

Initialsensorenbasierte Positionsregelung eines Indoor-Quadroopters

T3100

für die Prüfung zum
Bachelor of Science

im Studiengang Informatik
an der DHBW Karlsruhe

von

Michael Maag

17.05.2022

Bearbeitungszeitraum

6 Monate

Matrikelnummer

6170558

Gutachter der DHBW Karlsruhe

Prof. Dr. Marcus Strand

Michael Maag
Freidorfstraße 14
97957 Wittighausen

Eigenständigkeitserklärung

Ich versichere hiermit, dass ich meine Ausarbeitung T3100 mit dem Thema “Initial-sensorenbasierte Positionsregelung eines Indoor-Quadrokopters“ selbstständig verfasst und keine anderen als die angegebenen Quellen und Hilfsmittel benutzt habe. Ich versichere zudem, dass die eingereichte elektronische Fassung mit der gedruckten Fassung übereinstimmt.

Wittighausen, 17.05.2022

Unterschrift

Inhaltsverzeichnis

Abbildungsverzeichnis	I
Abkürzungsverzeichnis	II
Tabellenverzeichnis	III
Code-Verzeichnis	V
1 Einleitung	1
2 Problemstellung.....	2
3 Methodik	3
3.1 Begriffe.....	3
3.2 Eingesetzte Software	3
3.2.1 ROS	3
3.2.2 Ubuntu - Betriebssystem	4
3.2.3 Visual Studio - IDE	4
4 Regelsysteme.....	5
4.1 Regelkreis	5
4.2 Arten von Reglergliedern.....	6
4.2.1 P-Glied.....	6
4.2.2 I-Glied	6
4.2.3 D-Glied.....	7
4.2.4 PID-Regler.....	8
4.2.5 PT-Glied.....	8
4.2.6 Tt-Glied.....	8
4.3 Stabilität	8
5 Positionsregelung von Quadrooptern	10
5.1 Quadroopter als System.....	10
5.1.1 Orientierungsmerkmale.....	10
5.1.2 Geometrien	10
5.1.3 Freiheitsgrade.....	12
5.1.4 Pose	12
5.2 Positionsregelung von Quadrooptern mittels Pose.....	12
5.3 Erzeugung von Posen aus Beschleunigungsdaten	14
5.3.1 Berechnung	14
5.3.2 Signalaufarbeitung	14

6	Eingesetzte Hardware.....	20
6.1	COEX Drohne.....	20
6.1.1	Control Stack	20
6.1.2	Sensorik	20
6.1.3	Aufbau des Bausatzes.....	21
6.1.4	Inbetriebnahme.....	21
6.1.5	Mögliche Lösung der Aufgabenstellung.....	22
6.1.6	Troubleshooting.....	23
6.2	Parrot Drohne	24
6.2.1	Geometrie	25
6.2.2	Sensorik	25
6.2.3	Interaktion mittels <i>ROS</i>	25
6.2.4	Inbetriebnahme auf separatem Rechner.....	26
6.2.5	Troubleshooting.....	26
7	Implementierung.....	27
7.1	Software-Architektur	27
7.1.1	Package-Konzept	27
7.1.2	<i>Domain Package</i>	28
7.1.3	<i>DroneController Package</i>	28
7.1.4	<i>Adapter Package</i>	28
7.1.5	<i>Controller Package</i>	28
7.1.6	<i>parrot Package</i>	28
7.1.7	<i>PosControl Package</i>	28
7.2	Domain Layer.....	29
7.3	Application Layer - <i>DroneController Package</i>	30
7.4	Adapter Layer	31
7.5	PlugIn Layer	32
7.5.1	<i>parrot Package</i>	32
7.5.2	<i>Controller Package</i>	32
7.5.3	<i>PosControl Package</i>	33
7.5.4	<i>calling Package</i>	33
7.5.5	<i>threading Package</i>	34
7.5.6	<i>coex Package</i>	35
8	Ergebnis	37
8.1	Analyse realer Flugdaten	37
8.1.1	Datenbasis	37
8.1.2	Verlauf des Fluges.....	39
8.1.3	Lecks der Datenübertragung	39

8.2	Signalverarbeitung	39
8.2.1	Ermittlung der dauerhaften Nullpunkt-Abweichung.....	39
8.2.2	Kalibrierung der Posenberechnung.....	39
9	Erweiterungen	42
9.1	Dedektion der Umgebung	42
9.1.1	Vorwärts-Berechnung	42
9.1.2	Rückwärts-Berechnung bei Ringschluss	42
9.2	Sensoriken.....	42
9.2.1	Abstandssensoren.....	42
9.2.2	Magnetometer	42
9.2.3	Kamera.....	42
9.2.4	GPS	42
10	Fazit und Ausblick.....	43
	Literaturverzeichnis	
	Anhang	

Abbildungsverzeichnis

1	Allgemeines Schema eines Regelkreises nach IEC60050-351 [6]	5
2	Sprungantwort eines P-Glieds	6
3	Sprungantwort eines I-Glieds	7
4	Sprungantwort eines D-Glieds	7
5	Sprungantwort eines PID-Glieds	8
6	Sprungantwort eines PT-Glieds	8
7	Orientierungsmerkmale eines Flugobjekts [17]	10
8	wirkende Kräfte am Quadrocopter in x -Anordnung (vgl. [2])	11
9	Geometrien von Quadrocoptern [1]	11
10	wirkende Kräfte für gerollten Quadrocopter (vgl. [13])	13
11	Originalkurve des Szenarios	15
12	Einfluss von Signalrauschen	17
13	Einfluss von Ausreißern	18
14	Einfluss von konstanter Nullpunkt-Abweichung	19
15	Aufbau des Bausatzes für die Drohne <i>Clover 4.20</i>	21
16	Architektur des Regelungssystems	27
17	Klassendiagramm des <i>calling Packages</i>	34
18	Testflug: StatusID	38
19	Testflug Signalverarbeitung: Aufarbeitung a_z	40
20	Testflug Signalverarbeitung: Kalibrierung	41

Abkürzungsverzeichnis

ADC	Analog Digital Converter
GPIO	General Purpose Input Output
HAL	Hardware Abstraction Layer
I/O	Input/Output
IDE	Integrated Development Environment
IEEE	Institute of Electrical and Electronics Engineers
mm	Millimeter
POST	Power-on Self-Test
PWM	Puls Width Modulation
UART	Universal Asynchronous Receiver Transmitter
USB	Universal Serial Bus

Tabellenverzeichnis

Formelverzeichnis

1	Übertragungsfunktion des P-Glieds	6
2	Übertragungsfunktion des I-Glieds	7
3	Übertragungsfunktion des D-Glieds	7
4	Übertragungsfunktion des PID-Glieds	8
5	Übertragungsfunktion des PT-Glieds	8
6	Übertragungsfunktion des I-Glieds	40

Code-Verzeichnis

1	Befehl zum Öffnen des <i>OverrideRCIn</i> -Headers	24
2	Definition des Struct MD5Sum für das Template <i>OverrideRCIn</i>	24

1 Einleitung

“Über den Wolken muss die Freiheit wohl grenzenlos sein.“

aus dem Lied *Über den Wolken* von Reinhard Mey, 1973 [7]

Menschen sehnten sich seit jeher, fliegen zu können. **BESCHREIBUNG!** *irgendwas mit Ikarus*

BESCHREIBUNG! *Erste motorisierte Flüge - 1903 Gebrüder Wright*

Dronen als zukünftiges Verkehrsmittel für kurzstreckentransporte

Dronen auf dem Mars, Ingenuity Feb 2021

Anmerkung: Für diese Ausarbeitung werden fachliche Begrifflichkeiten vorausgesetzt, sofern diese nicht innerhalb der Ausarbeitung erklärt werden. Sind Begriffe für Lesende unklar, sind diese an geeigneter Stelle nachzuschlagen. Auf eine voranstehende Erklärung aller genutzten und nicht näher erklärten Begriffe wird in dieser Ausarbeitung verzichtet, um den Rahmen dieser Arbeit einhalten zu können.

2 Problemstellung

Fluggeräte jeder Ausführung können durch Umwelteinflüsse von ihrer Position abgetrieben werden (vgl. [8]). Während der Versuchsdurchführung von Studierenden der DHBW Karlsruhe an einem Quadroopter hat sich gezeigt, dass sich das Halten einer Position für Piloten mit geringer Erfahrung als schwierig erweist. Beschädigungen der in Laborversuchen eingesetzten Hardware ist zu vermeiden. Die Versuchsdurchführung *Höhenregelung*¹ soll für die Studierenden dahingehend vereinfacht werden, alsdass der eingesetzte Quadroopter die horizontale Bewegung selbstständig regelt.

Zu entwickeln ist eine Positionsregelung auf Basis der verfügbaren Beschleunigungswerte der Drohne. Optional kann die Regelung um ein bildgestütztes System erweitert werden.

Für die Positionsregelung können unterschiedliche Modi entwickelt werden:

- Halten der Position nach einer manuellen Positionsänderung
- Anfliegen von vorgegebenen Positionen. Hierbei ist ein Überschwingen möglichst zu vermeiden.

Durch die Anschaffung eines neuen Quadroopters erweitert sich die Aufgabenstellung um den Aufbau des Bausatzes und die Inbetriebnahme des Quadroopters, an dem die Positionsregelung implementiert werden soll. Die Anpassung der Versuchsbeschreibung an die geänderte Hardware ist gewünscht.

Eine tabellarisch angelegtes Lastenheft ist **BESCHREIBUNG!** *im Kapitel Anhang...* einzusehen.

¹Bei dem Laborversuch *Höhenregelung* sollen Studierende eine ROS-Node erstellen, welche eine konstante Flughöhe des Quadroopters ermöglicht. Hierzu wird als Rückführungsgröße des Regelkreises die Abstandsmessung zwischen Quadroopter und der darunterliegenden Ebene eingesetzt.

3 Methodik

BESCHREIBUNG!

Analyse des Systems „Drohne“ (Geometrie, Regel- und Messgrößen) Analyse möglicher Messgrößen (Beschleunigungssensorik, evtl. Bilddaten) Analyse realer Messdaten aus Flugversuchen Modellierung des Regelsystems Entwurf eines geeigneten Reglers Implementierung des entworfenen Reglers Testen und optimieren der Regelparameter

3.1 Begriffe

In diesem Kapitel sollen Begrifflichkeiten definiert werden, welche im allgemeinen Sprachgebrauch mehrdeutig belegt sind.

BESCHREIBUNG!

Drohne	Quadrokopter
--------	--------------

3.2 Eingesetzte Software

In diesem Kapitel sollen die für diese Projektarbeit eingesetzten Softwares genannt, um eine Reproduktion der Ergebnisse gewährleisten zu können.

Anmerkung: Die Ausführungen der eingesetzten Software beziehen sich auf den Umgang mit der Drohne *ArDrone 2.0*. Für die Interaktion mit der Drohne *Clover 4.20*, welche zum Projektbeginn eingesetzt wurde, wurde aktuellere Software eingesetzt.

3.2.1 ROS

Das *Robot Operating System (ROS)* ist eine *Open Source* Bibliothek, welche dem Nutzer eine modulare Architektur ermöglicht. Hierbei kommunizieren *Nodes* mittels *Messages* miteinander.(vgl. [11])

Die *ROS* Versionen werden jeweils mit Namen versehen, wobei die Anfangsbuchstaben der Versionen der alphabetischen Nummerierung entsprechen. In diesem Projekt wurde die *ROS*-Version *Indigo* eingesetzt. Diese Version wird auf Grund der Anforderungen des *Driver-Package ardroner_autonomy* eingesetzt. Der Einsatz der aktuellsten *ROS*-Version *noetic* in Zusammenspiel mit *Ubuntu 20.04* konnte das gewünschte Ergebnis nicht erzielen.

Die *ROS-Nodes* wurden mittels *catkin* kompiliert. Für eine korrekte Kompilierung müssen *CMakeList.txt*-Dateien den Befehl `add_compile_options(-std=c++11)` beinhalten

ten.

3.2.2 Ubuntu - Betriebssystem

Als Betriebssystem wird das *UNIX*-basierte Betriebssystem *Ubuntu* auf einer *virtuelle Maschine* in der Version 14.04 eingesetzt. Die Auswahl dieser Version gründet auf den Anforderungen der *ROSIndigo*-Version.(vgl. [12])

Die *virtuelle Maschine* wird durch die Software *VMWare Workstation 15 Pro* virtualisiert.

3.2.3 Visual Studio - IDE

Aus der Präferenz des Autors heraus wurde der Code mittels *Visual Studio 2019 (Community Editon)* erstellt, getestet und anschließend in den *catkin workspace* migriert.

4 Regelsysteme

In der Norm *DIN IEC 60050-351 (Internationales Elektrotechnisches Wörterbuch – Teil 351: Leittechnik)*, welche Begriffe der Regelungstechnik definiert, wird der Begriff *Regelung* wie folgt beschrieben: [6]

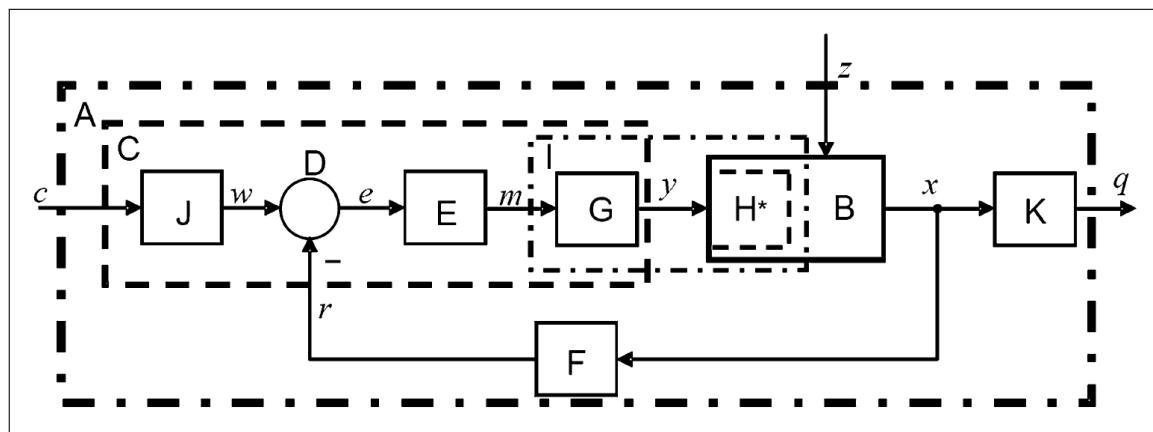
„Vorgang, bei dem fortlaufend eine variable Größe, die Regelgröße, erfasst, mit einer anderen variablen Größe, der Führungsgröße, verglichen und im Sinne einer Angleichung an die Führungsgröße beeinflusst wird.“

Anmerkung: Kennzeichen für das Regeln ist der geschlossene Wirkungsablauf, bei dem die Regelgröße im Wirkungsweg des Regelkreises fortlaufend sich selbst beeinflusst.“

In diesem Kapitel sollen regelungstechnische Grundlagen beschrieben werden.

4.1 Regelkreis

Im Allgemeinen grenzen sich die Konzepte *steuern* und *regeln* durch die Eigenschaft der Rückkopplung des Systems ab. Gesteuerte Systeme wirken lediglich auf Aktoren, wobei geregelte Systeme die Abweichung des *Ist*-Zustandes vom *Soll*-Zustand ermitteln und eine geeignete Veränderung erzielen sollen. (vgl. [6])



A	Regelungssystem	K	Bildung der Aufgabengröße
B	Regelstrecke	c	Zielgröße
C	Regeleinrichtung	w	Führungsgröße
D	Vergleichsglied	e	Regeldifferenz
E	Regelglied	m	Reglerausgangsgröße
F	Messglied	y	Stellgröße
G	Steller	z	Störgröße
H*	Stellglied	x	Regelgröße
I	Stelleinrichtung	q	Aufgabengröße
J	Führungsgrößenbildner	r	Rückführgröße

Abbildung 1: ALLGEIMEINES SCHEMA EINES REGELKREISES NACH ORN IEC60050-351 [6]

4.2 Arten von Reglergliedern

In diesem Kapitel sollen grundlegende Bausteine der Regelungstechnik beschrieben werden. Diesbezüglich erhebt dieses Kapitel keinen Anspruch auf Vollständigkeit. Auf eine detaillierte Beschreibung, welche unter anderem das Zeitverhalten betrachten, soll hier außen vor gelassen werden. Als weitere Einschränkung soll sich die Betrachtung der Bausteine ausschließlich auf zeitdiskrete Systeme beziehen.

4.2.1 P-Glied

Die Abkürzung P in der Bezeichnung *P-Glied* steht für *proportional*. Hierbei wird eine die Eingangsgröße um einen Faktor k_P verstärkt. **BESCHREIBUNG!** *Elektrotechnik oder sehr einfacher Regler* **BESCHREIBUNG!** *dauerhafte Regelabweichung*.

$$y_k = k_P * x_k \quad (1)$$

ÜBERTRAGUNGSFUNKTION DES P-GLIEDS

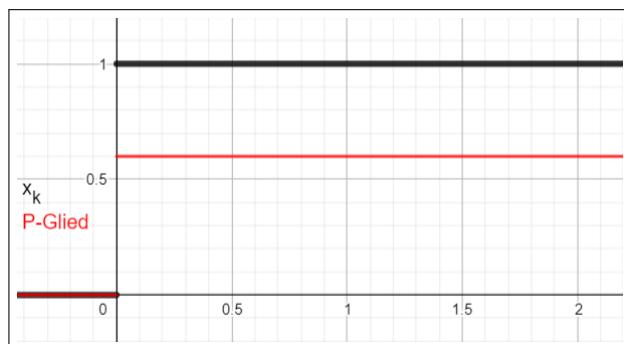


Abbildung 2: SPRUNGANTWORT EINES P-GLIEDS

Abbildung 5 zeigt charakteristischen Sprungantwort des *P-Glieds*. Hier wurde der Parameter k_P mit dem Wert 0,6 gewählt, um die Sichtbarkeit in der Abbildung zu erhöhen.

BESCHREIBUNG! [3] Seite 220

4.2.2 I-Glied

Wie sich aus dem Namen des *Integral-Glieds* ableiten lässt, bildet dieser Baustein ein Integral über dem Eingangssignal. Hierdurch können physikalische Umrechnungen oder Prozesse abgebildet werden. Als Beispiele kann an dieser Stelle der Füllstand eines Tanks oder die Ermittlung einer Geschwindigkeit aus Beschleunigungsdaten genannt werden.

$$y_k = y_{k-1} + k_I * x_k * \Delta t \quad (2)$$

ÜBERTRAGUNGSFUNKTION DES I-GLIEDS

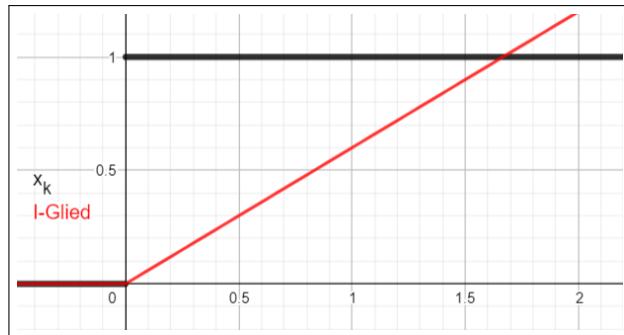


Abbildung 3: SPRUNGANTWORT EINES I-GLIEDS

4.2.3 D-Glied

In der betrachteten Literatur spielen D-Glieder keine signifikante Rolle. (vgl. [3] und [4]) Dennoch sollen sie hier als Grundlage für *PID*-Glieder beschrieben werden.

Bei einem *D-Glied* handelt es sich um ein differentielles Glied. Somit lässt sich hiermit die Veränderung des Eingangssignals ermitteln. (vgl. [9]) **BESCHREIBUNG! Diese Quelle iO?**

Das Ausgangssignal des *D-Glieds* kann durch folgende Formel berechnet werden, welche sich aus der Diskretisierung der Differenzationsfunktion ergibt.

$$y_k = k_D * \frac{x_k - x_{k-1}}{\Delta t} \quad (3)$$

ÜBERTRAGUNGSFUNKTION DES D-GLIEDS

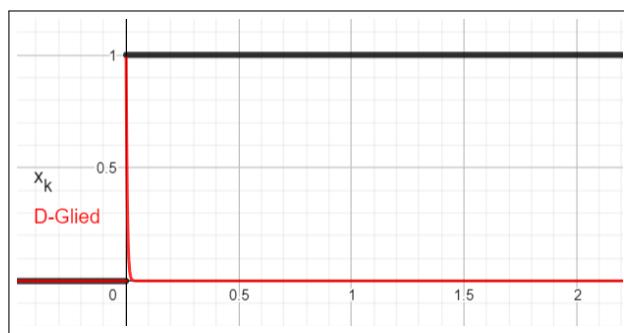


Abbildung 4: SPRUNGANTWORT EINES D-GLIEDS

Abbildung 4 zeigt die Sprungantwort eines *D-Glieds*. Diese ist ein Ausschlag, welcher für den Zeitschritt anhält, in dem sich die ansteigende Flanke des Sprungs befindet.

$$y_k = y_{k(P)} + y_{k(I)} + y_{k(D)} \quad (4)$$

ÜBERTRAGUNGSFUNKTION DES PID-GLIEDS

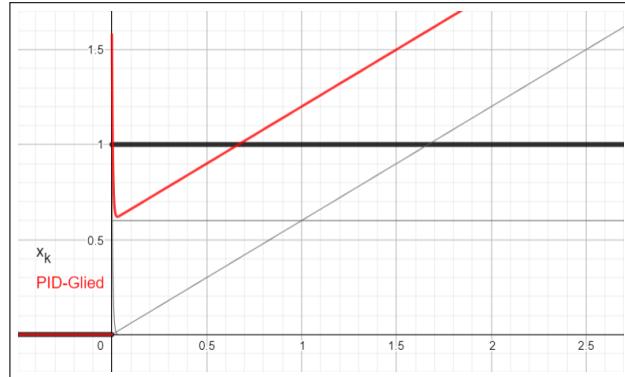


Abbildung 5: SPRUNGANTWORT EINES PID-GLIEDS

Abbildung 5 zeigt die Sprungantwort eines *PID-Glieds*. Hierbei setzt sich das Signal als Summe des P-, des I- und des D-Glieds zusammen, welche in grau angedeutet sind.

4.2.4 PID-Regler

4.2.5 PT-Glied

BESCHREIBUNG! *Dient der Abbildung realer Systeme, welche sich an einen Zustand anpassen müssen. Drehzahlen, Temperaturen etc.*

$$y_k = k_D * \frac{x_k - x_{k-1}}{\Delta t} \quad (5)$$

ÜBERTRAGUNGSFUNKTION DES PT-GLIEDS

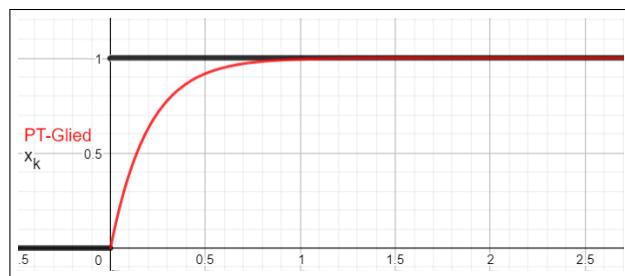


Abbildung 6: SPRUNGANTWORT EINES PT-GLIEDS

Abbildung 6 zeigt **BESCHREIBUNG!**

4.2.6 Tt-Glied

4.3 Stabilität

Die Stabilität eines Regelkreises beschreibt, ob der Regelkreis zum Schwingen neigt. Hierfür wird die Übertragungsfunktion des offenen Regelkreises analysiert. Das Schwin-

gen eines zu regelnden Systems ist zu vermeiden. (vgl. [3] und [10])

An dieser Stelle soll auf eine Beschreibung der Analyse der Stabilität von Regelkreisen verzichtet werden, um den Rahmen dieser Projektarbeit einhalten zu können. Als Schlagworte für interessierte Lesende sei hier das *Bode-Diagramm* und die *Ortskurve* genannt (vgl. [3] und [10]).

5 Positionsregelung von Quadrooptern

5.1 Quadroopter als System

5.1.1 Orientierungsmerkmale

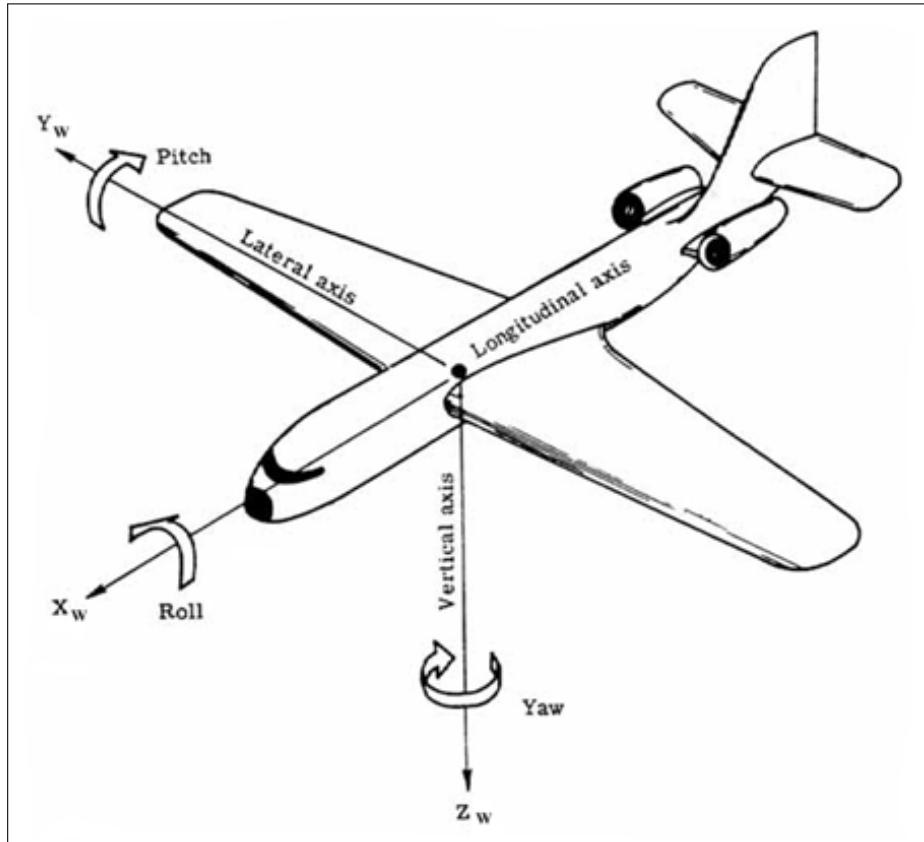


Abbildung 7: ORIENTIERUNGSMERKMALE EINES FLUGOBJEKTS [17]

Abbildung 7 zeigt die Orientierung eines beliebigen Flugobjektes am Beispiel eines Flugzeugs. Die Bezeichner beziehen sich auf ein kartesisches Koordinatensystem und beschreiben jeweils die Rotation um eine Raumachse.

5.1.2 Geometrien

Bei Quadrooptern handelt es sich um Fluggeräte mit vier Rotoren, welche horizontal angebracht sind. Der Auftrieb wird somit unmittelbar durch die Rotoren induziert.

Das Drehmoment der Rotoren des Quadroopters muss sich aufheben können, um eine unkontrollierbare Rotation um die z-Achse vermeiden zu können. Um die Agilität des Quadroopters beizubehalten zu können, sind die Drehrichtungen der Rotoren zu alternieren. (vgl. [1]) Abbildung 8 (Seite 11) deutet die Kräfte und aus der Rotationsgeschwindigkeit der Rotoren ableitbare Momente eines Quadroopters an. Dies soll als Einleitung für das Kapitel 5.1.3 *Freiheitsgrade* (Seite 12) dienen und wird an dieser Stelle nicht näher vertieft.

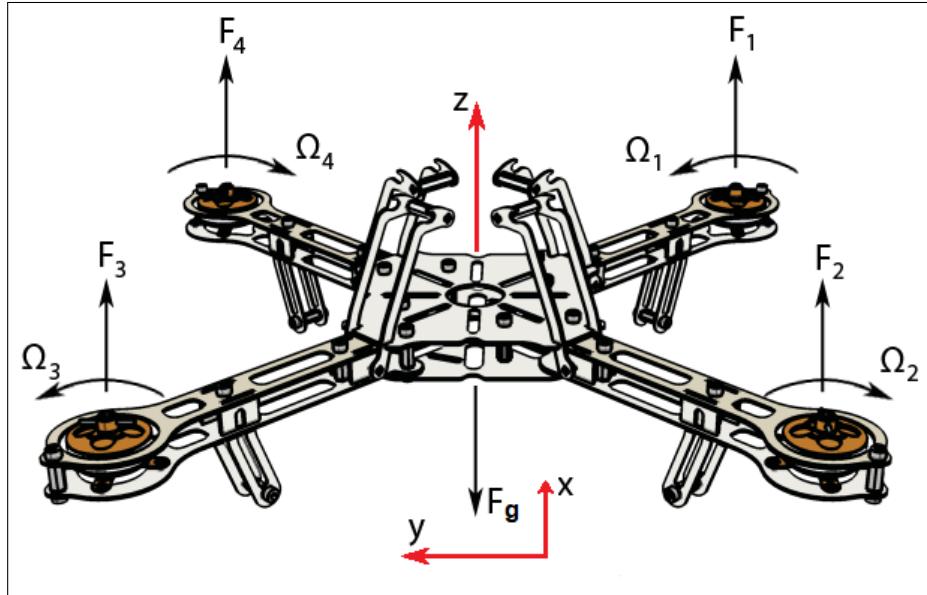


Abbildung 8: WIRKENDE KRÄFTE AM QUADROKOPTER IN x-ANORDNUNG (VGL. [2])

Abbildung 8 zeigt die wirkenden Kräfte an einem Quadrokopter in **x**-Anordnung. Die Achsen des Koordinatensystems sind in **rot** markiert. Alle mit *F* markierten Pfeile deuten Kräfte an. Die mit Ω markierten gebogenen Pfeile zeigen die Rotationsgeschwindigkeit der einzelnen Rotoren.

Die Rotoren von Quadrooptern können in zwei verschiedenen Anordnungen angebracht werden (siehe Abbildung 9 (Seite 11)).

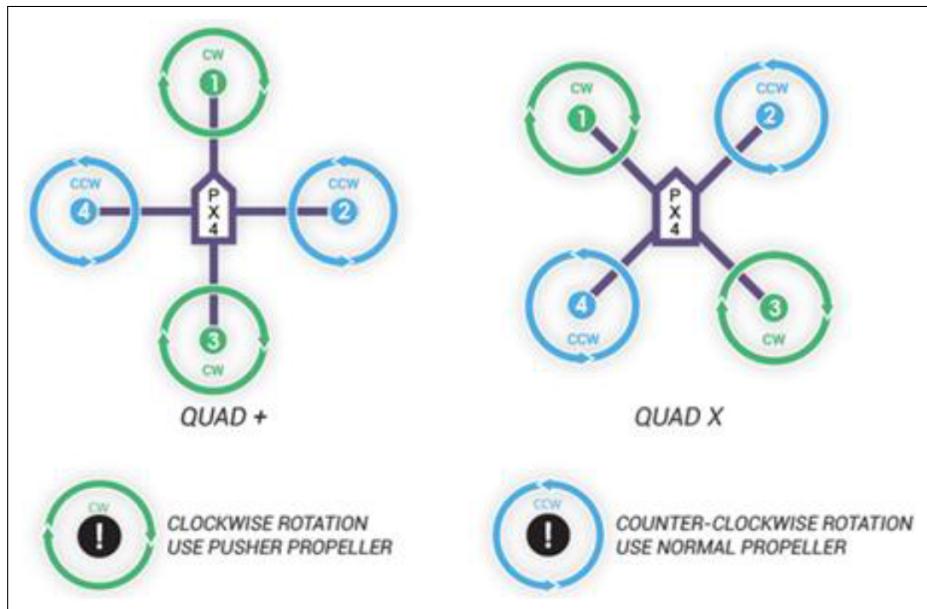


Abbildung 9: GEOMETRIEN VON QUADROKOPTERN [1]

+-Anordnung

In der +-Anordnung befinden sich die Rotoren auf den Objekt-Achsen des Quadroko-

pters. Die Nummerierung der Rotoren erfolgt gemäß Abbildung 9 (Seite 11) (links) im Uhrzeigersinn beginnend mit dem Rotor auf der positiven x-Achse.

x-Anordnung

Die **x**-Anordnung scheint nach online Recherchen weiter verbreitet. Eine mögliche Begründung findet sich in der weniger verdeckten Sicht für Frontkameras oder andere Anbaugeräte.

5.1.3 Freiheitsgrade

Einem Quadrokopter können sechs Freiheitsgrade zugewiesen werden, jeweils drei der Position und der Orientierung im Raum.

Nachfolgend wird physikalisch begründet, weshalb nur vier der genannten sechs Freiheitsgrade unabhängig regelbar sind.

Wird eine Kraft in der horizontalen Ebene induziert, beschleunigt der Quadrokopter entlang dieser Kraft. Eine solche Kraft wird durch eine Neigung um die x- beziehungsweise y-Achse hervorgerufen (siehe Abbildung 10 (Seite 13)). Aus den genannten Umständen lässt sich ableiten, dass sich eine geänderte Orientierung um die x- beziehungsweise y-Achse auf die Position des Quadroopters auswirkt.

5.1.4 Pose

Eine Pose ist die Positions- und Lagebeschreibung in einem Raum. **BESCHREIBUNG!**
quelle

lokale Pose

BESCHREIBUNG!

globale Pose

BESCHREIBUNG!

5.2 Positionsregelung von Quadrooptern mittels Pose

Die Freiheitsgrade einer Drohne können grundsätzlich separat geregelt werden. Jedoch ist die Kraft in z-Richtung abhängig von der Ausrichtung (Roll und Pitch) des Quadroopters. Dies ist aus Abbildung 10 (Seite 13) ersichtlich. Der Quadrokopter wird als Folge einer Veränderung der Roll- und Pitch-Winkel an Höhe verlieren. Der Höhenregler wird diese Veränderung nachführen. Um ein Nachregeln des Quadroopters bei einer Orientierungsänderung in der Horizontalen abschwächen zu können, kann der

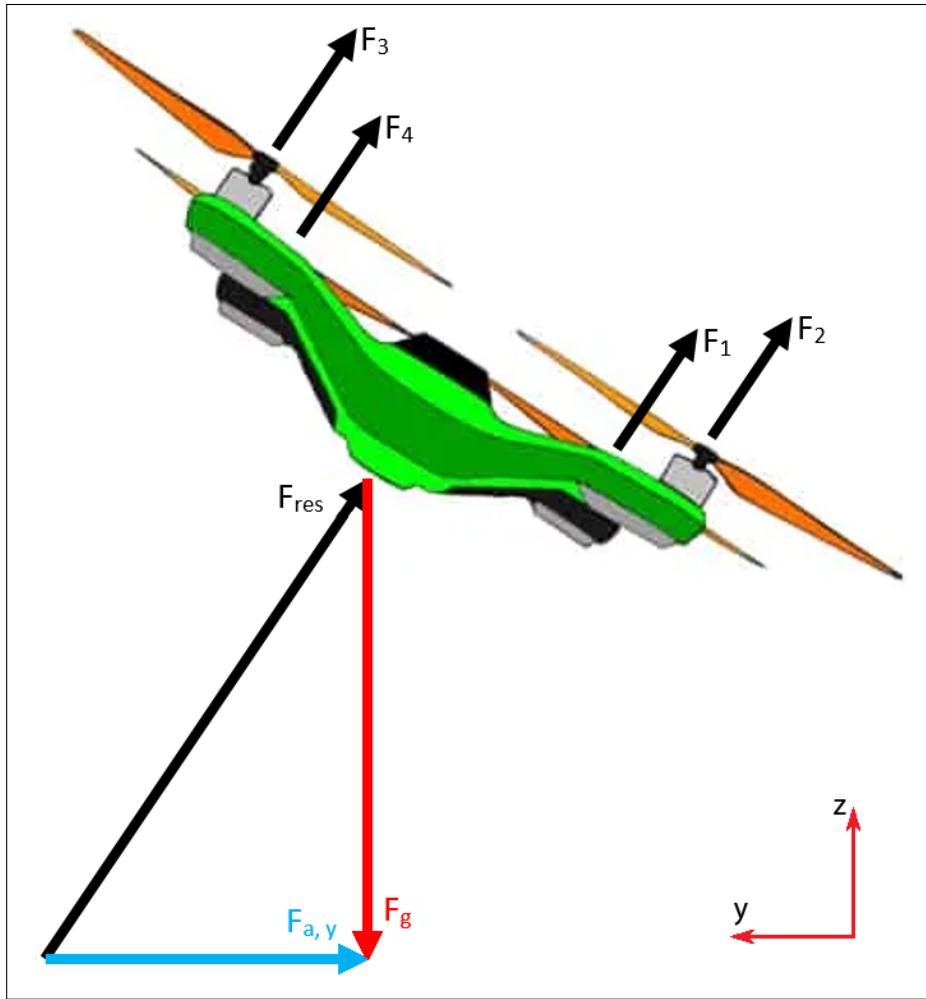


Abbildung 10: WIRKENDE KRÄFTE FÜR GEROLLTEN QUADROKOPTER (VGL. [13])

Abbildung 10 zeigt die auf einen Quadrocopter wirkenden Kräfte, wenn sich dieser in einer gerollten Orientierung befindet. Hier entspricht der Betrag der Kraft entlang der z-Achse der Gewichtskraft.

Die Kraft F_{res} wird mit der Gewichtskraft F_g überlagert. Die hieraus resultierende Kraft kann in drei Kräfte aufgeteilt werden, welche parallel zu den kartesischen Achsen angeordnet sind. Hieraus berechnet sich die Beschleunigung, welche auf den Quadrocopter wirkt.

veränderte Schubbedarf aus den gemessenen oder berechneten Roll- und Pitch-Winkel abgeleitet und zu dem Schubsignal aufsummiert werden.

Es ist zu beachten, dass die Parallelität des Quadrocopter-Koordinatensystems zum lokalen beziehungsweise globalen Koordinatensystem bei einer Rotation um die z-Achse verloren geht. Hierzu ist die translativen Bewegung entgegengesetzt dieser Rotation zu transformieren. Somit kann die Position bezogen auf das lokale beziehungsweise globale Koordinatensystem ermittelt werden. **BESCHREIBUNG!** Quelle? evtl Vorlesung?

5.3 Erzeugung von Posen aus Beschleunigungsdaten

5.3.1 Berechnung

Für die nachfolgend beschriebene Berechnung der Position einer Pose wird angenommen, dass die Orientierung des Quadroopters bekannt ist. Es ist zu berücksichtigen, dass die Beschleunigungssensorik fest im Quadroopter verbaut ist. Der resultierende Kraft-Vektor ist in ein Koordinatensystem zu transformieren, dessen xy-Ebene parallel zu der Start-Orientierung des Quadroopters ausgerichtet ist. **BESCHREIBUNG!** *Quelle?*

Anschließend kann der Kraft-Vektor entlang der Achsen des Quadroopter-Koordinatensystems aufgeteilt werden und die Beschleunigungen auf den Quadroopter zweifach integriert werden. Dieses Vorgehen gelingt lediglich bei idealen Daten. Da in Störungen auf das Signal wirken können, sind geeignete Methoden der Signalverarbeitung anzuwenden. **BESCHREIBUNG!** *Quelle?*

5.3.2 Signalaufarbeitung

Nachfolgend soll auf die Einflüsse einer Messung eingegangen werden, welche sich die Qualität der ermittelten Pose auswirken. Hierzu werden verschiedene Störgrößen am Beispiel eines Szenarios betrachtet und mögliche Gegenmaßnahmen gezeigt.

An dieser Stelle sei angemerkt, dass bei dem Vorgehen der Ansatz für online-Datenverarbeitung genutzt wurde. Hierbei fließen ausschließlich Daten ein, welche maximal den aktuell betrachteten Zeitstempel aufweisen.

veranschaulichendes Szenario

Im gewählten Szenario wird die z-Achse beziehungsweise Flughöhe als Beispiel betrachtet. Die Kurve setzt sich aus idealisierten Teilstücken zusammen (siehe Abbildung 11 (Seite 15), oben):

- Initialisierung: horizontale Gerade
- Abflug: negativer Cosinus ($1/2$ Schwingung)
- Schweben: horizontale Gerade
- Landung: zwei entgegengesetzte Parabeln²
- Abschalten: horizontale Gerade

²Die Parabeln sind so angeordnet, dass der Berührungszeitpunkt zeitlich in der Mitte der Landungsphase liegt. Da die Parabeln einen identischen Streckfaktor besitzen, entspricht der Übergang zwischen den Parabeln einer knickfreien Kurve.

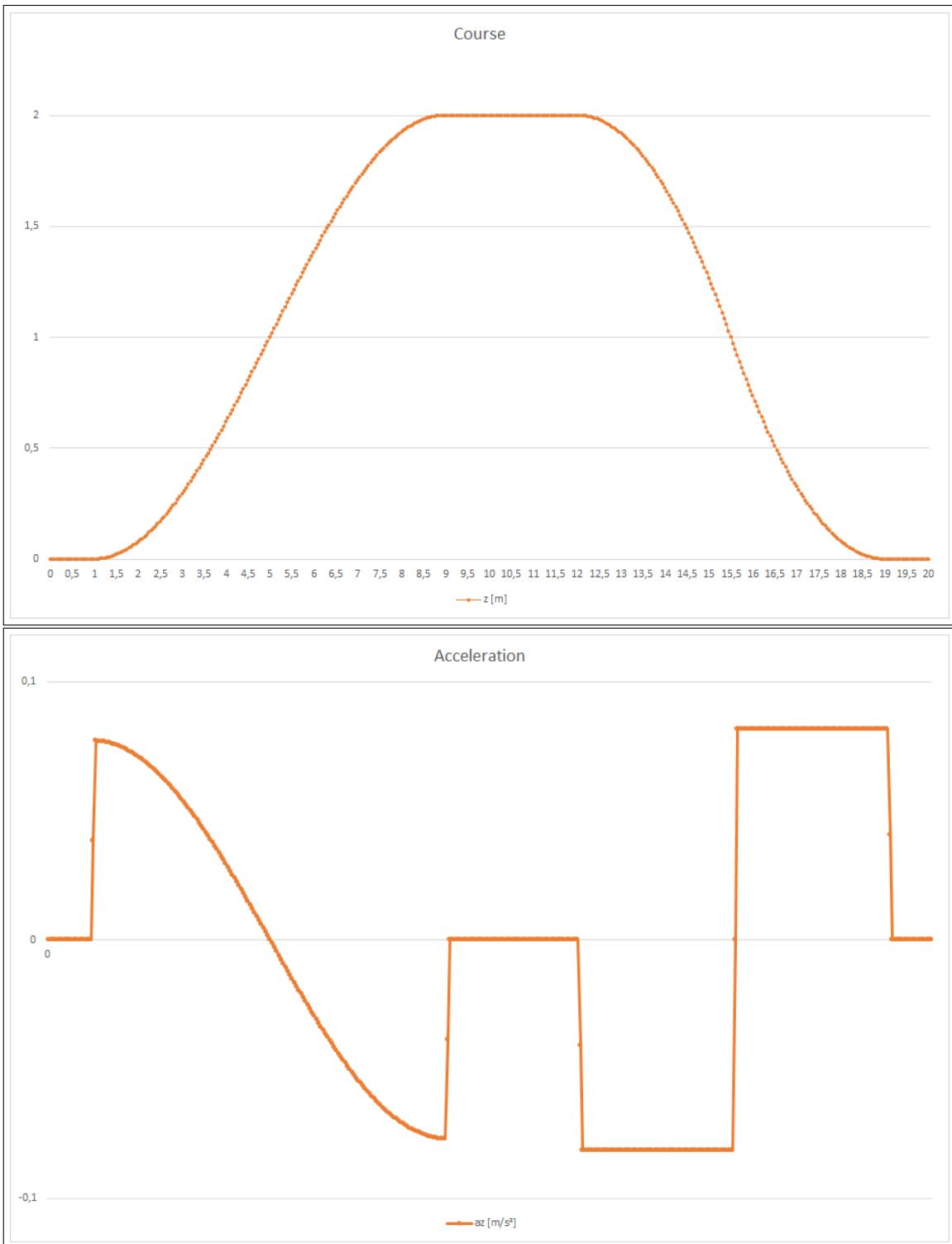


Abbildung 11: ORIGINALKURVE DES SZENARIOS

In Abbildung 11 sind der idealisierte Höhneverlauf (oben) und die daraus abgeleitete Beschleunigung (unten) aufgetragen. Sofern nicht anderweitig beschrieben, wird im Folgenden eine Abtastrate von 20 Datenpunkten pro Sekunde angenommen.

Die Beschleunigungsdaten wurden aus der genannten Kurve mittel zweifacher zeitdiskreter Differentiation gebildet (siehe Abbildung 11 (Seite 15), unten).

Durch dieses Vorgehen ist sichergestellt, dass ein Vergleich zwischen original Kurve und den rekonstruierten Verläufen gebildet werden kann. In diesem Zusammenhang wurde sichergestellt, dass eine Rekonstruktion ohne aufgeprägte Störgrößen möglich ist. (vgl. [4]) (Seite 123)

Rauschen

Rauschen eines Signal kann durch die Quantisierung von analogen Daten auftreten (vgl. [4]) (Seite 100, Abbildung 4.5) oder in dem Anwendungsfall einer Beschleunigungsmessung auch von Vibrationen des Systems beeinflusst werden. Es ist darauf zu achten, dass Überläufe von digitalen Speichertypen vermieden werden, da diese einen Signifikanten Anteil an rauschenden Signalen ausmachen können. (vgl. [4]) (Seite 118)

BESCHREIBUNG! *was dagegen tun? Eigentlich Mittelwert bilden. Aber Mittelwert glättet auch einzelne Werte. Also Höhere Abtastrate!*

Ausreißer

BESCHREIBUNG! *Erklären, wie diese entstehen*

1977 wurde von Tukey beschrieben, dass ein gleitender Median für die Glättung einer Datenreihe eingesetzt werden kann (vgl. [5]) (Seite 210). Im Buch wird ein Median über drei Werte vorgeschlagen. Eine Erweiterung der Anzahl der einbezogenen Werte ist möglich, wobei zu berücksichtigen ist, dass die Median-Funktion bei einer geraden Anzahl an Werten den Durchschnitt der mittleren Werte bildet. **BESCHREIBUNG!** *Das ist allgemeinbildung in Mathe. Es gibt zwar ein Buch (H. Cramér, "Mathematical methods of statistics", Princeton Univ. Press (1946) -Info von [https://encyclopediaofmath.org/wiki/Median_\(in_statistics\)](https://encyclopediaofmath.org/wiki/Median_(in_statistics))), aber da kommt man extrem schwer ran. reicht es, hier nur das Buch zu nennen, ohne explizite Seitenzahl?*

konstante Nullpunkt-Abweichung

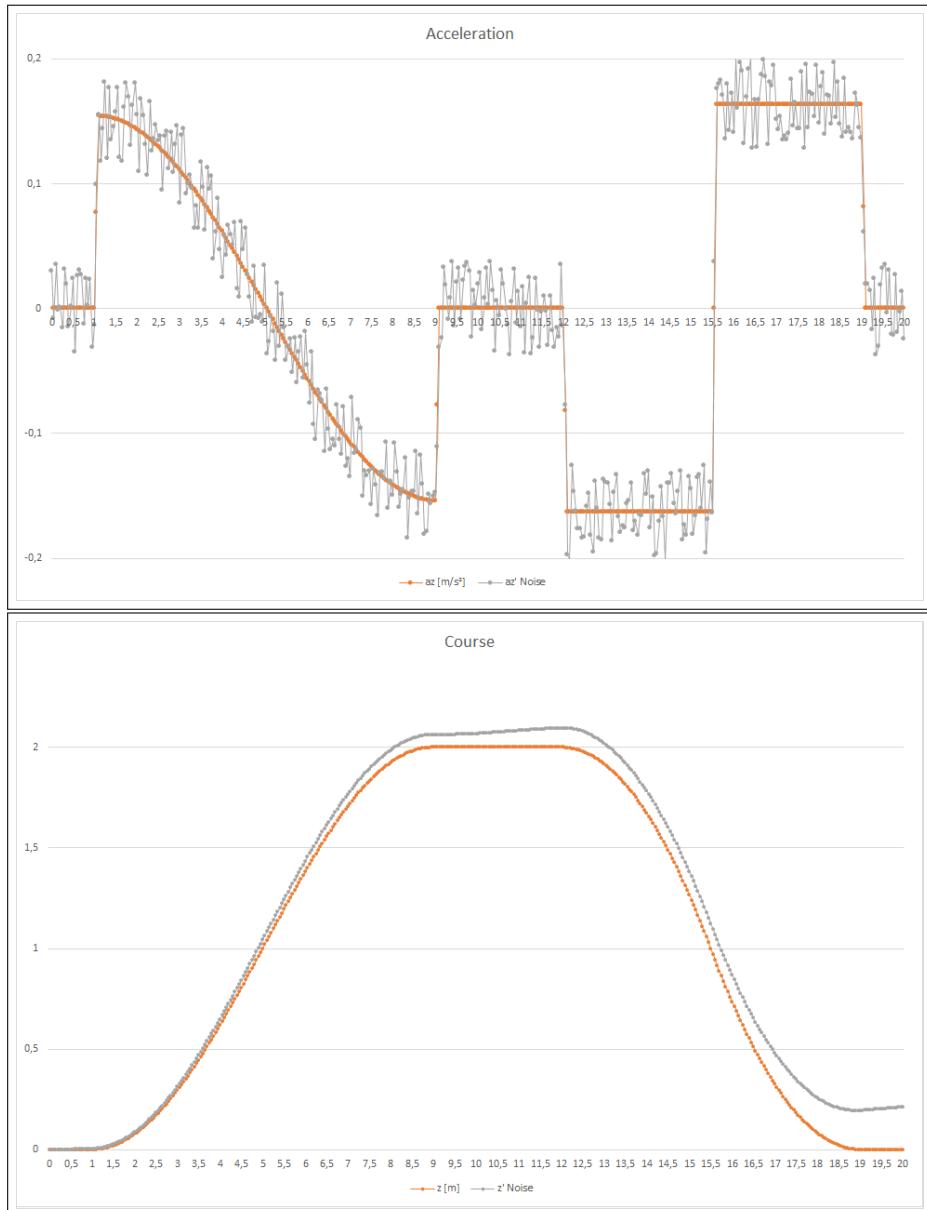


Abbildung 12: EINFLUSS VON SIGNALRAUSCHEN

Um das aufgeprägte Rauschen zu erzeugen wurden Zufallszahlen im Bereich $[-1, 1]$ erzeugt und diese mit dem Faktor einer angenommenen absoluten Genauigkeit (0.375% für einen Wertebereich $[-15 \text{ m/s}^2, 15 \text{ m/s}^2]$) und einer angenommenen relativen Genauigkeit (0.5%) verrechnet.

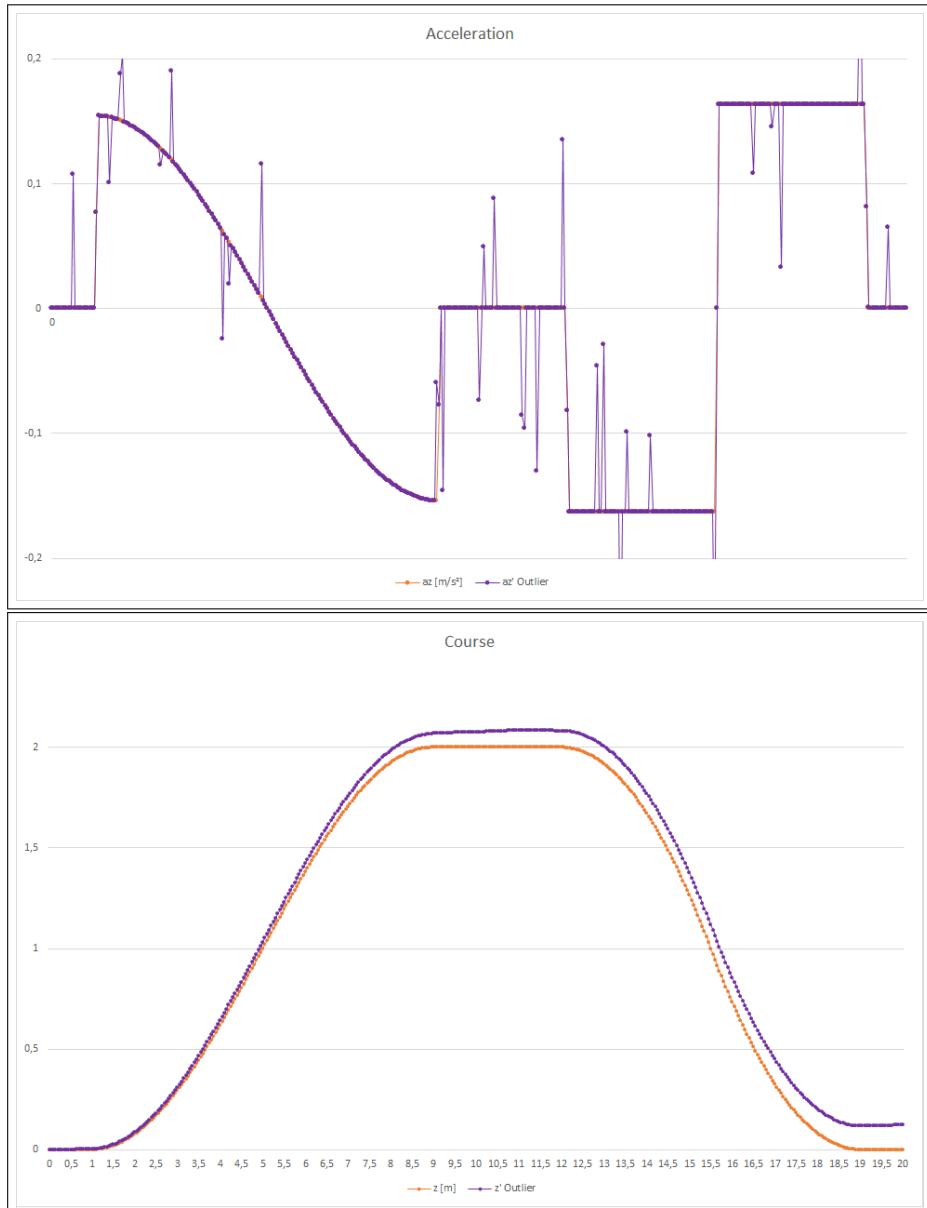


Abbildung 13: EINFLUSS VON AUSREISSERN

Die Höhe der aufgeprägten Ausreißer wurde mittel einer Datenreihe von Zufallszahlen im Bereich $[-1, 1]$, verrechnet mit dem beliebigen Faktor 0.125, generiert. Für die zeitliche Lage wurde eine Datenreihe von Zufallszahlen im Bereich $[0, 1]$ mit einem Schwellwert von 0.925 verglichen. Daraus folgt, dass etwa 7.5% der Datenwerte einen zusätzlichen Wert aufgeprägt bekommen.

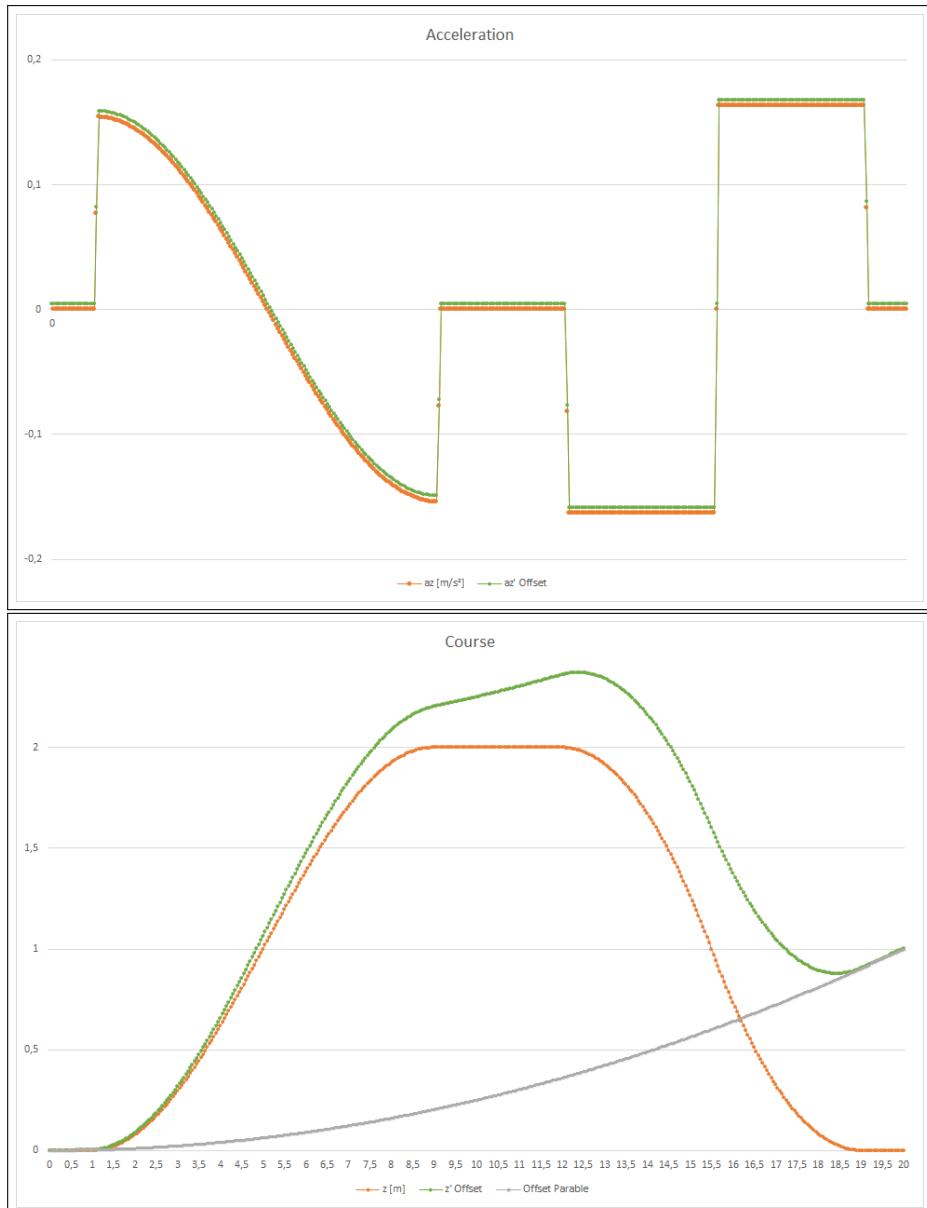


Abbildung 14: EINFLUSS VON KONSTANTER NULLPUNKT-ABWEICHUNG

Die hier gezeigte Abweichung der Beschleunigungsdaten beträgt 0.0025 m/s^2 . Die Superposition der rekonstruierten Kurve entspricht einer in grau dargestellten Parabel mit einem Streckfaktor von $\frac{\Delta a}{2}$.

6 Eingesetzte Hardware

In dieser Projektarbeit wurden zwei unterschiedliche Quadrokopter eingesetzt.

Die zu Beginn der Projektarbeit eingesetzte Quadrokopter des Herstellers *COEX* wird in diesem Kapitel ebenfalls beschrieben. Vorrangig sollen hier Erkenntnisse über das Verhalten dieser Drohne und mögliche Lösungswege der Problemstellung erläutert werden.

Nach Austausch der Hardware wurde die *ArDrone 2.0* des Herstellers *Parrot* genutzt. Dieser Quadrokopter wurde bereits erfolgreich durch die DHBW Karlsruhe im Zuge der Labor-Vorlesung *Robotik* eingesetzt.

6.1 COEX Drohne

Bei dem für die DHBW Karlsruhe neu angeschafften Quadrokopter handelt es sich um das Modell *Clover 4.20* des Unternehmens *Copter Express (COEX)*.

Das Quadrokopter-Familie *Clover* wurde vom Hersteller zur Ausbildung und Forschung an Quadrokoptern entwickelt. Das Modell besitzt einen Rahmen, welche die Rotoren bei Kollisionen schützen soll.

Interner Flight Controller, ROS Kommunikation via Pie 4.

Probleme bei Inbetriebnahme - Beispielprogramm des Herstellers bringt nicht das erwartete Ergebnis.

6.1.1 Control Stack

Als *Flight Controller* wird das Modell *PX4 Racer* genutzt. Die Firmware, sowie weitere Software zur Interaktion mit der Drohne *Clover 4.20* werden von *Dronecode Foundation* bereitgestellt.

Die Anbindung an *ROS* wird durch einen *Raspberry Pie 4* realisiert. Hierbei wird der On-Board Computer als *roscore* genutzt.

6.1.2 Sensorik

- Gyroskop
- Laser-Abstandsmessung zum Boden
- GPS

- Bodenkamera

6.1.3 Aufbau des Bausatzes

Aufbau

Der Aufbau und die Verkabelung des Quadroopters *Clover 4.20* wurden entsprechend der Hersteller-Vorgaben (siehe [14]) durchgeführt.

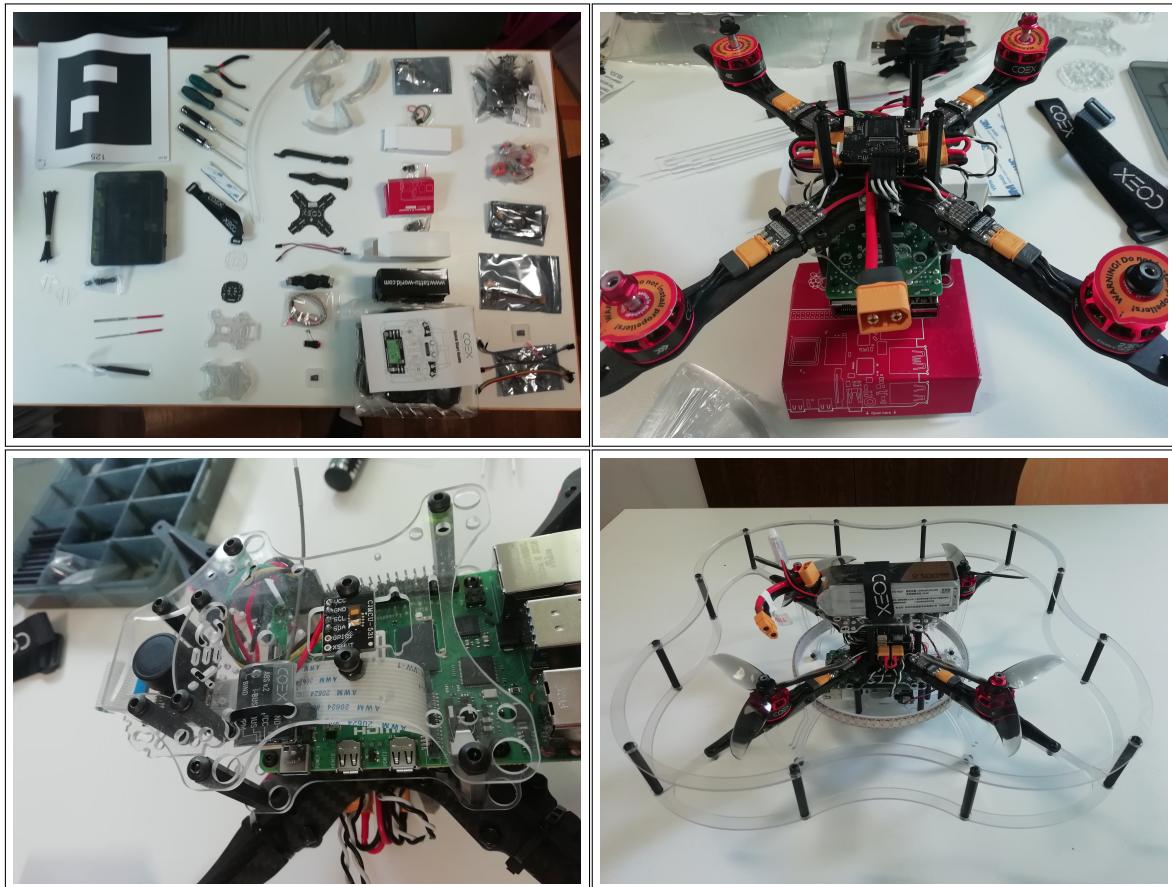


Abbildung 15: AUFBAU DES BAUSATZES FÜR DIE DROHNE *CLOVER 4.20*

Abbildung 15 zeigt etappenweise den Aufbau des Bausatzes für die Drohne *Clover 4.20*. Hierbei ist die zeitliche Anordnung in der Collage zeilenweise zu interpretieren.

6.1.4 Inbetriebnahme

Konfiguration des Flight Controllers

Die Konfiguration wurde entsprechend der Hersteller-Empfehlung mittels die Software *QGroundControl* durchgeführt. Sämtliche Anweisungen der Hersteller-Vorgaben (siehe [15]) wurden befolgt.

Das für den *Flight Controller* aufgespielte Image entspricht der Version v0.22.

Testflug

Nach einer vollständigen Konfiguration des *Clover 4.20* wurde ein Beispielprogramm zum Testen des Quadroopters genutzt. Dieses Programm wird vom Hersteller des *Flight Controller* zur Verfügung gestellt [16].

Das Programm sieht vor, den Quadroopter nach dem Start auf einer Höhe von 2 m in einem Hover-Modus zu halten. Um die Sicherheit dieses Versuches zu erhöhen, wurde die Flughöhe dieses Testflugs reduziert. Im Verlauf des Testfluges zeigte sich, dass die vorgegebene Höhe nicht gehalten wurde. Der Quadroopter wurde durch eine baulichen Begrenzung davon abgehalten, weiter an Höhe zu gewinnen.

Eine Rekalibrierung der Sensorik konnte diesem Umstand nicht entgegenwirken. Der Ansatz, diverse andere Topics zur Steuerung des *Clover 4.20* einzusetzen, schlug ebenfalls fehl.³ Der Austausch der Hardware hin zu einem bewährten Quadroopter wurde durch diese Flugversuche mit dem Quadroopter *Clover 4.20* hervorgerufen.

6.1.5 Mögliche Lösung der Aufgabenstellung

COEX-Package

Für die Interaktion mit der *COEX*-Drohne wurden diverse Klassen erstellt, um einzelne Aspekte der Interaktion mit der Drohne umsetzen zu können (siehe Kapitel 7.5.6 *coex Package* (Seite 35)).

Nach dem Wechsel auf die andere Drohne wurde die Aktualisierung dieses Package nicht weiter verfolgt. Sofern eine Einbindung der *COEX*-Drohne in die Ergebnisse dieser Projektarbeit durchgeführt werden soll, muss dieses Package entsprechend angepasst werden.

geeignete Topics

Mit dem *ROS-Topic* `setpoint_raw/local` kann eine Regelung in der XY-Ebene umgesetzt werden. Die Höhenregelung kann mit dem *ROS-Topic* `set_attitude/thrust` eingeführt werden. Die Umsetzung mit den genannten *ROS-Topics* entspricht der Lösung der Aufgabenstellung entsprechend Kapitel 2 *Problemstellung* (Seite 2).

Alternativ zu der genannten Lösung können Stellgrößen als Befehle der Funkfernsteuerung immitiert werden. Das *ROS-Topic* `/mavros/rc/override` erlaubt das Überschreiben der RC-Kanäle, somit können die Eingaben durch den Regelkreis übernommen werden. Eingaben Nutzender sind durch eine entsprechend implementierte Daten-Brücke weiterhin möglich.

³Eine Auswahl an Herangehensweisen ist im Git-Repository im Ordner Text_coex hinterlegt.

RC-Sender: FS-i6
RC-Empfänger: FS-X8B

hilfreiche Literatur

Nachfolgend sollen Internetseiten genannt werden, welche die Einarbeitung in den Umgang mit der *COEX*-Drohne vereinfachen können.

- <https://clover.coex.tech/en/wifi.html>
- https://clover.coex.tech/en/simple_offboard.html
- https://docs.px4.io/master/en/ros/mavros_offboard.html
- https://docs.px4.io/master/en/flight_modes/offboard.html
- https://mavlink.io/en/services/manual_control.html
- http://wiki.ros.org/mavros#mavros.2FPlugins.manual_control
- https://mavlink.io/en/messages/common.html#SET_POSITION_TARGET_LOCAL_NED

Spezifische Verweise sind im Quellcode des *COEX*-Package hinterlegt.

6.1.6 Troubleshooting

Platinenfehler

Es zeigte sich nach Messungen, dass die Spannungsversorgung des LED-Streifens verpolt an die entsprechende Platine angebracht wurde. Als Folge wird der Verpolungsschutz des LED-Streifns aktiv, wodurch die Spannung aller Komponenten des *Control Stack* auf etwa 0.6V abfällt.

Der LED-Streifen zählt nicht zu des essentiellen Bauteilen des Quadrokopter. Der Quadrokopter kann ohne die Nutzung des LED-Streifens betrieben werden.

Bus-System des RC Empfängers

Der RC-Empfänger gibt die Funk-Signale über einen Bus an den *Flight Controller* weiter. Hierbei ist zu berücksichtigen, dass der RC-Empfänger die beiden Bus-Protokolle *i-Bus* und *s-Bus* versenden kann. Der Inhalt beider Protokolle ist identisch. Der Unterschied besteht in der Signal-Invertierung.

Lösung

BIND-Knopf beim Einschalten für etwa 3 Sekunden gedrückt halten. Der Bus-Mode wird hiermit umgeschalten.

md5-Sum des Topics OverrideRCIn

Nach erfolgreicher Kompilierung wird nachfolgender Laufzeitfehler ausgegeben, wenn sich eine Instanz der Klasse `ros::Subscriber` oder der Klasse `ros::Publisher` auf das *ROS-Topic /mavros/rc/override* anmeldet:

[ERROR] [1643616625.226584828]: Client [/mavros] wants topic /mavros/rc/override to have datatype/md5sum [mavros_msgs/OverrideRCIn/73b27a463a40a3eda1f9fbb1fc86d6f3], but our version has [mavros_msgs/OverrideRCIn/fd1e1c08fa504ec32737c41f45223398]. Dropping connection.

Lösung

Definition von

```
struct MD5Sum<::mavros_msgs::OverrideRCIn_<ContainerAllocator>>
```

aus

```
sudo nano /opt/ros/noetic/include/mavros_msgs/OverrideRCIn.h
```

Code 1: BEFEHL ZUM ÖFFNEN DES OVERRIDERCIN-HEADERS

von dem *Raspberry Pi 4* kopieren und in der Definition des lokalen *ROS OverrideRCIn*-Headers ersetzen. Ein Versuch, den *Raspberry Pi 4* einem Update zu unterziehen, ist fehlgeschlagen. Somit ist eine unmittelbare Synchronisation der Nachrichten-Typen aufwändig.

```
template<class ContainerAllocator>
struct MD5Sum<::mavros_msgs::OverrideRCIn_<ContainerAllocator>>
{
    static const char* value()
    {
        return "73b27a463a40a3eda1f9fbb1fc86d6f3";
    }

    static const char* value(const ::mavros_msgs::OverrideRCIn_<ContainerAllocator>&)
    {
        return value();
    }

    static const uint64_t static_value1 = 0x73b27a463a40a3edULL;
    static const uint64_t static_value2 = 0xa1f9fbb1fc86d6f3ULL;
};
```

Code 2: DEFINITION DES STRUCT `MD5Sum` FÜR DAS TEMPLATE `OVERRIDERCIN`

6.2 Parrot Drohne

Um die Problematik der COEX Drohne zu umgehen, steigt diese Projektarbeit auf die Drohne um, welche die Idee für diese Studienarbeit ergeben hat. Hierbei handelt es sich um die Drohne *ArDrone 2.0*. Nachfolgend soll die Drohne und die eingebaute Sensorik näher beschrieben werden.

6.2.1 Geometrie

Anordnung der Rotoren

BESCHREIBUNG!

X

Abmessungen

BESCHREIBUNG!

6.2.2 Sensorik

- Beschleunigungssensorik
- Magnetometer
- Ultraschall-Abstandsmessung zum Boden
- Frontkamera
- Bodenkamera

6.2.3 Interaktion mittels ROS

Treiber *ardrone_autonomy*

Für die Ansteuerung der Drohne *ArDrone 2.0* existiert eine Treiber, welche die Initialisierung und die Kommunikation mit der Drohne anbietet. Die *ArDrone 2.0* entspricht hierbei einem Client. Der *ROS*-Core wird auf dem Host-Rechner ausgeführt. Als *ROS*-seitige Schnittstelle werden verschiedene *ROS-Topics* und *ROS-Services* angeboten, welche nachfolgend näher beschrieben werden sollen.

Topics

BESCHREIBUNG! *Bild von rqt-graph*

ROS-Topic *NavData*

Das *ROS-Topic NavData* fasst alle für die verfügbaren Daten des Quadroopters in einem Nachricht zusammen. hieraus können geeignete Informationen entnommen werden.

ROS-Topic *cmd_vel*

Nur geschwindigkeits-Daten. Keine tatsächliche Übergabe von Neigungswinkeln und so ODER?? **BESCHREIBUNG!**

Entsprechen alle Attribute der `geometry_msgs::Twist`-Nachricht dem Wert 0, schaltet die *ArDrone 2.0* in einen Hover-Modus um und versucht, die aktuelle Position zu halten. Zu beachten ist, dass diese Funktion nicht für die Aufgabenstellung herangezogen werden kann, da für den studentischen Laborversuch *Höhenregelung* Daten abweichend des Werts 0 über das *ROS-Topic cmd_vel* übermittelt werden.

Video-Streams

Die Übertragung der Video-Daten der beiden Kameras soll an dieser Stelle lediglich erwähnt werden.

Services

Parameter

6.2.4 Inbetriebnahme auf separatem Rechner

Der in Kapitel 6.2.3 *Interaktion mittels ROS* (Seite 25) Treiber kann entsprechend folgender Anleitung installiert werden:

<https://ardrone-autonomy.readthedocs.io/en/latest/installation.html>

Für das System werden folgende *ROS*-Knoten benötigt:

- `roslaunch ardrone_autonomy ardrone.launch`
- `rosrun PosControl AutoController`
alternativ: `rosrun PosControl ManualController`
- `rosrun keyboard KeyReader`

6.2.5 Troubleshooting

Akkus

Die mit der *ArDrone 2.0* zur Verfügung gestellten Akkus konnten selbst in vollständig geladenen Zustand keine zufriedenstellende Flugdauer garantieren. Hierfür wurden zwei neue Akkus von einem Dritthersteller bezogen. Die Lieferung der bestellten Akkus erfolgte in geringem zeitlichen Abstand zum Projektende.⁴

⁴ „geringer zeitlicher Abstand“ entspringt in diesem Kontext einem Zeitraum von drei Wochen. In diesem Zeitraum lag die Priorität des Autors auf der schriftlichen Ausarbeitung dieser Projektarbeit.

7 Implementierung

7.1 Software-Architektur

7.1.1 Package-Konzept

Der Aufbau der Architektur entspricht den Konzept der *Clean Architecture*. Diesem Prinzip folgend zeigen sämtliche Abhängigkeiten des Codes auf *weiter innen liegende* Schichten. Die Farbgebung in Abbildung 16 (Seite 27) orientiert sich an den Inhalten der Vorlesung Advanced Software-Engineering der DHBW Karlsruhe⁵.

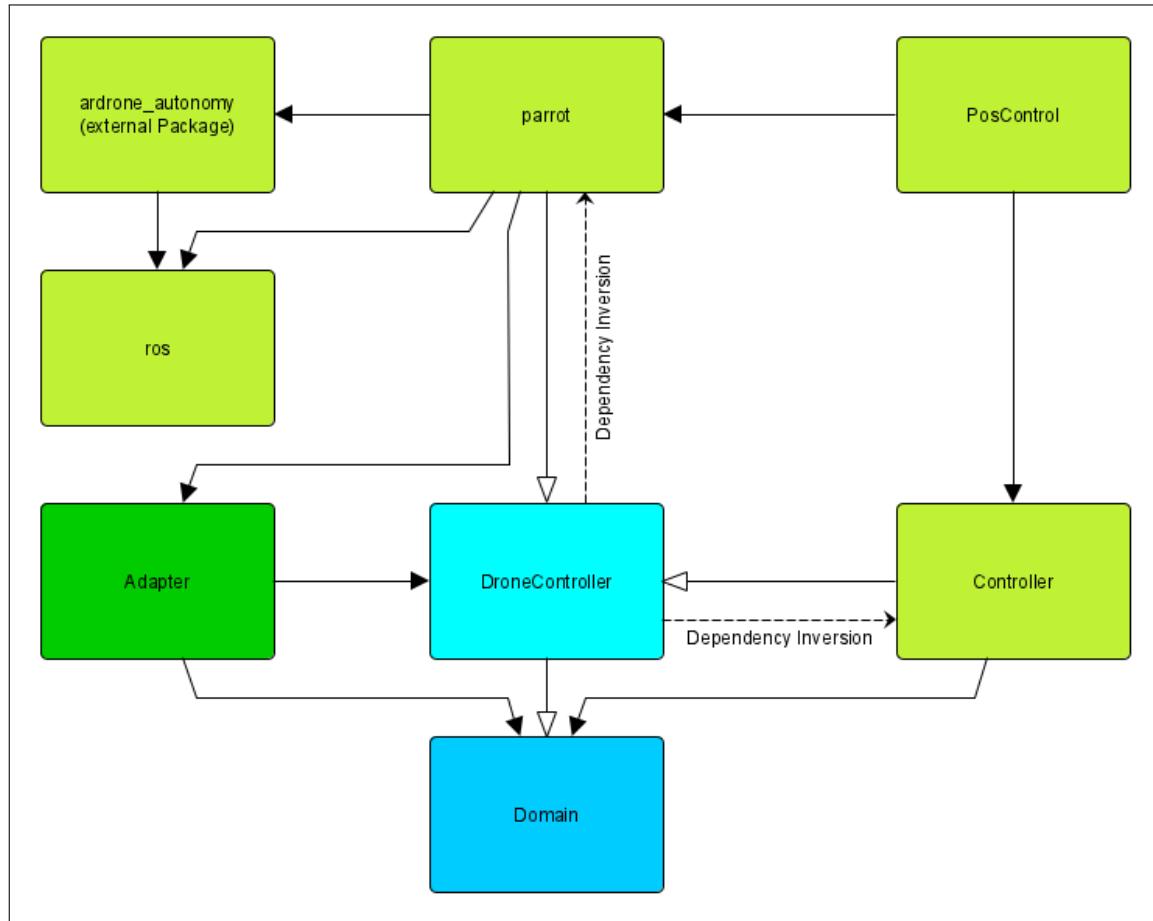


Abbildung 16: ARCHITEKTUR DES REGELUNGSSYSTEMS

Abbildung 16 zeigt das Konzept der Architektur. Die Bedeutungen der Pfeile orientieren sich an UML-Klassendiagrammen. Die Farbgebung unterscheidet die verschiedenen Schichten der *Clean Architecture*: *Domain-Layer* (blau), *Application-Layer* (hellblau), *Adapter-Layer* (grün), *PlugIn-Layer* (hellgrün).

⁵An dieser Stelle sei darauf hingewiesen, dass Abbildung 16 (Seite 27) in der Ausarbeitung für die genannte Vorlesung auftaucht.

7.1.2 Domain Package

Im *Domain Package* sind grundlegende Klassen abgelegt. Diese werden von den nachfolgend beschriebenen Schichten eingebunden. Gemeinsam mit dem *DroneController Package* bildet es das Herzstück der Anwendung. Eine eindeutige Zuordnung der Klassen in diese beiden *Packages* ist diskutabel.

7.1.3 DroneController Package

Das Entwurfsmuster des *Application-Layer* entspricht einer *Bridge*. Ziel ist es, sowohl die eingesetzte Drohne, als auch die Implementierung des Reglers mit überschaubarem Aufwand austauschen zu können.

Hierin werden die grundlegenden Aufgaben für die Regelung einer Drohne übernommen. Eine detailliertere Beschreibung findet sich im Kapitel Kapitel 7.3 *Application Layer - DroneController Package* (Seite 30).

7.1.4 Adapter Package

Im *Adapter Package* wird die Signalverarbeitung der Rohdaten übernommen und anschließend in einem aktuellen Zustand zur Weiteren Verarbeitung bereitgestellt.

7.1.5 Controller Package

Das *Controller Package* einspricht beinhaltet Regelungsglieder, welche für eine beliebige Regelung im Allgemeinen genutzt werden können. Die Interaktion wird durch die Fassade Klasse [PoseController](#) an das Aufgabenfeld dieser Projektarbeit angepasst.

7.1.6 parrot Package

Die Interaktion mit der in dieser Projektarbeit eingesetzten Hardware wird vom gleichnamigen *parrot Package* übernommen. Hier sind verschiedene Klassen enthalten, welche mittels *ROS ROS-Topics* mit der Drohne kommunizieren und sowie Messdaten von der Drohne zur Verarbeitung bereitstellen, sowie Steuerungsbefehle an die Drohne übersenden.

7.1.7 PosControl Package

Das *PosControl Package* kann als Dach-Software angesehen werden. hierin wird die Methode [main\(\)](#)-Methode aufgerufen und die übergeordnete verwaltende Klasse initialisiert.

7.2 Domain Layer

Der *Domain Layer* stellt als Teil der *Clean Architecture* die Ebene dar, in der allgemein gültige Typen oder Definitionen abgelegt werden können. Nachfolgend werden die Klassen beschrieben, die in diesem Projekt zu dem *Domain Layer* gehören. Sofern nicht anders betitelt, handelt es sich bei den Klassen um Klassen vom Typ *Value-Object*.

Optional

Die Klasse Klasse `Optional` soll dem Ringbuffer ermöglichen, das Nichtvorhandensein von Einträgen darstellen zu können. Diese Klasse ist als *template* implementiert und enthält neben dem Speicherplatz für die generische Instanz einen bool'schen Wert als Validierung. Hiermit wird das Arbeit mit *Null-pointern* im Kontext des Klasse Klasse `Ringbuffer` vermieden. *Anmerkung:* Mit der Verwendung von c++17 ist eine vergleichbare Klasse Teil der Standard-Bibliothek. Die Sprachversion des Projekts ist c++11.

Ringbuffer

Die Klasse Klasse `Ringbuffer` soll einen Ringspeicher abbilden. Hier wird nicht -wie der Name vermuten lässt- ein Ringspeicher im Sinne einer ringförmig verketteten Liste implementiert. Diese Klasse Kapselt eine *Standard Template Library (STL)* vom Typ Klasse `std::vector<T>`, wobei bei Überschreiten der maximalen Anzahl an Elementen das vordere Elemente entfernt wird.

Anmerkung: Die Implementierung der Klasse Klasse `std::vector<T>` sieht vor, neue Elemente an das Ende anzuhängen.

TimedValue

Die Klasse Klasse `TimedValue` soll einen mit einem Zeitstempel versehenen Wert abbilden. Dies wird durch das Erben von den Klassen `Timestamp` und Klasse `Value` umgesetzt.

Timestamp

Mit der Klasse Klasse `Timestamp` wird ein Zeitstempel eingeführt. Alle *ROS*-Nachrichten beinhalten durch die Kapselung der Klasse `std_msgs::Header`-Klasse einen Zeitstempel.

Unit

Mit Klasse `Unit` werden Einheiten umgesetzt, um eine korrekte Übergabe von Klasse `Value`-Instanzen zur Laufzeit zu gewährleisten.

Value

Die Klasse Klasse `Value` bildet einen Wert ab. Sie besteht aus einer Klasse `Unit` und einem dazugehörigen Zahlenwert.

Vector3D

Bei der Klasse Klasse `Vector3D` handelt es sich um die Abbildung eines Vektors im dreidimensionalen Raum. Zusätzlich wird dem Vektor eine Einheit zugewiesen. Zudem werden in dieser Klasse grundlegende mathematische Operationen für Vektoren implementiert.

SafetyChecker

BESCHREIBUNG! *evtl löschen?*

SafetyProvider

Die Klasse `SafetyProvider` ist in ihrer Funktionalität abgeschlossen. Instanzen der Klasse `SafetRequirement` werden an einen `SafetyProvider` übergeben. auf Anfrage wird geprüft, ob die übergebenen Instanzen der Klasse `SafetRequirement` die erwartungen erfüllen. Ist dies nicht der Fall, wird die Methode `safetyTriggered` der hinterlegten Instanzen der Klasse `SafetReceiver` aufgerufen.

SafetReceiver

Die *full virtual* Klasse `SafetReceiver` fordert die Implementierung der Methode `safetyTriggered`. Hierin definiert die erbende Klasse, wie in Folge einer Verletzung der Sicherheitsanforderungen reagiert werden soll. Allgemein ist hierfür eine Landung des Quadroopters vorgesehen.

SafetRequirementy

Im Sinne des *Open/Closed-Principle* wird die Klasse `SafetRequirementy` als virtuelle Klasse eingeführt. Hierdurch werden Eigenschaften und Status beziehungsweise Flags des Quadroopters für Sicherheitsfunktionalitäten zugänglich gemacht.

SafetyTranslative

Eine Instanz der Klasse `SafetyTranslative` erhält eine Referenz auf eine Instanz der Klasse `SafetyProvider`. Ziel dieser Klasse ist es, die Sicherheitsfunktionalität eines anderen `SafetyProvider` als `SafetRequirementy` einbinden zu können.

7.3 Application Layer - *DroneController* Package

BESCHREIBUNG!

Batteryable

DroneControlable

IMUable

IMUState

Pose

PoseBuildable

PoseControlable

Rotor

Statusable

Thrustable

Timable

ImpacktOK und ImpacktWatcher

PercentageOK und VoltageOK

TimeoutOK und WatchDog

7.4 Adapter Layer

StateBuilder

Innerhalb der Klasse **StateBuilder** werden große Teile der Signalverarbeitung übernommen. Hierzu werden verschiedene Instanzen der Klasse **StateHandler** mit entsprechenden Aufgaben implementiert. Als Funktionalität bietet die Klasse **StateBuilder** vor Allem das Glätten von Signalen, sowie die Anpassung einer dauerhaften Nullpunkt-Abweichung an.

StateHandler

Die Klasse **StateHandler** erbt von der Klasse **Ringbuffer** für das *Template* der Klasse **IMUState**. Zudem werden verschiedene Methoden als Grundlage für die Signalverarbeitung angeboten (Methode **IMUState getAvgState()**, Methode **IMUState getMedianState()** und Methode **IMUState getVariance()**).

7.5 Plugin Layer

7.5.1 *parrot* Package

Die Klassen in diesem *Package* entsprechen der vollständigen Implementierung der virtuellen Klassen des *DroneController-Package*. Weitere Details sind dem Code zu entnehmen.

Folgende Klassen sind verfügbar:

- Klasse `parrotBattery`
- Klasse `parrotControl`
- Klasse `parrotIMU`
- Klasse `parrotStatus`
- Klasse `parrotTransmitter`

7.5.2 *Controller* Package

Die in dieser *Package* umfangreiche Vererbungshirarchie wurde umgesetzt, um das parallel hierzu auszuarbeitende *Software Engineering 2*-Projekt ausführlicher umsetzen zu können. Eine schlankeres *Package* wäre möglich.

Nachfolgend sollen die implementierten Klassen dieses *Package* näher erläutert werden:

Controllable

Die virtuelle Klasse `Controllable` hält als Attribut eine Ausprägung der Enumeration `ControllerType` und deklariert zudem die Methoden für die Funktionalität, einen Regelparameter k verwalten zu können. Diese Funktionalität wird in der Klasse `Controller_Basic` definiert.

ControlledOutput

Mit der Klasse `ControlledOutput` werden die Funktionalitäten der Klassen Klasse `Controllable` und Klasse `Output` vereint.

Controller_Basic

Die Klasse `Controller_Basic` bildet die Grundlage für die in der Implementierung vorhandenen Regelbausteine, ausgenommen der Klasse Klasse `ControllerPID`.

Controller_Input

Lagacy Code BESCHREIBUNG! please delete!

Controller_x

Klassen, welche mit „Klasse `Controller_`“ beginnen und einen Baustein (vgl. Kapitel 4.2 *Arten von Reglergliedern* (Seite 6)) benennen, implementieren die Funktion des jeweiligen Bausteins.

ControllerSystem

Instanzen der Klasse `ControllerSystem` kapseln Instanzen verschiedener Regelbausteine (Klasse `Controller_`). Hierbei können diverse Regelbausteine als Reihenschaltung zusammengefasst werden.

Anmerkung: In der Implementierung wird diese Klasse nicht aktiv genutzt.

ControllerType

Bei `ControllerType` handelt es sich um eine Enumeration. Hier können Parameter der Regelbausteine über eine kapselnde Instanz der Klasse `ControllerSystem` angepasst werden.

Anmerkung: Im Projektfortschritt hat sich keine Möglichkeit ergeben, dieses Funktionalität einzusetzen.

Inputable und Input

Die beiden Klassen ermöglichen einen Daten-Eingang für ein Objekt. Hierbei Besitzt die Klasse `Input` einen Pointer auf eine Instanz der Klasse `Outputable`.

Outputable und Output

Die beiden Klassen bilden den Output eines Objekts an. Hierbei ist die Methode `TimedValue getOutput()` eine virtuelle Methode und muss in einer von der Klasse `Outputable` erbenden Klasse definiert werden.

TimedDifference

Die Klasse `TimedDifference` wurde eingeführt, um ein Datum und einen Zeitstempel zu vereinen. Dies ist für die Berechnung der Regelbausteine notwendig.

7.5.3 PosControl Package

7.5.4 calling Package

Dieses *Package* wurde eingeführt, um die Erzeugung neuer *ROS-Messages* zu umgehen. Ferner bildet die Struktur dieser Klassen einen *pull Observer* ab. Die aufgerufene Methode erhält den Pointer auf die aufrufende Klasse und kann hiermit eine Entscheidung über weitere Aktionen treffen.

Anmerkung: Dieses *Package* entspricht nicht den Grundsätzen einer *ROS*-Programmierung und ist daher nicht weiter zu nutzen. Die Beschreibung dient an dieser Stelle dem Verständnis des Einsatzes dieser Klassen im *coex Package* und wird darüber hinaus nicht weiter eingesetzt.

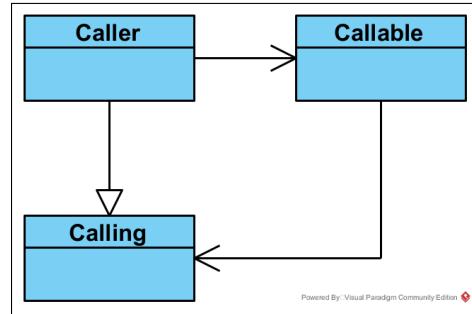


Abbildung 17: KLASSENIDIAGRAMM DES *CALLING PACKAGE*

7.5.5 *threading* Package

Das Package *threading* bietet die Möglichkeit wiederkehrende Aufgaben, abseits von separaten *ROS-Nodes*, bearbeiten zu können. Dieser Zusatz erlaubt ein monolithisches Programm zu entwerfen.

Thread

Diese Klasse bietet die Basis für die Thread-Implementierung, indem die Klasse `std::thread` gekapselt wird. Hier wird mit Aufruf der Methode `start()` eine neue Instanz auf den zugehörigen *Pointer* initialisiert. Zusätzlich implementiert die Klasse `Thread` einen Sperr-Mechanismus, um synchrones Schreiben zu vermeiden. **BESCHREIBUNG!** *dirty read und so beschreiben?*

rosThread

Die Klasse Klasse `rosThread` erweitert die Klasse Klasse `Thread` um eine generische Variable `T Payload`, welcher von den erbenden Klassen zum Versand genutzt werden kann. Die Methode Methode `T runOnce(T Payload)` ist als *full virtual* implementiert, somit wird ein Überschreiben durch erbende Klassen erzwungen. Die Klasse Klasse `ros::Rate` ermöglicht eine frequentiell pausierte Abarbeitung des der auszuführenden Methode `T runOnce()`.

Anmerkung: Idealerweise sollte eine Instanz der Klasse Klasse `ROS::NodeHandler` ebenfalls in dieser Klasse integriert sein. Tests während der Entwicklung zeigten, dass dies nicht umsetzbar ist. Eine Begründung hierfür konnte nicht gefunden werden.

AutoPublisher

Wie der Name der Klasse `AutoPublisher` erahnen lässt, wird hier eine Klasse `ros::Publisher` implementiert. Mit dem Aufruf der Methode `runOnce()` wird die in Klasse `rosThread` gespeicherte `T Payload` mit der Instanz der Klasse `ros::Publisher` versandt.

AutoClient

Die Klasse `AutoClient` kapselt eine Instanz der Klasse `ros::ServiceClient` und bietet somit die Option, Service-Anfragen regelmäßig senden zu können.

7.5.6 coex Package

Dieses Kapitel beschreibt die Klassen, welche zur Interaktion mit der zuerst eingesetzten Hardware genutzt wurden.

Anmerkung: Die Implementierung dieses *Packages* wurde vor der konzeptionellen Änderung des *Application-Layers* umgesetzt. Die Beschreibung der Klassen dieses Paketes dient der Einarbeitung nachfolgender Studienarbeiten. Auf Grund der Änderungen im Code kann dieses *Package* nicht Kompiliert werden.

BESCHREIBUNG! *Hier evtl den Abhängigkeitsgraph für coex zur Veranschaulichung?*

coexBattery

Wie der Klassename vermuten lässt überwacht diese Klasse die Batteriestand des Quadroopters.

Diese Klasse entspricht der Klasse `parrotBattery` der *ArDrone 2.0*.

coexControl

Die Klasse `coexControl` ist als Fassade eingesetzt und bietet Anwendenden Zugriff auf diverse Funktionen der gekapselten Klassen.

Diese Klasse entspricht der Klasse `parrotControl` der *ArDrone 2.0*.

coexMC

Die Abkürzung *MC* im Klassennamen steht für *Manual Control* und deutet hiermit sowohl das genutzte *ROS-Topic* als auch den zugrundeliegenden Nachrichtentyp an. Laut Entwickler-Literatur (siehe Kapitel 6.1.5 *Mögliche Lösung der Aufgabenstellung* (Seite 23)) werden Steuerungsdaten der vier Freiheitsgrade an den Quadroopter gesendet.

Diese Klasse erbt von der Klasse `coexTransitable`

Diese Klasse entspricht der Klasse `parrotTransmitter` der *ArDrone 2.0*.

coexOrientation

Es war geplant, die Pose des Quadroopters in dieser Klasse berechnen zu lassen. Im weiteren Projektverlauf hat sich ergeben, hierfür eine separate Klasse zu erstellen. Diese Klasse entspricht der Klasse `parrotIMU` der *ArDrone 2.0*.

coexRC

Die Klasse `coexRC` ist als Fassade für die beiden nachfolgenden implementiert.

coexRC_Receiver

Die Klasse `coexRC_Receiver` liest vom *ROS-Topic* `/mavros/rc/in` und somit die Eingaben der Funkfernsteuerung. Eine nähere Erläuterung, welche Daten übermittelt werden, findet sich als Kommentar im Code.

coexRC_Transmitter

Als *RC-Transmitter* wird die Klasse bezeichnet, welche Nachrichten an das *ROS-Topic* `/mavros/rc/override` veröffentlicht (vgl. Kapitel 6.1.5 *Mögliche Lösung der Aufgabenstellung* (Seite 22)).

Diese Klasse erbt von der Klasse `coexTransitable`

coexState

Die Klasse `coexState` übernimmt die Interaktion mit dem Zustandsautomaten, welcher im *Flight Controller* des Quadroopters realisiert ist. Anfragen zur Änderung eines Zustand beziehen sich maßgeblich auf den Start und die Landung eines Flugs.

Diese Klasse entspricht der Klasse `parrotStatus` der *ArDrone 2.0*.

coexTransitable

Diese Klasse erbt von der Klasse `Transitable`. Hierin wird die Steuerung innerhalb dieses *Packages* als eine normierte *Manual Control*-Nachricht mit dem Wertebereich [-1, 1] definiert.

Joystick

Hier wird ein Hilfskonstrukt für die Transformation von Daten der Funkfernsteuerung eingeführt. Die Klasse implementiert vier Instanzen der Klasse `JoystickAxis`.

JoystickAxis

Hier werden die Rohdaten der Kanäle der Funkfernsteuerung in normierte Daten zu überführt. Zudem können normierte Werte in den Wertebereich der Funkfernsteuerung transformiert werden.

8 Ergebnis

Um ein Ergebnis bewerten zu können, wird nachfolgend einer Auswahl aussagekräftiger Daten eines Fluges gezeigt.

Hierbei wurden zwei Starts in dem Datendatzen durchgeführt. Zur besseren Interpretation wurden Daten entfernt, welche entsprechend der Implementierung irrelevant sind.

Ein Mitschnitt, welcher mittels *rosbag* entstand, ist verfügbar. Die genannten Daten wurden mittels geeigneter Software (`rosrun BagPlotter parrot` und `rosbag play <File>.bag`) in menschenlesbare *.txt* Dateien überführt. Diese Daten wurden anschließend zur Ermittlung der von der Implementierung geschätzten Pose genutzt. Dieser Vorgang wurde aus Sicherheitsgründen in einer Simulation (*PosControl/Simulant.cpp*) durchgeführt.

Im Zuge dieses Projekts wurden diverse Sicherheitsfunktionen zum Quadrokopter hinzugefügt. Da sich diese Projektarbeit aus interne Sensoren beschränkt, werden diese als Basis der Sicherheitsfunktionen eingesetzt. Aus den übertragenen Daten kann ein Timeout⁶, sowie ein Zusammenstoß mit einem Objekt ermittelt werden. Als weitere Funktionalität wird ein Absturz auf Grund einer zu geringen Akku-Ladung verhindert. Jedes Sicherheitsfunktion löst das Landemanöver der *ArDrone 2.0* aus.

8.1 Analyse realer Flugdaten

8.1.1 Datenbasis

Dieses Kapitel zeigt die verschiedenen Daten des Flugs, um diese in der nachfolgenden Analyse einordnen zu können.

Der gezeigte Datensatz enthält zwei Flüge, welche naheinander aufgenommen wurden. Aus diesen Daten wurden irrelevante Einträge zwischen den Flügen entfernt. Durch diesen Eingriff wurde der berechnete Verlauf des zweiten Fluges nicht beeinflusst, da die Status des Quadrokopter zu geeigneten Zeitpunkten zurückgesetzt werden.

Der vom Zustandsautomaten der *ArDrone 2.0* einnehmbare ZustandIDs sind im Package *ardrone_autonomy* wie folgt definiert:

⁶Der *Timeout* wird in diesem Projekt mit dem Eingang einer neuen Nachricht ermittelt. Geeigneter wäre das Starten eines Timers beim Eingang einer Nachricht. Verstreicht die Zeit des Timers soll das Landemanöver initialisiert werden.

StatusID	Status-Text
0	Unknown
1	Init
2	Landed
3	Flying
4	Hovering
5	Test
6	Taking off
7	Goto Fix Point
8	Landing
9	Looping

Aus den Flugversuchen zeigte sich, dass StatusID 6 (*Taking off*) nicht gesendet wird. Stattdessen wird StatusID 7 (*Goto Fix Point*) unmittelbar nach der *Takeoff*-Message eingenommen. StatusID 8 (*Landing*) wird durch StatusID 9 (*Looping*) abgebildet.

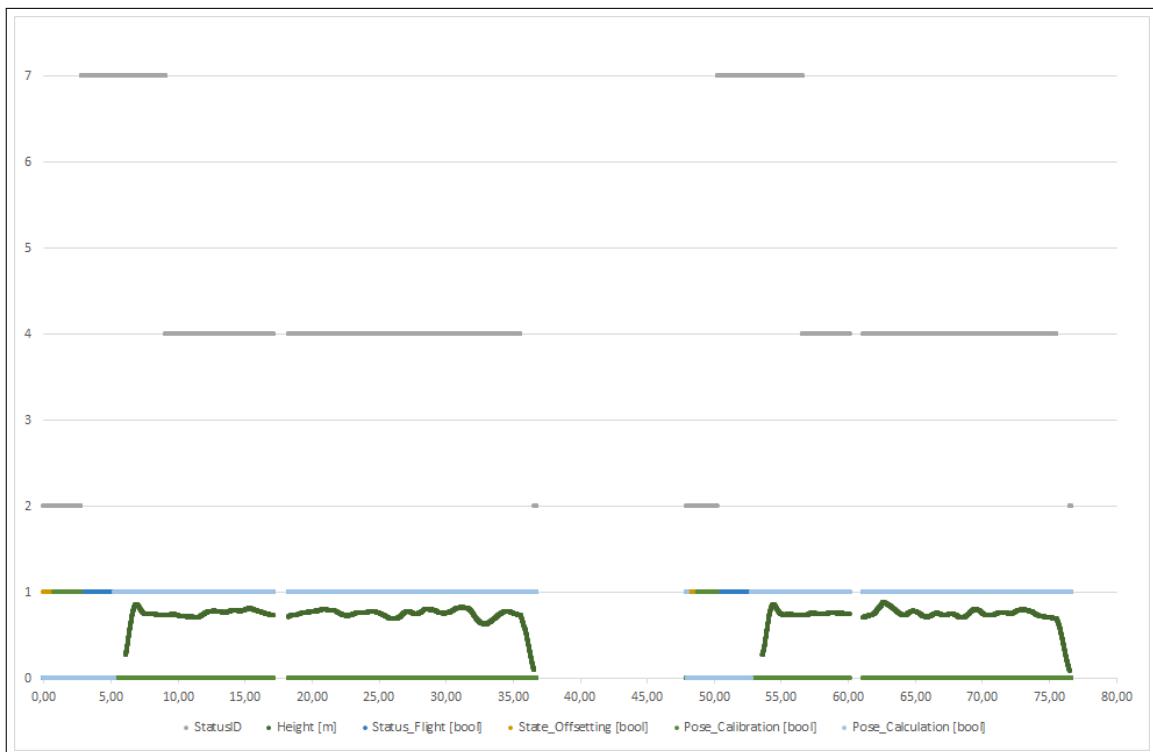


Abbildung 18: TESTFLUG: STATUSID

Um die Aussagekraft der Graphik zu gewährleisten wurde die Ordinatenachse lediglich bis zum Wert 7 abgebildet. Hierdurch wird die StatusID der Landephase ausgespart.

Aus den Daten kann eine *ground truth* für die Position der z-Achse entnommen werden. Diese Daten stammen von dem auf den Untergrund gerichteten Ultraschall-Sensor. Eine Genaue Abschätzung der Korrektheit dieser Daten lässt sich nicht aus Vergleichsdaten belegen. Die Genauigkeit des Untraschall-Sensors kann jedoch als höher angenommen werden als die der berechneten Pose.

8.1.2 Verlauf des Fluges

BESCHREIBUNG! Hier Abb 18 detailliert geschreiben. Besonders auf Flags eingehen.

8.1.3 Lecks der Datenübertragung

Aus den Daten, aufgetragen in Abbildung 18 (Seite 38), und weiteren Testflügen zeigt sich, dass die Verbindung zwischen dem Host-PC und dem Quadrokopter anfällig für Verbindungsunterbrechungen ist. Während diesen Unterbrechungen werden für einen Zeitraum von etwa einer Sekunde keine Nachrichten übermittelt.

Die entwickelte Software sieht für diese Fälle keine Interpolation der Daten vor. Hieraus entstehen Sprünge in den berechneten Daten. Hier können als Beispiel Abbildung 20 (Seite 41) und Abbildung ?? (Seite ??) jeweils für die Zeitbereiche um 17 Sekunden und 61 Sekunden herangezogen werden. BESCHREIBUNG! Bild der berechneten Pose referenzieren.

8.2 Signalverarbeitung

8.2.1 Ermittlung der dauerhaften Nullpunkt-Abweichung

In Abbildung 14 (Seite 19) wird eine Abweichung der Beschleunigungswerte vom Nullpunkt deutlich. Die eingesetzte Software wirkt dem in der Klasse `StateBuilder` entgegen, indem über eine definierte Anzahl an Eingangswerten der Klasse `IMUState` ein Mittelwert gebildet wird. Um an dieser Stelle aussagekräftigere Ergebnisse zu erhalten, wird zudem die Varianz über den zwischengespeicherten Datensatz gebildet. Der Mittelwert mit der geringste Varianz aus einer definierten Anzahl an Stichproben wird als Nullpunkt-Abweichung angenommen. Hierbei ist zu beachten, dass die Attribute der Klasse `IMUState` separat betrachtet werden.

8.2.2 Kalibrierung der Posenberechnung

Aus Simulationen mit der in Kapitel 7 *Implementierung* (Seite 27) beschrieben Software zeigte sich, dass eine einfache Abschätzung der Nullpunkt-Abweichung unach Kapitel 8.2.1 *Ermittlung der dauerhaften Nullpunkt-Abweichung* (Seite 39) nicht vollständig ausreicht. Der Einfluss bereits kleiner Nullpunkt-Abweichung wurde in Kapitel 5.3.2 *Signalaufarbeitung* (Seite 16) erläutert. Aus Erkenntnissen, aufgezeigt in Abbildung 14 (Seite 19), lässt sich nachfolgender mathematische Zusammenhang ableiten:

Entsprechend Formel ?? berechnet die Klasse `PoseBuilder` eine nach der Aufarbeitung

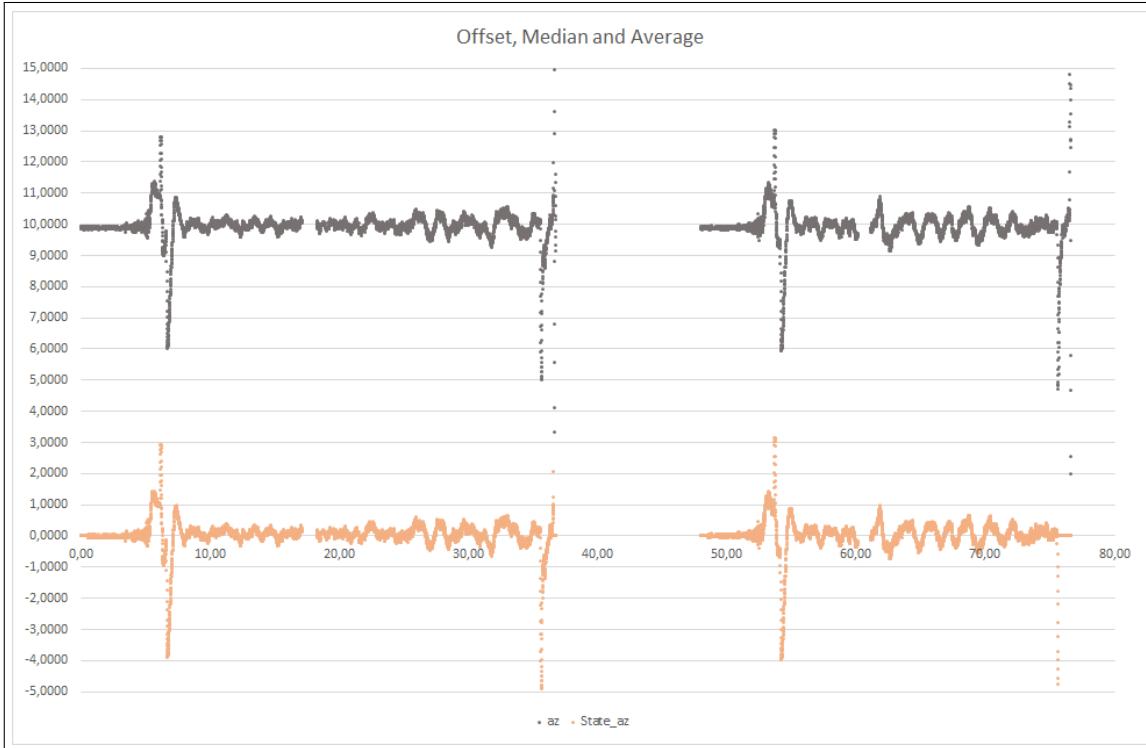


Abbildung 19: TESTFLUG SIGNALVERARBEITUNG: AUFARBEITUNG a_z

Es zeigt sich, dass die Nullpunkt-Abweichung aus den Eingangsdaten der Quadrokopter-IMU berechnet und zur Aufarbeitung der Daten eingesetzt werden kann. Als Parameter werden für diese Berechnung jeweils ein Median-Fenster und ein Mittelwert-Fenster der Größe 1 angesetzt. Somit findet keine Veränderung durch diese Filter statt. Es zeigte sich in den Auswertungen, dass ein Median-Fenster bis zur Größe von 15 Werten keinen signifikanten Einfluss auf die berechnete Pose besitzt. Jedoch wirkt sich eine Vergrößerung des Mittelwert-Fensters negativ auf die berechnete Pose aus. Die Abweichung von erwarteten Werten nimmt deutlich zu.

$$\Delta P_{Direction} = \frac{\Delta a_{Direction}}{2} * \Delta t^2 \quad (6)$$

ÜBERTRAGUNGSFUNKTION DES I-GLIEDS

durch die Klasse **StateBuilder** verbleibende Nullpunkt-Abweichung der Beschleunigungswerte. Diese werden zur Berechnung der Pose von den Eingangdaten subtrahiert.

In Abbildung 20 (Seite 41) kann gezeigt werden, dass sich eine zusätzliche Kalibrierung der Beschleunigungsdaten positiv auf die Berechnung der Pose⁷ auswirken kann.

⁷In der genannten Abbildung werden die berechneten Geschwindigkeiten aufgetragen.

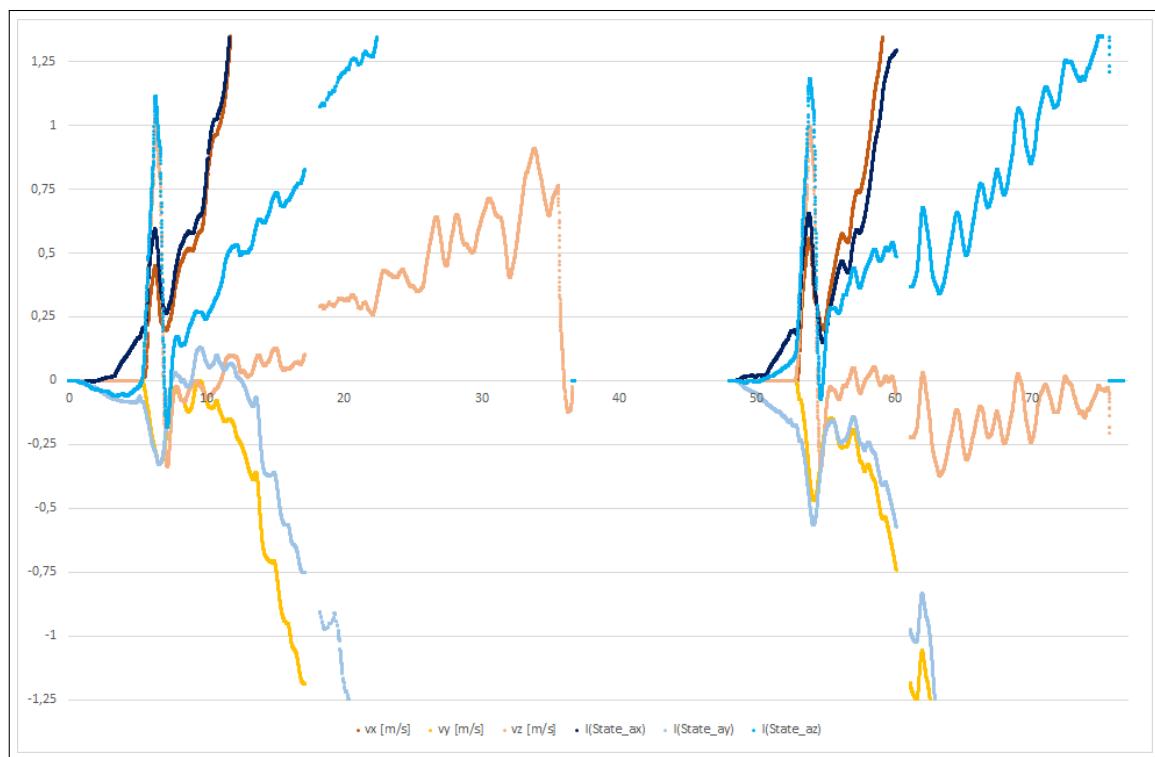


Abbildung 20: TESTFLUG SIGNALVERARBEITUNG: KALIBRIERUNG

BESCHREIBUNG!

9 Erweiterungen

Dieses Kapitel soll beschreiben, welche weiteren Sensoren eingesetzt werden können, um die Genauigkeit der Pose zu erhöhen und damit die Regelung der Drohne zu stabilisieren.

9.1 Dedektion der Umgebung

BESCHREIBUNG! *Auswertung von Objekten und Speicherung der zugehörigen Metadaten*

9.1.1 Vorwärts-Berechnung

9.1.2 Rückwärts-Berechnung bei Ringschluss

BESCHREIBUNG! *Position und Genauigkeit der vorherig ermittelten Objekte berechnen, wenn ein bekanntes Objekt erneut gesichtet wurde.*

Aufzeichnung des Weges erforderlich

9.2 Sensoriken

9.2.1 Abstandssensoren

Punktuelle Abstandsmessung

Linienförmige Abstandsmessung

3D Abstandsmessung

9.2.2 Magnetometer

9.2.3 Kamera

Bodenkamera

Frontkamera

Stereokamera

externe Stereokamera

9.2.4 GPS

globale Ausrichtung

10 Fazit und Ausblick

Im Zuge der Analyse der Flugdaten (siehe Kapitel 8.1 *Analyse realer Flugdaten* (Seite 37)) in Kombination mit der Rekonstruktion eines idealisierten Flugverlaufs (siehe Kapitel 5.3 *Erzeugung von Posen aus Beschleunigungsdaten* (Seite 14)) zeigte sich, dass sich eine Rekonstruktion der Pose aus Beschleunigungsdaten als schwierig herausstellt.

Um äußerer Einflüssen entgegenwirken zu können, wurden diversere Verfahren der Signalverarbeitung herangezogen (vgl. Kapitel 5.3.2 *Signalaufarbeitung* (Seite 14)).

Literaturverzeichnis

- [1] Pozo D., Romero L., Rosales J., Quadcopter stabilization by using PID controllers, veröffentlicht 2014
- [2] Fresk E., Nikolakopoulos G., Full Quaternion Based Attitude Control for a Quadrotor, veröffentlicht 19.07.2013
- [3] Heinrich B. (Hrsg.), et al., Kaspers/KOfner Messen - Steuern - Regeln, 8., überarbeitete und ergänzte Auflage. Auflage veröffentlicht 2009 ISBN 978-3-8348-0006-0
- [4] Wendemuth A., Grundlagen der digitalen Signalverarbeitung, veröffentlicht 2005 ISBN 3-540-21885-8
- [5] Tukey J., Exploratory Data Analysis, veröffentlicht 1977 ISBN 0-201-07616-0
- [6] Internationales Elektrotechnisches Wörterbuch – Teil 351: Leittechnik (IEC 60050-351:2006), veröffentlicht 06/2009
- [7] Mey R., Reinhard Mey Textsammlung 14.Auflage, online, <https://www.reinhard-mey.de/texte-fuer-alle/> veröffentlicht 13.12.2017, abgefragt 08.02.2022
- [8] ellwangen2010, Ballon steuern?, online, <https://www.ballonfahrten.com/ballon-steuern/> veröffentlicht 20.02.2010, abgefragt 07.11.2021
- [9] D-Glied, online, http://testcon.info/FB_DE_D-Glied.html veröffentlicht -unbekannt-, abgefragt 13.04.2022
- [10] Stabilität von Regelkreisen (Frequenzkennlinienverfahren), online, <https://homepages.thm.de/hg13555/Datenbank/aat/index.php/grundlagen-regelungstechnik/45-stabilitaet-von-regelkreisen-frequenzkennlinienverfahren.html> veröffentlicht -unbekannt-, abgefragt 15.04.2022
- [11] ROS - Robot Operating System, online, <https://www.ros.org> veröffentlicht -unbekannt-, abgefragt 28.11.2021
- [12] ROS Indigo Igloo,

online, <http://wiki.ros.org/indigo>
veröffentlicht -unbekannt-, verändert 08.01.2018, abgefragt 16.03.2022

- [13] How quadcopters work & fly: An intro to multirotors,
online, <https://www.droneybee.com/how-quadcopters-work/>
veröffentlicht -unbekannt-, verändert 20.11.2017, abgefragt 01.04.2022
- [14] Clover 4.2 assembly,
online, https://clover.coex.tech/en/assemble_4_2.html
veröffentlicht -unbekannt-, abgefragt 09.05.2022
- [15] Initial setup,
online, <https://clover.coex.tech/en/setup.html>
veröffentlicht -unbekannt-, abgefragt 09.05.2022
- [16] MAVROS Offboard control example,
online, https://docs.px4.io/master/en/ros/mavros_offboard.html
veröffentlicht -unbekannt-, verändert 02.02.2021, abgefragt 16.03.2022
- [17] AR.Drone Developer Guide,
Kapitel *AR.Drone 2.0 Overview*, Seite 5 ff. online, <https://jpchanson.github.io/ARdrone/ParrotDevGuide.pdf>
veröffentlicht 21.05.2012, abgefragt 17.03.2022
- [18] Saks D., Better even at the lowest levels,
online, <https://www.embedded.com/better-even-at-the-lowest-levels/>
veröffentlicht 01.11.2008, verändert 05.12.2020, abgefragt 28.07.2021
- [19] Application Note Object-Oriented Programming in C,
online, https://www.state-machine.com/doc/AN_OOP_in_C.pdf
veröffentlicht 06.11.2020, abgefragt 28.07.2021
- [20] Kirk N., How do strings allocate memory in c++?,
online, <https://stackoverflow.com/questions/18312658/how-do-strings-allocate-memory-in-c>
veröffentlicht 19.08.2013, abgefragt 17.08.2021
- [21] Bansal A., Containers in C++ STL (Standard Template Library),
online, <https://www.geeksforgeeks.org/containers-cpp-stl/>
veröffentlicht 05.03.2018, verändert 12.07.2020, abgefragt 17.08.2021
- [22] Automatic Storage Duration,
online, <https://www.oreilly.com/library/view/c-primer->

plus/9780132781145/ch09lev2sec2.html
veröffentlicht -unbekannt-, abgefragt 17.08.2021

- [23] Noar J., Orda A., Petruschka Y., Dynamic storage allocation with known durations,
online, <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0166218X99001754>
veröffentlicht 30.03.2000, abgefragt 17.08.2021

Anmerkung: Wird hier ein Veröffentlichungsdatum als “-unbekannt-“ markiert, so konnte diese Angabe weder auf der entsprechenden Webseite, noch in deren Quelltext ausfindig gemacht werden.

Anhang