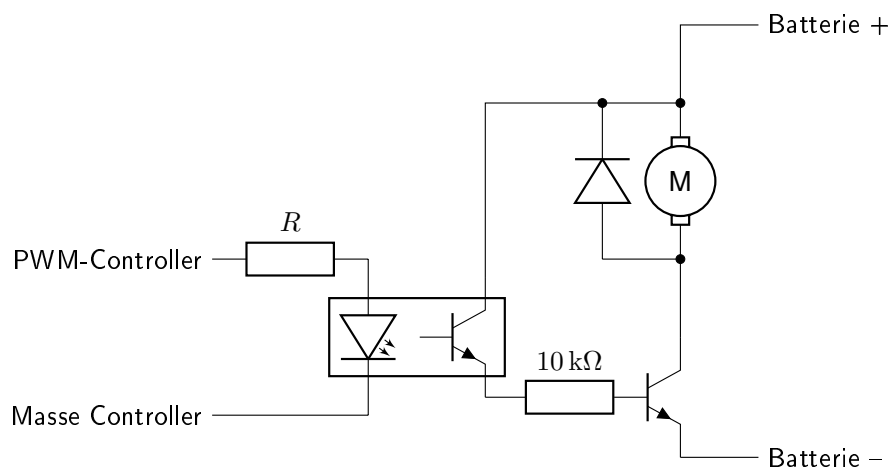


Abbildung 15.: Schaltplan des Motorentreibers in Version 1

dung 15 ersichtlich. Der Wert R des Vorwiderstands für die LED des Optokopplers richtet sich

¹http://www.multiwii.com/wiki/index.php?title=Multiwii_Serial_Protocol

dabei nach dem verwendeten Optokoppler, und der verfügbaren Spannung des Mikrocontrollers. Als praktikabler Wert bei 5 V Speisespannung des PWM-Controllers ergaben sich $390\ \Omega$.

In Versuchen stellte sich heraus, dass diese Treiberschaltung mit dem Motor selbst nicht sehr gut funktioniert. Dies ist in den Aufnahmen mit dem Oszilloskop in Abbildung 16 ersichtlich. Diese Problematik kann durch einen Pull-Down-Widerstand gelöst werden. Der Pull-Down-

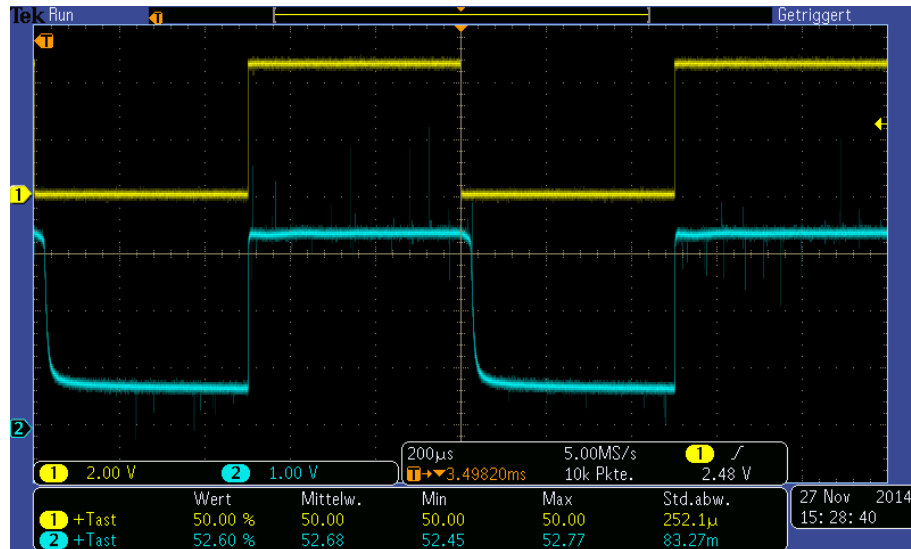


Abbildung 16.: Übertragungsfunktion der Treiberstufe in Blau auf ein PWM-Signal in Gelb ohne Pull-Down-Widerstand

Widerstand repräsentiert eine Verbindung des Basis-Anschlusses des Leistungstransistors mit dem Emitter-Anschluss. Neben dem Pull-Down-Widerstand wurden auch die Werte der Widerstände neu gewählt. Durch den Pull-Down-Widerstand konnte einer saubere Schaltschwelle

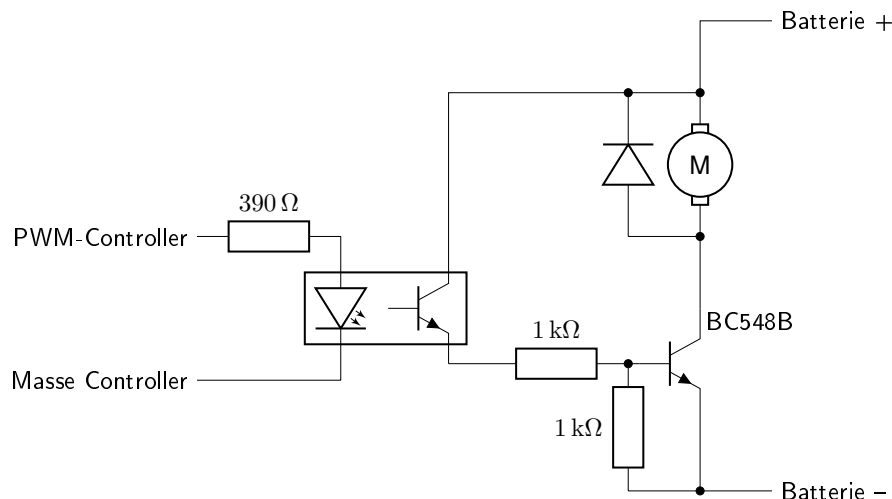


Abbildung 17.: Schaltplan des Motorentreibers in Version 2

realisiert werden. dies ist durch die Messung in Abbildung 18 ersichtlich. Zu erkennen ist, dass

mit dem Pull-Down-Widerstand das Blaue Signal im ausgeschalteten Zustand auf 0 V (gekennzeichnet durch die Marke auf der linken Seite) abfällt. In Abbildung 16 sieht man, dass das Signal nicht auf 0 V abfällt. Ohne Pull-Down-Widerstand kann bei höheren Schaltfrequenzen

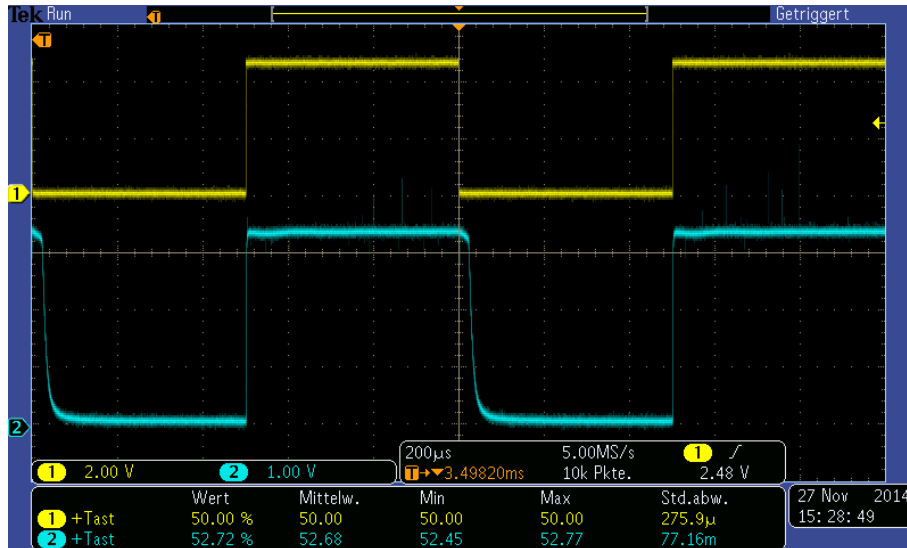


Abbildung 18.: Übertragungsfunktion der Treiberstufe in Blau auf ein PWM-Signal in Gelb mit Pull-Down-Widerstand

der Transistor nicht schnell genug abschalten. Damit erreichte der Motor schon bei einem Duty-Cycle von 3 % die maximale Drehzahl. Bei einem Versuch mit den Propellern auf den Motoren ergab sich, dass der Strom auf 1,5 A anstieg. Aus diesem Grund muss die Treiberschaltung in eine Version 3 überführt werden. Auf Grund des höheren Stroms muss statt einem regulären Transistor ein Metall-Oxid-Halbleiter-Feldeffekttransistor (MOSFET) verwendet werden. Diese sind für höhere Ströme und Leistungen gedacht. Durch den N-Kanal-MOSFET wird der Strom des Motors nicht mehr beschränkt. Dies war bei den regulären Transistoren der Fall, da diese nur ein gewisses Vielfaches des Basisstromes schalten können.

4.6. Tests

Im folgenden werden alle elektronischen Tests dokumentiert. Insgesamt wurden vier Tests durchgeführt. Im vierten Test wurde überprüft, ob die entwickelte Drohne flugfähig ist.

4.6.1. Erster Test

Im ersten Test wurden auf die Eingänge des FC verschiedene Servo-Signale angelegt. Dabei stellte sich heraus, dass der FC mit 3,3 V und 5 V arbeiten kann. Ebenso wurde die Sequenz zum *Armen* definiert.

1. 0 % Throttle \Rightarrow 1 ms Pulsbreite

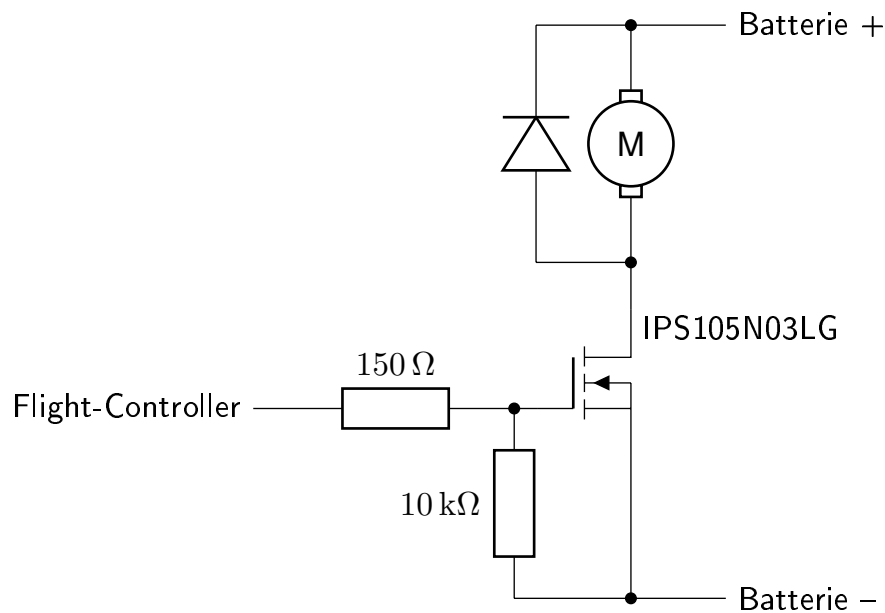


Abbildung 19.: Schaltplan des Motorentreibers in Version 3

2. 100 % Yaw \Rightarrow 2 ms Pulsbreite
3. Warten bis das Blaue Licht beginnt zu blinken.
4. 0 % Yaw \Rightarrow 1,5 ms Pulsbreite

Der FC *Disarmed* automatisch wenn Throttle längere Zeit auf 0 % geschaltet ist.

4.6.2. Zweiter Test

In diesem Test wurde das Verhalten der Treiberschaltung getestet. Als Erstes musste ermittelt werden, wie der FC die Motoren steuert. Die Tests ergaben, dass ein Servo-Signal verwendet wird um die Motoren zu steuern. Dieses Servo-Signal besitzt eine Periodendauer von 2,04 ms und eine Spannung von 5 V.

Da die Motoren jedoch direkt angesteuert werden, muss der Output als PWM-Signal vorliegen. Dazu müssen Teile des Frameworks geändert werden. Dies wird in Kapitel 5.1 näher erläutert. Zu beachten ist, dass mehrere Variablen angepasst werden müssen. Die Pulsbreite in Abbildung 20 korrespondiert mit dem in der Konfigurationsdatei eingestelltem Wert von 1 150 μ s. Die Pulsbreite in Abbildung 21 korrespondiert mit der Neutralstellung von 1 500 μ s. Die Pulsbreite in Abbildung 22 korrespondiert mit dem in der Konfigurationsdatei eingestelltem Wert von 1 850 μ s.

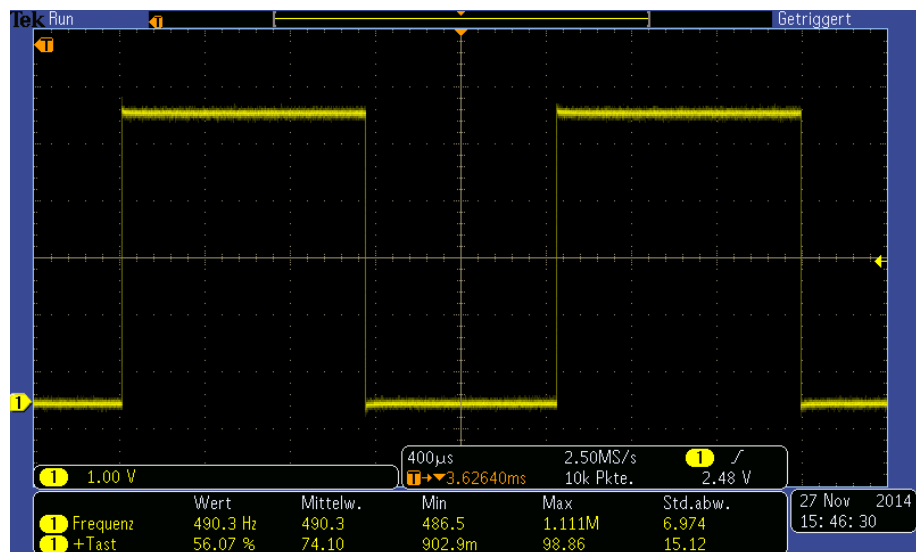


Abbildung 20.: Servo-Signal des FC in Minimal-Stellung.

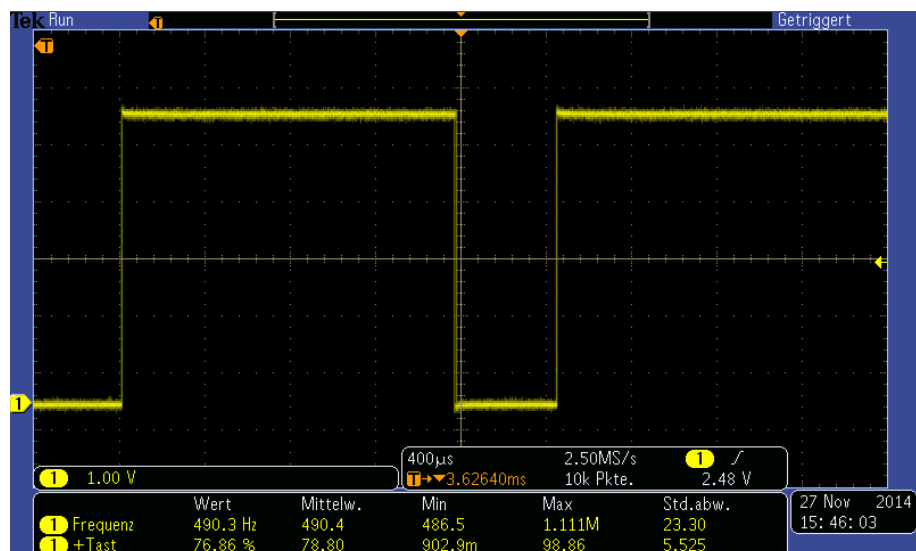


Abbildung 21.: Servo-Signal des FC in Neutral-Stellung.

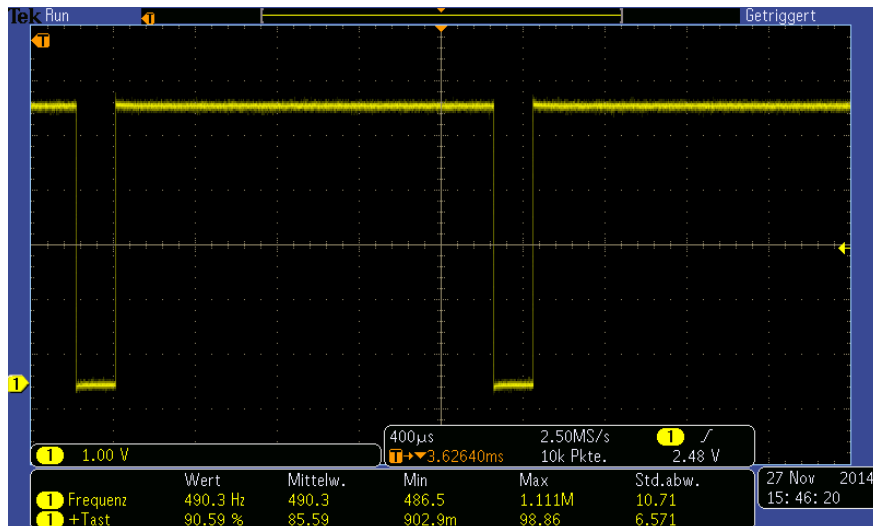


Abbildung 22.: Servo-Signal des FC in Maximal-Stellung.

4.6.3. Dritter Test

Beim dritten Test wurde der Strombedarf der Motoren gekoppelt mit den Motoren empirisch ermittelt. Dabei wurde ersichtlich, dass die Motoren nicht mit der Treiberschaltung in Version Zwei verwendbar waren. Dies liegt an dem hohen Stromverbrauch der Motoren.

4.6.4. Vierter Test

Im vierten Test wurde überprüft, ob die Drohne fliegen kann. In den ersten Versuchen konnte sich die Drohne nur leicht bewegen. Dies lag daran, dass das verwendete Netzgerät maximal 3 A liefern konnte. Nach Wahl der eines anderen Netzgerätes war der Flug der Drohne kein Problem. Neben 5 V Versorgungsspannung wurden auch 7,4 V getestet. Die Motoren halten diese Spannung problemlos aus, solange nicht länger als fünf Minuten durchgehend geflogen wird. Danach benötigen die Motoren eine kurze Pause zum abkühlen. Da das System auch mit 7,4 V versorgt werden kann, wird ein DC-DC-Buck-Konverter benötigt, um den FC, die Individualintelligenz und das Kommunikationsmodul mit 5 V zu versorgen. Durch die Versorgungsspannung mit 7,4 V können LiPo-Akkus verwendet werden.

5. Programmierung

Die Programmierung der Drohne basiert auf drei Säulen. Dem Framework des FC, dem Framework des Arduino, und die App selbst. Genauere Angaben zur Programmierung sind in der Arbeit meines Kollegen Herrn Spulak zu finden.

5.1. Framework – Flight-Controller

Das Framework des FC besteht aus eine Anzahl an fertigen Programmteilen, und einer Konfigurationsdatei. Der Benutzer muss nur die Konfigurationsdatei an seine Bedürfnisse anpassen. Die Drohne gliedert sich in sieben Abschnitte; Das grundlegende Setup, die typen-spezifische Konfiguration, das RC-Setup, alternative CPUs und Leiterplatten, alternatives Setup, optionale Funktionalität und Optionen zum Tunen und für Entwickler. Im grundlegenden Setup wird die Motorenkonfiguration ausgewählt und die Pulsbreite für die Motoren, beziehungsweise für die Geschwindigkeitsregler für bürstenlose Motoren definiert. Die Multiwii arbeitet mit einer Periodendauer von $2048\text{ }\mu\text{s}$. Standardmäßig sendet die Multiwii an die Motoren ein Signal mit einer Pulsbreite von $1000\text{ }\mu\text{s}$. Sobald die Drohne bereit zum Fliegen ist, arbeitet sie in einem Bereich von $1150\text{ }\mu\text{s} - 1850\text{ }\mu\text{s}$. Um die bürstenbehafteten Motoren zu steuern, wurden dieser Werte entsprechend angepasst und auf $200\text{ }\mu\text{s}$ und $400\text{ }\mu\text{s} - 2000\text{ }\mu\text{s}$ festgelegt. Dies entspricht einem Duty-Cycle von $\approx 10\%$ wenn die Drohne nicht bereit zum Abflug ist, und einem verfügbaren Bereich von $\approx 20\% - \approx 97\%$. Damit ist sofort erkennbar, wenn die Drohne flugbereit ist. Als nächstes wurde `#define I2C_SPEED 400000L, #define INTERNAL_I2C_PULLUPS, #define RCAUXPIN12, #define FREEIMUv035_BMP` und `#define MAG_ORIENTATION(X, Y, Z) {magADC[ROLL] = -Y; magADC[PITCH] = X; magADC[YAW] = Z;}` gesetzt. Alle anderen Werte blieben unverändert. Die einzige Datei, die editiert werden musste, ist die `config.h`.

5.2. Framework – Arduino

Die Arduino-Plattform bietet eine komplette Ansteuerung eines Atmel-Mikrocontrollers mit mehreren Bibliotheken. Diese Bibliotheken bieten einen einfachen Einstieg in die Welt der Mikrocontroller. Das implementierte Framework agiert als Interpreter zwischen der Telefon-App und dem FC-Framework. Der Arduino ist über die serielle Schnittstelle mit dem Bluetooth-Modul und über die regulären PWM-fähigen Output-Pins mit dem FC verbunden. Aktuell sind Befehle für das Setzen von *Throttle*, *Roll*, *Pitch*, *Yaw*, das Armen und Disarmen, und für das Halten der aktuellen Höhe. Das Befehlslayout sieht folgendermaßen aus: `*[Code] |[Wert] #`. Dabei steht `*` für den Beginn einer Befehlssequenz und `#` für das Ende. `|` ist das Trennzeichen zwischen dem Befehl und eines benötigten Werts.

5.3. App

Die App wurde für das Android-Betriebssystem entwickelt. Mit ihr ist es möglich den *Throttle*-, *Roll*- und *Pitch*-Wert zu setzen. Ebenso kann die Drohne die aktuelle Höhe halten, und scharf geschaltet werden. Zusätzlich können über ein Einstellungsmenü die Sensitivität der Inputs und eine Winkelkorrektur eingestellt werden.

6. Zusammenfassung und Ausblick

In dieser Arbeit wurde die mechanische und elektrische Auslegung einer kostengünstigen Drohne dokumentiert. Diese Drohne bietet auf Grund ihrer Konzeptionierung einen uneingeschränkten Funktionsumfang. Dies bietet Studenten die Möglichkeit, die Parameter der Drohne selbst zu verändern. Ein weiterer Punkt ist, dass die Drohne in der aktuellen Konfiguration beliebig skaliert werden kann. Ab einem gewissen Punkt muss lediglich beachtet werden, dass keine bürstenbehafteten Motoren mehr verwendet werden können. Danach müssen bei der Verwendung von bürstenlosen Motoren die Standardpulsbreiten wieder eingestellt und elektronische Geschwindigkeitsregler verwendet werden.

In diesem Projekt wurde der Grundstein für eine Drohne der FH Technikum Wien gelegt. Es gibt noch kleinere Defizite, die in einer weiteren Arbeit ausgebessert werden können. Die derzeitige Verbindung der Individualintelligenz, des Bluetooth-Moduls und des Flight-Controllers kann sehr viel eleganter durch eine selbst geätzte Platine gelöst werden. Dadurch kann ebenso der Schwerpunkt der Drohne genauer kontrolliert werden. Ein anderer Punkt ist, dass die aktuellen elektrischen Verbindungen nicht zur schnellen De- und Montage gedacht sind. Dies kann durch Steckverbindungen gelöst werden.

Literaturverzeichnis

- Ars Electronica Linz GmbH, 2014. *Spaxels*. [] Verfügbar unter: <<http://www.aec.at/spaxels/>> [Zugang am 20.10.2014].
- campilots GmbH, 2014. *campilots - Mini Helicopter Filmaufnahmen*. [] Verfügbar unter: <<http://www.campilots.com/de/home.html>> [Zugang am 20.10.2014].
- DIGICOPTER® Luftaufnahmen & Videoproduktion, 2014. *DIGICOPTER.DE*. [] Verfügbar unter: <<http://digicopter.de/de/luftaufnahmen/>> [Zugang am 20.10.2014].
- EOS GmbH, 2014. *Produktinformation EOSINT P/ PA2200 - Pulver*. [Datenblatt] München, Germany: EOS GmbH.
- Hibbeler, R. C., 2005. *Technische Mechanik. 1. Statik*. 10. Auflage. München, Germany: Pearson.
- Hibbeler, R. C., 2006a. *Technische Mechanik. 2. Festigkeitslehre*. 5. Auflage. München, Germany: Pearson.
- Hibbeler, R. C., 2006b. *Technische Mechanik. 3. Dynamik*. 10. Auflage. München, Germany: Pearson.
- HobbyKing, 2015. *MultiWii 328P Flight Controller w/FTDI DSM2 Comp. Port*. [Online] Verfügbar unter: <http://www.hobbyking.com/hobbyking/store/__27033__MultiWii_328P_Flight_Controller_w_FTDI_DSM2_Port.html> [Zugang am 19.01.2015].
- Parrot Public Company, 2015. *Parrot Minidrones Rolling Spider*. [Online] Verfügbar unter: <<http://www.parrot.com/de/produkte/rolling-spider/>> [Zugang am 19.01.2015].
- Shenzhen Hubsan Technology Company Limited, 2015. *Hubsan X4 Cemare*. [Online] Verfügbar unter: <http://www.hubsan.com/productinfo_16.html> [Zugang am 17.01.2015].
- Zach, F., 2010. *Leistungselektronik*. 4. Auflage. Berlin, Germany: Springer.

Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1.	Drohne in der Konfiguration <i>Quadcopter X</i>	5
Abbildung 2.	Basis in der ersten Version mit einem Ein-Euro-Stück als Größenvergleich	5
Abbildung 3.	Motorhalterung in der ersten Version mit einem Ein-Euro-Stück als Größenvergleich	6
Abbildung 4.	Basis in der zweiten Version mit einem Ein-Euro-Stück als Größenvergleich	7
Abbildung 5.	Benötigte Motorspannung zum schweben in der Luft bei gegebenem Gewicht der Drohne. Die strichpunktierte Linie markiert das Gewicht der FH-Technikum Wien Drohne. Die gestrichelte Linie markiert die halbe Versorgungsspannung. Abgeleitet aus Gleichung 4. Die Dichte der Luft wurde mit $1,233 \text{ kg m}^{-3}$ angenommen, die restlichen Parameter sind dem Text zu entnehmen.	9
Abbildung 6.	Geschwindigkeitsverlauf über die Zeit entgegen der Erdbeschleunigung bei maximaler Motorspannung in Abhängigkeit vom Gewicht der Drohne. Verwendet wurde Gleichung 8; der Luftwiderstand wurde vernachlässigt. .	10
Abbildung 7.	Endgeschwindigkeit entgegen der Erdbeschleunigung bei verschiedenen Motorspannungen in Abhängigkeit vom Gewicht der Drohne. Verwendet wurde Gleichung 9; der Luftwiderstand wurde vernachlässigt.	11
Abbildung 8.	Skizze zu den Gleichungen 10 und 11.	12
Abbildung 9.	Übersicht über die Systemkomponenten einer regulären Drohne	14
Abbildung 10.	Übersicht über die Systemkomponenten der FHTW-Drohne für Schwam- aufgaben	14
Abbildung 11.	FC mit den benötigten Verbindungen in Grün und einer vorzunehmenden Trennung in Gelb.	15
Abbildung 12.	PWM-Signal mit einem Duty-Cycle von 12,5 %.	19
Abbildung 13.	Servo-Signal korrespondierend zur Neutral-Position.	19
Abbildung 14.	I ² C-Signal bei einer Übertragung von 2 Bit.	20
Abbildung 15.	Schaltplan des Motorentreibers in Version 1	20
Abbildung 16.	Übertragungsfunktion der Treiberstufe in Blau auf ein PWM-Signal in Gelb ohne Pull-Down-Widerstand	21
Abbildung 17.	Schaltplan des Motorentreibers in Version 2	21
Abbildung 18.	Übertragungsfunktion der Treiberstufe in Blau auf ein PWM-Signal in Gelb mit Pull-Down-Widerstand	22
Abbildung 19.	Schaltplan des Motorentreibers in Version 3	23
Abbildung 20.	Servo-Signal des FC in Minimal-Stellung.	24

Abbildung 21. Servo-Signal des FC in Neutral-Stellung.	24
Abbildung 22. Servo-Signal des FC in Maximal-Stellung.	25

Tabellenverzeichnis

Tabelle 1. Materialdaten des Werkstoffes EOSINT P/PA2200 (Quelle: (EOS GmbH, 2014))	7
Tabelle 2. Hilfstabelle zur Berechnung des Flächenträgheitsmoment des Motorauslegers.	12
Tabelle 3. Motorenvergleich	16
Tabelle 4. Auflistung der verwendeten Komponenten mit Gewicht und Preis	18

Abkürzungsverzeichnis

FC	Flight-Controller
I²C	Inter-Integrated Circuit
ISP	In-System Programming
LiPo	Lithium-Polymer
MOSFET	Metall-Oxid-Halbleiter-Feldeffekttransistor
PWM	Pulsweitenmodulation
UAV	Unmanned Aerial Vehicle

A. Anhang

Im Anhang findet man folgende Daten.

A.1. CAD-Daten

Die CAD-Daten der gezeichneten Bauteile umfassen:

- Version 1
 - Basis
 - Motorhalterung
- Version 2 – Kombinierte Basis mit Motorhalterung

A.2. Quellcode

Der gesamte Quellcode der verwendeten MultiWii-Steuerung, des Arduino-Programmes und der Steuerungs-App.