



Hochschule für Angewandte Wissenschaften Hamburg
Hamburg University of Applied Sciences

Bachelorthesis

Hassan Baydoun

Implementierung einer Positionsregelung für einen
brennstoffzellenbetriebenen Quadrocopter mit Hilfe
eines GPS-artigen Protokolls

Hassan Baydoun

Implementierung einer Positionsregelung für einen
brennstoffzellenbetriebenen Quadrocopter mit Hilfe
eines GPS-artigen Protokolls

Bachelorthesis eingereicht im Rahmen der Bachelorprüfung
im Studiengang Informations- und Elektrotechnik
am Department Informations- und Elektrotechnik
der Fakultät Technik und Informatik
der Hochschule für Angewandte Wissenschaften Hamburg

Betreuender Prüfer : Prof. Dr. Klaus Jünemann
Zweitgutachter : M. Sc. Andreas Cloppenburg

Abgegeben am 15. März 2018

Hassan Baydoun

Thema der Bachelorthesis

Implementierung einer Positionsregelung für einen brennstoffzellenbetriebenen Quadrocopter mit Hilfe eines GPS-artigen Protokolls

Stichworte

Steuerung, Regelung, GPS, NMEA 0183, UAV, PEMFC

Kurzzusammenfassung

Im Rahmen dieser Arbeit wird eine Indoor-Positionsregelung für einen Quadrocopter implementiert. Die Erfassung der Position erfolgt über ein von der Firma Vicon am Flugkäfig installiertes Kamerasystem. Die bereitgestellten Koordinaten werden dann in ein GPS-artiges Protokoll übersetzt und der Flugsteuerung per Funkübertragung zur Verfügung gestellt. Diese Positionsregelung soll im Anschluss auf einen großen Quadrocopter, der von einer Brennstoffzelle versorgt wird, übertragen werden.

Hassan Baydoun

Title of the paper

Implementation of a position control system for a fuel cell powered quadcopter using a GPS-like protocol

Keywords

Control, Regulation, GPS, NMEA 0183, UAV, PEMFC

Abstract

The goal of this thesis is to implement a position control system for a quadcopter. The position is captured by a camera system installed by Vicon on the flight cage. The recorded coordinates are then translated into a GPS-like protocol and transmitted via radio transmission to the flight controller. Subsequently, this position control shall be implemented on a large quadcopter, powered by fuel cell system.

Danksagung

Die vorliegende Arbeit wurde an der Professur für Regelungstechnik der Helmut Schmidt Universität / Universität der Bundeswehr durchgeführt. Ich möchte mich daher bei allen Personen dieser Professur bedanken, die mir bei der Durchführung dieses spannenden Projekts geholfen haben.

Ich danke Herrn Prof. Dr. Klaus Jünemann für seine Unterstützung und Bereitschaft, alle meine Fragen zu beantworten sowie für die Übernahme der Erstprüfung.

Weiterer Dank gilt Herrn Andreas Cloppenburg, M. Sc. für die Übernahme der Zweitprüfung, die Vergabe des interessanten Themas sowie seine fachliche Unterstützung im Labor.

Besonderer Dank geht an die Personen, die diese Arbeit gelesen und verbessert haben.

Abschließend möchte ich mich bei meiner Familie für die moralische und finanzielle Unterstützung und bei meinen Freunden für Ihre Motivation während des Studiums bedanken.

Inhaltsverzeichnis

Abbildungsverzeichnis	1
Tabellenverzeichnis	2
1 Einführung	3
1.1 Ziel.....	3
1.2 Anforderung.....	4
1.3 Gliederung.....	5
2 Grundlagen	6
2.1 Prinzip eines Quadropters.....	6
2.1.1 Steuerung des Quadropters.....	6
2.1.2 Eulerwinkel.....	6
2.1.3 Fluglageregelung	8
2.2 Global Positioning System (GPS)	8
2.2.1 Geografisches Koordinatensystem	9
2.2.2 Positionsbestimmung über GPS	11
2.2.3 NMEA 0183.....	13
2.3 Brennstoffzelle.....	16
3 Design	17
3.1 Hardware.....	17
3.1.1 Flugcontroller (Pixhawk)	17
3.1.2 Ultraschallsensor (Sonarsensor).....	19
3.1.3 Optical-Flow-Kamrea	20
3.1.4 Telemetrie Modul	21
3.1.5 Fernsteuerung.....	21
3.1.6 Vicon System	22
3.1.7 Weitere Hardware	23
3.2 Software	25
3.2.1 Matlab	25
3.2.2 Mission Planner.....	25
3.2.3 Vicon Motion Capture Tracker	26
4 Implementierung.....	27
4.1 Umrechnen der Koordinaten.....	27

4.1.1 Einfachste Entfernungsmessung	29
4.1.2 Exakte Entfernungsmessung	32
4.2 Erstellung des NMEA-Protokolls	33
4.2.1 NMEA-Generator-Flussdiagramm	34
5 Flugtests	35
5.1 Kalman-Filter	35
5.2 PID-Regler	36
5.3 Flugtests mit GPS	36
5.3.1 Kompass	38
5.3.2 Flugtests durch Tunen der Parameter	42
5.4 Flugtests mit der Flow-Kamera	44
5.5 Vergleich von Flow-kamera- und GPS-Regelung	45
6 Sicherheitshinweise	45
7 Zusammenfassung und Ausblick	46
Literaturverzeichnis	47
Anhang	49

Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1: Der verwendete Quadrocopter	5
Abbildung 2: x-Konfiguration	6
Abbildung 3: Die drei verschiedenen Drehungen.....	7
Abbildung 4: Breiten- und Längenkreise	9
Abbildung 5: Geografisches Koordinatensystem	10
Abbildung 6: Positionsbestimmung über zwei Satelliten.....	11
Abbildung 7: Positionsbestimmung mit drei Satelliten und Korrektur des Uhrenfehlers.....	12
Abbildung 8: Aerostack 1000 Brennstoffzelle	16
Abbildung 9: Pix32 von Holybro	17
Abbildung 10: Ultraschallsensor.....	19
Abbildung 11: Vergleich Sonarsensor und Barometer	19
Abbildung 12: Optischer-Flow-Kamera (PX4Flow)	20
Abbildung 13: 433MHz Radiotelemetrie.....	21
Abbildung 14: Spektrum DX7 Fernsteuerung	22
Abbildung 15: Bewegungserfassung mit Vicon [10].....	23
Abbildung 16: Pixhawk mögliche Erweiterungen	24
Abbildung 17: Screenshot aus Mission Planner.....	25
Abbildung 18: 3D-Perspektive des Vicon Motion Capture Trackers	26
Abbildung 19: Karte von Hamburg mit Breiten- und Längenkreisen [12].....	29
Abbildung 20: Gebäude H2 der Universität der Bundeswehr [12]	30
Abbildung 21: NMEA-Flussdiagramm	34
Abbildung 22: Vergleich gemessener und geschätzter Höhe	35
Abbildung 23: Vergleich gesendeter mit empfangenen Positionsdaten (x-Achse)	37
Abbildung 24: Vergleich gesendeten mit empfangenen Positionsdaten (y-Achse)	37
Abbildung 25: Deklination (Missweisung)	38
Abbildung 26: 3D Plot Kompassstörung	39
Abbildung 27: Autoanalyse der Flugdaten	40
Abbildung 28: Externer Kompass im Vergleich zum internen (x-Achse)	41
Abbildung 29: Externer Kompass im Vergleich zum internen (y-Achse)	41
Abbildung 30: Externer Kompass im Vergleich zum internen (z-Achse)	41
Abbildung 31: Extended Tuning in Mission Planner.....	42
Abbildung 32: Vergleich der Abweichung von drei Flügen auf der x-Achse (GPS)	43
Abbildung 33: Vergleich der Abweichung von drei Flügen auf der y-Achse (GPS)	43
Abbildung 34: Abweichung auf der x-Achse (Flow-Kamera)	44
Abbildung 35: Abweichung auf der y-Achse (Flow-Kamera)	44

Tabellenverzeichnis

Tabelle 1: Steuermöglichkeiten eines Quadropters in x -Konfiguration	7
Tabelle 2: ASCII-Codes	15
Tabelle 3: Eigenschaften von der Brennstoffzelle	16
Tabelle 4: Pixhawk Versionen	18
Tabelle 5: Die geografischen Koordinaten in drei verschiedenen Formaten	28
Tabelle 6: Geografische Koordinaten	30
Tabelle 7: Tunen der Regelparameter	42
Tabelle 8: Vergleich GPS- mit Flow-Kamera-Regelung	45

1 Einführung

Diese Arbeit wurde an der Professur für Regelungstechnik der Helmut-Schmidt-Universität / Universität der Bundeswehr Hamburg durchgeführt.

1.1 Ziel

Die Professur für Regelungstechnik der Universität der Bundeswehr in Hamburg beschäftigt sich mit unterschiedlichen Applikationen für UAV-Systeme (unbemanntes Luftfahrzeug, engl. *Unmanned Aerial Vehicle*) wie beispielsweise autonome Kartografierung, Schwarmverhalten, Objektinspektion und Flugzeitoptimierung. Im Bereich der Flugzeitoptimierung wird derzeit der Einsatz von PEM-Brennstoffzellensystemen (PEMFC)¹ als primäre Energieversorgung für UAV-Systeme näher untersucht. Das UAV-System wird dabei so ausgelegt, dass das PEMFC mit seiner Nominalleistung in der Lage ist, die erforderliche Leistung zum Schweben bereitzustellen. Zusätzlicher Leistungsbedarf zum Beschleunigen des UAV-Systems wird von einem LiPo-Akkumulator bereitgestellt, welcher im Betrieb vom PEMFC wieder geladen werden kann. Um es zu ermöglichen, mit einer Brennstoffzelle mit 1kW Nennleistung und einem Tank mit einem Füllvolumen von rund 7l zu fliegen, wird ein großer Quadrocopter mit einem Gesamtgewicht von ca. 11kg und einem Durchmesser von ca. 180cm gebaut.

Die Flugtests finden in der Laborumgebung innerhalb eines Flugkäfigs statt, welcher mit einem Infrarot-Kamerasystem der Firma Vicon ausgestattet ist.

Um automatische und positionsstabile Flugtests über längere Zeiträume (>1h) durchführen zu können, ist es notwendig, eine genaue Positionsregelung zu gewährleisten.

Ziel dieser Arbeit ist es, eine Möglichkeit zu finden, welche diese Positionsregelung mittels der vorhandenen GPS-Schnittstelle und mit Hilfe des Vicon-Systems ermöglicht.

¹ PEMFC: Protonenaustauschmembran-Brennstoffzelle, engl. *Proton Exchange Membrane Fuel Cell*

1.2 Anforderung

Im Laufe dieser Arbeit soll eine Möglichkeit gefunden werden, einen Quadrocopter innerhalb eines geschlossenen Raumes so präzise zu regeln, dass dieser autonom über einen längeren Zeitraum hinweg schweben kann. Die Besonderheit des mit diesem Ziel zu entwickelnden Systems ist, dass es auf einem GPS-artigen Protokoll beruht, welches den autonomen Flug des Kopters im Innenbereich ermöglichen soll. Die Positionserfassung des Kopters erfolgt über das Vicon-System. Anschließend werden die Daten in Matlab bearbeitet und zu einem GPS-Protokoll konvertiert, welches dann per Funkübertragung an den Kopter gesendet wird. Die im Flugcontroller vorhandene GPS-basierte Positionsregelung kann daraufhin wie im Outdoor-Bereich bekannt erfolgen. Im nächsten Schritt wird eine zweite Art der Positionsregelung durch eine Optical-Flow-Kamera getestet und diese mit der GPS-Regelung verglichen.

1.3 Gliederung

Im Folgenden werden die erforderlichen Schritte und Bestandteile dieses Projekts erklärt. Das zweite Kapitel liefert hierfür allgemeine Informationen über die Hauptthemen dieser Arbeit, nämlich Quadrocopter und GPS. Im dritten Kapitel werden der in dieser Arbeit verwendete Kopter sowie alle benutzten Sensoren näher erläutert. Das vierte Kapitel beschäftigt sich mit der Implementierung der Positionsregelung und erklärt diese schrittweise. Im letzten Kapitel werden verschiedene Flugtests durchgeführt, um eine optimale Positionsregelung zu gewährleisten. Vor der genauen Beschreibung der einzelnen Testverläufe, wird kurz auf das Kalman-Filter und den PID-Regler eingegangen, die für das Flugverhalten relevant sind.



Abbildung 1: Der verwendete Quadrocopter

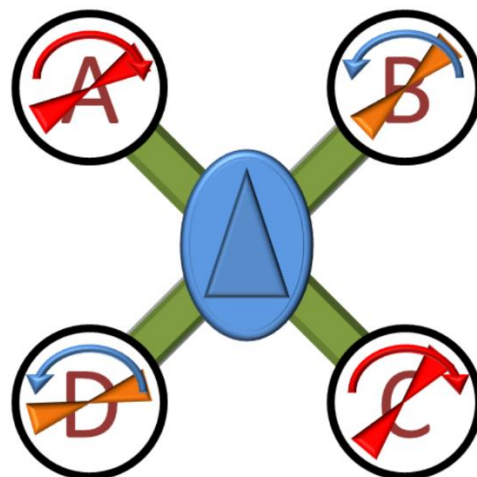
2 Grundlagen

2.1 Prinzip eines Quadropters

Ein Quadroptor gehört wie ein Hubschrauber zu den Drehflüglern und besitzt sechs Freiheitsgrade. Diese setzen sich zusammen aus drei Translations- und drei Rotationsfreiheitsgraden [1]. Angetrieben werden Quadroptoren in der Regel durch bürstenlose Elektromotoren, welche sich durch eine sehr hohe Leistung und gleichzeitig sehr geringen Verschleiß auszeichnen. Im Gegensatz zu Hubschraubern besitzt ein Quadroptor vier Motoren, die zueinander symmetrisch angeordnet sind. Die elektrische Energie für diese Motoren wird in der Regel von Lithium-Polymer-Akkumulatoren bereitgestellt.

2.1.1 Steuerung des Quadropters

Quadroptoren werden in verschiedenen Konfigurationen aufgebaut. Die meistverwendeten sind die „+“, „x“ und „H“ Konfigurationen. Bei der „x“- und „H“-Konfiguration sind die Motoren um 45° zur Flugrichtung versetzt. Der in dieser Arbeit verwendete Kopter besitzt die x-Konfiguration.



Quelle: <https://commons.wikimedia.org/wiki/File:Quadrocopter-X-Config.PNG>

Abbildung 2: x-Konfiguration

2.1.2 Eulerwinkel

Die Eulerwinkel *roll*, *pitch* und *yaw*, benannt nach dem Schweizer Mathematiker Leonhard Euler, beschreiben die Orientierung (Drehlage) eines festen Körpers im drei-

dimensionalen Raum. Hierbei beschreibt der yaw-Winkel, der auch als *Azimuth* bezeichnet wird, die erste Drehung um die z -Achse des Körpers, also um die lokale Vertikale. Anschließend wird um die neue y -Achse des Körpers um den pitch-Winkel gedreht. In der deutschsprachigen Literatur wird der pitch-Winkel manchmal auch als Nickwinkel bezeichnet. Die letzte Drehung um den roll-Winkel erfolgt schließlich um die x -Achse, die sich nach Drehung um yaw und pitch ergeben hat. Diese drei Drehungen sind in Abbildung 3 veranschaulicht [2].

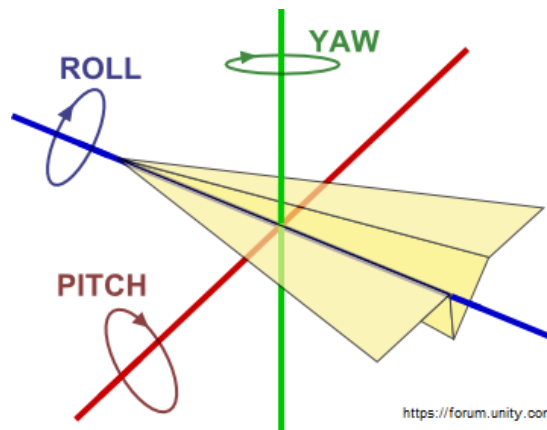


Abbildung 3: Die drei verschiedenen Drehungen

Der Auftrieb wird durch vier senkrecht zum Boden gerichtete Propeller erreicht. Zwei Rotoren drehen sich im Uhrzeigersinn, die beiden anderen in entgegengesetzte Richtung. Sobald die Auftriebskraft größer als die Gewichtskraft wird, steigt der Kopter senkrecht nach oben.

In der nachfolgenden Tabelle sind alle Steuermöglichkeiten angegeben. Ein Pfeil nach oben bzw. unten zeigt die Erhöhung bzw. Verringerung der Drehzahl an.

	Steigen	Sinken	Gieren		Nicken		Rollen	
			Rechts	Links	Vorne	Hinten	Rechts	Links
Motor A	↑	↓	↓	↑	↓	↑	↑	↓
Motor B	↑	↓	↑	↓	↓	↑	↓	↑
Motor C	↑	↓	↓	↑	↑	↓	↓	↑
Motor D	↑	↓	↑	↓	↑	↓	↑	↓

Tabelle 1: Steuermöglichkeiten eines Quadropters in x-Konfiguration

2.1.3 Fluglageregelung

Ein Quadrocopter ist ein System, das ständigen Steuereingriffen bedarf, um eine Position im Raum zu halten. Eine kleine Störung reicht aus, um Beschleunigung zu verursachen, die den Kopter aus seiner Sollposition bringt. Dies kann z. B. durch Wind oder Drehzahlunterschiede geschehen. Bei einem Quadrocopter wird die Lage durch die Elektronik geregelt. Diese Regelung funktioniert über Sensoren am Kopter, die Auskunft über die aktuelle Position geben. Mit Hilfe von Kompassen, Beschleunigungssensoren und Gyroskopen kann der Flugcontroller seine aktuelle Ausrichtung und horizontale Lage bestimmen.

Würden diese Sensoren ideal arbeiten, wäre ein Schweben auf der Stelle möglich. In der Praxis ist dies jedoch selten der Fall, da die Sensoren eine endliche Auflösung haben. Tatsächlich sorgen sehr kleine Messfehler über die Zeit für große Abweichungen, die einen Drift des Kopters zur Folge haben. Aus diesem Grund wird, um eine stabile Positionsregelung zu erreichen, externe Sensorik benötigt, beispielsweise in Form von GPS oder einer Optical-Flow-Kamera [1].

2.2 Global Positioning System (GPS)

GPS ist ein satellitengestütztes Navigationssystem mit 32 aktiven Satelliten (Stand: 2014) und heißt vollständig *Navigational Satellite Timing and Ranging – Global Positioning System (NAVSTAR-GPS)*. Am 17. Juli 1995 wurde GPS offiziell in Betrieb genommen. Die Satelliten umkreisen die Erde in einer Höhe von ca. 20000 km. Jeder Satellit folgt einer festgelegten Bahn, sodass für jeden Empfänger sechs bis zehn Satelliten gleichzeitig sichtbar sind. Mindestens vier Satelliten sind überall auf der Erde sichtbar. Als Sichtbarkeit wird die Anzahl der empfangbaren Satelliten-Signale bezeichnet [3].

Seit 2012 ist auch das russische System GLONASS zugänglich, weitere Systeme befinden sich im Aufbau, z.B. das europäische Galileo, das chinesische BeiDou oder das indische NAVIC [4].

2.2.1 Geografisches Koordinatensystem

Das Gradnetz der Erde ist ein gedachtes, über die Erdkugel gezogenes Liniennetz. Es besteht aus sich senkrecht schneidenden Breiten- und Längengraden und dient der Bestimmung der geographischen Lage und der Orientierung auf der Erde [5].

Die Breitenkreise verlaufen parallel zum Äquator und werden immer kleiner, wenn man sich nördlich oder südlich vom Äquator wegbewegt, siehe Abbildung 4.

Die Längengrade verlaufen vom Nord- zum Südpol und treffen sich an den beiden Polen, daher ist der Abstand zwischen zwei Längengraden nicht an jeder Stelle gleich groß, siehe Abbildung 4. Eine die Pole verbindende Längengradhälfte wird als Meridian bezeichnet. Der sogenannte Null-Meridian wurde 1884 durch die Sternwarte des Londoner Stadtteils Greenwich gelegt, in dem sich das Zentrum der britischen Marine befand.

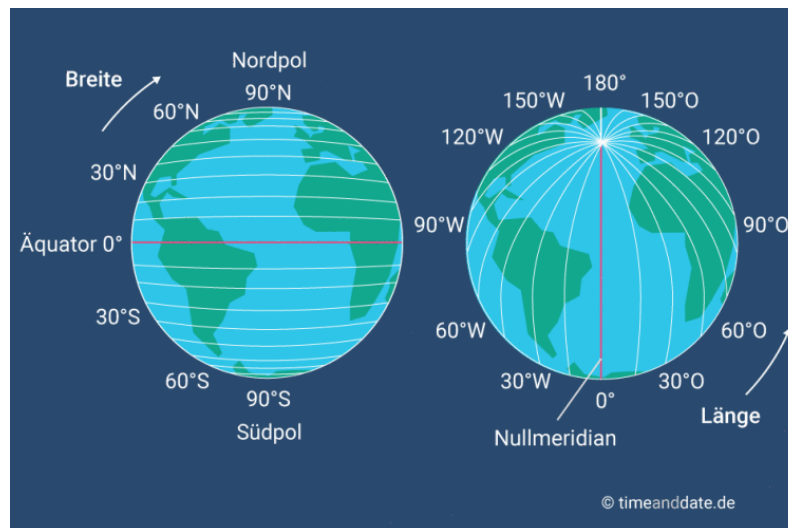


Abbildung 4: Breiten- und Längengrade

Den Abstand zwischen zwei Meridianen, die 1° auseinander liegen, bezeichnet man als Abweitung. Die Abweitung d ist am Äquator am größten und nimmt zu den Polen hin ab. Sie berechnet sich wie folgt:

$$d = \frac{2 \cdot \pi \cdot R}{360^\circ} = \frac{2 \cdot \pi \cdot 6378,137 \text{ km}}{360^\circ} = 111,32 \frac{\text{km}}{^\circ}, \quad (1)$$

wobei R der Erdradius ist.

Zur Berechnung der Abweitung an einem, vom Äquator entfernten Ort, muss die Äquatorabweitung mit dem Kosinus des Ortes multipliziert werden. Beispielsweise in Hamburg:

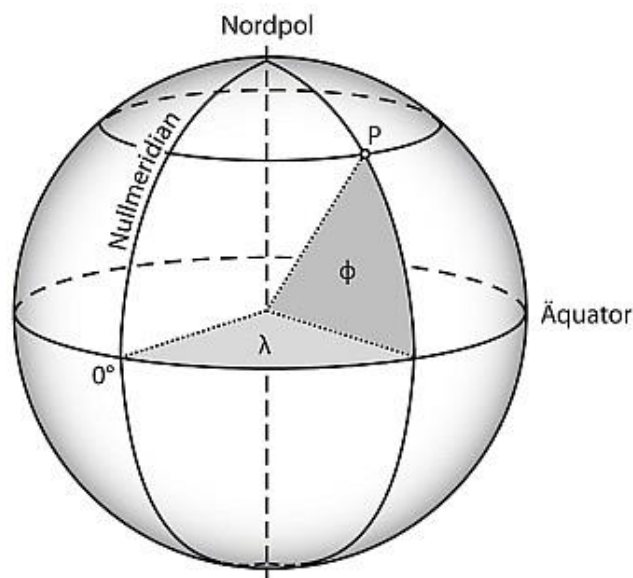
$$d_{HH} = d \cdot \cos(\text{lat}_{HH}) = d \cdot \cos(53,56^\circ) = 66,12 \frac{\text{km}}{^\circ} \quad (2)$$

Der Abstand zwischen zwei Breitenkreisen ist konstant und beträgt überall $111,32 \frac{\text{km}}{^\circ}$.

Die geographische Breite (engl. *Latitude*) ist der eingeschlossene Winkel ϕ zwischen der Linie Erdmittelpunkt-Äquator und der Linie Erdmittelpunkt-Ort, siehe Abbildung 5. Die Breite kann zwischen -90° am Südpol über 0° am Äquator bis $+90^\circ$ am Nordpol betragen. (Statt des Vorzeichens sind auch N und S für Nord und Süd zulässig, N für positive und S für negative Werte).

Die geographische Länge (engl. *Longitude*) ist der eingeschlossene Winkel λ zwischen der Linie Erdmittelpunkt-Nullmeridian und der Linie Erdmittelpunkt-Ort, siehe Abbildung 5. Die Länge ist ein Winkel, der ausgehend vom Nullmeridian (0°) bis 180° in östlicher und 180° in westlicher Richtung gemessen wird, das heißt die Länge 180° und -180° führen zum gleichen Meridian [6].

Die beiden Begriffe *Breite* und *Länge* werden in dieser Arbeit häufig gebraucht. Mit ihnen sind die geografischen Koordinaten gemeint.



Quelle: <http://www.avenz.de/Meridian.html>

Abbildung 5: Geografisches Koordinatensystem

Um die Koordinaten von Punkt P zu bestimmen werden also die beiden Winkel ϕ und λ benötigt. Sie werden üblicherweise in Grad angegeben, möglich sind aber noch zwei andere Schreibweisen. Mehr dazu unter dem Punkt 4.1.

2.2.2 Positionsbestimmung über GPS

Um die Position auf der Erde über GPS zu bestimmen, benötigt man die Informationen, die von den die Erde umkreisenden Satelliten gesendet werden. Stark vereinfacht sendet jeder Satellit eine Nachricht mit den folgenden Informationen:

1. Satellitennummer
2. Aktuelle Position
3. Die Zeit, zu der die Nachricht gesendet wurde

sowie weitere Informationen über seine Laufbahn.

Der GPS-Empfänger berechnet die Zeitdifferenz zwischen dem Senden und dem Empfangen des Signals. Aus dieser Zeitdifferenz kann die Entfernung des Satelliten bestimmt werden. Werden nun weitere Satellitenmessungen hinzugefügt, so kann die aktuelle Position durch Trilateration² bestimmt werden.

Kennt man die Entfernung von nur einem Satelliten, kann man die aktuelle Position auf einen Kreis, dessen Radius dieser Entfernung entspricht, beschränken.

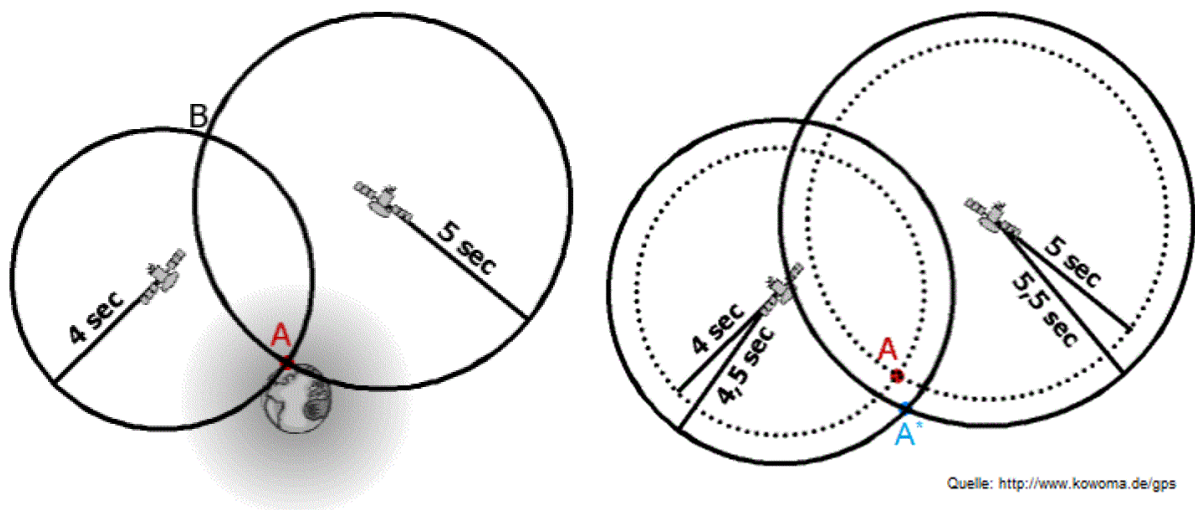


Abbildung 6: Positionsbestimmung über zwei Satelliten

² Trilateration: Entfernungsmessung von drei Punkten aus

Kennt man nun die Entfernung von zwei Satelliten, könnte man sich theoretisch sowohl auf Punkt A als auch auf Punkt B befinden wie in Abbildung 6 (links) dargestellt. Es ist aber unrealistisch, dass man sich auf Punkt B befindet, weil Punkt B im Welt- raum liegt. Die wahre Position kann also nur Punkt A sein.

Ein wichtiger Punkt sollte allerdings nicht vergessen werden: alle Satelliten besitzen Atomuhren, die absolut genau und synchron gehen. Die GPS-Empfänger dagegen besitzen einfache Quarzuhren, die im Vergleich zu den Atomuhren nicht sehr genau sind. Angenommen, die Empfängeruhr geht im Vergleich zur Satellitenuhr eine halbe Sekunde vor, dann scheinen die Signale beim Empfänger eine halbe Sekunde ver- zögert einzutreffen, siehe Abbildung 6 (rechts). Man nähme also an, man befände sich am Punkt A^* , nicht am Punkt A .

Die angegebenen Zeiten in Abbildung 6 und Abbildung 7 sind übertrieben groß, sie sollen lediglich zur Veranschaulichung dienen.

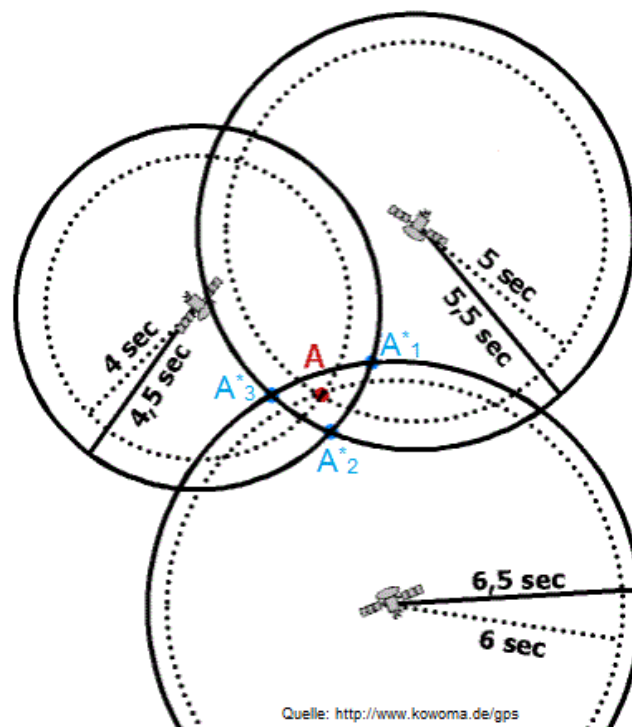


Abbildung 7: Positionsbestimmung mit drei Satelliten und Korrektur des Uhrenfehlers

Nimmt noch ein dritter Satellit an der Messung teil, wird es möglich diesen Uhrenfeh- ler zu korrigieren. Zunächst erhält man keinen genauen Schnittpunkt mehr, sondern drei Schnittpunkte A_1^* , A_2^* und A_3^* (Abbildung 7). Verschiebt man nun die Zeit der

Empfängeruhr solange, bis aus den drei Schnittpunkten A_1^* , A_2^* und A_3^* ein Schnittpunkt A wird, so hat man den Fehler der Zeitmessung bzw. den Unterschied zwischen den Atomuhren und der Empfängeruhr kompensiert.

Fazit: Um eine eindeutige Position zu bestimmen, benötigt man mindestens drei Satelliten. Will man außerdem die Höhe bestimmen, so sind vier Satelliten nötig [7].

2.2.3 NMEA 0183

NMEA 0183 wird unter anderem von der *National Marine Electronics Association* (NMEA) definiert, um einen Datenaustausch zwischen verschiedenen Geräten aus der Marineelektronik zu ermöglichen. [7]

Mit Hilfe der standardisierten NMEA-Daten gelingt es jedem, der einen GPS-Empfänger besitzt, die Daten zu empfangen und sie mit einem Navigations- oder Kartenprogramm auf dem PC zu verwenden.

2.2.3.1 Datensätze

Jedes NMEA-Protokoll enthält verschiedene Datensätze, die wiederum verschiedene Informationen enthalten, unter anderem die Position des Empfängers, die Zeit, Informationen über die Satelliten und vieles mehr.

Die Daten werden im ASCII-Format (*American Standard Code for Information Interchange*) übertragen. Jeder Datensatz beginnt mit dem Zeichen „\$“, einer zwei Zeichen langen Senderkennung und einer drei Zeichen langen Satznummer, dann folgt eine Reihe von Datensätzen, die mit Kommas unterteilt werden. Schließlich wird der Satz mit einer Prüfsumme abgeschlossen. Jeder Datensatz kann insgesamt 82 Zeichen enthalten. Ist ein Datenfeld nicht verfügbar oder wird es nicht benutzt, kann es leer gelassen werden. Das dazugehörige Komma zur Trennung der Datensätze wird aber ohne Leerzeichen beibehalten. Durch Zählen der Kommas kann der Empfänger aus jedem Datensatz die Informationen richtig zuordnen. [7]

Ein kompletter Datenblock sieht beispielsweise so aus:

```
$GPRMC,191410,A,4735.5634,N,00739.3538,E,0.0,0.0,181102,0.4,E,A*19
$GPRMB,A,9.99,L,,Exit,4726.8323,N,00820.4822,E,29.212,107.2,,V,A*69
$GPGGA,191410,4735.5634,N,00739.3538,E,1,04,4.4,351.5,M,48.0,M,,*45
$GPGSA,A,3,,,,,15,17,18,23,,,,,4.7,4.4,1.5*3F
$GPGSV,2,1,08,02,59,282,00,03,42,287,00,06,16,094,00,15,80,090,48*79
$GPGLL,4735.5634,N,00739.3538,E,191410,A,A*4A
$GPBOD,221.9,T,221.5,M,Exit,*6B
$GPVTG,0.0,T,359.6,M,0.0,N,0.0,K*47
$PGRME,24.7,M,23.5,M,34.1,M*1D
$PGRMZ,1012,f*36
$PGRMM,WGS 84*06
$HCHDG,170.4,,,0.4,E*03
$GPRTE,1,1,c,*37
```

Jeder Datensatz (d.h. jede Zeile) enthält bestimmte Informationen. Je nach Anwendung kann man die benötigten Daten nutzen. Nachfolgend sind die wichtigsten Datensätze genauer erklärt.

GPRMC (*Recommended Minimum Sentence*)

„GP“ ist die Senderkennung von GPS, „RMC“ ist die Satznummer und steht für **Recommended Minimum Sentence**. Es handelt sich um eine Empfehlung für das Minimum, was ein GPS-Empfänger ausgeben soll.

```
$GPRMC,191410,A,4735.5634,N,00739.3538,E,0.0,0.0,181102,0.4,E,A*19
^      ^ ^      ^      ^      ^      ^      ^      ^      ^
|      | |      |      |      |      |      |      |
|      | |      |      |      |      |      |      |      Art der Bestimmung
|      | |      |      |      |      |      |      |      A=autonomous (selbst)
|      | |      |      |      |      |      |      |      D=differential
|      | |      |      |      |      |      |      |      E=estimated
|      | |      |      |      |      |      |      |      N=not valid (ungültig)
|      | |      |      |      |      |      |      |      S=simulator
|      | |      |      |      |      |      |      |      Missweisung (mit Richtung)
|      | |      |      |      |      |      |      |      Datum: 18.11.2002
|      | |      |      |      |      |      |      |      Bewegungsrichtung in Grad (wahr)
|      | |      |      |      |      |      |      |      Geschwindigkeit über Grund (Knoten)
|      | |      |      |      |      |      |      |      Längengrad mit (Vorzeichen)-Richtung (E=Ost, W=West)
|      | |      |      |      |      |      |      |      007° 39.3538' Ost
|      | |      |      |      |      |      |      |      Breitengrad mit (Vorzeichen)-Richtung (N=Nord, S=Süd)
|      | |      |      |      |      |      |      |      46° 35.5634' Nord
|      | |      |      |      |      |      |      |      Status der Bestimmung: A=Active (gültig); V=void (ungültig)
|      | |      |      |      |      |      |      |      Uhrzeit der Bestimmung: 19:14:10 (UTC-Zeit)
```

GPGGA (GPS Fix Data)

Das ist einer der wichtigsten Datensätze; er enthält Informationen über die Zeit, die geografischen Koordinaten sowie die Qualität der Messung.

```
$GPGGA,191410,4735.5634,N,00739.3538,E,1,04,4.4,351.5,M,48.0,M,,*45
```

^	^	^	^	^	^	^	^	^
								Prüfsumme
								Höhe Geoid minus
								Höhe Ellipsoid (WGS84)
								in Metern (48.0,M)
								Höhe über Meer (über Geoid)
								in Metern (351.5,M)
								HDOP (horizontal dilution
								of precision) Genauigkeit
								Anzahl der erfassten Satelliten
								Qualität der Messung
								(0 = ungültig)
								(1 = GPS)
								(2 = DGPS)
								Längengrad
								Breitengrad
								Uhrzeit

2.2.3.2 Prüfsumme

Hinter jeden Datensatz wird eine Prüfsumme angehängt. Die Prüfsumme teilt dem Controller mit, ob der Datensatz komplett empfangen wurde oder ob er modifiziert wurde. Die Prüfsumme besteht aus einem „ * “ und einer Hexadezimalzahl, die sich durch ein bitweises exklusives Oder aller Zeichen zwischen dem „ \$ “ und dem „ * “ berechnen. So lautet die Prüfsumme aus dem obenstehenden Datensatz beispielsweise:

$$\text{Pruefsumme} = 71 \text{ xor } 80 \text{ xor } 71 \text{ xor } 71 \text{ xor } 65 \text{ xor } 44 \text{ usw.} \quad (3)$$

Wobei die Dezimalzahlen den jeweiligen ASCII-Codes der einzelnen Zeichen entsprechen, siehe Tabelle 2. Der erhaltene Wert als Hexadezimalzahl ist die Prüfsumme.

Zeichen	ASCII-Code
G	71
P	80
A	65
,	44

Tabelle 2: ASCII-Codes

2.3 Brennstoffzelle

Die für den brennstoffzellenbetriebenen Quadrokooper zu verwendende Brennstoffzelle ist der Aerostak 1000 von der Firma HES enregy systems. Sie umfasst einen elektronisch gesteuerten Brennstoffzellenstack mit einem integrierten Kühlsystem und einer Hybridisierungskarte. Die Nennleistung beträgt 1000W.



Quelle: HES Energy Systems Pte. Ltd Manual

Abbildung 8: Aerostack 1000 Brennstoffzelle

Type of Fuel cell	PEM
No. Of Cells	50
Rated Performance	34A@30V
Continuous Output Power	1000W
Output Voltage Range	30V – 47V
Weight (AEROSTAK)	2182g
Recommended Battery Size	8S
Reactants	Hydrogen & Air
Hydrogen Gas Purity	99.999%
Rated Hydrogen Consumption	14 L/min
Required Hydrogen Input Pressure	0.55 – 0.77bar
Low Voltage Shutdown	20V
Humidification	Self – humidified
Cooling	Air (Integrated Fan)
Start-up Time (with H2 gas tank)	Under 30s
Efficiency of stack	50%

Tabelle 3: Eigenschaften von der Brennstoffzelle

3 Design

3.1 Hardware

3.1.1 Flugcontroller (Pixhawk)

Der erste Pixhawk kam 2013 auf den Markt. Die Firma 3DR und die ETH Zürich (Eidgenössische Technische Hochschule Zürich) entwickelten ihn gemeinsam, 3DR vertrieb ihn exklusiv.



Quelle: <https://synosystems.de/de/kategorien/315-pix32-px4-246-pixhawk-flight-controller.html>

Abbildung 9: Pix32 von Holybro

Der Nachfolger Pixhawk 2 wird unter anderem von der Firma ProfiCNC produziert und vertrieben. Sein Vorteil gegenüber seinem Vorgänger ist ein modulares System der IMU (Inertiale Messeinheit, engl. *Inertial Measurement Unit*), welches neuerdings nun in einem „Cube“ (daher wird er auch Pixhawk Cube genannt) zusammen mit der FMU (*Flight Management Unit*) verbaut wird. Durch diesen Cube sind die empfindlichen Sensoren schwingungsgedämpft. Die vorige Verbauungsart hatte immer ein Problem dargestellt, da die Sensoren direkt auf der Platine gelötet waren. Seit Sommer 2017 ist auch der Pixhawk 3 erhältlich. Er hat einige Upgrades und zusätzliche Eigenschaften [8]. In dieser Arbeit wird der Pix32 PX4 2.4.6 Pixhawk (Abbildung 9) verwendet. Pix32 ist eine Alternative zu den Pixhawk-Boards und entspricht technisch dem Pixhawk 1. Er wird von der Firma Holybro mit Sitz in Shenzhen China und San Diego USA hergestellt.

3.1.1.1 Eigenschaften und Schnittstellen von Pix32

Eigenschaften	Schnittstellen		
<ul style="list-style-type: none"> • Main System-on-Chip: STM32F427 <ul style="list-style-type: none"> ○ CPU: 32-bit STM32F427 Cortex M4 core with FPU ○ RAM: 168 MHz/256 KB ○ Flash: 2 MB • Failsafe System-on-chip: STM32f103 • Sensors: <ul style="list-style-type: none"> ○ ST Micro L3GD20 3-axis 16-bit Gyroscope ○ ST Micro LSM303D 3-axis 14-bit Accelerometer / Magnetometer ○ Invensence MPU 6000 3-axis Accelerometer / Gyroscope ○ MEAS MS5611 Barometer • Input Voltage: 2~10s (7.4~27V) 	<ul style="list-style-type: none"> • 1x I²C • 2x CAN • 3.3 and 6.6 ADC inputs • 5x UART (serial ports) • Spektrum DSM Satellite compatible input • Fubata S.BUS compatible input and output • PPM sum signal • RSSI (PWM or signal) input • SPI • External microUSB 		
			
Pixhawk 1	Pix32	Pixhawk 2	Pixhawk 3

Quelle: https://docs.px4.io/en/flight_controller/pixhawk_series.html

Tabelle 4: Pixhawk Versionen

3.1.2 Ultraschallsensor (Sonarsensor)



Quelle: <https://www.sparkfun.com/products/retired/9492>

Abbildung 10: Ultraschallsensor

Der Pix32 besitzt ein integriertes Barometer zur Höhenmessung. Da das Barometer den Luftdruck misst, kann seine Messung von vielen verschiedenen Aspekten beeinflusst werden. Luftdruckänderungen werden zum Beispiel durch den Luftstrom der Propeller oder durch Luftstöße von zugeschlagenen Türen verursacht. Aus diesen Gründen wird in dieser Arbeit ein Ultraschallsensor (Sonar) zur Messung der Flughöhe bevorzugt. Der in dieser Arbeit verwendete Sensor ist der MB1260 XL-MaxSonar-EZL0 der Firma Maxbotix und kann erst ab einer Höhe von 30cm vernünftige Werte liefern. Er hat einen maximalen Messbereich von 1068cm.

Abbildung 11 zeigt einen Vergleich der Barometermessung mit der Sonarmessung. Die Barometermessung ist stark verrauscht, was einen negativen Einfluss auf die Regelung hat.

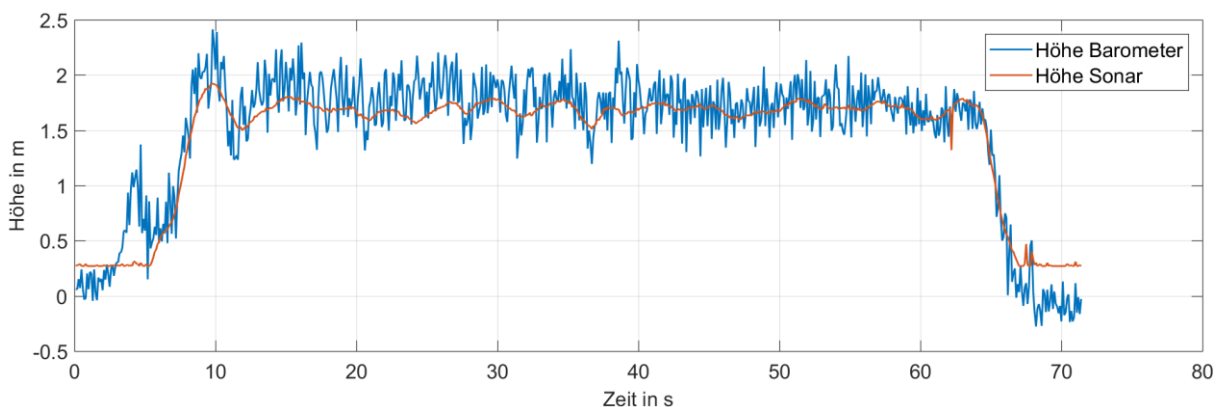


Abbildung 11: Vergleich Sonarsensor und Barometer

Der Ultraschallsensor ermittelt die Entfernung zu einem Objekt mittels Laufzeitmessung von Ultraschallwellen zwischen dem ausgesendeten Signal und dem empfangenen Echo. Über die Ausbreitungsgeschwindigkeit kann dann der zurückgelegte Weg ermittelt werden. Nachteil dieses Sensors ist der sogenannte Blindbereich, das ist ein Bereich sehr nahe am Sensor, in dem nicht gemessen werden kann.

3.1.3 Optical-Flow-Kamera



<https://de.aliexpress.com>

Abbildung 12: Optischer-Flow-Kamera (PX4Flow)

Der optische Fluss (engl. *Optical flow*) wird als Vektorfeld der Verschiebung der Grauwert- oder Farbpunkte, zwischen zwei oder mehr Bildern gesehen. Als Daten liegen meist zwei Bilder oder eine ganze Bildsequenz vor, wobei es zwischen zwei aufeinander folgenden Bildern kaum Unterschiede geben sollte. Um ein Maß der Unterschiedlichkeit zwischen zwei aufeinanderfolgenden Bildern zu erhalten, wird die Summe der absoluten Differenzen (engl. **Sum of Absolute Differences (SAD)**) gebildet. Die SAD aus zwei Bildern B_1 und B_2 berechnet sich wie folgt:

$$SAD = \sum_{x=0}^{b-1} \sum_{y=0}^{h-1} |B_2(x, y) - B_1(x, y)|, \quad (4)$$

wobei b und h die Breite und die Höhe der Bilder bezeichnen, x und y die einzelnen Pixel.

Ein neues Objekt, eine Änderung der Beleuchtung oder starke Einflüsse auf die vorhandenen Grauwerte dürfen nicht vorkommen, sonst ergeben sich Probleme bei der Zuordnung der Grau- oder Farbwerte [9]. Die Höhe ist auch für diese Messung wichtig und wird dem Ultraschallsensor entnommen. Die Optical-Flow-Kamera ist am Kopter in Flugrichtung zu montieren, anderenfalls muss der Winkel in der Software angepasst werden. Diese Technik findet beispielsweise auch in optischen Computermäusen Anwendung.

3.1.4 Telemetrie Modul



Quelle: <https://ru.aliexpress.com/item/F450-Quadcopter-Rack-Kit-Frame-APM2-6-and-7M-GPS-2212-920KV-simonk-30A-9443-props/32755213410.html>

Abbildung 13: 433MHz Radiotelemetrie

Nachdem die Vicon-Daten in Matlab verarbeitet werden, müssen sie drahtlos an den Kopter übermittelt werden. Dafür wird das FPV Telemetrie Modul verwendet. Es besteht aus einem Groundmodul, welches an den PC über einen USB-COM-Port angeschlossen wird und einem Airmodul, welches an den Flugcontroller über den GPS-Port angeschlossen wird.

3.1.5 Fernsteuerung

Als Fernsteuerung wird der DX7-Sender der Firma Spektrum verwendet. Es handelt sich um einen 7-Kanal-Sender, der verschiedene Funktionen bietet. Die ersten vier Kanäle sind für Gas, Pitch, Roll und Yaw vorbehalten. Die übrigen sind frei belegbar. Sie können beispielsweise für die Ein- und Ausschaltung eines Sensors während des Flugs oder für die Änderung eines Regelparameters verwendet werden. In dieser

Aufgabe wird der Sender nur zum Starten und Landen benutzt. Der Rest erfolgt automatisch.

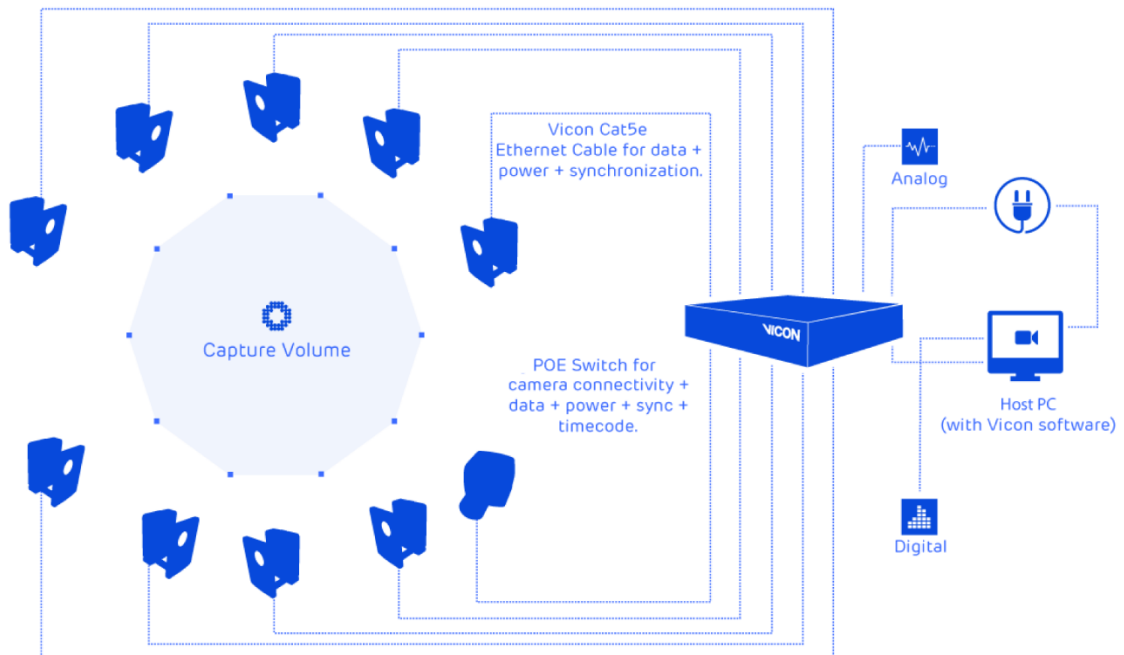


Quelle: <https://www.horizonhobby.de/p/spektrum-dx7-7-kanal-dsmx-einzelsender-multimode.htm?SessionId=&a=article&ProdNr=094SPMR7000EU>

Abbildung 14: Spektrum DX7 Fernsteuerung

3.1.6 Vicon System

Ein Motion Capture- oder Bewegungserfassungssystem ist ein System, das die Position eines Objekts mit Hilfe von hochauflösenden Kameras und aktiven oder passiven Reflektoren erfassen kann. Die Kameras sind um das Objekt herum – und in einer bestimmten Höhe anzubringen (Abbildung 15), sodass man darunter ein Erfassungsvolumen erhält. Aktive Reflektoren besitzen eine eigene Spannungsversorgung und können Signale an die Kameras schicken, während passive Reflektoren (auch Marker genannt) spannungslos sind und die aus den Kameras gesendeten Signale reflektieren. Die sogenannte Workstation sammelt und verarbeitet die Rohdaten, indem sie die zweidimensionalen Daten aus jeder Kamera nimmt und sie mit den Kalibrierungsdaten kombiniert, um eine digitale Bewegung in drei Dimensionen zu erstellen. Diese Daten werden an den PC weitergegeben und stehen dann dem Anwender zur Verfügung.



Quelle: <https://www.vicon.com/>

Abbildung 15: Bewegungserfassung mit Vicon [10]

3.1.7 Weitere Hardware

Für den Pixhawk gibt es noch zusätzlich verschiedene optionale Hardware; beispielsweise besteht die Möglichkeit, eine Videokamera am Kopter zu montieren, welche ihre Aufnahmen per Funksignal an eine Bodenstation sendet. Mit einer entsprechenden Videobrille ist damit ein sogenannter FPV-Flug möglich (*First Person View*). Das heißt der Pilot steuert den Quadrocopter aus der Ich-Perspektive, als wäre er selbst am Bord. Andere mögliche Erweiterungen sind auf der Webseite ardupilot.org [11] erklärt.

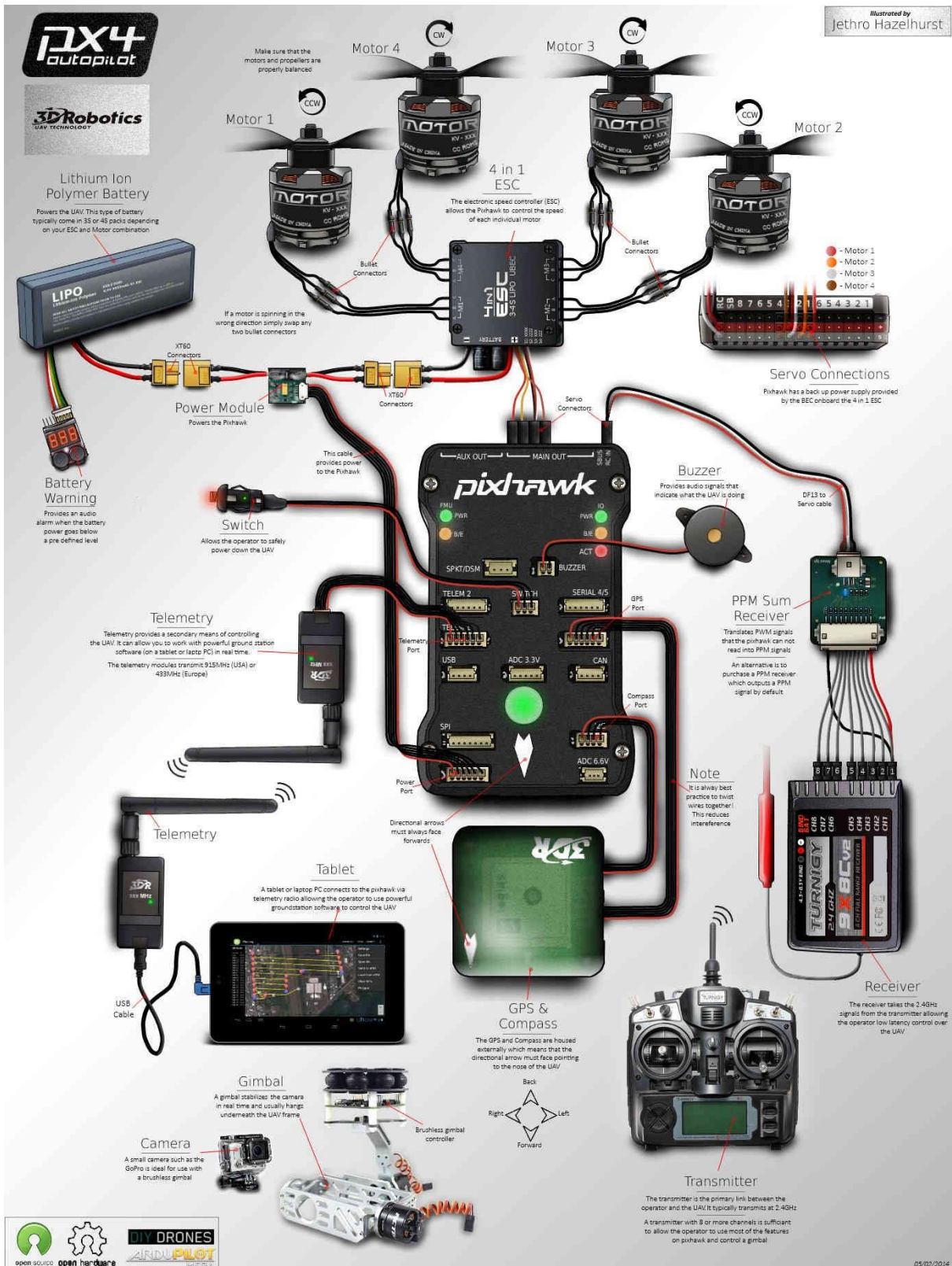


Abbildung 16: Pixhawk mögliche Erweiterungen

3.2 Software

3.2.1 Matlab

Die Firma Vicon bietet ein Matlab-Skript an, das die umgerechneten Rohdaten über die Lage des Objekts und seine Ausrichtung im Raum ausgibt. Die Ausgabe ist die Entfernung des Objekts in Meter vom Ursprung in kartesischer Form. Daher wird Matlab auch für die Umrechnung sowie das Senden der Koordinaten benutzt.

3.2.2 Mission Planner

Mission Planner ist ein Bodenkontrollprogramm, das dem Nutzer verschiedene und hilfreiche Funktionen anbietet. Unter anderem:

- Installieren und Aktualisieren von Firmware.
- Einrichten und Konfigurieren des Kopters.
- Planen und Speichern von autonomen Missionen (für Outdoor-Flüge).
- Herunterladen und Analysieren der Log-Daten, die vom Kopters während des Flugs aufgezeichnet werden.
- Live-Überwachen der Flugdaten während des Flugs, z. B. mit Hilfe des Telemetrie-Moduls aus Punkt 3.1.4.



Abbildung 17: Screenshot aus Mission Planner

3.2.3 Vicon Motion Capture Tracker

Vicon Motion Capture Tracker ist ein Programm der Firma Vicon, das einfach zu benutzen ist und dem Benutzer den einfachen, schnell erlernbaren Umgang mit dem Vicon-System ermöglicht. Es bietet verschiedene Funktionen, wie z. B. Kalibrierung der Kameras, Festlegung des Koordinatensystems, Erstellung von Objekten usw.

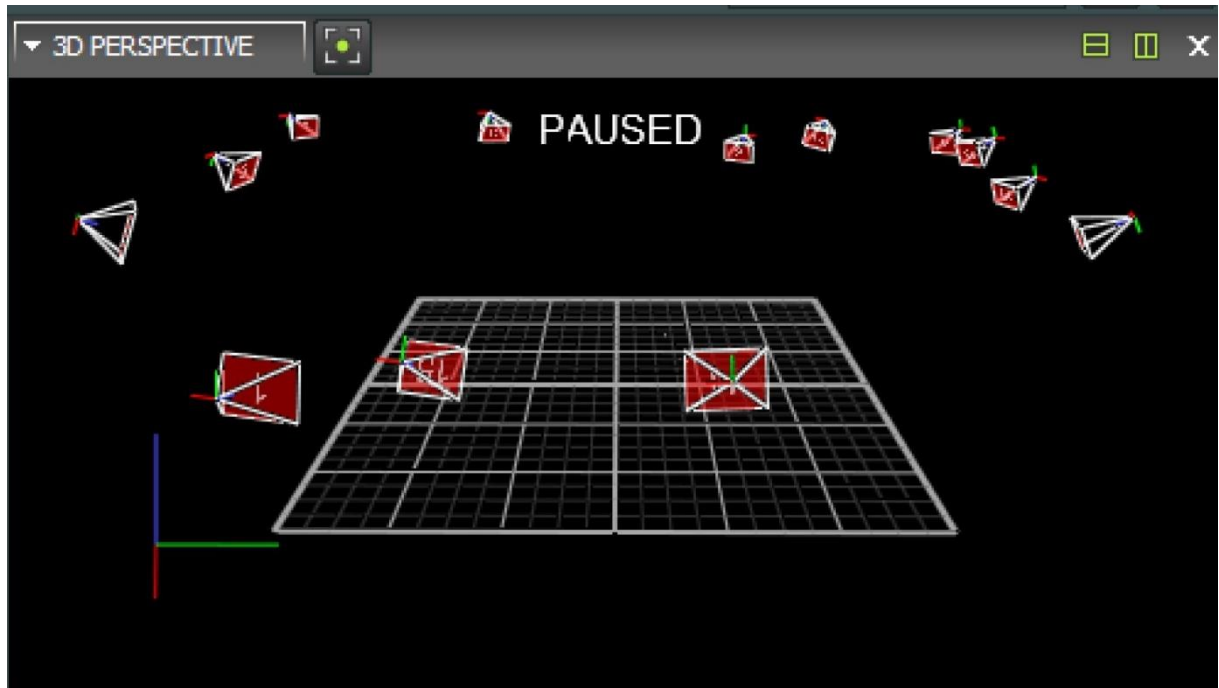


Abbildung 18: 3D-Perspektive des Vicon Motion Capture Trackers

4 Implementierung

4.1 Umrechnen der Koordinaten

In diesem Kapitel wird Schritt für Schritt erklärt, wie man die kartesischen Koordinaten x und y in geografische Koordinaten Breite (*lat*) und Länge (*lon*) umrechnet. Die geografischen Koordinaten in einem NMEA-Protokoll sind in Grad-Dezimalminuten angegeben. Daher ist es für diese Aufgabe nötig, die aus dem Vicon System erfassten Daten in Grad-Dezimalminuten umzurechnen. Auf elektronischen Karten wie zum Beispiel Google Maps sind die Koordinaten in Dezimalgrad angegeben. Um von Dezimalgrad zu Grad-Dezimalminuten zu gelangen, geht man wie folgt vor:

Die Koordinaten der Universität der Bundeswehr sind:

$$\text{Breite} = 53,569405^\circ$$

$$\text{Laenge} = 10,110888^\circ$$

Ein Grad entspricht 60 Winkelminuten und eine Winkelminute entspricht 60 Winkelsekunden:

$$1^\circ = 60'$$

$$1' = 60''$$

Die Vorkommastellen werden ohne Änderung übernommen, die Nachkommastellen werden mit 60 multipliziert. Die daraus resultierende Ganzzahl sind die Winkelminuten. Das Ergebnis wird dann an die Vorkommastellen gehängt.

$$0,569405^\circ \cdot \frac{60'}{1^\circ} = 34,16430' \quad (5)$$

Die Breite in Grad-Dezimalminuten ist dann:

$$53^\circ 34,16430'$$

und wird im NMEA-Protokoll angegeben als

$$5334,16430$$

Analog wird auch die Länge umgerechnet.

Ein drittes Format ist Grad-Minuten-Sekunden. Hier wird der Nachkommateil aus dem Format Grad-Dezimalminuten nochmals mit 60 multipliziert. Dadurch erhält man die Winkelsekunden, also:

$$0,16430' \cdot \frac{60''}{1'} = 9,858'' \quad (6)$$

Das Ganze sieht dann wie folgt aus:

$$53^\circ 34' 9,858''$$

Die Zurückrechnung erfolgt schneller mit Hilfe der folgenden Gleichung:

$$\begin{aligned} \text{Winkel in Grad} &= \text{Grad} + \frac{\text{Winkelminute}}{60'} + \frac{\text{Winkelsekunde}}{3600''} \quad (7) \\ &= 53^\circ + \frac{34'}{60'} + \frac{9,858''}{3600''} = 53,569405^\circ \end{aligned}$$

In Tabelle 5 sind alle drei Formate zusammengefasst

	Dezimalgrad	Grad-Dezimalminuten	Grad-Minuten-Sekunden
Breite	53,569405°	53° 34,16430'	53° 34' 9,858''
Länge	10,110405°	10° 06,65328'	10° 06' 39,197''

Tabelle 5: Die geografischen Koordinaten in drei verschiedenen Formaten

4.1.1 Einfachste Entfernungsmessung

Die Erdoberfläche ähnelt der Oberfläche einer Kugel. Jeder Punkt auf der Erdoberfläche kann damit durch zwei Koordinaten eindeutig beschrieben werden: Breite und Länge. Da wir uns auf einer kleinen Fläche bewegen, können wir die Erdkrümmung vernachlässigen und die Erdoberfläche als Ebene ansehen.

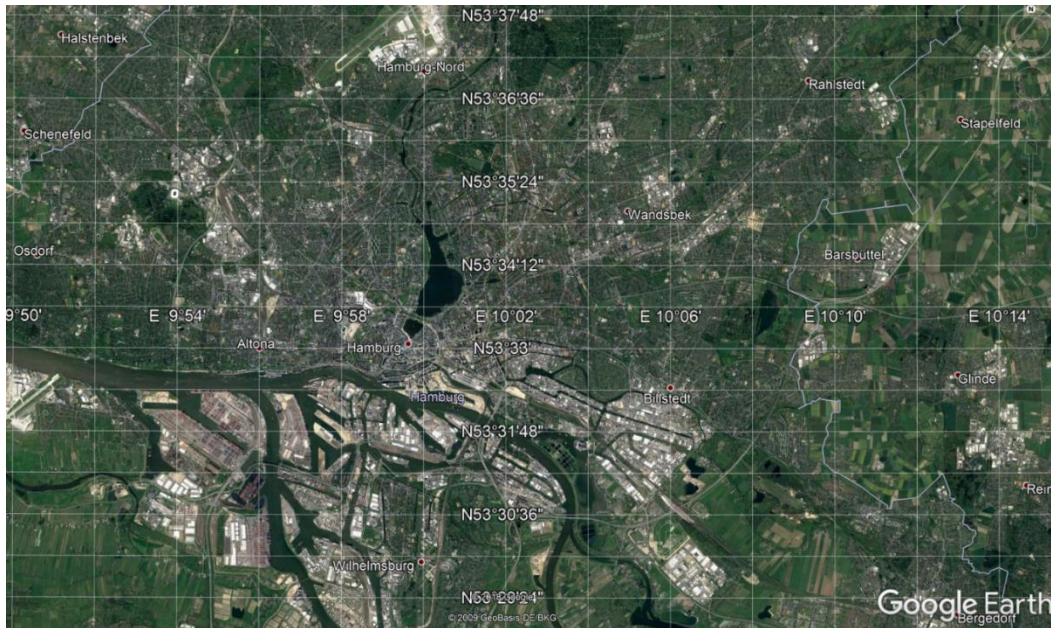


Abbildung 19: Karte von Hamburg mit Breiten- und Längengraden [12]

Wie man in Abbildung 19 sieht, stellen auf der Karte die Längens- und Breitenkreise gerade Linien dar und verlaufen parallel beziehungsweise senkrecht zueinander. Man kann daher die Entfernung einfach mit dem Satz des Pythagoras berechnen. Im Flugkäfig, in dem die Flugtests durchgeführt werden, wird das Koordinatensystem der Einfachheit halber so ausgelegt, dass die Breite auf der y -Achse und die Länge auf der x -Achse liegt.

Für die Entfernungsmessung wird das Gebäude H2 der Universität der Bundeswehr, in dem sich auch das Labor für Regelungstechnik befindet als Beispiel genommen (Abbildung 20).

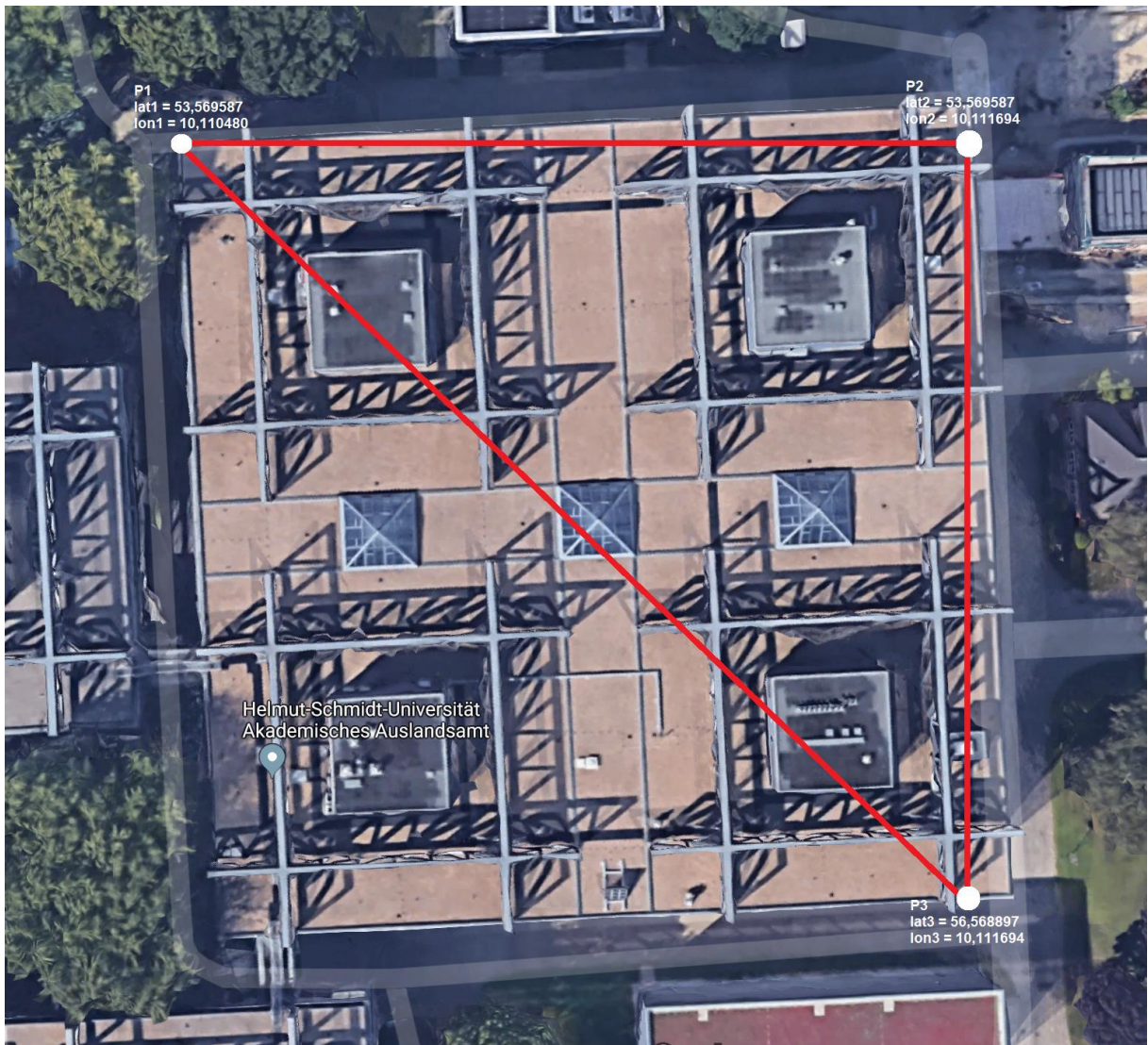


Abbildung 20: Gebäude H2 der Universität der Bundeswehr [12]

Die Punkte P_1 und P_2 werden so ausgewählt, dass sie die gleiche Breite und die Punkte P_2 und P_3 die gleiche Länge besitzen. So bilden die drei Punkte zusammen ein rechtwinkliges Dreieck.

	lat	lon
P_1	53,569587°	10,110480°
P_2	53,569587°	10,111694°
P_3	56,568897°	10,111694°

Tabelle 6: Geografische Koordinaten

Der Abstand zwischen den Punkten berechnet sich wie folgt:

$$|\overline{P_1P_2}| = d \cdot \cos(\text{lat}_{p1}) \cdot x_d = 0,080\text{km} \quad (8)$$

mit

$$x_d = \text{lon}_{p2} - \text{lon}_{p1} = 10,111694^\circ - 10,110480^\circ = 0,00022^\circ, \quad (9)$$

wobei $d \cdot \cos(\text{lat}_{p1})$ die Entfernung zwischen zwei Längengraden an diesem Ort ist, siehe Kapitel 2.2.1.

$$|\overline{P_2P_3}| = d \cdot y_d = 0,076\text{km} \quad (10)$$

mit

$$y_d = \text{lat}_{p2} - \text{lat}_{p3} = 53,569587^\circ - 53,568897^\circ = 0,00069^\circ \quad (11)$$

$|\overline{P_1P_3}|$ ist die Hypotenuse des Dreiecks:

$$|\overline{P_1P_3}| = \sqrt{(|\overline{P_1P_2}|)^2 + (|\overline{P_2P_3}|)^2} = 0,110\text{km} \quad (12)$$

Mit Hilfe dieser Gleichung kann man nun bestimmen, wie groß die Veränderung in Grad bei den geografischen Koordinaten für einen Meter beträgt. Wenn man nun Gleichung (8) nach x_d umstellt und für $|\overline{P_1P_2}| = 1\text{m}$ einsetzt, erhält man einen Skalierungsfaktor in Grad, der einem Meter entspricht:

$$x_{d_{1m}} = \frac{|\overline{P_1P_2}|}{d \cdot \cos(\text{lat}_{p1})} = \frac{1\text{m}}{d \cdot \cos(\text{lat}_{p1})} = 0,00001513^\circ \quad (13)$$

Dasselbe wird für die Breite mit Hilfe von der Gleichung (10) wiederholt:

$$y_{d_{1m}} = \frac{|\overline{P_2P_3}|}{d} = \frac{1\text{m}}{d} = 0,000008985^\circ \quad (14)$$

Einfacher gesagt, steht man am Punkt P_1 , hat die geografische Länge an diesem Punkt einen bestimmten Wert. Addiert man $y_{d_{1m}}$ auf diese Länge, so erhält man die geografische Länge für den Punkt, der sich einen Meter weiter rechts befindet.

Diese Faktoren $(x_{d_{1m}}, y_{d_{1m}})$ werden mit den kartesischen Koordinaten aus dem Vicon System multipliziert, um Werte von Grad in Meter umzurechnen. Dann wird das Ergebnis auf die ursprünglichen Koordinaten addiert, was wie folgt aussieht:

$$lon_{akt} = x \cdot x_{d_{1m}} + lon_0 \quad (15)$$

$$lat_{akt} = y \cdot y_{d_{1m}} + lat_0 \quad (16)$$

x und y bezeichnen die erfassten Werte auf der x - bzw. y -Achse, lon_0 und lat_0 bezeichnen die Breite und die Länge der Startposition. Wenn der Kopter sich nicht bewegt, bleiben x und y konstant. Bewegt sich der Kopter z. B. einen Meter nach vorne, wird y gleich eins und die gesamte Breite erhöht sich damit um einen Meter. So kann man alle Stellen auf der Ebene erreichen und dem Kopter ständig seine aktuelle Position senden.

Diese Methode funktioniert nur auf kleinen Flächen und ist für diese Aufgabe ausreichend. Will man größere Entfernungen berechnen, muss man die Erde wieder als Kugel betrachten und mit der sphärischen Trigonometrie arbeiten.

4.1.2 Exakte Entfernungsmessung

Betrachtet man die Erde als Kugel, kann man die Erdkrümmung nicht mehr vernachlässigen. Die Entfernung $|\overline{P_1 P_2}|$ von Punkt 4.1.1 entspricht jetzt der Bogenlänge zwischen P_1 und P_2 . Die Bogenlänge b eines Kreises berechnet sich nach der folgenden Gleichung:

$$b = \frac{\pi \cdot R \cdot \lambda}{180^\circ}, \quad (17)$$

wobei λ der eingeschlossene Winkel zwischen Erdmittelpunkt- P_1 und Erdmittelpunkt- P_2 ist. R bezeichnet der Erdradius. λ wird mit der folgenden Gleichung berechnet:

$$\lambda = \cos^{-1}[(\sin(lat_{p1}) \cdot \sin(lat_{p2}) + \cos(lat_{p1}) \cdot \cos(lat_{p2}) \cdot \cos(lon_{p2} - lon_{p1}))] [13] \quad (18)$$

Nach Einsetzen der Breite und Länge von P_1 und P_2 erhält man einen Winkel von $\lambda = 0,00072^\circ$. Für b ergibt sich also eine Entfernung von:

$$b = \frac{\pi \cdot 6378,137\text{km} \cdot 0,00072^\circ}{180^\circ} = 0,080\text{km} \approx \overline{|P_1 P_2|} \quad (19)$$

4.2 Erstellung des NMEA-Protokolls

Da die Informationen selber erzeugt und nicht von den Satelliten gesendet werden, ist es möglich, die einzelnen Werte so auszuwählen, dass sie für die Regelung am passendsten sind. Die Genauigkeit kann beispielsweise Werte von 1.0 bis 9.9 annehmen. Je kleiner sie ist, umso genauer wird die Messung, daher wird sie auf 1.0 gesetzt.

Die Anzahl der Satelliten kann zwischen sechs und zwölf (moderne Geräte können auch Daten aus 19 Satelliten gleichzeitig empfangen) variieren. Die für diese Aufgabe irrelevanten Informationen werden einfach weggelassen. Der Matlab-Code befindet sich auf der mitgelieferten CD.

4.2.1 NMEA-Generator-Flussdiagramm

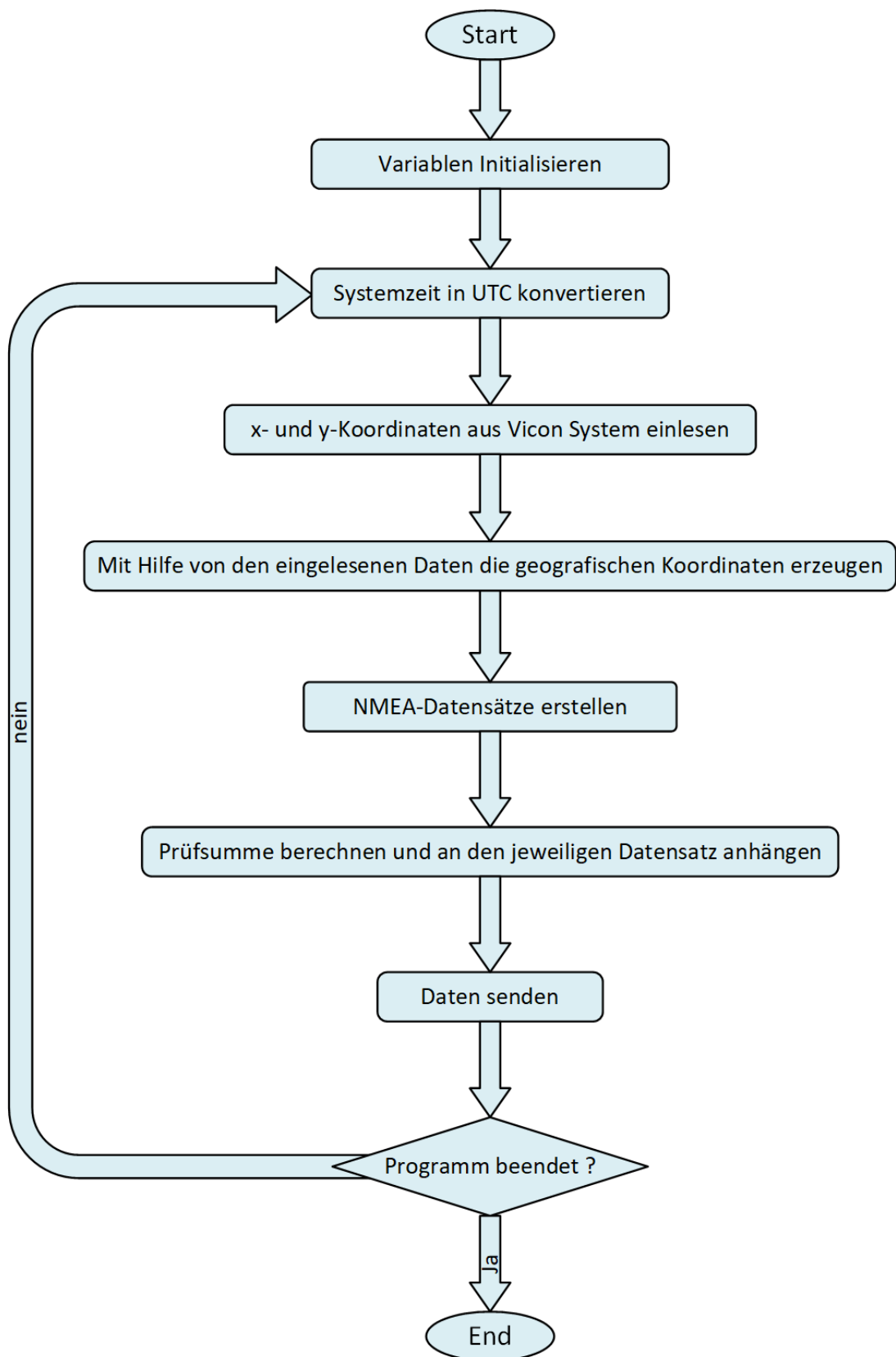


Abbildung 21: NMEA-Flussdiagramm

5 Flugtests

5.1 Kalman-Filter

In der Sensortechnik hat man häufig mit Unsicherheiten in Form von fehlerhaften Sensordaten zu tun. Diese Fehler führen dazu, dass abgeleitete Informationen über Sensoren nicht präzise, sondern ebenfalls fehlerbehaftet sind.

Ein Kalman-Filter, benannt nach seinem Entdecker Rudolf E. Kalman, dient allgemein zur Fusion mehrerer unabhängiger Informationsquellen, um die Unsicherheit zu reduzieren und somit die Qualität der abgeleiteten Daten zu verbessern. Naturgemäß sollen glaubwürdige Informationen höher gewichtet werden. [14]

Ist das beobachtete System nicht linear, kann ein erweitertes Kalman-Filter (engl. *Extended Kalman Filter (EKF)*) eingesetzt werden [2].

Der Flugcontroller verwendet integrierte Kalman-Filter zur Schätzung der Position, der Geschwindigkeit und der Orientierung des Kopters basierend auf Gyroskopen, Beschleunigungsmessern, Kompassen, Luftdruckmessungen und Fluggeschwindigkeit.

In Abbildung 22 ist die gemessene Höhe des Ultraschallsensors gegenüber der geschätzten Höhe des Kalman-Filters dargestellt. Der Kalman-Filter kann – mit Hilfe anderer Messdaten, wie beispielsweise den Barometermessdaten oder den vorherigen Messdaten, die Höhe besser abschätzen und die Messfehler ausfiltern. Die Ausreißer am Anfang und am Ende entstehen durch den Blindbereich des Ultraschallsensors, wenn er sich nah am Boden befindet.

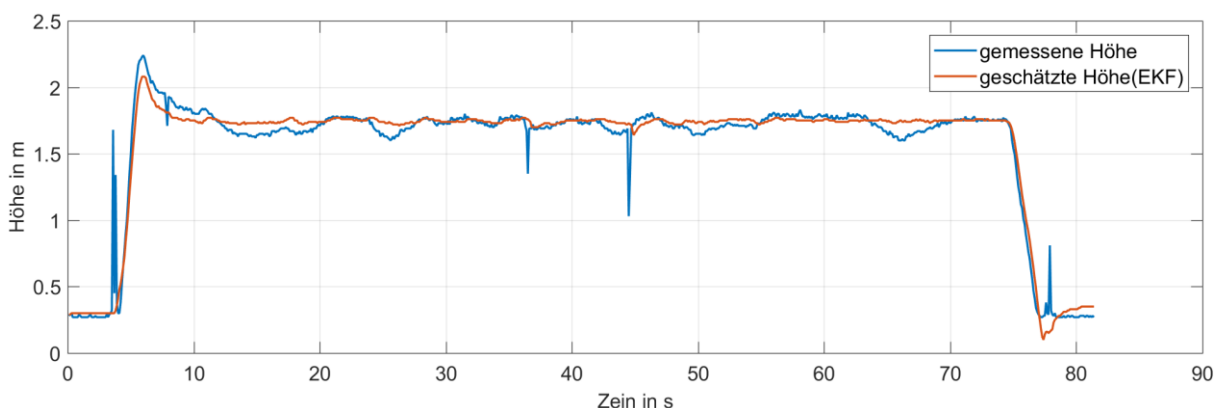


Abbildung 22: Vergleich gemessener und geschätzter Höhe

5.2 PID-Regler

Zum Regeln des Flugverhaltens besitzt der Kopter einen PID-Regler. Wird der Kopter von äußerlichen Effekten gestört, bringt ihn der PID-Regler in seine Ausgangslage zurück. Um diese Regelung zu schaffen besitzt der Regler drei wichtige Parameter.

- **Proportionalglied:** Es multipliziert die Regelabweichung mit seinem Verstärkungsfaktor K_p und gibt das Ergebnis unverzögert weiter. Es kann aber die Abweichung nicht komplett ausregeln.
- **Integralglied:** Es summiert die Regelabweichung über der Zeit auf und multipliziert die Summe mit dem Faktor K_i . Je länger eine Regelabweichung andauert, desto größer wird die Stellgröße des I-Reglers. Er arbeitet langsam im Vergleich zu den anderen Gliedern und hat den Vorteil, dass die Abweichung vollständig ausgeregelt wird.
- **Differenzialglied:** Es bewertet die Veränderung der Regelabweichung. Das heißt es berechnet die Änderungsgeschwindigkeit derselben. Bei einer konstanten Regeldifferenz bleibt die Stellgröße somit 0 [15].

Mathematisch kann ein PID-Regler so beschrieben werden:

$$y(t) = K_p \cdot e(t) + K_i \cdot \int_0^t e(\tau) d\tau + K_d \cdot \frac{d}{dt} e(t) , \quad (20)$$

wobei $e(t)$ die Regelabweichung ist.

5.3 Flugtests mit GPS

Die Flugtests finden im Labor für Regelungstechnik der Universität der Bundeswehr statt. Der Flugkäfig ist neun Meter lang, sechs Meter breit und ca. vier Meter hoch.

Es wird immer im Loiter-Modus geflogen. In diesem Modus versucht der Kopter seine Position durch GPS-Daten zu halten. Das Fliegen im Loiter-Modus ist normalerweise für draußen gedacht aber er wird hier auch im Innenbereich verwendet, weil die GPS-Daten schon zur Verfügung stehen. Armed³ man den Kopter, so speichert er seine aktuelle Position als Startposition (Siehe Matlab-Code, Startkoordinaten). Die

³ Armed: bewaffnet. Ein Signal von der Fernsteuerung aussenden, dass man gleich fliegen will. Der Flugcontroller gibt erst in diesem Moment Spannung an die Motoren, sonst sind sie aus Sicherheitsgründen spannungslos.

Startkoordinaten können willkürlich sein, wichtig ist nur, alle weiteren Daten beziehen sich auf diese Koordinaten. Zunächst muss sichergestellt werden, dass die gesendeten Daten auch vollständig und richtig beim Kopter ankommen. Da der Kopter alle Flugdaten aufzeichnet, kann man die gesendeten und die empfangenen Positionsdaten miteinander vergleichen.

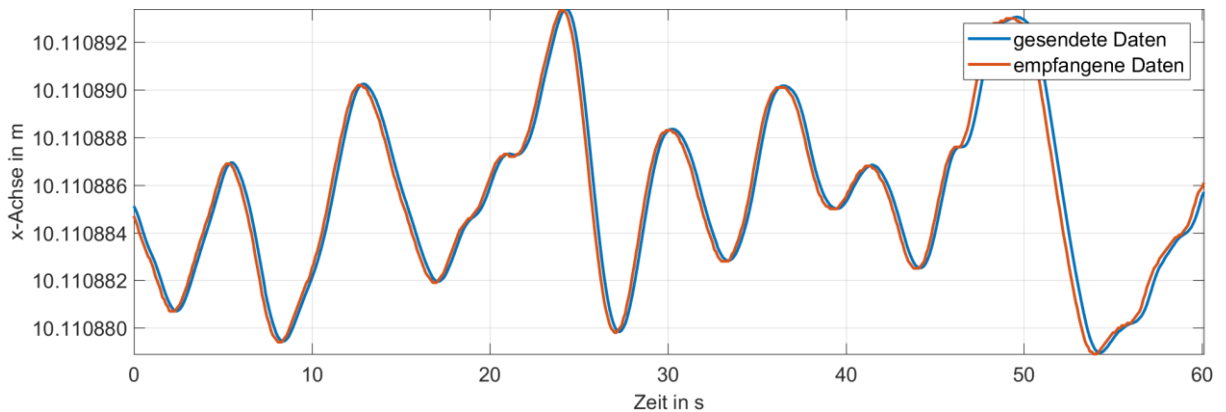


Abbildung 23: Vergleich gesendeter mit empfangenen Positionsdaten (x-Achse)

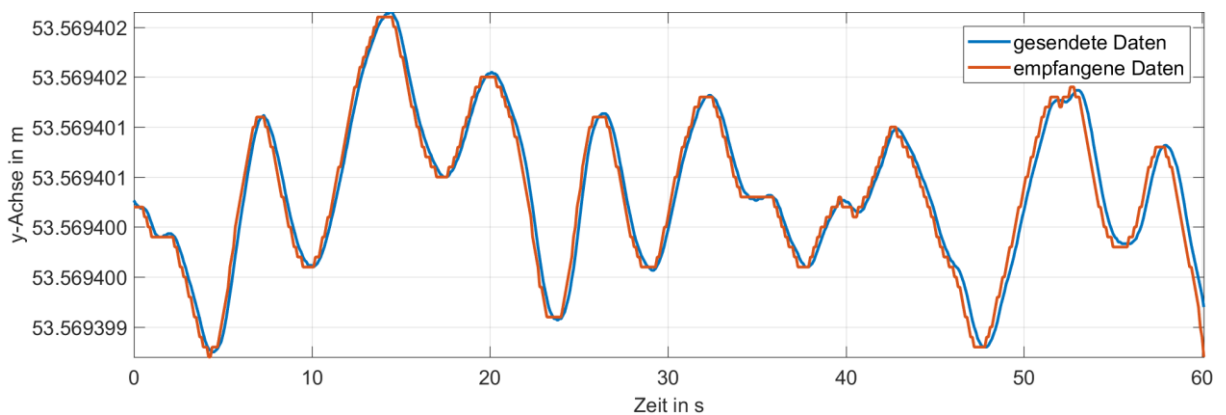


Abbildung 24: Vergleich gesendeten mit empfangenen Positionsdaten (y-Achse)

Abbildung 23 und Abbildung 24 zeigen einen Vergleich der Positionsdaten für beide Achsen. An den fast aufeinander liegenden Kurven ist zu erkennen, dass die Daten richtig übertragen werden. Die Kurven wurden manuell aufeinander gelegt, daher ist nur die Form der Kurve von Bedeutung. Die kleine Zeitverschiebung hat nichts mit dem Senden zu tun.

5.3.1 Kompass

Der Flugcontroller wird aus verschiedenen Quellen mit Daten versorgt, um eine optimale Regelung zu schaffen. Neben dem GPS verwendet er auch die Daten aus dem Kompass. Wenn nun die GPS-Daten mit den Kompassdaten nicht übereinstimmen, kann der Flugcontroller keine vernünftige Regelung schaffen.

5.3.1.1 Deklination

Als Deklination, auch Missweisung oder Ortsmissweisung genannt, bezeichnet man den Unterschied zwischen der magnetischen Nordrichtung und der geografischen Nordrichtung.

- **Der magnetische Nord** ist die Himmelsrichtung, in die eine Kompassnadel zeigt.
- **Der geografische Nord** ist die Richtung entlang des jeweiligen Meridians zum geografischen Nordpol – also zum Ort, an dem das nördliche Ende der Erdachse durch die Erdoberfläche tritt [6].

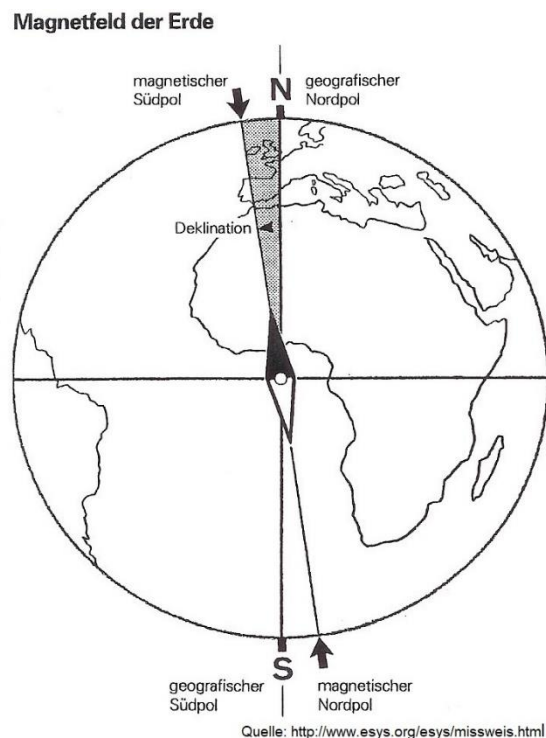


Abbildung 25: Deklination (Missweisung)

In Hamburg beträgt die Deklination im Moment ca. zwei Grad. Man hat also zwei Koordinatensysteme, einmal das geografische und einmal das magnetische System. Durch das Vicon-System kann man sozusagen das geografische Koordinaten System selber ausrichten. Im Zuge der vorliegenden Aufgabe wird es so gedreht, dass es auf dem geografischen Koordinatensystem liegt, die y -Achse ist also parallel zur Kompassnadel ausgerichtet. In dem Fall kann ist die Deklination null. Die Deklination kann im Mission Planner auf fest oder auf automatisch gesetzt werden. Im Fall automatisch wird sie dem NMEA-Protokoll entnommen.

5.3.1.2 Kompassstörung

Nach den ersten durchgeführten Flügen wurde festgestellt, dass es im Labor starke Kompassstörungen gibt. Der Quadropter hielt seine Position für ein paar Sekunden, schwebte dann aber in verschiedene Richtungen langsam weg oder begann zu kreisen, was laut Entwickler auf Kompassstörungen hindeutet. Abbildung 26 zeigt einen 3D-Plot für einen Flug, bei dem der Kompass stark gestört ist. Es ist gut zu erkennen, wie der Kopter beginnt, in Kreisen zu fliegen.

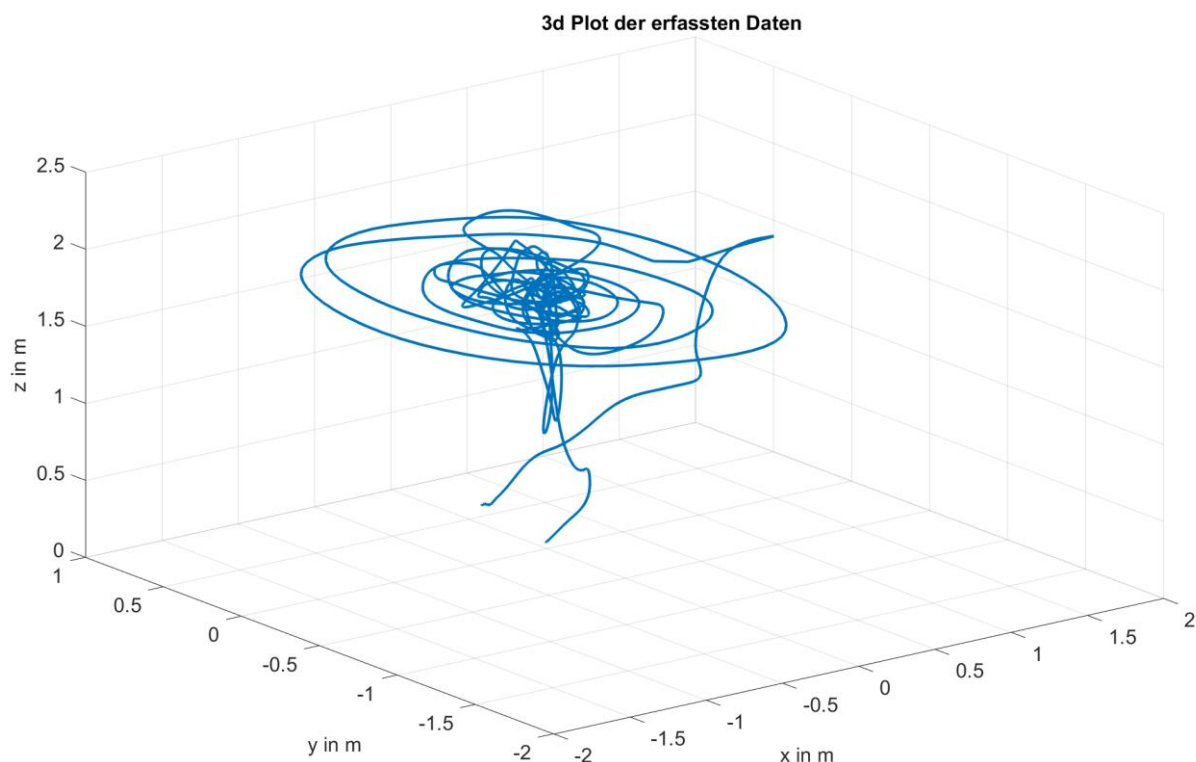


Abbildung 26: 3D Plot Kompassstörung

Der Flugcontroller besitzt einen integrierten digitalen Kompass (auch digitaler Magnetometer genannt), der das Erdmagnetfeld misst. Daher kann er auch durch andere Geräte, die Magnetfelder erzeugen, gestört werden. Störungen entstehen durch die im Labor installierten Stromleitungen, durch die Lautsprecher oder andere elektrische Geräte. Auch die Elektronik des Kopters selbst kann den Kompass stören. In Mission Planner kann man die aufgezeichneten Flugdaten über den Log Analyzer automatisch analysieren lassen. Abbildung 27 zeigt eine Autoanalyse für einen Flug. Wie man sieht, liegen alle wichtigen Werte im guten Bereich bis auf den Kompasswert.

```
Log File C:\Users\mario\OneDrive\Bachelorarbeit\logs\07_02\2018-02-07 14-00-02.log
Size (kb) 786.787109375
No of lines 10225
Duration 0:00:30
Vehicletype ArduCopter
Firmware Version V3.5.5
Firmware Hash 27229c83
Hardware Type
Free Mem 0
Skipped Lines 0
Test: Autotune = UNKNOWN - No ATUN log data
Test: Brownout = GOOD -
Test: Compass = FAIL - Large change in mag_field (47.55%)
Test: Dupe Log Data = GOOD -
Test: Empty = GOOD -
Test: Event/Failsafe = GOOD -
Test: GPS = GOOD -
Test: IMU Mismatch = GOOD - (Mismatch: 0.25, WARN: 0.75, FAIL: 1.50)
Test: Motor Balance = GOOD - Motor channel averages = [1241, 1249, 1193, 1191]Average motor output = 1218Difference
between min and max motor averages = 58
Test: NaNs = GOOD -
Test: OpticalFlow = FAIL - insufficient roll data pointsa
Test: Parameters = FAIL - 'THR_MIN' not found
Test: PM = GOOD -
Test: Pitch/Roll = GOOD -
Test: Thrust = GOOD -
Test: VCC = GOOD -
```

Abbildung 27: Autoanalyse der Flugdaten

Auf der Webseite Ardupilot.de [11] ist beschrieben, wie man die entstehenden Störungen beseitigen kann. Es wird empfohlen, den Flugcontroller soweit wie möglich von der anderen Elektronik zu trennen oder einen externen Kompass zu benutzen. Daher wird der Flugcontroller nach oben versetzt, davor war er direkt auf der Versorgungsplatine befestigt und es wird zusätzlich noch ein externes Kompass-Modul gebaut. Das externe Kompass-Modul ist ca. 15cm vom Kopter entfernt. Dadurch kann es bessere Werte liefern als der interne Kompass, siehe Abbildung 28, Abbildung 29 und Abbildung 30 (Rohdaten). Die y - und z -Achse sind nach dem Umbau weniger

verrauscht. Bei der x -Achse lässt sich aber keine Verbesserung erkennen. Das zeigte sich auch später, da der Kopter seine Position auf der y -Achse besser halten konnte. Der externe Kompass wird nun als primärer Kompass benutzt.

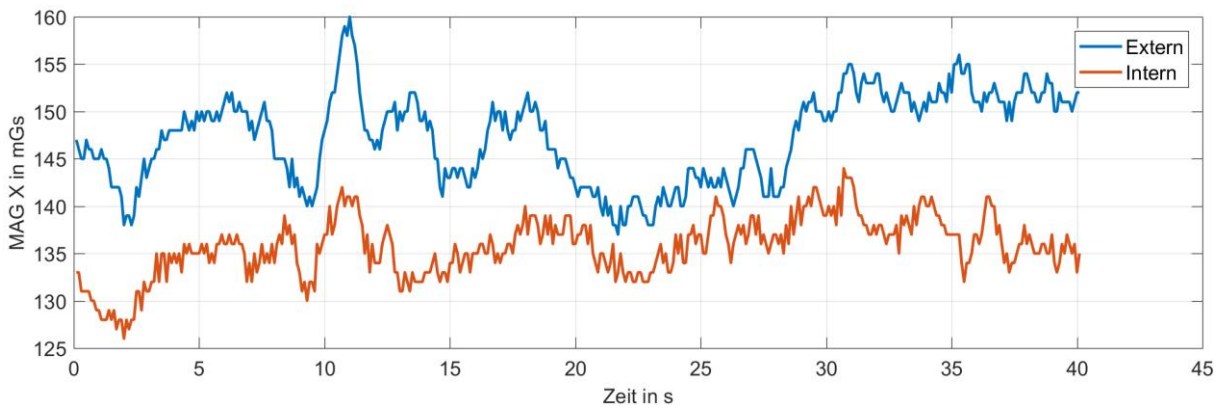


Abbildung 28: Externer Kompass im Vergleich zum internen (x-Achse)

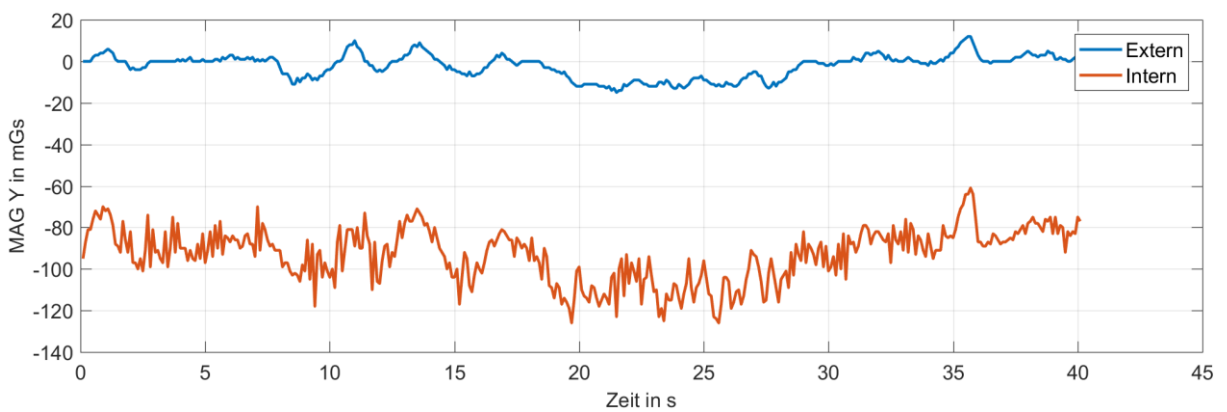


Abbildung 29: Externer Kompass im Vergleich zum internen (y-Achse)

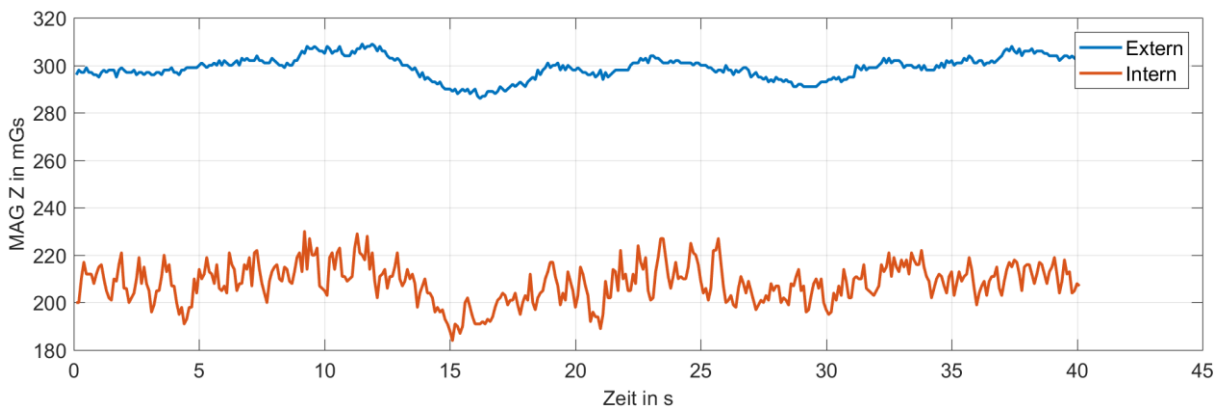


Abbildung 30: Externer Kompass im Vergleich zum internen (z-Achse)

5.3.2 Flugtests durch Tunen der Parameter

In diesem Kapitel wird versucht, die beste Positionsregelung durch Tunen der PID-Regelparameter zu finden. In Mission Planner unter „Extended Tuning“ kann man diese Parameter ändern. Der D-Anteil ist vom Entwickler deaktiviert bzw. auf null gesetzt, was aus einem PID-Regler ein PI-Regler macht. Es ist auch möglich, die Gewichtung der Messungen über das Kalman-Filter zu ändern. Diese wird so eingestellt, dass die GPS-Daten die größte Gewichtung gegenüber anderen Messungen haben.



Abbildung 31: Extended Tuning in Mission Planner

Es wurden mehrere Flugtests mit verschiedenen Parametern durchgeführt. Zu hohe Parameter bringen den Kopter zum Oszillieren. Bei zu niedrigen Parametern reagiert er schwach auf Abweichungen und schafft es nicht mehr zur Startposition zurückzufliegen. In Tabelle 7 sind drei Beispiele angegeben. Das Flugverhalten wird von oben nach unten besser.

Flugnummer	P-Anteil	I-Anteil	Abbildung
1	2	0,1	32 und 33
2	1	0,1	32 und 33
3	1,1	0,2	32 und 33

Tabelle 7: Tunen der Regelparameter

Nach der Änderung der Regelparameter hat sich ein besseres Flugverhalten gezeigt, siehe Abbildung 32 und Abbildung 33. Die Kurve in Gelb stellt den besten Flug dar. Auf der x -Achse ist die Abweichung von ca. 1m auf ca. 40cm und auf der y -Achse von ca. 40cm auf ca. 15cm gesunken. Es ist festzustellen, dass die Regelung auf der y -Achse besser ist, was sich auch in allen Flügen zeigte. Der quadratische Mittelwert (engl. **Root Mean Square (RMS)**) hat sich auch damit verbessert; er beträgt beim besten Flug (Gelbe Kurve) 8cm auf der x -Achse bzw. 4cm auf der y -Achse und berechnet sich folgendermaßen:

$$RMS = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n x^2} = \sqrt{\frac{x_1^2 + x_2^2 + \dots + x_n^2}{n}} \quad (21)$$

Der Grund dafür kann mit der Kompassstörung zusammenhängen. Unter dem Punkt 5.3.1.2 hat man gesehen, dass sowohl der interne als auch der externe Kompass keine vernünftige Werte für die x -Achse lieferten.

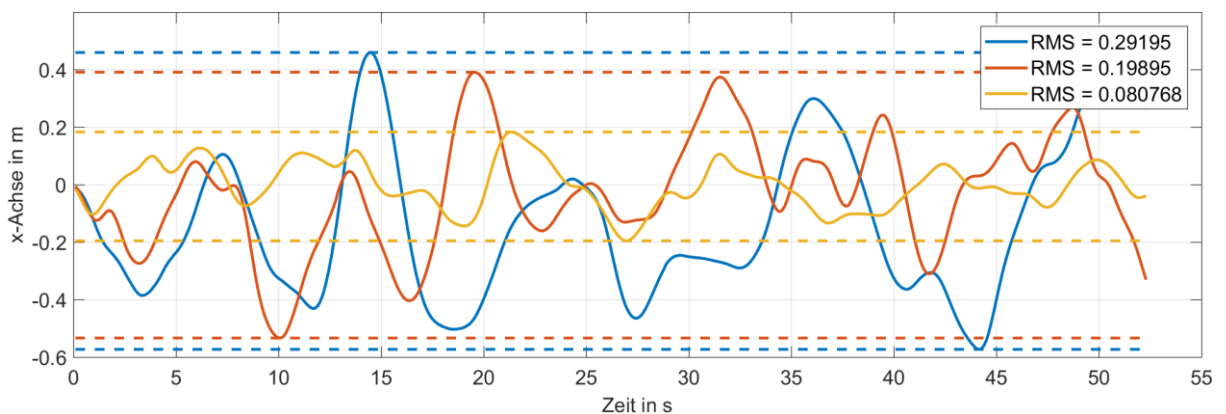


Abbildung 32: Vergleich der Abweichung von drei Flügen auf der x -Achse (GPS)

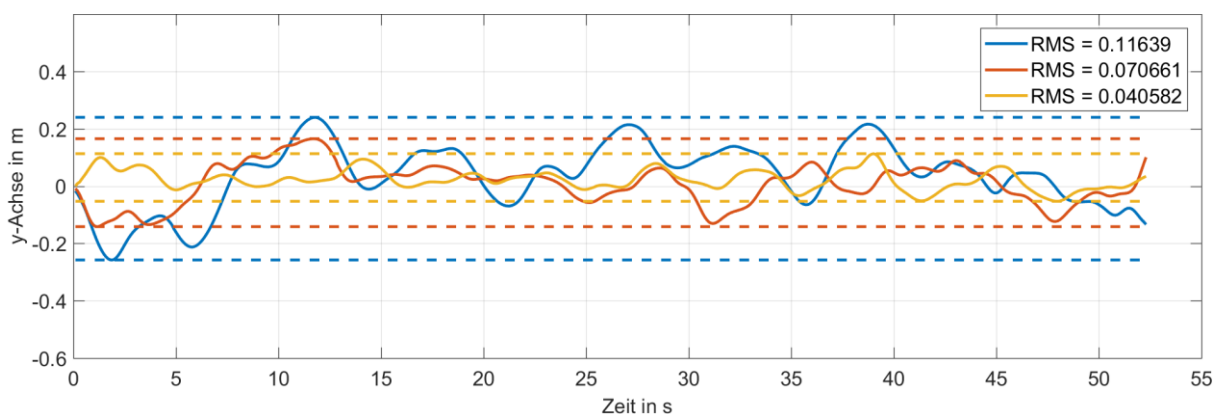


Abbildung 33: Vergleich der Abweichung von drei Flügen auf der y -Achse (GPS)

5.4 Flugtests mit der Flow-Kamera

Nach den Tests mit GPS wurden auch Flüge mit der Flow-Kamera durchgeführt. Abbildung 34 und Abbildung 35 zeigen einen Testflug. Der Kopter kehrt zu seiner Startposition zurück, hat aber eine größere Abweichung als beim GPS. Eine kleine Bewegung auf einer der drei Achsen kann die Messung der Flow-Kamera direkt beeinflussen. Das ist bei GPS nicht der Fall, was seine Regelung ruhiger macht.

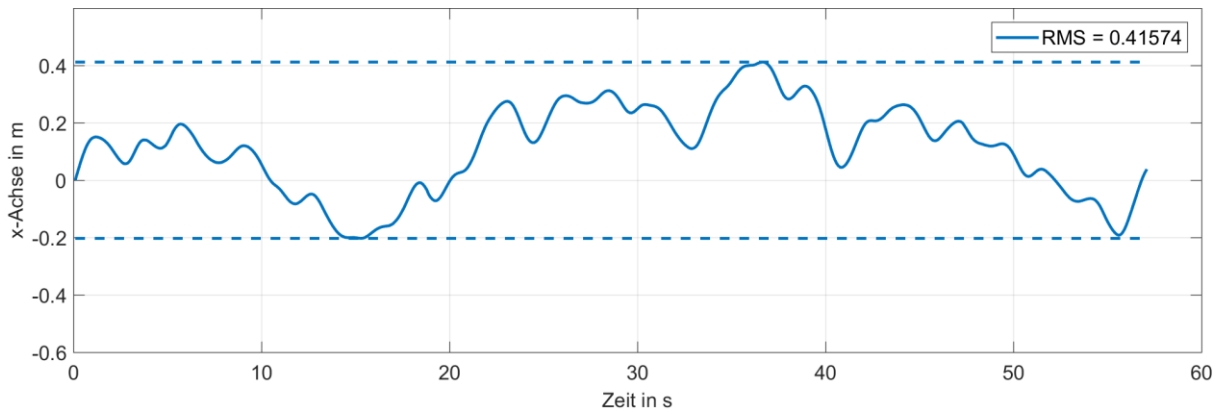


Abbildung 34: Abweichung auf der x -Achse (Flow-Kamera)

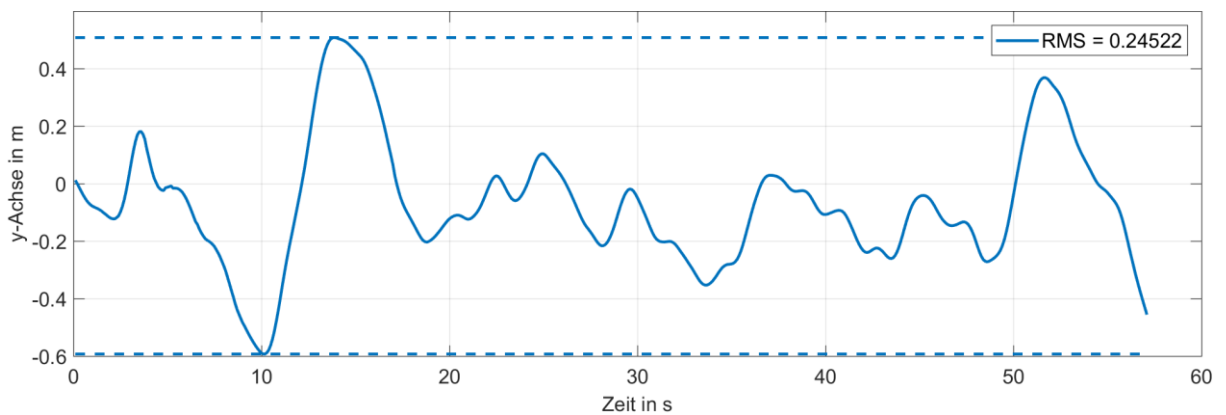


Abbildung 35: Abweichung auf der y -Achse (Flow-Kamera)

5.5 Vergleich von Flow-kamera- und GPS-Regelung

Nach der Untersuchung der beiden Regelmöglichkeiten ist festzustellen, dass die GPS-Regelung bessere und ruhigere Ergebnisse als die Flow-Kamera-Regelung erzielte. Natürlich ist es möglich, die Regelung mit der Flow-Kamera zu verbessern, sie wurde aber in dieser Arbeit nicht tiefergehend untersucht. In der untenstehenden Tabelle sind die Vor- und Nachteile der beiden Regelungen gegenübergestellt.

	Vorteile	Nachteile
GPS-Regelung	<ul style="list-style-type: none">• Höhenunabhängig	<ul style="list-style-type: none">• Braucht externe Datenquelle (Vicon)
Flow-Kamera-Regelung	<ul style="list-style-type: none">• Braucht keine externe Datenquelle	<ul style="list-style-type: none">• Höhenabhängig• Bewegung auf der Roll-, Pitch und Yaw-Achsen können die Messung direkt beeinflussen.

Tabelle 8: Vergleich GPS- mit Flow-Kamera-Regelung

6 Sicherheitshinweise

Immer wieder hört man von Kopterunfällen. Viele Piloten sind sich der Gefahren nicht bewusst. Die Propeller haben scharfe Kanten; sie können eine Drehzahl von bis zu 10000 Umdrehungen/Minute erreichen. Wenn ein Propeller den Körper des Piloten trifft, kann es zu schweren Verletzungen kommen. Beim Starten und Landen sollte der Pilot deswegen einen Abstand von mindestens vier Metern zum Kopter halten. Um das Verletzungsrisiko zu verringern, lohnt es sich, ein Propellerschutz anzuschaffen. Dieser besteht aus Kunststoffteilen, die unter den Propellern angebracht werden und es verhindern, dass die Propeller im Fall eines Unfalls den Piloten direkt treffen. Sie kosten lediglich 10€, können aber ein Leben retten.

Außerdem sollte man das Risiko, welches durch LiPo-Akkumulatoren entsteht, nicht vergessen. Diese sind immer in einer Brandschutzbox oder an einem sicheren Platz zu verwahren.

7 Zusammenfassung und Ausblick

Ob alle Anforderungen dieser Arbeit erreicht wurden, wird abschließend geprüft. Es ist festzustellen, dass der Kopter nun seine Position im Innenbereich unter Verwendung des selbstgenerierten GPS-Protokolls halten und – bis auf eine kleine Abweichung auf der Stelle schweben kann. Für einen kleinen Kopter ist diese Regelung ausreichend. Im Laufe dieser Arbeit wurde festgestellt, dass der Hauptgrund, warum der Kopter nicht ohne minimale Abweichungen an einem Punkt schweben kann, die Kompassstörung ist. Um eine genauere Positionsregelung zu erreichen, könnte man als denkbarer nächster Schritt die Kompassdaten mit Hilfe des Vicon-Systems selbst generieren und sie dem Kopter zur Verfügung stellen. Das Vicon-System ist in der Lage, auch die Rotation eines Objekts zu erfassen, was das Ersetzen der Kompassdaten ermöglicht.

Literaturverzeichnis

- [1] J. Meyer, „Indoornavigation eines Quadrocopters,“ 12 Mai 2010. [Online]. [Zugriff am 12 Februar 2018].
- [2] J. Wendel, Integrierte Navigationssysteme, Oldenbourg: Oldenbourg Wissenschaftsverlag GmbH, 2011.
- [3] „Elektronik Kompendium,“ [Online]. Available: <https://www.elektronik-kompendium.de/sites/kom/1201071.htm>.
- [4] M. Schrode, „magicmaps,“ [Online]. Available: <https://www.magicmaps.de/produktinfo/gps-grundlagen/wie-funktioniert-gps.html>. [Zugriff am 14 Februar 2018].
- [5] S. Seidel und K. Uhlenbrock, „Geographie Infothek,“ 2004. [Online]. Available: <https://www.klett.de/alias/1037707>. [Zugriff am 20.02.2018].
- [6] S. Thorsen, „time and date,“ [Online]. Available: <https://www.timeanddate.de/geographie/laengengrad-breitengrad>. [Zugriff am 15 Februar 2018].
- [7] K. Anja und W. Michael, „Kowoma,“ [Online]. Available: <http://www.kowoma.de/gps/>. [Zugriff am 13 Februar 2018].
- [8] „synosystems UAV,“ 08 August 2016. [Online]. Available: <http://blog.synosystems.de/pix32-px4-2-4-6-von-holybro/>. [Zugriff am 15 Februar 2018].
- [9] M. Patrik, 30 August 2005. [Online]. Available: https://www10.cs.fau.de/publications/theses/2005/Muench_SA_2005.pdf. [Zugriff am 04 März 2018].
- [10] Vicon, „Vicon,“ [Online]. Available: <https://www.vicon.com/what-is-motion-capture>. [Zugriff am 15 Februar 2018].
- [11] „Ardupilot,“ [Online]. Available: <http://ardupilot.org/copter/index.html#>. [Zugriff am 11 Februar 2018].
- [12] „Google Earth,“ [Online]. Available: <https://earth.google.com/web/>. [Zugriff am 15 Februar 2018]
- [13] „Kompf,“ [Online]. Available: <https://www.kompf.de/gps/distcalc.html>. [Zugriff am 04 März 2018].
- [14] J. Hertzberg, K. Lingemann und A. Nüchter, Mobile Roboter, Berlin-Heidelberg: Springer-Verlag, 2012.
- [15] B. Frank, „RN-Wissen,“ 22 Juli 2015. [Online]. Available: <http://rn-wissen.de/wiki/index.php?title=Regelungstechnik>. [Zugriff am 27.02.2018].
- [16] „Wikipedia, Die freie Enzyklopädie.,“ 15 Januar 2018. [Online]. Available: <https://de.wikipedia.org/w/index.php?title=Quadrocopter&oldid=172945291>. [Zugriff am 14 Februar 2018].
- [17] „magicmaps,“ [Online]. Available: <https://www.magicmaps.de/produktinfo/gps-grundlagen/wie-funktioniert-gps.html>.

- [18] „synosystems UAV,“ [Online]. Available: <http://blog.synosystems.de/pix32-px4-2-4-6-von-holybro/>.
- [19] M. Bauer, Vermessung und Ortung mit Satelliten, Berlin: Wichmann, 2017.
- [20] W. Peter, „EUROPÄISCHES SEGEL-INFORMATIONSSYSTEM,“ [Online]. Available: <http://www.esys.org/esys/missweis.html>. [Zugriff am 25 02 2018].

Anhang

Der Anhang zu dieser Arbeit befindet sich auf der mitgelieferten CD und ist bei Prof. Dr. Klaus Jünemann anzusehen.

Hier ist eine Übersicht über den Inhalt:

- Kopie der Arbeit als PDF
- Matlab Code
- Pixhawk Datenblatt
- Pixhawk Anleitung
- Spektrum DX7 Anleitung
- Ultraschallsensor Datenblatt
- Optical-Flow-Kamera Anleitung

Versicherung über die Selbstständigkeit

Hiermit versichere ich, dass ich die vorliegende Arbeit im Sinne der Prüfungsordnung nach §16(5) APSO-TI-BM ohne fremde Hilfe selbstständig verfasst und nur die angegebenen Hilfsmittel benutzt habe. Wörtlich oder dem Sinn nach aus anderen Werken entnommene Stellen habe ich unter Angabe der Quellen kenntlich gemacht.

Hamburg, den 15. März 2018

Ort, Datum

Unterschrift