



FACHHOCHSCHUL-BACHELORSTUDIENGANG

Automatisierungstechnik

Recherche, Gegenüberstellung, Bewertung und
Auswahl von Hardwarekomponenten für den
Aufbau eines Quadrocopters

ALS BACHELORARBEIT EINGEREICHT

zur Erlangung des akademischen Grades

Bachelor of Science in Engineering

von

Berger Andreas

Mai 2011

Betreuung der Bachelorarbeit durch
Prof. (FH) Dipl.-Ing. Walter Rokitansky



Campus Wels

Ich erkläre ehrenwörtlich, dass ich die vorliegende Arbeit selbstständig und ohne fremde Hilfe verfasst, andere als die angegebenen Quellen nicht benutzt, die den benutzten Quellen entnommenen Stellen als solche kenntlich gemacht habe und dass diese Arbeit mit der vom Begutachter beurteilten Arbeit übereinstimmt. Die Arbeit wurde bisher in gleicher oder ähnlicher Form keiner anderen Prüfungsbehörde vorgelegt und auch nicht veröffentlicht.

.....
Berger Andreas

Freilassing, den 09.05.2011

DANKSAGUNG

An dieser Stelle möchte ich allen danken, die durch ihre fachliche und persönliche Unterstützung zum Gelingen dieser Bachelorarbeit beigetragen haben.

Besonderer Dank gebührt meinen Eltern, Franz und Dagmar Berger, die mir das Studium durch ihr Verständnis und ihre Unterstützung ermöglicht haben.

Weiterhin bedanke ich mich bei Prof. (FH) Dipl.-Ing. Walter Rokitansky, sowie bei Dipl.-Ing. (FH) Raimund Edlinger und Ing. Zauner Michael, BSc für die Betreuung meiner Bachelorarbeit und deren zahlreiche Ratschläge, welche zur Verbesserung der Arbeit beigetragen haben.

Ebenfalls bedanken möchte ich mich speziell bei dem gesamten Robo-Racing-Team und meinen Kollegen der FH OÖ Campus Wels für ihre Unterstützung und Zusammenarbeit.

KURZFASSUNG

Im Zuge der Vorbereitungen zum Wettbewerb der RoboCup Rescue League¹ und im Rahmen eines fächerübergreifenden Projektes wurde ein Prototyp eines Quadrocopters mit Codenamen „Willi“ entwickelt, der die Wettbewerbsanforderungen erfüllen sollte.

Inhalt dieser Bachelorarbeit ist die Erläuterung des Grundprinzips von Quadrocoptern, deren Steuerung, sowie ein Überblick über bereits bestehende kommerzielle Plattformen.

Ein weiteres Augenmerk ist die Auswahl des Steuerungssystems und der Vergleich mit bestehenden Konzepten in Bezug auf Flexibilität, Erweiterbarkeit und Grad an Source Code Verfügbarkeit, sowie Wahl des elektrischen Antriebssystems, dessen Dimensionierung und Berechnung. Ebenfalls wurden Komponenten für Energiespeichereinheit und Fluggestell unter dem Gesichtspunkt der Anforderungspunkte (siehe Kapitel 4) ausgewählt.

Des Weiteren dient diese Arbeit als Grundlage für weitere Entwürfe von fliegenden Robotern, die im Zuge der Weiterentwicklung und Konzeptionierung von verschiedenen Problemstellungen in den nächsten Jahren im Robo-Racing-Team² der FH OÖ Campus Wels entwickelt werden.

„Mache die Dinge so einfach wie möglich - aber nicht einfacher.“

Albert Einstein

¹ <http://www.robocuprescue.org>

² <http://rrt.fh-wels.at>

ABSTRACT

In preparation for the competition of the RoboCup Rescue League³ and as part of a multidisciplinary project, a prototype of Quadrocopter code-named "Willi" was developed to meet the competitive requirements.

Content of this bachelor work is to explain the basic principle of Quadrocopter, their control, and a review of existing commercial platforms.

The further background of this bachelor thesis is the selection of the control system and the comparison with existing concepts in terms of flexibility, extensibility and degree of source code availability, the choice of the electric drive system and its dimensions and calculation. Also components for energy storage unit and airframe are selected from the broader standpoint of compliance with a maximum weight of 2 kg and the indoor fitness to fly.

Furthermore, this work serves as base for further designs of flying robots being engineered in line with the development and conception of various problems in the next few years in the Robo-Racing-Team⁴ at FH OÖ Campus Wels.

³ <http://www.robocuprescue.org>

⁴ <http://rrt.fh-wels.at>

INHALTSVERZEICHNIS

1	EINFÜHRUNG.....	1
1.1	MOTIVATION	1
1.2	ABGRENZUNG.....	1
2	TECHNISCHE GRUNDLAGEN.....	2
2.1	GRUNDPRINZIP DES QUADROPTER	2
2.2	AUFBAU UND STEUERUNG.....	3
3	KOMMERZIELLE SYSTEME.....	5
3.1	MICRODRONES	5
3.2	MIKROKOPTER	6
3.3	DRAGANFLYER X6	7
3.4	PARROT AR DROHNE	8
3.5	ETH-ZÜRICH.....	9
3.6	UNIVERSITÄT PENNSYLVANIA.....	10
4	EINSATZGEBIETE UND ANFORDERUNGEN.....	11
4.1	ROBOCUP RESCUE LEAGUE.....	11
4.2	WEITERE WETTBEWERBE.....	12
4.2.1	IMAV 2011	12
4.2.2	Motodrone	12
4.3	MÖGLICHE EINSATZGEBIETE.....	13
4.4	MECHANIK UND AUFBAU	13
4.5	KONZEPT UND DESIGNFINDUNG	13
5	DAS STEUERUNGSSYSTEM.....	15
5.1	VORHANDENE SYSTEME.....	15
5.1.1	Sensoren	16
5.1.2	Aktoren.....	18
5.1.3	Flugmodus	18
5.1.4	Konfigurationen	18
5.1.5	Source Code	18
5.2	ENTSCHEIDUNG UND AUSWAHL	19
5.3	AUFBAU DES NG UAVP.....	20
5.3.1	LPC Board.....	20
5.3.2	Flightcontrol Board	20
5.3.3	Sensorboard.....	21

6	DAS ELEKTRISCHE ANTRIEBSSYSTEM	22
6.1	BRUSHLESSMOTOR	22
6.1.1	Innenläufer	22
6.1.2	Außenläufer	22
6.1.3	Entscheidung und Auswahl	23
6.2	PROPELLER.....	24
6.3	BRUSHLESS-REGLER	24
6.3.1	Anforderungen	24
6.3.2	Entscheidung und Auswahl	25
6.4	GESAMTSYSTEM.....	26
6.4.1	Darstellung	26
6.4.2	Theoretische Berechnung des Schwebestroms	27
6.4.3	Stromverbrauch und Schubmessung	28
7	DER AKKUMULATOR.....	29
7.1	AKKUVERGLEICH	29
7.2	DIMENSIONIERUNG.....	30
7.3	FLUGDAUER	31
7.3.1	Berechnung der Flugdauer	31
7.3.2	Erfahrungswert aus der Praxis.....	31
8	DAS FLUGGESTELL	32
8.1	CARBON-QUADROCOPTER.....	32
8.2	KUBUS DES QUADROCOPTER.....	33
8.3	GESAMTSYSTEM.....	34
8.4	AUFBAU DES PROTOTYPEN.....	34
9	ZUSAMMENFASSUNG.....	35

ABBILDUNGSVERZEICHNIS

Abbildung 2.2.1: Schematische Darstellung eines Quadrocopters (Quelle [1])	3
Abbildung 2.2.2: Kippen um die Querachse (Nick)	4
Abbildung 2.2.3: Kippen um die Längsachse (Roll)	4
Abbildung 2.2.4: Drehen um die eigene Achse (Yaw, Gier).....	4
Abbildung 3.1.1: Quadrocopter-Modell md4-200 von der Firma Microdrones (Quelle [2])	5
Abbildung 3.2.1: Quadrocoptermodell MK Basis Set L4-ME (Quelle [3])	6
Abbildung 3.3.1: Hexacoptermodell Draganflyer X6 (Quelle [4])	7
Abbildung 3.4.1: Quadrocoptermodell der Firma Parrot (Quelle: [5]).....	8
Abbildung 3.5.1: Quadrocopter der ETH Zürich mit Positionskugeln (Quelle: [6]).....	9
Abbildung 3.6.1: Quadrocopter der Universität Pennsylvania beim Gerüstbau (Quelle: [7]).....	10
Abbildung 4.1.1: Darstellung der Luft-Arena der RoboCup Rescue League 2009(Quelle: [8]).....	11
Abbildung 5.3.1: LPC Board 2148 von Sparkfun(Quelle: [15])	20
Abbildung 5.3.2: Flightcontrol Board von NG UAVP (Quelle: [13]).....	21
Abbildung 5.3.3: Sensorboard von NG UAVP (Quelle: [13])	21
Abbildung 6.4.1: Brushless Motor 20/20L der Firma Hacker (Quelle: [18])	26
Abbildung 6.4.2: Propeller 10´x 4,7 APC Slow Flyer der Firma APC (Quelle: [18])	26
Abbildung 6.4.3: Brushless Regler BI-Ctrl 1.2 der Mikrokopter Plattform (Quelle: [14])	26
Abbildung 7.2.1: Kokam Akku 4S 5000 mAh (Quelle: [18])	30
Abbildung 8.1.1: Carbon-Quadrocopterkonzept (links) , Detailansicht Spezialstecksystem (rechts)..	32
Abbildung 8.2.1: Detailansicht Kubus mit den zwei Ebenen.....	33
Abbildung 8.2.2: Darstellung des Carbon-Quadrocopterkonzepts mit allen Komponenten	33
Abbildung 8.4.1: Prototypaufbau des Quadrocopters	34

TABELLENVERZEICHNIS

Tabelle 4.5.1: Abschätzung des Gesamtgewichtes.....	14
Tabelle 5.1.1: Vergleich der einzelnen vorhandenen Systeme(Quelle: [13])	16
Tabelle 6.1.1: Brushless-Außenläufer Vergleich (Quelle: [18], [19], [20])	23
Tabelle 6.4.1: Variablendefinition für (6.1), (6.2), (6.3), (6.4) und (6.5)	27
Tabelle 6.4.2: Stromstärke- und Schubmessung	28
Tabelle 7.1.1: Vergleich von LiPo und NiMH Akku (Quelle: [18], [22], [23])	29
Tabelle 7.3.1: Variablendefinition für (7.1) und (7.2).....	31
Tabelle 8.3.1: Gewichtsauflistung des Quadrocopters	34

1 Einführung

In diesem Kapitel werden die Motivation für dieses Bachelorprojekt sowie die Abgrenzung zu den Bachelorarbeiten von Daniel Rumetshofer und Manuel Zangenfeind erläutert.

1.1 Motivation

Das Robo-Racing-Team hat bereits zahlreiche autonome mobile Roboter für verschiedene Bewerbe entwickelt und diese erfolgreich eingesetzt. In einem abgeschlossenen Projekt des dritten Semesters, „Entwicklung eines Roboters für den European Robot Sumo Championship“, konnte ich mich für die Thematik Robotik begeistern, welche einen großen Bereich meiner Ausbildung darstellt.

Die Konstruktion eines Quadrocopters für die RoboCup Rescue League bot die Möglichkeit, eigenverantwortlich die Entwicklung und Konzeptionierung eines autonom fliegenden Roboters zu erarbeiten. Hiermit war es mir nicht nur möglich mein persönliches Interesse an der Konzeptionierung, Komponentenauswahl und Konstruktion von Robotern mit einem Projekt zu verbinden, sondern auch in einem jungen und dynamischen Team der Fachhochschule Wels mitzuwirken.

1.2 Abgrenzung

Alle zum fliegenden Betrieb des Roboters nötigen Komponenten, welche in den Bereich Steuerung und Software fallen, werden von anderen Kollegen konzipiert und dokumentiert. Diese Arbeit befasst sich rein mit der Auswahl der mechanischen Teile, sowie den weiteren Hardwarekomponenten des Roboters. Details zur Software bzw. Steuerung sind den Bachelorarbeiten von Daniel Rumetshofer bzw. Manuel Zangenfeind zu entnehmen.

2 Technische Grundlagen

Das Kapitel „Technische Grundlagen“ beschäftigt sich zunächst mit den Grundprinzipien von Quadrocoptern. Anschließend werden Aufbau und der Steuerungsmechanismus durch Drehzahländerung der einzelnen Luftschrauben weiter erläutert.

2.1 Grundprinzip des Quadrocopter

Ein Quadrocopter, auch als quadrotor Helicopter oder Quadcopter bezeichnet, ist ein Luftfahrzeug, welches durch vier Luftschrauben angetrieben wird. Anders als Starrflügler haben sie keine starren Tragflächen, welche den Auftrieb erzeugen. Aus diesem Grund werden Quadrocopter in die Klasse der Drehflügler eingestuft, da ihr gesamter Auftrieb auf vier Rotoren zurückzuführen ist. Des Weiteren können sie auch in die Klasse der Hubschrauber eingeordnet werden. Im Gegensatz zu Standard-Hubschraubern verwenden Quadrocopter allerdings starre Luftschrauben, deren Steigung sich während des Fluges nicht ändert. Ein Quadrocopter kann durch Drehzahl-Variation der einzelnen Luftschrauben und dem daraus resultierenden unterschiedlichen Schub und Drehmoment gesteuert werden.

Der Vorteil von modernen Quadrocoptern gegenüber vergleichbaren Hubschraubern liegt darin, dass alle drei Achsen des Luftfahrzeugs allein durch Änderung von Schub und Drehmoment angesteuert werden. Speziell mechanische Komponenten, wie Taumelscheiben bzw. Gestänge zur Blattverstellung entfallen. Hierdurch ergibt sich ein im Vergleich sehr einfacher mechanischer Aufbau, hohe Zuverlässigkeit und Verfügbarkeit.

Weiters ist die leichte und intuitive Steuerung zu nennen, da die gesamte Ausregelung des Systems im Gegensatz zum Hubschrauber von Sensoren und der Elektronik übernommen wird. (Quelle [1])

2.2 Aufbau und Steuerung

Ein Quadrocopter wird nach einem der drei folgenden Schemata aufgebaut. Die vier Motoren werden in „H“, „X“ bzw. „+“ - Form angeordnet. Die beiden jeweils gegenüberliegenden Rotoren haben bei allen drei Konfigurationen die gleiche Drehrichtung; zwei drehen sich im Uhrzeigersinn und zwei dagegen. Hierdurch ergibt sich bei gleicher Drehzahl aller vier Rotoren eine Aufhebung des Drehmoments des gesamten Systems. Somit steht der Quadrocopter, trotz drehender Rotoren, ohne Drehung um die eigene Achse in der Luft.

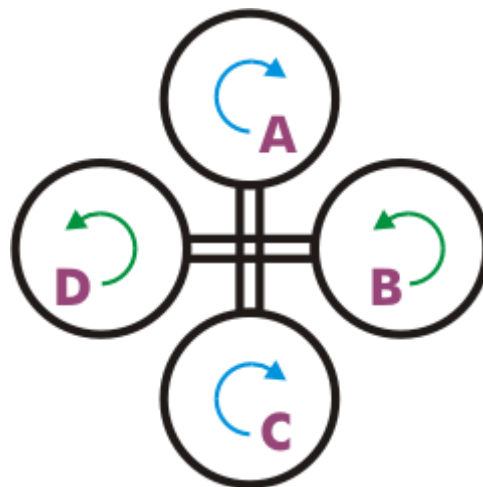


Abbildung 2.2.1: Schematische Darstellung eines Quadrocopters (Quelle [1])

Die hier gezeigte „+“-Konfiguration, Flugrichtung nach A, ist weit verbreitet und bedeutet eine einfache Ansteuerung, indem für Roll- und Nickachse jeweils nur ein Motorenpaar angesteuert werden muss. Bei der H- oder auch x-Konfiguration sind die Rotoren um 45° zur Flugrichtung versetzt. Hier sind bei Nick- oder Rollbewegungen stets alle vier Motoren zu regeln, jedoch sind höhere Drehbeschleunigungen erlaubt. In diesem Fall ist bei der Montage einer Kamera kein Rotor im Sichtbereich. (Quelle [1])

Die Steuerung und das Zusammenwirken der Rotoren bei einem Quadrocopter werden anhand der nachfolgenden Grafiken deutlich:

- **Kippen nach vorne oder hinten (siehe Abbildung 2.2.2) um die Querachse (Nick):**

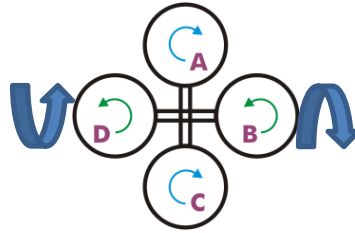


Abbildung 2.2.2: Kippen um die Querachse (Nick)

- Das Drehzahlverhältnis zwischen A und C ändern

- **Kippen um die Längsachse (siehe Abbildung 2.2.3) nach links oder rechts (Roll):**

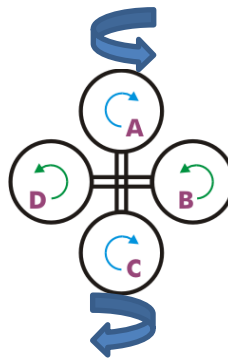


Abbildung 2.2.3: Kippen um die Längsachse (Roll)

- Das Drehzahlverhältnis zwischen B und D ändern

- **Drehen um die eigene Achse (siehe Abbildung 2.2.4) (Yaw, Gier):**

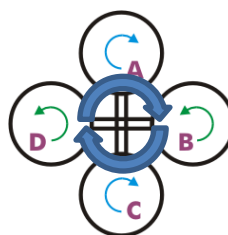


Abbildung 2.2.4: Drehen um die eigene Achse (Yaw, Gier)

- Das Drehzahlverhältnis paarweise zwischen A, C und B, D ändern

Neben der weit verbreiteten Konfiguration mit vier Rotoren existieren auch Konstruktionen mit sechs, acht oder zwölf Luftschrauben. Hierbei gibt es bereits Systeme, welche den Ausfall eines Antriebs automatisch erkennen und ausregeln. Der Tricopter, eine Sonderbauform, spart zwar Gewicht und Bauteile durch Beschränkung auf drei Rotoren. Zum Ausgleich des Gesamtdrehmoments muss jedoch ein Motor schwenkbar ausgelegt und gesteuert werden. (Quelle [1])

3 Kommerzielle Systeme

Quadrocopter Systeme haben sich in den letzten Jahren stark verbreitet. Es gibt nun neben Forschungsprojekten an Universitäten, sowie im Hobby- und Amateurbereich bereits eine Vielzahl von kommerziellen Lösungen. Als Beispiel der Verbreitung werden nachfolgend vier der käuflich zu erwerbenden Systeme vorgestellt und ebenfalls zwei Forschungsprojekte von Universitäten näher erläutert.

3.1 Microdrones



Abbildung 3.1.1: Quadrocopter-Modell md4-200 von der Firma Microdrones (Quelle [2])

Die md4-200 der Firma Microdrones ist ein Quadrocopter mit einer Gesamtspannweite von unter 70 cm (siehe Abbildung 3.1.1). Das Abfluggewicht mit Farbkamera und Funkübertragungssystem beträgt 680g. Dieses niedrige Gewicht wurde durch konsequenten Leichtbau aus kohlenstoffaserverstärktem Kunststoff (CFK) erreicht. Zusätzlich kann eine maximale Nutzlast von 200g transportiert werden. Die maximale Flugzeit beträgt bis zu 30 Minuten - abhängig von den zusätzlich angebrachten Baugruppen. Dank GPS-, Licht- und Temperatursensoren bietet dieser Quadrocopter ein sehr breites Einsatzgebiet. Des Weiteren besitzt er bereits eine Fülle an Erweiterungsmöglichkeiten. Zu nennen sind hier die vier speziell entwickelten Kameras, die Bodenstation sowie die umfangreiche Steuerungs- und Parametrierungssoftware. (Quelle [2])

3.2 Mikrokoopter



Abbildung 3.2.1: Quadrocoptermodell MK Basis Set L4-ME (Quelle [3])

Das Mikrokoopter-Projekt ist ein Selbstbauquadrocopter auf Basis einer OpenSource Fluglageregelung. Neben dem Schwebeflug ermöglicht diese Regelung auch sportlicheres Flugverhalten. Dieses Modell (siehe Abbildung 3.2.1) ist das Mikrokoopter Basis Set mit Landegestell und Kamerahalterung.

Neben einfachen Chassis aus Aluminiumprofilen werden auch fertige Rahmensysteme aus GFK/CFK angefertigt. Die Rahmengröße variiert dabei zwischen 30 bis 54cm. Allen Mikrokooptern ist die Fluglageregelung auf Basis eines 8bit AVR Controllers gemein. Auf dieser Platine sind Gyroskope und Beschleunigungssensoren montiert. Zusätzlich kann ein barometrischer Drucksensor zu Höhenregelung angebracht werden. Für die Ansteuerung der Motoren werden speziell entwickelte Motorregler verwendet, die über einen I2C-Bus kommunizieren. Über ein PC-basiertes System kann die Lageregelung an den verwendeten Rahmen und an das gewünschte Flugverhalten angepasst werden. (Quelle [3])

3.3 Draganflyer X6



Abbildung 3.3.1: Hexacoptermodell Draganflyer X6 (Quelle [4])

Die Draganflyer X6 Drohne der Firma Draganfly ist das Standardmodell für den kommerziellen Einsatz in den Vereinigten Staaten. Neben dem Hexacopter (X6) wird ebenfalls eine Quadro- (X4) und Oktocopter (X8) Version angeboten. Die maximale Spannweite dieses Modells (siehe Abbildung 3.3.1) beträgt 83cm und das maximale Abfluggewicht sind 1500g. Die maximale Zuladung beträgt 500g.

Die Drohne ist komplett aus CFK gefertigt und mit klappbaren Auslegern für den einfacheren Transport ausgestattet. Dieses Drohnensystem ist bereits mit GPS-, Temperatur- und Lichtsensor- ausgestattet. Als Erweiterungsmöglichkeiten sind bereits verschiedene Kamerasysteme und Steuerungseinheiten sowie Bodenstationen auf dem Markt. Die maximale Flugdauer beträgt 30 Minuten. Dieses System wird bereits seit mehreren Jahren erfolgreich von der US-Polizei für Aufnahmen von Unfallstellen und Gefahrensituationen eingesetzt. (Quelle [4])

3.4 Parrot AR Drohne



Abbildung 3.4.1: Quadrocoptermodell der Firma Parrot (Quelle: [5])

Die Parrot AR Drohne der Firma Parrot ist ein Low Budget Quadrocopter für den Freizeit- und Spaßflug. Die Parrot AR Drohnen erzeugen ihr eigenes Wi-Fi Netzwerk, zu welchem sich ein iPhone oder iPod touch verbinden können. Das AR FreeFlight Programm ist eine App welche es dem Benutzer erlaubt, die Drohne per iPhone bzw. iPod touch zu steuern. Die Drohne ist mit einer Front- und Bodenkamera ausgestattet. Die Steuerung beruht auf den Bewegungssensoren des iPhones, jede Drehung und Neigung wird direkt auf die Drohne übertragen. Dies ermöglicht eine sehr einfache und intuitive Steuerung. Ebenfalls wird das Bild der Kamera der AR Drohne direkt auf den Bildschirm des iPhones bzw. iPods übertragen. Ein weiteres interessantes Feature ist die Möglichkeit zur Verwendung mehrerer AR Drohnen in einem Netzwerk. Die Drohne richtet ihr eigenes Wi-Fi-Netzwerk ein, sodass die Spieler eine Game Party veranstalten und mehrere Spieler gegeneinander antreten können. Mit dem Multiplayer-Spiel „AR.PURSUIT“ können zwei AR Drohnen einen virtuellen Luftkampf austragen. Die Styroporgehäuse sind in drei verschiedenen Farben verfügbar um die AR Drohnen vom Gegner zu unterscheiden. (Quelle: [5])

3.5 ETH-Zürich

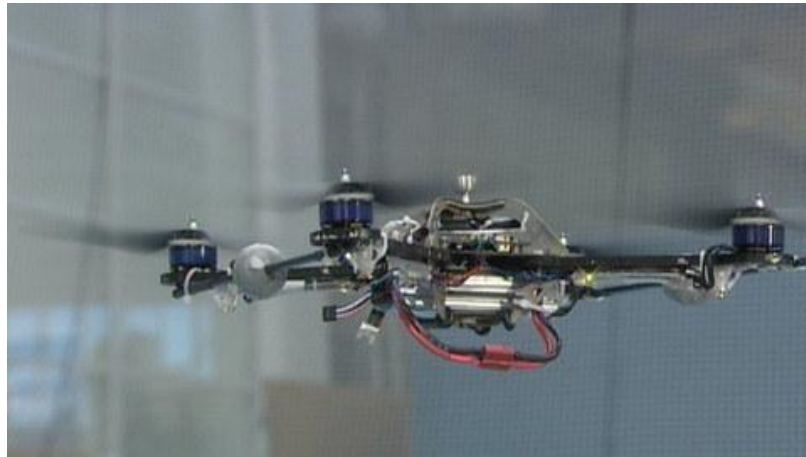


Abbildung 3.5.1: Quadrocopter der ETH Zürich mit Positionskugeln (Quelle: [6])

An der ETH Zürich (Eidgenössische Technische Hochschule Zürich), in der ETH Flying Machine Arena, wird an der Steuerung für Quadrocopter gearbeitet. Diese sind mit drei speziellen Positionskugeln bestückt und können somit im Raum detektiert werden.

„Wir haben acht Kameras an der Decke die 200 Bilder pro Sekunde machen, und jede Kamera hat dabei einen Blitz, und in diesem Blitz leuchten diese Kugeln auf, jedes Mal wenn ein Blitz die Kugel sieht, kann jede Kamera bestimmen, wo sie diese Kugel sieht, und die Kameras zusammen können daraus bestimmen, wo im Raum diese Kugel ist. Wenn man dann die 3 Kugeln an einem Fahrzeug gesehen hat, dann kann [man] daraus bestimmen, wo die Kugel ist, und wie es gedreht ist.“(Markus Hehn, Doktorand ETH Zürich (Quelle: [6]))

Per Infrarot kommunizieren die Quadrocopter mit den Kameras und können sich somit im Raum orientieren. Das System ist bereits soweit ausgereift, dass die Quadrocopter autonom miteinander Tennis spielen können. Auch Flugmanöver wie Loopings und 720° Rollen sind bereits möglich. (Quelle: [6])

3.6 Universität Pennsylvania



Abbildung 3.6.1: Quadrocopter der Universität Pennsylvania beim Gerüstbau (Quelle: [7])

Wie in der Schweiz arbeiten auch die Wissenschaftler vom Grasp Lab der Universität von Pennsylvania in Philadelphia an der Steuerung von Quadrocoptern. Hierbei wird das Augenmerk sowohl auf die Steuerung als einzelner Flugroboter, als auch auf das Zusammenspiel in einem Schwarm gelegt. Dazu wurde den Quadrocoptern beigebracht verschiedene Gerüste aus Fertigteilen zu bauen (siehe Abbildung 3.6.1). Die Flugroboter werden dabei nicht ferngesteuert, sondern agieren autonom.

Die Forscher beschäftigen sich schon seit längerem mit den Quadrocoptern, die von dem Unternehmen *Ascending Technologies*⁵ aus Krailling bei München gefertigt werden. Für dieses Projekt haben sie die Roboter mit Greifern unter dem Rumpf ausgestattet, mit dem sie die Teile aufnehmen können. Weiters wird hier an der Vorstellung gearbeitet, dass Quadrocopter miteinander kommunizieren um auf unvorhergesehene Zwischenfälle zu reagieren. (Quelle: [7])

⁵ www.asctec.de

4 Einsatzgebiete und Anforderungen

In diesem Kapitel werden die Anforderungen an das System herausgearbeitet. Als Grundlage hierfür dienen das Reglement der RoboCup Rescue League sowie weiterer Wettbewerbe. Ebenfalls werden mögliche Szenarien für spätere Einsatzgebiete angeführt. Zuletzt wird auf die Konzept- und Designfindung des Quadrocopters eingegangen.

4.1 RoboCup Rescue League

Der Zweck der Luft-Arena bei der RoboCup Rescue League ist die Förderung der Entwicklung von autonomen Kleinst-Luftfahrzeugen für Aufklärungs- und Rettungseinsätze. Diese Veranstaltung legt ihren Schwerpunkt auf vertikal startende und landende Fahrzeuge, sogenannte Quadrocopter, welche eine Gesamtmasse von 2 kg nicht überschreiten dürfen. Die Aufgabe des Quadrocopters ist der autonome Start und Flug, das Halten einer bestimmten Position und das eigenständige Erkennen von Zielen in der Testumgebung. Diese Ziele können Opfer darstellen, welche Lebenszeichen wie Wärme, Bewegung und Schall aussenden, oder Warn- und Gefahrenzeichen, welche erkannt und kategorisiert werden müssen. Der Aufbau der Luft-Arena ist ähnlich der Boden-Arena. Es gibt Boxen mit Zielen, welche frei im Luftraum hängen, und Wände mit schematischen Fenstern, welche die Sicht ins Innere eines Hauses darstellen sollen (siehe Abbildung 4.1.1). (Quelle: [8])

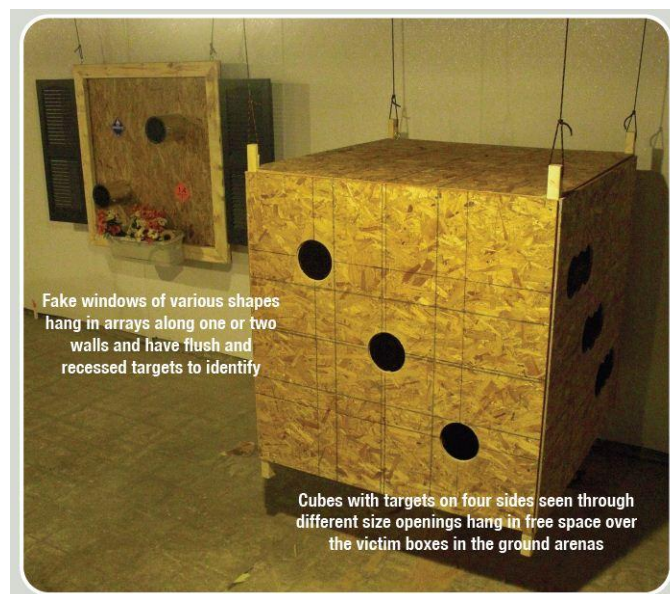


Abbildung 4.1.1: Darstellung der Luft-Arena der RoboCup Rescue League 2009(Quelle: [8])

4.2 Weitere Wettbewerbe

4.2.1 IMAV 2011

Die IMAV⁶ (International Micro Air Vehicle) Conference and Flight Competition ist ein Wettbewerb in den Niederlanden. Das Hauptziel dieser Konferenz sowie des Wettbewerbs ist die Förderung der Entwicklung sowie Integration von MAVs (Micro Air Vehicles). Ebenfalls sollen mit diesem Wettbewerb die Vorteile und Möglichkeiten aufgezeigt werden. Es finden zwei Wettbewerbe statt. Der Indoor-Wettbewerb soll die Agilität und Präzision von MAVs in der Luft demonstrieren. Der Outdoor-Wettbewerb beschäftigt sich bereits mit dem Thema des autonomen Fliegens, sowie dem gesteuerten Zusammenspiel mehrerer MAVs gleichzeitig. Hierbei müssen Aufgaben erfüllt werden, welche sich mit dem autonomen Starten und Landen, sowie dem Abwurf von Gegenständen und Erkennen von Zeichen und Personen beschäftigen. (Quelle: [9])

4.2.2 Motodrone

„Auf der motodrone⁷ haben Entwickler, Forscher und Fans die Möglichkeit, ihre neuesten Fortschritte vorzustellen, sich aktiv aneinander zu messen und ihr Wissen zu teilen. [...]Die Präsenz der maßgeblichen Gestalter der Open-Source-Szene vereinfacht die Verbesserung von Technik und Software im direkten Austausch. Universitäten können, genau wie Hobbyentwickler, ihre Projekte und Entwicklungen vorstellen und so unter anderem die Studenten von morgen auf sich aufmerksam machen.“(Quelle: [10])

Bei dieser Veranstaltung, sowie dem hierbei stattfindenden Wettbewerb, stehen die Aspekte des autonomen GPS-Flugs im Vordergrund. Es werden Bewerbe ausgetragen, welche sich mit dem stabilen Schwebeflug bei wechselnden Windverhältnissen und dem Flug entlang mehrerer vordefinierter Punkte beschäftigen. Ebenfalls soll das Fixieren von Objekten mit einer Kamera, das autonome Abfangen des Fluggerätes aus völlig unvorhergesehenen Fluglagen und der autonome Start bzw. Landung die Sicherheit und Kontrollierbarkeit von Quadrocoptern fördern und verbessern. (Quelle: [10])

⁶ <http://www.imav2011.org>

⁷ <http://www.motodrone.de>

4.3 Mögliche Einsatzgebiete

Verbreitete Anwendung findet der Quadrocopter in der Luftbildfotografie und –videografie. Ebenfalls entstehen vermehrt Privatprojekte welche hauptsächlich für den Spaß- und Kunstflug eingesetzt werden. Weitere Beispiele für Einsatzgebiete, wie in Amerika und Großbritannien, wären Szenarien zur Unterstützung der Polizei und Feuerwehr in Unfall- und Gefahrensituationen. Diese Art des Einsatzes ist in vielen weiteren Bereichen möglich. Denkbar sind Situationen zur Detektion von Lawinenopfern mit Hilfe von Peilsendern oder zur Aufrechterhaltung von Funk- und Bildübertragungen in zerstörten Gebieten, beispielsweise nach Erdbeben und Überschwemmungen. Aus aktuellem Anlass sollte ebenfalls der sehr nützliche Einsatz eines solchen Systems bei der Atomkatastrophe von Fukushima genannt werden. Hiermit hätten sehr schnell und einfach Luftproben genommen, sowie Luftbildaufnahmen und Strahlungsmessungen in unzugänglichen Gebieten gemacht werden können. (Quelle: [11])

4.4 Mechanik und Aufbau

Der Quadrocopter sollte robust und zuverlässig sein, da man sich an dem autonomen Einsatz in Gefahrenbereichen orientiert. Seine Komponenten müssen leicht austauschbar und zugänglich sein, um eine hohe Verfügbarkeit zu erreichen. Der Aufbau sollte modular sein um ein Höchstmaß an Flexibilität zu gewährleisten. Ebenfalls wurde ein großes Augenmerk auf die Größe gelegt, da der Quadrocopter sich im Indoor-Bereich bewegen können sollte. Das Fluggerät muss somit durch Türen und Fenster fliegen können und darf eine maximale Spannweite⁸ von 70cm nicht überschreiten. Des Weiteren sollte es möglich sein das Gesamtsystem platzsparend zu verstauen. Der Quadrocopter muss somit zusammensteckbar sein, um ihn einfach und schnell transportieren zu können, z.B. in einem Rucksack oder Koffer.

4.5 Konzept und Designfindung

Die Aufgabe der Orientierung im Raum und die Erstellung eines 2D- bzw. 3D-Mappings, sowie einer Hindernisdetektion als Grundvoraussetzung für autonomen Flug wurden mit Hilfe eines Laser Range Finders realisiert. Mit dem vordergründigen Gedanken an einen späteren autonomen Flug entschied man sich, die Auswertung der Daten und die Erstellung des Mappings an Bord der Drohne zu errechnen.

⁸ Spannweite: Propellerspitze zu Propellerspitze, betrachtet im 90° Winkel zur Flugrichtung

Zur Realisierung dieser Lösung wurde eine komprimierte Version des Windows XP Betriebssystems verwendet, welche auf einem VIA PICO PX 10000G Pico-ITX [12] Mini-Mainboard installiert ist.

Ein Kamerasystem auf dem Quadrocopter soll Rettungsteams an den Bodenstationen einen Überblick geben und Informationen bereitstellen über Bereiche, in denen sich der Quadrocopter bewegt. Ebenfalls kann die Drohne mit Hilfe von Bildverarbeitung Opfer, Gefahrenstellen, Hinweise aus der Umwelt, wie Gefahrenschilder und Zeichen erkennen und entsprechend reagieren. Da sich die Einhaltung des maximal zulässigen Gewichts von 2 kg als die größte Herausforderung darstellte, wurde bei der Auswahl jeglicher Teile auf ein Minimum an Gewicht geachtet.

Um den Spielraum für Antrieb und Konstruktion zu definieren, wurde eine Gewichtsabschätzung getroffen. In dieser wurden die bereits bekannten Komponenten mit realem Gewicht und Abmessungen berücksichtigt. Ebenfalls wurde eine Unterteilung und Abschätzung für die Bereiche Antrieb und Konstruktion gemacht.

Anzahl	Einzelgewicht [g]	Gesamt [g]	Beschreibung
1	150	150	Kamerasystem
1	207	207	PIKO ITX Board
1	380	380	Laser Range Finder
1	450	450	Akkumulator
1	150	150	Verkabelung
1	180	180	Steuerungs-Platinen
Gesamtgewicht der bekannten Komponenten		1517	
Gewichtsbeschränkung		2000	
Gewicht für Antriebssystem und Konstruktion		483	
4	80	320	Motor + Regler + Rotor
1	150	150	Konstruktion
Gesamtgewicht des Quadrocopters		1987	

Tabelle 4.5.1: Abschätzung des Gesamtgewichtes

Für Informationen zur Umsetzung und Einhaltung der Gewichtsbeschränkungen der einzelnen Konstruktionskomponenten verweise ich auf die entsprechenden nachfolgenden Kapitel.

5 Das Steuerungssystem

Das Steuerungssystem von Quadrocoptern ist das wichtigste Hardwareelement für eine ruhige und präzise Flugdynamik. Im nachfolgenden Kapitel werden die Open Source Plattformen der fünf meistverwendeten Steuerungseinheiten (Quelle: [13]) in der Hobby- und Amateurwelt näher analysiert. Es ist kein Ziel dieses Entwicklungsprojektes, die Regelalgorithmen, Schaltungsentwicklung, sowie Auswahl der Sensoren zu übernehmen. Hierbei wird ein bereits flugfähiges vorhandenes System verwendet.

5.1 Vorhandene Systeme

In der nachfolgenden Tabelle werden die fünf meist genutzten Open Source Plattformen miteinander Verglichen (Quelle: [13]):

- **NG UAVP⁹ (Next Generation Universal Aerial Video Project)**
- **UAVP¹⁰ (Universal Aerial Video Project)**
- **HB-Kopter¹¹ (Hochschule Bremen – Kopter)**
- **ARM-o-Kopter¹²**
- **Mirkokopter¹³**

Hierbei wird lediglich der Aspekt von vorhandenen Komponenten und Software-Implementierungen berücksichtigt. Es kann keine Aussage über das tatsächliche Flugverhalten getroffen werden.

⁹ <http://ng.uavp.ch/moin>

¹⁰ <http://ng.uavp.ch/moin/TheOriginal>

¹¹ <https://www.akaflieg.hs-bremen.de/trac/akaflieg/wiki/airborne/hw/qc>

¹² <http://www.armokopter.at>

¹³ <http://www.mirkokopter.de>

		NG UAVP	UAVP	HB- Kopter	ARM-o- Kopter	Mikroko- pter	
	Mikrokontroller Boards und weitere Mikrokontroller	1x LPC2148, 2x ATMega	1x PIC 16F876	1x LPC214 8	1x AT91SA M	1x ATMeg a, 1x STR9 (Opt)	
Sensors	Gyro	MEMS	MEMS	MEMS	MEMS	MEMS	
	Acc	Optional	Y	Y	Y	Y	
	GPS	Optional	Optional	N	Optional	Optional	
	Compass	Optional	Optional	Y	Y	Optional	
	Pressure	Optional	Optional	Y	Y	Optional	
	DSL	4x	N	1x	1x	N	
	RCSum	1x	1x	1x	1x	1x	
	S3DSum	1x	N	N	N	N	
	Temp	Optional	N	N	Optional	N	
	Light	Optional	N	N	N	N	
Actors	Servos	5x	2x	10x	2x	2x	
Flight Mode	HH	Y	Y	N	N	Y	
	Integral	Y	Y	Y	Y	Y	
	Heigh-Hold	Y	Y	Y	Y	Y	
	GPS Position Hold	Y	Y	N	Y	Y	
	GPS Flight Point	Y	N	N	N	Y	
Configurations	Tri	Optional	Y	N	N	Y	
	Quadro	+	Y	Y	Y	Y	Y
		x	Y	Y	Y	Y	Y
		R	Y	N	N	N	N
	Hexa	☆	Optional	N	N	N	Y
		Y	Y	N	N	Y	Y
	Okto	☆	Y	N	N	Y	Y
		+	Y	N	N	Y	Y
		V	Optional	N	N	N	Y
	> Okto	Y	N	N	Y	Y	
Source Code	Available	Y	Y	Y	N	Parts	
	License	GPLv3+	GPLv2+	GPLv3+	-	MKv1	
Hardware	Schematic	Available	Y	Y	Y	Y	
		License	CC-BY- NC-SA	GPLv2+	GPLv3+	-	MKv1
	PCB Design	Available	N	Y	Y	N	N
		License	-	GPLv2+	GPLv3+	-	-
Price[EUR]		ca. 420	ca. 800	Unknown	ca. 450	ca. 750	
Started		Aug 07	Sep 06	Unknown	Mrz 07	Jan 06	
Status		stable, active	stable, active	devel	stable, active	stable, active	

Tabelle 5.1.1: Vergleich der einzelnen vorhandenen Systeme(Quelle: [13])

5.1.1 Sensoren

In diesem Unterkapitel werden die wichtigsten Sensoren für den Flug von Quadrocoptern näher beschrieben (siehe Tabelle 5.1.1). Dies soll einen kurzen Einblick in die Funktionsweise und deren Anwendungsgebiet ermöglichen.

5.1.1.1 Gyro-Sensor

Ein Gyroskop (ugs. Gyro) ist einer der Hauptbestandteile neben dem ACC zur Bestimmung der momentanen Fluglage. Ein Gyroskop, auch Drehwinkelsensor genannt, misst die Drehwinkelbeschleunigung um die eigenen 3-Achsen durch Messung der Coriolis Kraft. Dieser Sensor ist meistens als MEMS-Gyro bekannt und in SMD-Baugröße erhältlich. Aufgrund dieser Messwerte kann die relative Flugrichtungsänderung des Quadrocopters bestimmt und ausgeregelt werden. (Quelle: [14])

5.1.1.2 ACC-Sensor

Der ACC-Sensor (Adaptive Cruise Control Sensor), oder auch 3-Achs-Magnetsensor genannt, dient im Quadrocopter zur Messung der linearen Beschleunigung der 3-Achsen. Diese Messung beruht auf der Richtung des Erdmagnetfelds in Bezug auf den Quadrocopter. Im normalen Flugbetrieb werden die Daten des ACC-Sensors zur Kompensation des Drifts¹⁴ verwendet, welcher meist bei der Integration der Gyro-Messwerte auftritt. Da die Werte des ACC jedoch sehr stark von Beschleunigungsphasen im Flug, sowie Vibrationen durch das Fluggestell beeinflusst werden, wird meist ein Mittelwert über einen längeren Zeitraum erstellt. Ebenfalls dient der ACC-Sensor zur Dämpfung der Höhenregelung mit dem Luftdrucksensor. (Quelle: [14])

5.1.1.3 Luftdrucksensor

Ein Luftdrucksensor (Pressure Sensor) wird meist als letzte Vorstufe, vor der GPS-Regelung, eingebaut. Hierbei wird der atmosphärische Luftdruck gemessen, welcher durch die Gravitation kontinuierlich mit steigender Höhe abnimmt. (Quelle: [14])

5.1.1.4 GPS

Die GPS-Regelung von Quadrocoptern ist die bis jetzt letzte Ausbaustufe für den autonomen Flug. Hierbei wird ebenfalls das Kompass-Modul benötigt um eine Identifizierung der Himmelsrichtungen durchzuführen. Es ist anschließend möglich, mit geeigneter Implementierung in der Software den Quadrocopter über Wegpunkte und Vektoren zu steuern. Dem Quadrocopter ist es somit möglich, die „Position Hold¹⁵“ und „Coming Home¹⁶“ Funktion zu nutzen. (Quelle: [14])

¹⁴ Drift: lineare ungewollte Bewegung

¹⁵ Position Hold: Der Quadrocopter hält seine Position und Höhe aufgrund der GPS-Koordinaten im Raum

¹⁶ Coming Home: Der Quadrocopter speichert seine Startpunkt-Koordinaten und kann aufgrund der GPS-Regelung wieder autonom zum Startpunkt (nach Hause) zurückkehren.

5.1.2 Aktoren

Die PWM-Ausgänge auf der Flightcontrol Platine dienen der Ansteuerung der Servo-Motoren. Mit diesen ist es möglich, z.B. eine Ausregelung der Kamera herzustellen, um diese immer parallel zur Erdoberfläche zu halten. Ebenfalls werden Servo-Ausgänge für Funktionen wie Headtracking oder Pick and Place Aufgaben benötigt.

5.1.3 Flugmodus

Der Flugmodus (Flight Mode) stellt die Regelung und Steuerung des Quadrocopters dar. In dieser Kategorie wird eine Auflistung aller bis jetzt implementierter Regelungsalgorithmen gezeigt. Ebenfalls wird die Implementierung von GPS und Höhensensor dargestellt.

5.1.4 Konfigurationen

Die Konfigurationen (eng: Configurations) sind bereits vorprogrammierte, fertige Steuerungsalgorithmen. Diese werden zur Erweiterung des Einsatzgebietes und für Testzwecke benötigt. Wie bereits in Kapitel 2.2 Steuerung und Aufbau beschrieben, gibt es neben dem normalen Quadrocopter mit vier Motoren bereits einige weitere Variationsmöglichkeiten mit 3- (Tricopter), 6- (Hexacopter) bzw. 8-Motoren (Oktocopter). Für jede dieser Varianten gibt es, wie auch beim Quadrocopter, verschiedene Ausrichtungen, z.B. „+“ bzw. „☼-Form“.

5.1.5 Source Code

Die Verfügbarkeit des Source Codes und C Programms ist für die Zwecke der Weiterentwicklung und Implementierung von eigenen Algorithmen sehr wichtig. Hierbei wird das Augenmerk speziell auf die Lizenz für Weiterentwicklung, Veränderung und kommerziellen Einsatz gerichtet.

5.2 Entscheidung und Auswahl

Die Auswahl der Open Source Plattform geschah durch die Ermittlung der meisten Übereinstimmungen mit den Anforderungen. Hierbei fiel die Wahl auf das NG UAVP (Next Generation Universal Aerial Video Project), da hiermit alle Anforderungen abgedeckt wurden und darüber hinaus noch weitere Features nutzbar waren. Ein entscheidender Punkt waren die vorhandene Rechenleistung (siehe Kapitel 5.3) und die Verfügbarkeit des C-Codes der einzelnen drei Mikrokontroller, sowie die Lizenz zur Veränderung und Vervielfältigung.

Mit diesem C-Code war es möglich, weitere eigene Programmabschnitte zu implementieren: Protokolle für die Datenübertragung mit Xbee, die serielle Kommunikation mit dem PIKO ITX Board und die Auswertung der weiteren Sensoren, welche am Quadrocopter angebracht sind. Auch die bereits bestehenden Steuerungsalgorithmen für Tri-, Quadro-, „H“ und „X“, sowie Hexa-, Okto- und Dedokopter¹⁷ brachten einen Vorteil gegenüber den anderen Systemen, da hiermit mit wenig Aufwand neue Prototypen realisiert und getestet werden können.

¹⁷ Dedokopter: Ein Multicopter mit 12 Motoren

5.3 Aufbau des NG UAVP

Das NG Projekt ist unterteilt in drei Platinen: das LPC Board für die Flugregelung, die Flightcontrol Platine für die Ansteuerung der PWM-Ausgänge und das Sensorboard, welches alle Sensoren beinhaltet.

5.3.1 LPC Board

Das LPC Board (siehe Abbildung 5.3.1) ist eine kompakte Entwicklerplatine, welche mit Hilfe eines ARM 7 Mikrokontrollers die Flugregelung übernimmt. Die Programmierung kann über die USB- bzw. JTAG-Schnittstelle direkt am Board erfolgen oder über die UART-Schnittstelle auf dem Flightcontrol Board. Der ARM 7 ist über ein SPI-Bussystem mit dem Sensorboard verbunden. Auf dem LPC Board wird die Grundfunktion des Fliegens mit Hilfe eines PID-Reglers (Proportional-Integral-Differential Regler) mit Kalman-Filter realisiert.



Abbildung 5.3.1: LPC Board 2148 von Sparkfun(Quelle: [15])

5.3.2 Flightcontrol Board

Auf dem Flightcontrol Board (siehe Abbildung 5.3.2) befindet sich das LPC-Board als Rucksackplatine.

Ebenfalls befindet sich ein Atmel 644p, sowie die Spannungsversorgung des gesamten Systems auf der Platine. Die Ansteuerung der Brushless Regler erfolgt über den I2C Bus (ein serieller 2-Draht Datenbus). Die Programmierung aller Mikrokontroller kann von dieser Platine über die UART-Schnittstelle erfolgen.

Der Atmel 644p kann für die Steuerung von RC-Servos benutzt werden und bietet genügend weitere Rechenkapazität für eigene Programmteile. Für weitere Details der Verknüpfung und Datenübertragung verweise ich auf die Bachelorarbeiten von Daniel Rumetshofer und Manuel Zangenfeind.

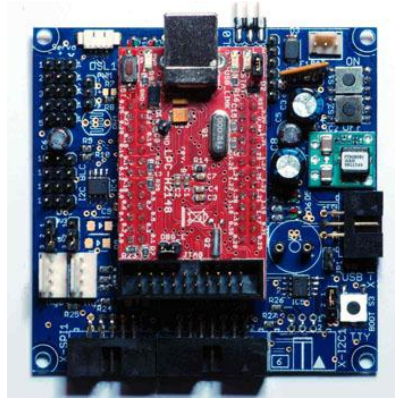


Abbildung 5.3.2: Flightcontrol Board von NG UAVP (Quelle: [13])

5.3.3 Sensorboard

Das Sensorboard (siehe Abbildung 5.3.3) besitzt einen Atmel 328 Mikrokontroller, welcher die Kommunikationen über den SPI-Bus, die Datenerfassung der einzelnen Sensoren und die Auswertung des Kompasses übernimmt. Auf dem Sensor Board befinden sich die drei Gyroskope, der ACC-3-Achs-Magnetsenor, sowie der Kompass- und Luftdrucksensor.

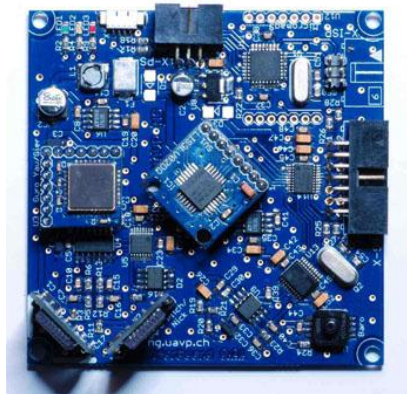


Abbildung 5.3.3: Sensorboard von NG UAVP (Quelle: [13])

6 Das elektrische Antriebssystem

Im nachfolgenden Kapitel werden die Komponenten des elektrischen Antriebssystems genauer erläutert und deren Auswahl begründet. Anschließend werden die Komponenten dargestellt und eine theoretische Berechnung des Schwebestroms¹⁸ durchgeführt. Zuletzt folgt eine Auflistung der Messergebnisse des Antriebssystems.

6.1 Brushlessmotor

Der Brushlessmotor wird in zwei Arten im Modellbau eingesetzt, als Innen- und Außenläufer.

„Je nach spezifischen Anforderungen werden beide Typen in unterschiedlichen Modellbaubereichen eingesetzt. Außenläufer sind Elektromotoren, bei [denen] sich der ruhende Teil (Stator) des Motors im Inneren befindet und vom bewegten Teil (Läufer) umschlossen ist. Bei einem Innenläufer hingegen befinden sich die Permanentmagnete im Inneren und werden von den Wicklungen in Form des Stators umschlossen.“(Modellbau in Perfektion, 2006, Quelle: [16])

6.1.1 Innenläufer

Dieser zeichnet sich durch ein sehr hohes Leistungsniveau aus. Er erreicht eine höhere Drehzahl und wird vorzugsweise bei sehr schnellen Modellflugzeugen mit kleinen Propellern eingesetzt. Der Nachteil dieser Bauart ist die schlechte Kühlung aufgrund der geschlossenen und kompakten Bauform. Die Magneterwärmung ist sehr viel höher als beim Außenläufer, wodurch schnell eine kritische Temperatur erreicht werden kann. (Quelle: [16])

6.1.2 Außenläufer

Der Außenläufer hingegen ist ein Motor mit kleinerer, aber sehr konstanter Drehzahl. Dieser Motor wird vorzugsweise für den Bau von Quadrocoptern eingesetzt, da ein hohes Rotations-Trägheitsmoment erwünscht ist. Des Weiteren benötigt man bei Quadrocoptern große Rotoren, welche mit einer geringeren Drehzahl auskommen. Die Kühlung und Belastbarkeit ist ebenfalls ein großer Pluspunkt des Außenläufers für diese Anwendung, da durch die freie Montage und offene Bauform eine gute Kühlung möglich ist und der Motor ohne Schaden auch überlastet werden kann. (Quelle [16], [17])

¹⁸ Schwebestrom: Stromstärke welche im Schwebestand des Quadrocopters aufgenommen wird

Aufgrund dieser Vorteile entschied man sich für den Einsatz von Außenläufer Brushlessmotoren. Für das Konzept des Quadrocopters werden Motoren im Gewichtsbereich von 50 g gesucht, welche jedoch zur stabilen Fluglage eine Leistungsreserve¹⁹ von mindestens 50 % Schub liefern sollten. In der Quadrocopter-Szene haben sich in dieser Gewichtsklasse drei Brushlessmotoren weit verbreitet:

- **Hacker 20-20L**²⁰
- **Turnigy TR28-30B**²¹
- **EMAX BL2215 / 25**²²

In der nachfolgenden Tabelle werden die Kenndaten der drei Außenläufer Brushlessmotoren gegenübergestellt.

	Hacker 20-20L	Turnigy 28-30B	EMAX 2215 /25
Leistungsbereich [W]	200	150	170
Anzahl an Zellen	3 - 4	2 - 3	2 – 3
Leerlaufdrehzahl pro Volt [U/V]	1022	1050	1015
Gewicht [g]	55	57,5	59
Aussendurchmesser [mm]	28	28	28
Länge [mm]	34	30	32
Maximaler Strom [A]	19	14	15
Messung mit Propeller: 10´´x 4.7 APC Slow Flyer			
Schub [g]	1050	700	950
Strom [A]	13,2	14,5	16,5
Spannung [V]	11,1	11,1	11,1
RPM [U/min]	7221	6300	7250

Tabelle 6.1.1: Brushless-Außenläufer Vergleich (Quelle: [18], [19], [20])

6.1.3 Entscheidung und Auswahl

Wie aus Tabelle 6.1.1 hervorgeht ist der Brushless Außenläufer 20-20L der Firma Hacker der leistungsfähigste Motor in dieser Auflistung. Zu den weiteren Vorteilen zählen das geringe Gewicht sowie die hohe Anzahl an möglichen Akkuzellen. Da für den Quadrocopter ein Akkumulator mit vier Zellen und einer daraus resultierenden Gesamtspannung von 14,8 Volt benötigt wird (siehe Kapitel 7.Akkumulator), ist dieser Motor der einzige welcher die Anforderungen erfüllt.

¹⁹ Leistungsreserve: Gesamtschubwert abzüglich des zum Schweben benötigten Schubwerts

²⁰ <http://www.hacker-motor.com>

²¹ <http://www.hobbyking.com>

²² <http://www.cnc-modellsport.de>

Die Messung (siehe Tabelle 6.1.1) zeigt die Leistungsreserve (>100%) des Hacker 20-20L; diese ist doppelt so groß wie nötig um den Quadrocopter sicher in der Luft steuern zu können. Ebenfalls sind der geringe Stromverbrauch sowie die hohe Qualität von Hacker-Motoren ein weiterer Pluspunkt für dieses Produkt.

6.2 Propeller

Die Propeller sind neben den Motoren eine der wichtigsten Komponenten für einen hohen Schubwert. Die allgemeine Angabe der Propeller besteht aus zwei Ziffern. Die erste steht für den Durchmesser des Propellers in Zoll (1 Zoll \equiv 2,54 Zentimeter), die zweite Ziffer für die Steigung des Flügelblatts, die ebenfalls in Zoll angegeben wird. Letztere beschreibt die Schraubenhöhe, welche der Propeller bei einer Umdrehung zurücklegen würde. Bei der Auswahl beschränkt man sich auf den Propellertyp, welcher von 90% aller Amateur- und Hobbypiloten für den Bau von Quadrocoptern eingesetzt wird. Dieses Produkt ist der 10''x 4,7 APC Slow Flyer der Firma APC. Dieser Propeller ist für geringe Drehzahlen ausgelegt und daher sehr gut für Außenläufer Brushlessmotoren geeignet. Aufgrund der geringen Steigung ist mit diesem Produkt ein sehr ruhiges und leises Fliegen möglich.

6.3 Brushless-Regler

6.3.1 Anforderungen

Da ein Brushlessmotor keine mechanische Kommutierung hat, wie ein Gleichstrommotor mit Bürsten, muss die Umpolung elektronisch erfolgen. Hierfür gibt es den Brushless-Regler, auch Brushless-Controller genannt, welcher aus einer Gleichspannung eine Dreiphasen-Wechselspannung einer bestimmten Frequenz erzeugt. Diese Frequenz bestimmt die Drehzahl des Brushlessmotors. Ein Brushless-Regler für Quadrocopter muss spezielle Anforderungen erfüllen. Da aufgrund der elektronischen Ausregelung des Fluggeräts sehr schnelle Reaktionen auf Fluglagen erfolgen müssen, sollte der Brushless-Regler einen neuen Sollwert in unter 0,5 Millisekunden annehmen und einstellen können. Des Weiteren benötigt er eine I2C Schnittstelle zum Anschluss an die Flightcontrol Platine. Für weitere Details der Funktionsweise von Brushless-Reglern möchte ich auf die Literatur verweisen.

6.3.2 Entscheidung und Auswahl

Nach einer Internetrecherche in den Quadrocopter-Foren stehen drei Brushless-Regler zur Auswahl:

- **Mirkrokopter Bl-Ctrl 1.2**²³
- **YGE 30i**²⁴
- **Tower Pro w25A**²⁵ mit **Quax Software**²⁶

Die YGE 30i Regler werden nicht weiter betrachtet. Aufgrund eines Softwareupdates der NGOS²⁷ auf die Version 0.60 wird dieser Reglerhersteller nicht länger unterstützt. Ebenfalls wird nach einem Erfahrungsaustausch mit Entwicklern und Quadrocopterfliegern der Turnigy Tower Pro w25A Regler aus der Auswahl genommen. Dieser Regler muss vor Inbetriebnahme am Quadrocopter umgebaut und mit einer speziellen Software bespielt werden, was einen verhältnismäßig hohen Arbeitsaufwand verursacht. Zudem ist dieser Regler ein Import aus China und die geforderte Verfügbarkeit und Qualität kann nicht gewährleistet werden. Aus diesen Gründen fällt die Wahl der Brushless-Regler auf den Bl-Ctrl 1.2 der Mirkokopter Plattform. Dieser Regler wird speziell für Quadrocopter entwickelt und erfüllt somit alle Voraussetzungen. Neben dem hohen Ansprechverhalten (<0,5ms), ist das sehr geringe Gewicht (21g) ein weiterer Pluspunkt. (Quelle: [14])

²³ <http://www.mikrokopter.de/>

²⁴ <http://www.yge.de>

²⁵ <http://www.lightinthebox.com>

²⁶ <http://uavp.agner.ch/2010/01/towerpro-w25a-umbau/>

²⁷ NGOS: Firmware der NG UAVP Platinen

6.4 Gesamtsystem

6.4.1 Darstellung

In diesem Unterkapitel werden zur weiteren Veranschaulichung des Antriebssystems die ausgewählten Komponenten dargestellt.

- **Hacker 20/20L**



Abbildung 6.4.1: Brushless Motor 20/20L der Firma Hacker (Quelle: [18])

- **10''x 4,7 APC Slow Flyer**



Abbildung 6.4.2: Propeller 10''x 4,7 APC Slow Flyer der Firma APC (Quelle: [18])

- **Mirkokopter Brushless Regler BI-Ctrl 1.2**

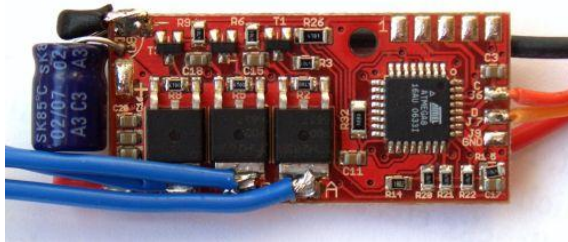


Abbildung 6.4.3: Brushless Regler BI-Ctrl 1.2 der Mirkokopter Plattform (Quelle: [14])

6.4.2 Theoretische Berechnung des Schwebestroms

In diesem Unterkapitel wird der theoretisch aufgenommene Strom berechnet, welcher sich im Schwebestand des Quadropters einstellt. Diese Berechnung soll als Grundlage für den Energieverbrauch dienen um zu ermitteln, ob das gewählte Antriebssystem energieeffizient arbeitet. Die Formeln und Konstanten wurden dem Artikel von Helmut Schenk entnommen. („Der Standschub von Rotoren und Propellern“, 2002, Quelle: [21])

Für den Schwebestand benötigt der Quadropter einen Schub von 2 kg, welcher sich auf die vier Antriebssysteme zu je 0,5 kg aufteilt. Hieraus kann der benötigte Schub in Newton errechnet werden.

$$S_N = S_{kg} * g = 0,5 \text{ kg} * 9,81 \frac{\text{N}}{\text{kg}} = 4,905 \text{ N} \quad (6.1)$$

Dieser Schwebeschub kann nun unter Berücksichtigung der Luftdichte und des Propellordurchmessers in eine nötige mechanische Leistung umgerechnet werden, welche an der Welle des Motors benötigt wird.

$$S_N = 0,67 * \sqrt[3]{\frac{\rho}{2} * \pi * D^2 * P_m^2} \quad (6.2)$$

Hieraus ergibt sich:

$$P_m = \sqrt[2]{\frac{2 * (\frac{S_N}{0,67})^3}{\rho * \pi * D^2}} = \sqrt[2]{\frac{2 * (\frac{4,905 \text{ N}}{0,67})^3}{1,24 \text{ kg/m}^3 * \pi * 0,254^2}} = 55,878 \text{ W} \quad (6.3)$$

Diese mechanische Leistung lässt sich mit dem Wirkungsgrad η in eine elektrische Leistung umrechnen.

$$P_{el} = \frac{P_m}{\eta} = \frac{55,878 \text{ W}}{0,8} = 69,847 \text{ W} \quad (6.4)$$

Anschließend wird die resultierende Stromstärke berechnet.

$$I = \frac{P_{el}}{U} = \frac{69,847 \text{ W}}{14,8 \text{ V}} = 4,71 \text{ A} \quad (6.5)$$

Symbol	Beschreibung	Einheit
S_N	Schub	[N]
S_{kg}	Schub	[kg]
g	Erdanziehungskraft	[N/kg]
ρ	Luftdichte	[kg/m ³]
D	Propellerdurchmesser	[m]
P_m	mechanische Leistung	[W]
P_{el}	elektrische Leistung	[W]
η	Wirkungsgrad	
I	Stromstärke	[A]
U	Spannung	[V]

Tabelle 6.4.1: Variablendefinition für (6.1), (6.2), (6.3), (6.4) und (6.5)

6.4.3 Stromverbrauch und Schubmessung

Da die Berechnung des theoretischen maximalen Standschubs²⁸ keine Aussagekraft über das Flugverhalten sowie die Belastung des Akkus und der Motoren im Flug zulässt, beschränkt man sich hierbei auf Messungen an einem geeigneten Prüfstand. Diese Anlage ermöglicht es, das gewählte Antriebssystem (siehe Kapitel 6.4) in ähnlichen Verhältnissen wie sie im Flug vorherrschen zu testen und Messungen anzustellen. In der nachfolgenden Tabelle werden die drei Messungen sowie die Ergebnisse der Rechnung aus Kapitel 6.4.1 dargestellt.

	Vergleichsmessung	max. Schub	Schwebezustand	Berechnung
Schub [g]	1080	1746	500	500
Strom [A]	13,8	32,5	3,75	4,71
Spannung [V]	11,1	14,8	14,8	14,8

Tabelle 6.4.2: Stromstärke- und Schubmessung

Die Vergleichsmessung wurde zur Verifizierung der Glaubwürdigkeit der benutzten Quellen aus Kapitel 6.1 angestellt (siehe Tabelle 6.1.1). Die Ergebnisse stimmen sehr gut überein, daher kann die Wahl des Hacker-Brushlessmotors als Antrieb für den Quadrocopter bestärkt werden. Mit diesen Ergebnissen wird auch die in Kapitel 6.4.1 durchgeführte Rechnung überprüft. Der ermittelte Stromverbrauch aus den Messergebnissen ist geringer als der errechnete. Diese Abweichung lässt sich auf die nicht exakt bekannten Werte des Propellers und Wirkungsgrads des Motors zurückführen.

Ebenfalls wurden mit diesen Messungen die Eckdaten des Hacker 20-20L ermittelt. Hierbei ist der große Leistungsüberschuss des Motors zu erkennen. Der Brushless Außenläufer leistet bei maximaler Leistung über 250% mehr Schub als zum Schweben des Quadrocopters nötig ist. Ebenso ist der geringe Stromverbrauch (< 4A) im Bereich des Schwebeschubs ein großer Vorteil durch welchen eine große Flugzeit ermöglicht wird.

²⁸ Standschub: Der Schubwert welcher am Boden erzeugt wird

7 Der Akkumulator

Im Bereich des Akkumulators (ugs. Akku) gibt es in den letzten Jahren einen neuen Trend der sich von den altbewährten NiMH (Nickel-Metall-Hydrid Akkus) abwendet und zur neuen LiPo (Lithium-Polymer Akku) Technologie greift. Bei der Auswahl des Akkus in Quadrocoptern spielt hauptsächlich die Energiedichte und die daraus resultierende Gesamtmasse eine wichtige Rolle.

7.1 Akkuvergleich

In der nachfolgenden Tabelle werden die charakteristischen Parameter von LiPo und NiMH Akkumulatoren verglichen.

	LiPo	NiMH
Energiedichte [Wh/kg]	140	60-80
Wirkungsgrad [%]	90	70
Zellenspannung [V]	3,7	1,2
Lebensdauer [Ladezyklen]	300	500
Maximaler Entladestrom, Dauer/Spitze [A]	150/250	5 / 8
Memory Effekt ²⁹	Nein	Ja
Selbstentladung	Nein	Ja
Schwellwert für Wiederaufladung ³⁰	Ja	Ja

Tabelle 7.1.1: Vergleich von LiPo und NiMH Akku (Quelle: [18], [22], [23])

Im direkten Vergleich (siehe Tabelle 7.1.1) von LiPo und NiMH Akku stellt sich der Lithium Polymer Akku als die bessere Wahl heraus. Lediglich in der Lebensdauer kann die junge Technologie des LiPo noch nicht mit dem NiMH mithalten.

Da für die vier Brushless Motoren jedoch Entladeströme von insgesamt 50 A Dauer- und 80 A Spitzenentladestrom benötigt werden, kann der NiMH Akku diese Anforderungen nicht erfüllen.

²⁹ Memory Effekt: Kapazitätseinbuße bei nicht sachgemäßer Wiederaufladung

³⁰ Schwellwert für Wiederaufladung: Ein minimaler Ladezustand unter welchem der Akku nicht mehr aufgeladen werden kann

7.2 Dimensionierung

Für den Bordspannungsbereich wird eine Mindestspannung von 12 Volt zur Versorgung von Laser Range Finder und Kamera benötigt. Dieser Spannungsbereich soll aufgrund von geringen Transformationsverlusten nicht weit überstiegen werden. Zur Realisierung werden vier Zellen des LiPo mit je 3,7 Volt benötigt. Somit erhält man eine Gesamtspannung von 14,8 Volt. Um ein möglichst ausgeglichenes Verhältnis von Kapazität und Masse zu erreichen wurde ein 5000mAh Kokam Akku mit vier Zellen gewählt. Die Masse dieses Akkus beträgt 450 g. (siehe Abbildung 7.2.1).



Abbildung 7.2.1: Kokam Akku 4S 5000 mAh (Quelle: [18])

7.3 Flugdauer

Bei Quadrocoptern basiert die Flugdauer hauptsächlich auf der Masse und dem daraus resultierenden Stromverbrauch der Motoren. Weitere Einflussfaktoren sind Flugverhalten und Flugweise. Ebenfalls sind Außentemperatur und Flughöhe zu berücksichtigen, welche in der nachfolgenden Berechnung jedoch nicht berücksichtigt werden.

7.3.1 Berechnung der Flugdauer

Zur Bestimmung der Flugdauer muss zu Anfang der gesamte Kapazitätsverbrauch aller Motoren berechnet werden. Dieser ergibt sich aus der Multiplikation des Kapazitätsverbrauchs pro Motor und der Anzahl an Motoren. Hierbei wird eine energiesparende Flugweise von 5000 mAh angenommen.

$$gkv = kvm * n = 5000 \text{ mAh} * 4 = 20000 \text{ mAh} \quad (7.1)$$

Aufgrund des ermittelten gesamten Kapazitätsverbrauchs kann nun mit der Kapazität des Akkumulators die Flugdauer t berechnet werden.

$$t = \frac{k}{gkv} * 60 = \frac{5000 \text{ mAh}}{20000 \text{ mAh}} * 60 \text{ min} = 15 \text{ min} \quad (7.2)$$

Symbol	Beschreibung	Einheit
t	Flugdauer	[min]
k	Kapazität des Akku	[mAh]
gkv	Gesamter Kapazitätsverbrauch	[mAh]
kvm	Kapazitätsverbrauch pro Motor	[mAh]
n	Anzahl der Motoren	

Tabelle 7.3.1: Variablendefinition für (7.1) und (7.2)

7.3.2 Erfahrungswert aus der Praxis

Die gemittelte Flugzeit beträgt nach 20 Testflügen 12 Minuten. Die Testflüge werden mit dem Prototypenaufbau des Quadrocopters durchgeführt (siehe Abbildung 8.4.1) Diese Abweichung vom errechneten Wert (siehe Formel 7.2) wird durch den nicht konstanten Stromverbrauch sowie den Einfluss von Flughöhe und Flugweise erzeugt.

8 Das Fluggestell

Nach einer intensiven Internetrecherche über Fluggestelle für Quadrocopter wurde kein Konzept gefunden, welches als geeignet erschien, die Anforderungen zu erfüllen. Da 90% der Quadrocopter in der Hobby- und Amateur-Szene aus Aluminium-Vierkantprofilen gefertigt und damit zu schwer sind, ist ein neues Konstruktionskonzept benötigt worden. Nach der Gewichtsabschätzung (siehe Tabelle 4.5.1) darf eine maximale Masse von 150 g für die Konstruktion nicht überschritten werden. Aus diesem Grund ist der hochfeste Werkstoff CFK (kohlenstofffaserverstärkter Kunststoff), auch Carbon genannt, gewählt worden. Wie bereits in den Anforderungen beschrieben, sollte das Fluggestell robust und doch leicht zerlegbar sein. Daher wird ein Stecksystem von Carbon-Platten verwendet um die hohe Steifigkeit des Werkstoffs optimal nutzen zu können. Dieses Konzept wurde mit steckbaren Auslegern versehen um die Zerlegbarkeit zu gewährleisten. Nachfolgend wird das Carbonkonzept vorgestellt sowie eine Gewichtsrechnung aufgrund der 3D-CAD Daten durchgeführt. Zuletzt wird zur weiteren Veranschaulichung des Systems „Quadrocopter“ eine Abbildung (siehe Abbildung 8.4.1) des derzeit im Einsatz befindlichen Prototypen gezeigt.

8.1 Carbon-Quadrocopter

Aufgrund der geforderten schnellen Einsatzfähigkeit wurde ein System entwickelt, welches aus einem inneren Kubus und vier Auslegern besteht (siehe Abbildung 8.1.1). Diese Ausleger werden mit Spezialsteckern in den Kubus eingesteckt.

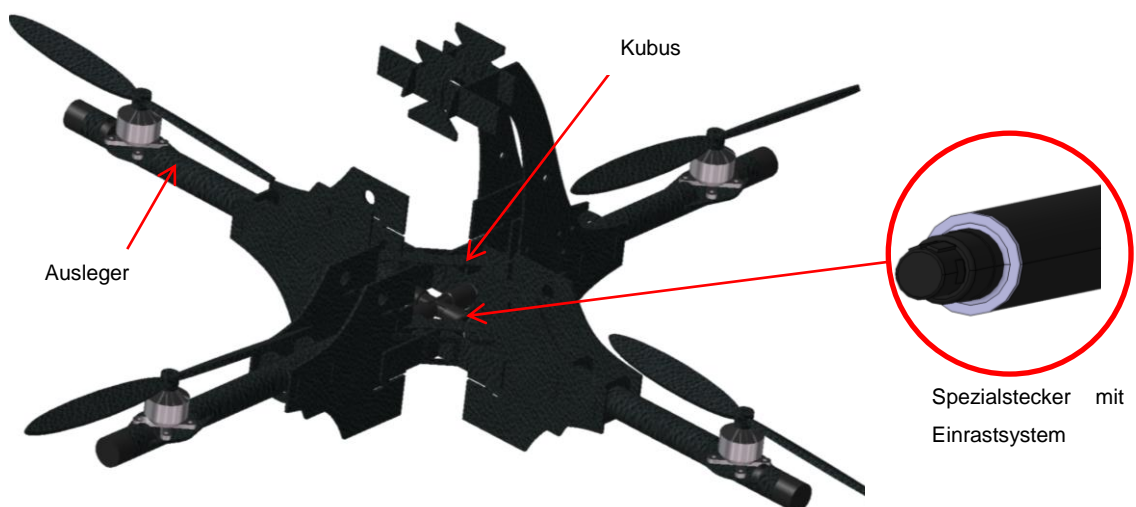


Abbildung 8.1.1: Carbon-Quadrocopterkonzept (links), Detailansicht Spezialstecksystem (rechts)

8.2 Kubus des Quadrocopter

Der Kubus des Quadrocopters ist in zwei Ebenen unterteilt. Auf der unteren Ebene erfolgen die Fluglageregelung, sowie die gesamte Datenübertragung zur Bodenstation. Die obere Ebene dient als Halterung und Ausregelung von Kamera, Laser Range Finder und PIKO ITX Board. Somit ist eine flexible Umgestaltung möglich, da die zwei Ebenen nur mit wenigen Steckern und Schrauben verbunden sind. Die bisher vorstellbaren Einsatzgebiete sind die Ausrüstung mit einer Wärme- bzw. HD-Kamera. Ebenfalls ist es möglich, weitere technische Geräte wie Peilsender und Netzwerkgeräte zu installieren, um in Katastrophengebieten vermisste Personen zu orten und die Kommunikation aufrechtzuerhalten.

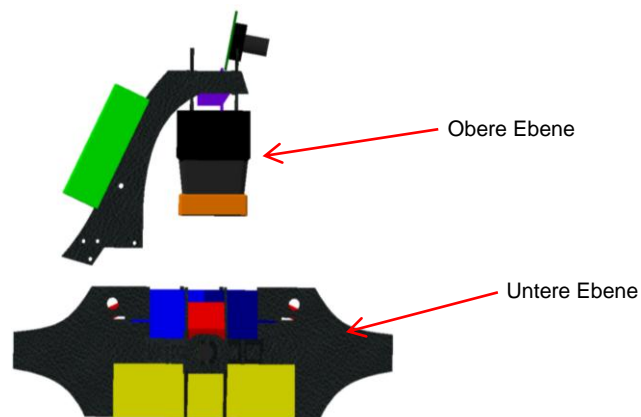


Abbildung 8.2.1: Detailansicht Kubus mit den zwei Ebenen

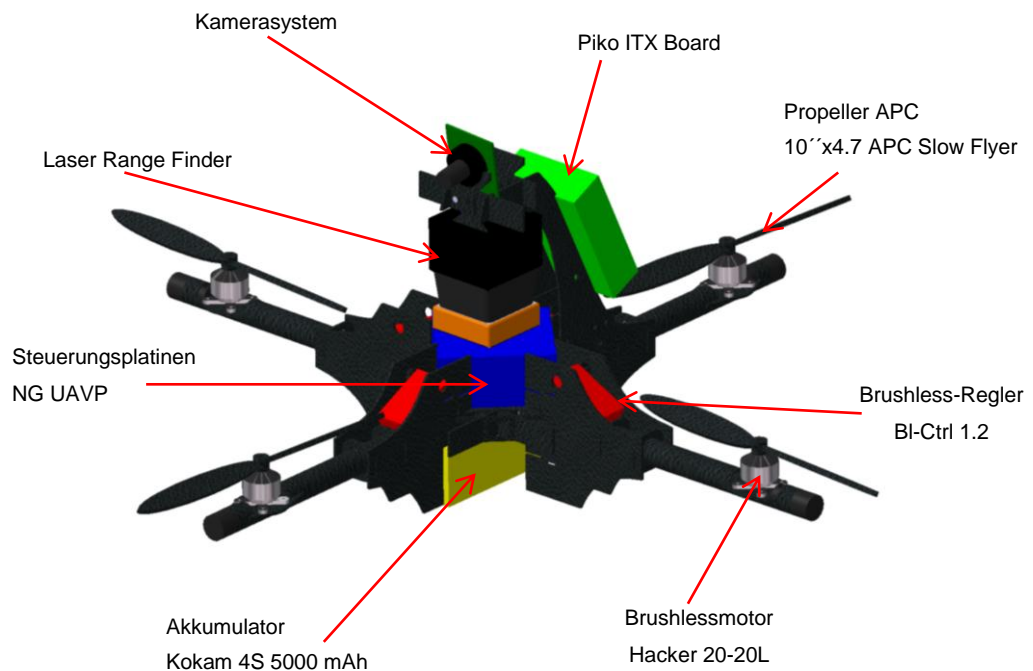


Abbildung 8.2.2: Darstellung des Carbon-Quadrocopterkonzepts mit allen Komponenten

8.3 Gesamtsystem

Nach Fertigstellung der Konstruktion (siehe Abbildung 8.2.2) in *Catia V5 R18 von Dassault Systems*³¹ ist erneut eine Gewichtsrechnung durchgeführt worden. Hierbei wird nach mehreren Verbesserungszyklen die Gewichtsbestimmung von 2000 g eingehalten. (siehe Tabelle 8.3.1)

Anzahl	Einzelgewicht [g]	Gesamt [g]	Beschreibung
1	150	150	Kamerasystem
1	207	207	PIKO ITX Board
1	380	380	Laser Range Finder
1	450	450	Akkumulator Kokam 4S 5000mAh
1	150	150	Verkabelung
1	180	180	Steuerungsplatinen
4	55	220	Brushless Motor Hacker 20-20L
4	21	84	Brushless Regler BI-Ctrl 1.2
4	7	28	Luftschraube APC 10''x 4.7 Slow Flyer
1	149	149	Carbon-Konstruktion
Gesamtgewicht		1998	

Tabelle 8.3.1: Gewichtsaufstellung des Quadrocopters

8.4 Aufbau des Prototypen

Der Prototyp wird derzeit für Testzwecke eingesetzt und besitzt bereits das ausgewählte Steuerungssystem, das Antriebssystem sowie den in dieser Arbeit ausgewählten Akkumulator.



Abbildung 8.4.1: Prototypaufbau des Quadrocopters

³¹ <http://www.3ds.com>

9 Zusammenfassung

Das Ziel dieser Arbeit ist es eine Recherche, Gegenüberstellung, Bewertung und Auswahl von Hardwarekomponenten für den Aufbau eines Quadrocopters zu erstellen.

Aus dieser Aufgabe heraus wird in Kapitel 3 ein Überblick über die bestehenden kommerziellen Quadrocoptersysteme gegeben. Da keiner der kommerziellen Systeme die gewünschten Leistungsmerkmale aufweist, wird in Kapitel 4 das Konzept für einen Quadrocopter erarbeitet, welcher das Reglement der RoboCup Rescue League sowie die Anforderungen der weiteren Einsatzgebiete erfüllt. Dieses Konzept dient als Ausgangspunkt für die Auswahl der Steuerungsplatinen in Kapitel 5. Die Steuerungsplatinen der OpenSource Plattform NG UAVP haben sich aufgrund ihrer zahlreichen Einsatzmöglichkeiten und dem verfügbaren Programmcode als am optimalsten erwiesen. In Kapitel 6 wird in Abstimmung mit dem Konzept die Auswahl des Antriebssystems durchgeführt. Die Motoren der Firma Hacker, sowie die Rotoren der Firma APC und die Regler der Mikrokooper Plattform haben sich als zielgerechtes Konzept herausgestellt. Kapitel 7 beschäftigt sich auf Basis des Antriebssystems mit der Auswahl des Akkumulators. Hierbei erweist sich der LiPo Akkumulator als vorteilhaft. Auf Basis dieser Hardware wird in Kapitel 8 das Konzept einer Quadrocopter-Konstruktion aus CFK aufgebaut. Es kann jedoch nicht ausgeschlossen werden, dass andere bzw. weniger bekannte Komponenten in gleicher Weise oder besser für den Einsatz geeignet sind.

Das Konzept des Quadrocopters hat nach abschließender Berechnung eine Masse von unter 2000g und besitzt nun alle zum Erfüllen der Anforderungen nötigen Eigenschaften und Komponenten.

GLOSSAR

ACC Adaptive Cruise Control

ARM Prozessorarchitektur, Markenname der Fa. ARM

AVR Prozessorarchitektur, Markenname der Fa. Atmel

CFK Kohlenstofffaserverstärkter Kunststoff, Carbon

I2C Inter-IC (Bus), serieller 2-Draht Datenbus

JTAG Joint Test Action Group

LiPo Lithium-Polymer (Akkumulator)

MEMS Micro-Electro-Mechanical System

NG UAVP Next Generation Universal Aerial Video Project

NiMH Nickel-Metall-Hydrid (Akkumulator)

PID Proportional-Integral-Differential (Regler)

PWM Pulsweitenmodulation

SMD Surface-mounted Device, oberflächenmontierbares Bauteil

SPI Serial Peripheral Interface

SSD Solid State Drive, nichtflüchtiger Massenspeicher ohne mechanische Komponenten

UART Universal Asynchronous Receiver Transmitter

USB Universal Serial Bus

LITERATURVERZEICHNIS

- [1]. Wikipedia. *Quadrocopter*. [Online] 5. März 2011. <http://de.wikipedia.org/wiki/Quadrocopter>.
- [2]. Homepage Microdrones Gmbh. [Online] 21. März 2011. <http://microdrones.de/md4-200.php>.
- [3]. Homepage Mikrokopter. [Online] 21. März 2011.
<http://www.mikrokopter.de/ucwiki/MikroKopter>.
- [4]. Homepage Draganflyer. [Online] 21. März 2011. <http://www.draganfly.com/uav-helicopter/draganflyer-x6/specifications/>.
- [5]. Homepage Parrot. [Online] 21. April 2011. <http://ardrone.parrot.com/parrot-ar-drone/de/>.
- [6]. ETH Zürich. *Bericht Quadrocopter*. [Online] 21. April 2011.
<http://www.3sat.de/page/?source=/neues/sendungen/magazin/152250/index.html>.
- [7]. Homepage Universität Pennsylvania. *Quadrocopter*. [Online] 21. April 2011.
<http://www.robonews.de/2011/01/quadrotor-flugzeuge-bauen-grundgeruste-fur-hauser/>.
- [8]. Homepage RoboCup Rescue League Thailand. [Online] 6. April 2011.
<http://www.thailandrescuerobot.org/eng/index.html#>.
- [9]. IMAV 2011. [Online] 19. April 2011. <http://www.imav2011.org/>.
- [10]. Homepage Motodrone. [Online] 19. April 2011. <http://www.motodrone.de/>.
- [11]. **Valavanis, Kimon P.** *Advances in Unmanned Aerial Vehicles* : Springer-Verlag, 2007.
- [12]. Cartft-Shop. *Piko ITX*. [Online] 5. März 2011. www.cartft.com.
- [13]. Homepage NG UAVP. [Online] 21. März 2011. <http://ng.uavp.ch/moin>.
- [14]. Mikrokopter Wiki. [Online] 7. April 2011. <http://www.mikrokopter.com/ucwiki/Sensoren>.
- [15]. Homepage Sparkfun. [Online] 7. April 2011. <http://www.sparkfun.com/products/676>.
- [16]. Modellbau in Perfektion. *Artikel*. [Online] 2011. April 2011.
http://finder.conrad.de/tipps_tricks2/view/praxistipps/modellbau/PT_MoBau_18_Brushless.pdf.
- [17]. **Hughes, Austin.** *Electric motors and drives* : Newnes-Verlag, 2006.
- [18]. Lindinger Modellbau. [Online] 7. April 2011.
http://shop.lindinger.at/product_info.php?cPath=1335_1350&products_id=69702.
- [19]. Mobimodeli Modellbau. [Online] 21. April 2011. <http://mibomodeli.si>.
- [20]. Hobbyking Modellbau. [Online] 21. April 2011. <http://www.hobbyking.com>.
- [21]. **Schenk, Helmut.** RC Network . *Artikel Standschub 2002*. [Online] 21. April 2011.
http://www.rc-network.de/magazin/artikel_02/art_02-0037/Standschub.pdf.
- [22]. Wikipedia. *Akkumulator*. [Online] 21. April 2011. <http://de.wikipedia.org/wiki/Akkumulator>.
- [23]. Akku-Abc. *Akkumulator Lebensdauer*. [Online] 21. April 2011. <http://www.akku-abc.de/akkulebensdauer.php>.