**DIPLOMARBEIT**

Gesamtprojekt

**FPV-Drohne**

**Elektronik FPV-Drohne**

Marcel Bieder 5AHEL

**Softwareentwicklung FPV-Drohne**

Maximilian Lendl 5AHEL

**CAD-Entwicklung & Datenübertragung**

Ben Heinicke 5AHEL

**Entwicklung einer APP für Smartphone & Videoübertragung**

Sebastian Hinterberger 5AHEL

Betreuer: Dipl.-Ing. Josef Reisinger

Schuljahr 2023/24

Abgabevermerk:

Datum: 02.04.2024 übernommen von:

****

**Höhere Technische Bundeslehranstalt Hollabrunn**

**Höhere Lehranstalt für Elektronik und Technische Informatik**

**EIDESSTATTLICHE ERKLÄRUNG**

**Ich erkläre an Eides statt, dass ich die vorliegende Diplomarbeit selbständig und ohne fremde Hilfe verfasst, andere als die angegebenen Quellen und Hilfsmittel nicht benutzt und die den benutzten Quellen wörtlich und inhaltlich entnommenen Stellen als solche erkenntlich gemacht habe.**

**Marcel Bieder**

**Maximilian Lendl**

**Ben Heinicke**

**Sebastian Hinterberger**

Hollabrunn, am 02.04.2024

**HINWEISE**

Die vorliegende Diplomarbeit wurde in Zusammenarbeit mit der Firma **Dronetech Austria** ausgeführt.

oder

Die vorliegende Diplomarbeit wurde für die Abteilung Elektronik und Technische Informatik der HTL Hollabrunn ausgeführt.

Die in dieser Diplomarbeit entwickelten Prototypen und Software-Produkte dürfen ganz oder auch in Teilen von Privatpersonen oder Firmen nur dann in Verkehr gebracht werden, wenn sie diese selbst geprüft und für den vorgesehenen Verwendungszweck für geeignet befunden haben.

Es wird keinerlei Haftung übernommen für irgendwelche Schäden, die aus der Nutzung der hier entwickelten oder beschriebenen Bestandteile des Projekts resultieren.

Für alle Entwicklungen gilt die GNU General Public License [http://www.gnu.org/licenses/gpl.html] der Free Software Foundation, Boston, USA in der Version 3.

Die Diplomarbeit erfüllt die “Standards für Ingenieur- und Technikerprojekte” entsprechend dem Rundschreiben Nr. 60 aus 1999 des BMBWK (GZ.17.600/101-II/2b/99).

[https://www.bmb.gv.at/ministerium/rs/1999\_60.html]

SCHLÜSSELBEGRIFFE

DANKSAGUNGEN

Reisinger, Wihsböck, Kauer, Stoll, Dronetech Austria (Daniel Stoiber),

**DIPLOMARBEIT**

**DOKUMENTATION**

|  |  |
| --- | --- |
| Namen der  Verfasser/innen |  |
| Jahrgang  Schuljahr |  |
| Thema der Diplomarbeit |  |
| Kooperationspartner |  |

|  |  |
| --- | --- |
| Aufgabenstellung |  |

|  |  |
| --- | --- |
| Realisierung |  |

|  |  |
| --- | --- |
| Ergebnisse |  |

|  |  |
| --- | --- |
| Typische Grafik, Foto etc.  (mit Erläuterung) |  |

|  |  |
| --- | --- |
| Teilnahme an Wettbewerben,  Auszeichnungen |  |

|  |  |
| --- | --- |
| Möglichkeiten der Einsichtnahme in die Arbeit | HTL Hollabrunn  Anton Ehrenfriedstraße 10  2020 Hollabrunn |

|  |  |  |
| --- | --- | --- |
| Approbation  (Datum / Unterschrift) | Prüfer/Prüferin | Direktor/Direktorin  Abteilungsvorstand/Abteilungsvorständin |

**DIPLOMA THESIS**

**Documentation**

|  |  |
| --- | --- |
| Author(s) |  |
| Form  Academic year |  |
| Topic |  |
| Co-operation partners |  |

|  |  |
| --- | --- |
| Assignment of tasks |  |

|  |  |
| --- | --- |
| Realisation |  |

|  |  |
| --- | --- |
| Results |  |

|  |  |
| --- | --- |
| Illustrative graph, photo  (incl. explanation) |  |

|  |  |
| --- | --- |
| Participation in competitions  Awards |  |

|  |  |
| --- | --- |
| Accessibility of  final project thesis | HTL Hollabrunn  Anton Ehrenfriedstraße 10  2020 Hollabrunn |

|  |  |  |
| --- | --- | --- |
| Approval  (Date / Signature) | Examiner/s | Head of Department / College |

DA Antrag und unterschriebene Erklärung aus der Diplomarbeitsdatenbank einfügen

Inhaltsverzeichnis

[1 Einleitung 16](#_Toc160104417)

[1.1 Projektziel 16](#_Toc160104418)

[1.2 Gesamtüberblick 16](#_Toc160104419)

[2 Grundlagen Drohnenflug 17](#_Toc160104420)

[2.1 Inertial Measurement Unit (IMU) 17](#_Toc160104421)

[2.1.1 Gyroskop 17](#_Toc160104422)

[2.1.2 Accelerometer 17](#_Toc160104423)

[2.1.3 Magnetometer 17](#_Toc160104424)

[2.1.4 Barometer 17](#_Toc160104425)

[2.2 Lagewinkel 18](#_Toc160104426)

[2.2.1 Throttle 18](#_Toc160104427)

[2.2.2 Pitch 18](#_Toc160104428)

[2.2.3 Roll 18](#_Toc160104429)

[2.2.4 Yaw 18](#_Toc160104430)

[2.2.5 Komplementärfilter 18](#_Toc160104431)

[2.3 PID-Regler 21](#_Toc160104432)

[2.3.1 Proportionalglied (P-Glied) 22](#_Toc160104433)

[2.3.2 Integralglied (I-Glied) 22](#_Toc160104434)

[2.3.3 Differenzialglied (D-Glied) 23](#_Toc160104435)

[2.3.4 PID-Regler 23](#_Toc160104436)

[3 Mechanischer Aufbau 24](#_Toc160104437)

[3.1.1 FPV – Drohne Gesamtaufbau 24](#_Toc160104438)

[3.1.2 3D – Modelle 24](#_Toc160104439)

[3.1.2.1 Propellerschutz 24](#_Toc160104440)

[3.1.2.2 Groundstation 24](#_Toc160104441)

[4 Elektronik FPV-Drohne (BIE) 25](#_Toc160104442)

[4.1 Allgemeines 25](#_Toc160104443)

[4.1.1 Grundlegendes Hardwarekonzept 25](#_Toc160104444)

[4.1.2 Anforderungen 25](#_Toc160104445)

[4.1.3 Komponentenauswahl 25](#_Toc160104446)

[4.2 Flight Controller 25](#_Toc160104447)

[4.2.1 Allgemeines 25](#_Toc160104448)

[4.2.2 Spannungsversorgungskonzept 25](#_Toc160104449)

[4.2.3 Mikrocontroller 25](#_Toc160104450)

[4.2.4 Altium PCB Design 25](#_Toc160104451)

[4.2.5 Pinbelegung 25](#_Toc160104452)

[4.3 Electronic Speed Controller (ESC) 25](#_Toc160104453)

[4.3.1 Übersicht 25](#_Toc160104454)

[4.3.2 Aufbau 25](#_Toc160104455)

[4.3.3 Funktionsweise 25](#_Toc160104456)

[4.3.4 Technische Daten 25](#_Toc160104457)

[4.4 Motoren 25](#_Toc160104458)

[4.4.1 Übersicht 25](#_Toc160104459)

[4.4.2 Aufbau 25](#_Toc160104460)

[4.4.3 Funktionsweise 25](#_Toc160104461)

[4.4.4 Technische Daten 25](#_Toc160104462)

[4.5 Receiver Fernsteuerung 25](#_Toc160104463)

[4.5.1 Übersicht 25](#_Toc160104464)

[4.5.2 Funktionsweise 25](#_Toc160104465)

[4.5.3 Technische Daten 25](#_Toc160104466)

[4.6 Video Transmitter (VTx) 25](#_Toc160104467)

[4.6.1 Übersicht 25](#_Toc160104468)

[4.6.2 Funktionsweise 25](#_Toc160104469)

[4.6.3 Technische Daten 25](#_Toc160104470)

[4.7 Live Kamera 25](#_Toc160104471)

[4.7.1 Übersicht 26](#_Toc160104472)

[4.7.2 Funktionsweise 26](#_Toc160104473)

[4.7.3 Technische Daten 26](#_Toc160104474)

[4.8 VR-Brille 26](#_Toc160104475)

[4.8.1 Übersicht 26](#_Toc160104476)

[4.8.2 Funktionsweise 26](#_Toc160104477)

[5 Steuerungssoftware 27](#_Toc160104478)

[5.1 Softwarearchitektur 27](#_Toc160104479)

[5.1.1 Hauptprogramm 27](#_Toc160104480)

[5.1.2 Real Time System 28](#_Toc160104481)

[5.1.3 Umgang mit Initialisierungsfehler 30](#_Toc160104482)

[5.1.3.1 Übersicht Fehlercodes 31](#_Toc160104483)

[5.2 Fernsteuerung 33](#_Toc160104484)

[5.2.1 Konfiguration Fernsteuerung 35](#_Toc160104485)

[5.2.2 Unterstützte Protokolle 37](#_Toc160104486)

[5.2.2.1 PPM 37](#_Toc160104487)

[5.2.2.2 S.Bus 37](#_Toc160104488)

[5.2.2.3 I.Bus 39](#_Toc160104489)

[5.2.3 Initialisierung der Empfangssoftware 41](#_Toc160104490)

[5.2.4 Empfangssoftware 46](#_Toc160104491)

[5.3 Inertial Measurement Unit (IMU) 49](#_Toc160104492)

[5.3.1 I²C Protokoll 49](#_Toc160104493)

[5.3.1.1 Schreibzyklus IMU 51](#_Toc160104494)

[5.3.1.2 Lesezyklus IMU 52](#_Toc160104495)

[5.3.2 IMU-Verbindungstest 54](#_Toc160104496)

[5.3.3 Gyroskop und Accelerometer - MPU9250 56](#_Toc160104497)

[5.3.3.1 Registerübersicht MPU9250 56](#_Toc160104498)

[5.3.3.2 Initialisierung Accelerometer und Gyroskop 57](#_Toc160104499)

[5.3.3.3 Einlesen der Accelerometer- und Gyroskop-Daten 58](#_Toc160104500)

[5.3.3.4 Komplementärfilter 60](#_Toc160104501)

[5.3.4 Barometer / Luftdrucksensor - BMP280 62](#_Toc160104502)

[5.3.4.1 Registerübersicht BMP280 62](#_Toc160104503)

[5.3.4.2 Initialisierung Barometer 63](#_Toc160104504)

[5.3.4.3 Einlesen der Barometer-Daten 64](#_Toc160104505)

[5.3.4.4 Berechnung der Höhe 66](#_Toc160104506)

[5.4 Smart Battery Monitor - DS2438 68](#_Toc160104507)

[5.4.1 One-Wire Protokoll 68](#_Toc160104508)

[5.4.1.1 One-Wire Schreibzyklen 69](#_Toc160104509)

[5.4.1.2 One-Wire Lesezyklen 72](#_Toc160104510)

[5.4.1.3 Initialisierungssequenz 74](#_Toc160104511)

[5.4.1.4 ROM-Funktionsbefehl 75](#_Toc160104512)

[5.4.1.5 Memory-Funktionsbefehl 75](#_Toc160104513)

[5.4.2 Registerübersicht DS2438 76](#_Toc160104514)

[5.4.3 Initialisierung DS2438 77](#_Toc160104515)

[5.4.4 Spannungsüberwachung 78](#_Toc160104516)

[5.5 Motoransteuerung 80](#_Toc160104517)

[5.5.1 DShot Protokoll 80](#_Toc160104518)

[5.6 PID-Regler 83](#_Toc160104519)

[5.6.1 Hover Modus 83](#_Toc160104520)

[5.6.2 Failsafe 83](#_Toc160104521)

[5.7 Debugging 84](#_Toc160104522)

[5.7.1 Terminal Ausgabe 84](#_Toc160104523)

[5.7.2 Status – LEDs 86](#_Toc160104524)

[6 Datenübertragung der Mess- und Videodaten (Ben) 88](#_Toc160104525)

[6.1 Überblick Datenübertragung 88](#_Toc160104526)

[6.2 Kommunikation: Flight Controller und Sender 88](#_Toc160104527)

[*6.2.1 Aufbau Sendermodul (VTx)* 88](#_Toc160104528)

[6.2.2 ASK – Modulation 88](#_Toc160104529)

[6.2.3 Transmit – Programm auf Cortex µC 88](#_Toc160104530)

[6.2.3.1 Gleitkommadarstellung (memcpy) 88](#_Toc160104531)

[6.2.3.2 Code 88](#_Toc160104532)

[*6.2.4* Testen der Übertragung 88](#_Toc160104533)

[6.3 Kommunikation: Sender und Empfänger 88](#_Toc160104534)

[6.3.1 Aufbau Empfängermodul 88](#_Toc160104535)

[6.3.2 Verbindungsaufbau 88](#_Toc160104536)

[6.3.3 Testen der Übertragung 88](#_Toc160104537)

[6.4 Kommunikation: Empfänger und Raspberry Pi 88](#_Toc160104538)

[6.4.1 Empfangsprogramm auf Raspberry Pi 88](#_Toc160104539)

[6.4.1.1 UART auf dem Raspberry Pi 88](#_Toc160104540)

[6.4.1.2 Code 88](#_Toc160104541)

[6.4.1 Senden der Daten auf dem MQTT-Server 88](#_Toc160104542)

[6.5 Testen der Datenübertragungskette 88](#_Toc160104543)

[7 Visualisierungs-App 89](#_Toc160104544)

[7.1 Applikation 89](#_Toc160104545)

[7.1.1 Einführung – Dart / Flutter - Framework 89](#_Toc160104546)

[7.1.1.1 Allgemeines 89](#_Toc160104547)

[7.1.1.2 Pub Dev / Package Installer 89](#_Toc160104548)

[7.1.1.3 Dart Syntax 89](#_Toc160104549)

[7.1.1.4 State Management 89](#_Toc160104550)

[7.1.1.4.1 Stateful vs. Stateless Widgets 89](#_Toc160104551)

[7.1.1.4.2 Provider 89](#_Toc160104552)

[7.1.2 Allgemeines zur App 89](#_Toc160104553)

[7.1.2.1 Usersystem 89](#_Toc160104554)

[7.1.2.2 Datenvisualiserung 89](#_Toc160104555)

[7.1.2.3 3D-Model-Viewer 89](#_Toc160104556)

[7.1.2.4 Livestream-Viewer 89](#_Toc160104557)

[7.1.3 UI-Konzept 89](#_Toc160104558)

[7.1.4 Projektstruktur und -umgebung 89](#_Toc160104559)

[7.1.4.1 Editor – Visual Studio Code 89](#_Toc160104560)

[7.1.4.2 Flutter Installation 89](#_Toc160104561)

[7.1.4.3 Projekterstellung 89](#_Toc160104562)

[7.1.4.4 Projektstruktur 89](#_Toc160104563)

[7.1.4.5 Packages 89](#_Toc160104564)

[7.1.4.5.1 Pubspec.yaml 89](#_Toc160104565)

[7.1.4.5.2 Installieren neuer Packages 89](#_Toc160104566)

[7.1.5 Splash + Willkommensscreen 90](#_Toc160104567)

[7.1.5.1 Native Splash Screen 90](#_Toc160104568)

[7.1.5.2 Willkommensbildschirm 90](#_Toc160104569)

[7.1.5.3 Logo-Design 90](#_Toc160104570)

[7.1.6 Login + Registrierung 90](#_Toc160104571)

[7.1.6.1 E-Mail-Login 90](#_Toc160104572)

[7.1.6.2 Google-Login 90](#_Toc160104573)

[7.1.6.3 Passwort vergessen 90](#_Toc160104574)

[7.1.6.4 Registrierung 90](#_Toc160104575)

[7.1.7 Homepage 90](#_Toc160104576)

[7.1.7.1 Bottom Navigation Bar / GNav-Bar 90](#_Toc160104577)

[7.1.7.2 Serverdatendialog 90](#_Toc160104578)

[7.1.7.3 Flugdatenvisualisierung 90](#_Toc160104579)

[7.1.7.3.1 MQTT-Datenstreams 90](#_Toc160104580)

[7.1.7.3.2 Syncfusion Cartesian Charts 90](#_Toc160104581)

[7.1.7.3.3 Echtzeitdaten + Animierte Diagramme 90](#_Toc160104582)

[7.1.7.3.4 Speicherung der Daten 90](#_Toc160104583)

[7.1.7.4 3D-Model-Viewer 90](#_Toc160104584)

[7.1.7.4.1 Flutter Cube 90](#_Toc160104585)

[7.1.7.4.2 MQTT-Datenstream 90](#_Toc160104586)

[7.1.7.4.3 3D-Dronenmodell 90](#_Toc160104587)

[7.1.7.4.3.1 Optimierungen in Blender 90](#_Toc160104588)

[7.1.7.4.4 Extrabedienungen 90](#_Toc160104589)

[Live-View 90](#_Toc160104590)

[7.1.7.4.5 VLC-Plugin 90](#_Toc160104591)

[7.1.7.4.6 Darstellung eines Netzwerkstreams 90](#_Toc160104592)

[7.1.7.4.7 Video-Overlay 90](#_Toc160104593)

[7.1.8 Sidemenu / Drawer 90](#_Toc160104594)

[7.1.8.1 Userprofil 90](#_Toc160104595)

[7.1.8.1.1 Darstellung der Userdaten 90](#_Toc160104596)

[7.1.8.1.2 Profilbildauswahl 90](#_Toc160104597)

[7.1.8.1.3 Änderung der Userdaten 91](#_Toc160104598)

[7.1.8.2 Credits 91](#_Toc160104599)

[7.1.8.3 Vorherige Flüge 91](#_Toc160104600)

[7.1.8.3.1 Darstellung aller gespeicherten Flüge 91](#_Toc160104601)

[7.1.8.3.2 Sortiermöglichkeiten 91](#_Toc160104602)

[7.1.8.3.3 Einsicht in vorherigen Flug 91](#_Toc160104603)

[7.1.8.4 Einstellungen 91](#_Toc160104604)

[7.1.8.4.1 Dark- / Light-Mode 91](#_Toc160104605)

[7.1.8.4.2 3D-Model Ausrichtung 91](#_Toc160104606)

[7.1.8.5 Logout´ 91](#_Toc160104607)

[7.2 Firebase Backend 91](#_Toc160104608)

[7.2.1 Installation via Firebase CLI 91](#_Toc160104609)

[7.2.1.1.1 Firebase CLI – Setup 91](#_Toc160104610)

[7.2.1.1.2 Firebase für Dart / Flutter aktivieren 91](#_Toc160104611)

[7.2.1.1.3 Flutter App mit Flutterfire konfigurieren 91](#_Toc160104612)

[7.2.2 Einbindung in Flutter 91](#_Toc160104613)

[7.2.2.1.1 Flutterfire Configure 91](#_Toc160104614)

[7.2.2.1.2 Benutzten Firebase Packages hinzufügen 91](#_Toc160104615)

[7.2.3 Nutzen der verschiedenen Datenbanksysteme 91](#_Toc160104616)

[7.2.3.1 Auth 91](#_Toc160104617)

[7.2.3.1.1 E-Mail + Passwort – Login 91](#_Toc160104618)

[7.2.3.1.2 Google Login 91](#_Toc160104619)

[7.2.3.2 Firestore Database 91](#_Toc160104620)

[7.2.3.2.1 Struktur 91](#_Toc160104621)

[7.2.3.2.2 Allgemeine Userdaten 91](#_Toc160104622)

[7.2.3.2.3 Flugdaten 91](#_Toc160104623)

[7.2.3.2.4 Einstellungen 91](#_Toc160104624)

[7.2.3.3 Realtime Database 91](#_Toc160104625)

[7.2.3.3.1 Allgemein 91](#_Toc160104626)

[7.2.3.3.2 Sinn der verschiedenen Flags 92](#_Toc160104627)

[7.2.3.4 Storage 92](#_Toc160104628)

[7.2.3.4.1 Allgemein 92](#_Toc160104629)

[7.2.3.4.2 Referenz zu User in Firestore 92](#_Toc160104630)

[8 Videostreaming 92](#_Toc160104631)

[8.1 Allgemeiner Aufbau 92](#_Toc160104632)

[8.1.1 Anforderungen 92](#_Toc160104633)

[8.1.2 Übertragungskette 92](#_Toc160104634)

[8.2 CADFPX Analog Kamera 92](#_Toc160104635)

[8.2.1 Allgemein 92](#_Toc160104636)

[8.2.2 Produktinformationen 92](#_Toc160104637)

[8.2.3 Verwendungszweck 92](#_Toc160104638)

[8.2.4 Verbindungstest via USB-Camera App 92](#_Toc160104639)

[8.3 USB2.0 VHS Video Grabber 92](#_Toc160104640)

[8.4 RTMP-Server via NGINX aufsetzen 92](#_Toc160104641)

[8.4.1 RTMP Allgemein 92](#_Toc160104642)

[8.4.2 NGINX 92](#_Toc160104643)

[8.4.2.1 Allgemein 92](#_Toc160104644)

[8.4.2.2 Installation 92](#_Toc160104645)

[8.4.2.3 RTMP-Konfiguration 92](#_Toc160104646)

[8.4.2.4 Serverstatus einsehen 92](#_Toc160104647)

[8.5 RTMP-Stream erstellen 92](#_Toc160104648)

[8.5.1 FFMPEG Allgemein 92](#_Toc160104649)

[8.5.2 Aufbau der Konvertierung 92](#_Toc160104650)

[8.5.2.1 Simple Konvertierung 92](#_Toc160104651)

[8.5.2.2 Optimierungen 92](#_Toc160104652)

[8.5.2.2.1 Encodervergleich 92](#_Toc160104653)

[8.5.2.2.2 Optimierungsflags 92](#_Toc160104654)

[8.5.2.2.3 Unoptimiert vs. Optimiert 93](#_Toc160104655)

[9 Videoserver-Port Forwarding 93](#_Toc160104656)

[9.1 Allgemein 93](#_Toc160104657)

[9.2 Routereinstellungen 93](#_Toc160104658)

[9.3 Kontakt mit Routerfirma zur Freischaltung 93](#_Toc160104659)

[9.4 Testen der Ports 93](#_Toc160104660)

[9.4.1 Portchecker.co 93](#_Toc160104661)

[9.5 Testen des Videostreams 93](#_Toc160104662)

[9.5.1 VLC-Player 93](#_Toc160104663)

[9.5.1.1 Devicestream direkt testen 93](#_Toc160104664)

[9.5.1.2 Netzwerkstream im selben Netzwerk 93](#_Toc160104665)

[9.5.1.3 Netzwerkstream via Public IP 93](#_Toc160104666)

[10 Ergebnisse 93](#_Toc160104667)

[11 Anhang 94](#_Toc160104668)

[11.1 Einführung CAD – Software (Fusion 360) (Ben) 94](#_Toc160104669)

[*11.1.1* UI und Projekterstellung 94](#_Toc160104670)

[*11.1.2* Skizze anfertigen 94](#_Toc160104671)

[*11.1.3* Körper erstellen 94](#_Toc160104672)

[*11.1.4* Schrift und Bilder einfügen 94](#_Toc160104673)

[11.2 3D – Druck (Ben) 94](#_Toc160104674)

[*11.2.1* 3D – Drucker 94](#_Toc160104675)

[*11.2.2* Filamente 94](#_Toc160104676)

[11.2.3 3D – Drucker Software (Ultimaker Cura) 94](#_Toc160104677)

[11.3 Inbetriebnahme Anleitung 94](#_Toc160104678)

[11.4 Projektplan 94](#_Toc160104679)

[11.5 Projektkosten 94](#_Toc160104680)

[11.6 Projekttagebuch 94](#_Toc160104681)

[11.7 Einführung Entwicklungsumgebung - Steuerungssoftware 94](#_Toc160104682)

[12 Quellen 101](#_Toc160104683)

[12.1 Gedruckte Medien 101](#_Toc160104684)

[12.2 Online 101](#_Toc160104685)

[13 Verzeichnis der Abbildungen 103](#_Toc160104686)

[14 Begleitprotokoll 105](#_Toc160104687)

[15 Anhang 106](#_Toc160104688)

[15.1 — Projektdokumentation (Kostendarstellung, Besprechungsprotokolle etc.) 106](#_Toc160104689)

[15.2 — Technische Dokumentation (technische Beschreibungen, Berechnungen, 106](#_Toc160104690)

[15.3 Konstruktionszeichnungen, Versuchsberichte, betriebswirtschaftliche Kalkulationen etc.) 106](#_Toc160104691)

[15.4 Schaltungen, Zeichnungssätze, sonstiges 106](#_Toc160104692)

# Einleitung

## Projektziel

## Gesamtüberblick

# Grundlagen Drohnenflug

## Inertial Measurement Unit (IMU)

### Gyroskop

### Accelerometer

### Magnetometer

### Barometer

## Lagewinkel

### Throttle

Throttle beschreibt die Geschwindigkeit aller vier Motoren. Ein anderer Begriff für Throttle ist der Motorschub. Bei der Angabe von zum Beispiel 80% Throttle ist gemeint, dass alle Motoren sich mit 80% Geschwindigkeit drehen. Wenn der Wert hoch ist, fliegt die Drohne nach oben. Bei einem niedrigen Wert fliegt die Drohne nach unten.

Die Motoren und Propellern müssen genug Schub erzeugen, damit das Gesamtgewicht der Drohne angehoben und manövriert werden kann. Die Throttleangabe ist vor allem wichtig bei einem Hover-Modus. Dabei regelt der Quadrokopter die einzelnen Geschwindigkeiten der Motoren, um sich selber aufrecht zu halten.

### Pitch

Bei Pitch handelt es sich um den Neigungswinkel nach vorne und hinten, wenn die Drohne von hinten angeschaut wird. Mit der Angabe vom Pitch kann der Quadrokopter nach vorne und nach hinten gelenkt werden.

Bild Drohne mit Pitch winkel

Vielleicht mehr physikalisch erklären

### Roll

Bei Roll handelt es sich um den Neigungswinkel nach rechts und links, wenn die Drohne von hinten angeschaut wird. Mit der Angabe vom Roll kann der Quadrokopter nach rechts und links gesteuert werden.

Bild Drohne mit Roll winkel

Vielleicht mehr physikalisch erklären

### Yaw

Bei Yaw handelt es sich um die Drehung um die eigene Achse nach links oder rechts. Mit der Angabe vom Yaw kann der Quadrokopter nach links und rechts drehen.

Bild Drohne mit Yaw winkel

Vielleicht mehr physikalisch erklären

### Komplementärfilter

Der Komplementärfilter hat die Aufgabe die Messwerte von einen Beschleunigungssensor und Gyroskop in Lagewinkel umzuwandeln.

**Accelerometer Winkel**:

Durch die Kombination der terrestrischen Gravitation und Trigonometrie ermöglicht es die Accelerometer-Werte in Neigungswinkel umzuwandeln:

accelerometerPitch/Roll … jeweiliger berechneter Winkel in Radiant (rad)

accelerometerX/Y/Z … Accelerometer Messwert der jeweiligen Achse in g (Erdbeschleunigung, ungefähr 9,81m/s²)

Der Yaw-Winkel kann nicht berechnet werden, da die Yaw-Bewegung in der Ebene, um die Z-Achse, stattfindet und daher unabhängig von dem Werten der X- und Y-Achse ist.

Im Gegensatz zum Gyroskop besitzt ein Accelerometer keinen Drift in der Messung und kann daher für längerfristige Messungen verwendet werden.

Für den Filter wird der berechnete Winkel in Grad, statt Radiant, benötigt. Daher müssen die Ergebnisse mit einem Faktor von multipliziert werden.

Problem:

Wenn der Accelerometer bewegt wirkt, kann dieser nicht zwischen den Bewegungsbeschleunigungen und der Erdbeschleunigung unterscheiden und liefert daher verfälschte Werte.

**Gyroskop Winkel**:

Durch die Integration der Winkelbeschleunigungswerte über der Zeit ist es möglich Lagewinkel zu bestimmen:

gyroscopePitch/Roll/Yaw … jeweiliger berechneter Winkel in Radianten (rad)

gyroscopeX/Y/Z … Gyroskop Messwert der jeweiligen Achse in Grad pro Sekunde (°/s)

dt … Zeitbereich in Sekunden (s)

Problem:

Durch die Integration werden Messungenauigkeit aufsummiert, die zu einen Wertedrift führen. Daher kann das Gyroskop nur für kurzfristige Messungen verwendet werden.

**Sensorfusion**:

Der Komplementärfilter kann als Kombination von zwei Filter gesehen werden: Ein Hochpassfilter für das Gyroskop und einen Tiefpassfilter für den Accelerometer.

Das Accelerometer liefert eine gute Indikation der Orientierung bei konstanten Bedingungen und das Gyroskop liefert eine gute Indikation bei schnellen Neigungsänderungen.

Winkel … Pitch/Roll-Winkel in Grad (°)

α … Filterkoeffizient

gyroscopeData … Gyroskop Messwerte der jeweiligen Achse in Grad pro Sekunde (°/s)

dt … Abtastzeit in Sekunden (s)

accelerometerWinkel … berechneter Roll/Pitch nur mit Accelerometerdaten in Grad (°)

Der Wert für α ist typischerweise 0,98. Das bedeutet, dass die Gyroskop-Messung zu 98% und die Accelerometer-Messung zu 2% gewichtet wird. Daraus folgt:

Dadurch, dass mit dem Accelerometer kein Yaw-Winkel bestimmt werden kann, wird der Winkel nur mit dem Gyroskop berechnet. Wegen dem Gyroskop-Drift wird dieser Winkel über die Zeit immer ungenauer und muss für einen genauen Wert nach einer Zeit zurückgesetzt werden.

## PID-Regler

Im Allgemeinen wird zwischen einer Steuerung und einer Regelung unterschieden. Bei einer Steuerung wird der Sollwert direkt in einen Steuerungsalgorithmus geleitet, der immer nach demselben Schema abläuft. Bei einer Regelung wird der Istwert des Systems rückgekoppelt und mit dem Sollwert verglichen. Dieser Vergleich ergibt eine Regelabweichung, die das in den Regelalgorithmus geleitet wird. Das Ziel einer Regelung ist, die Regelabweichung zu verschwinden zu bringen – Soll- und Istwert auf denselben Wert regeln.

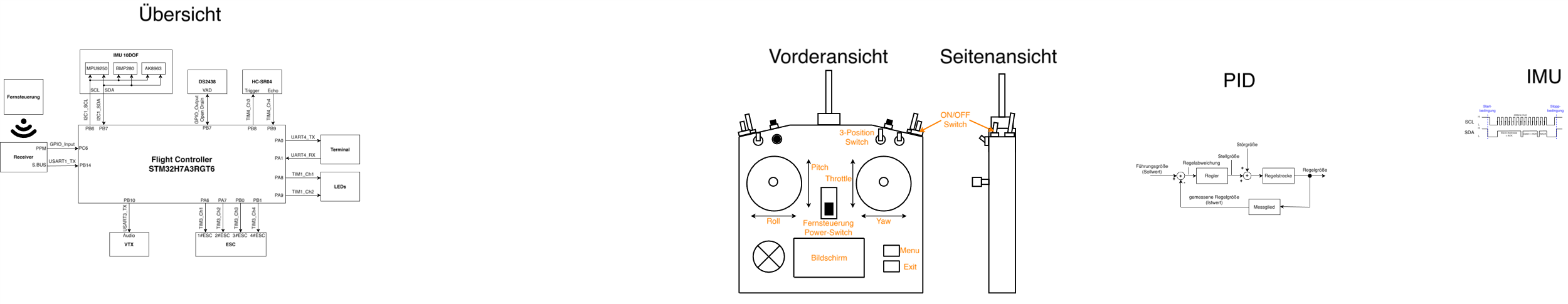


Abbildung 1: Regler-Blockschaltbild

Führungsgröße … eingestellter Sollwert, der vom Regler erreicht werden soll

Regelabweichung … Differenz zwischen Führungsgröße und gemessener Regelgröße

Regler … erstellt Stellgröße proportional von der Regelabweichung

Stellgröße … Reglerausgang

Störgröße … externe Einflüsse, die die Stellgröße beeinflussen

Regelstrecke … wandelt Stellgröße in die Regelgröße um

Regelgröße … gemessener Istwert, meistens durch Sensoren bestimmt

Es gibt verschiedene Arten für Regler, die für unterschiedliche Anwendungen Vor- und Nachteile liefern. Für den Quadrokopter wurde ein PID-Regler verwendet. Dieser hält während des Fluges die Drohne stabil. Bei Störgrößen, wie zum Beispiel Windstößen, soll die Drohne sich automatisch wieder in die richtige Lage ausrichten, um einen stabilen Flug zu gewährleisten.

Ein PID-Regler besteht aus drei verschiedenen Gliedern (Proportional-, Integral-, Differenzialglied), die unterschiedliche Aufgaben erfüllen und Funktionsweisen aufweisen:

### Proportionalglied (P-Glied)

Das Proportionalglied setzt das Ausgangssignal proportional zum Eingangssignal.

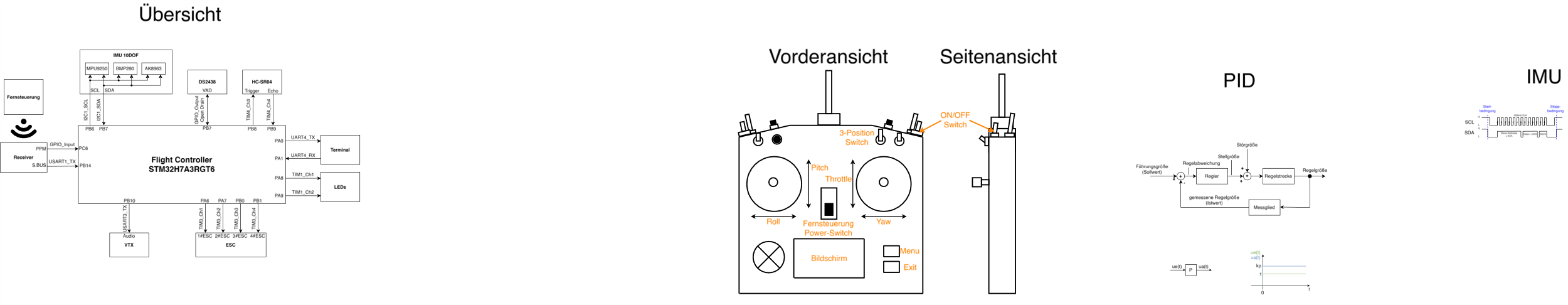


Abbildung 2: P-Glied Sprungantwort

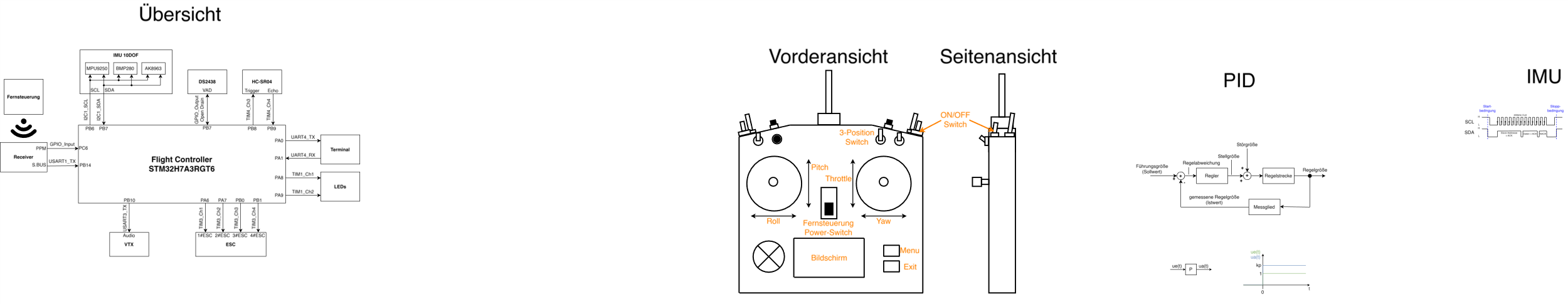


Abbildung 3: P-Glied Schaltsymbol

**Vor- (+) und Nachteile (-):**

+ kann Regelabweichung zum Verschwinden bringen

+ schnelles Anregeln

+ keine Phasenverschiebung

- kann Regelabweichung = 0 nicht halten

### Integralglied (I-Glied)

Das Integralglied setzt das Ausgangssignal zum Integral vom Eingangssignal.

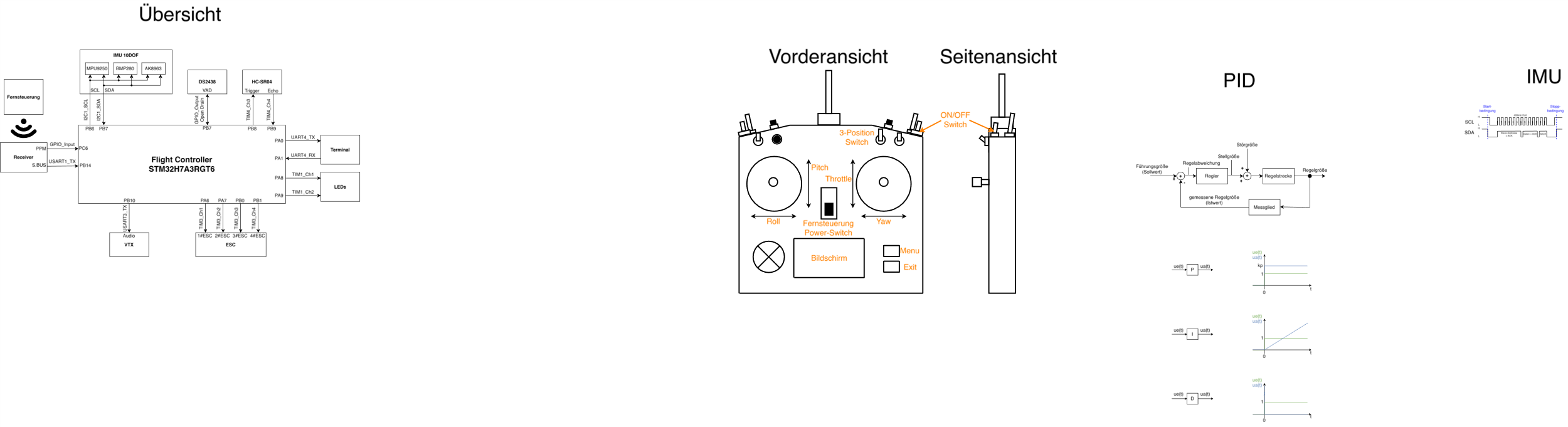


Abbildung 4: I-Glied Schaltsymbol

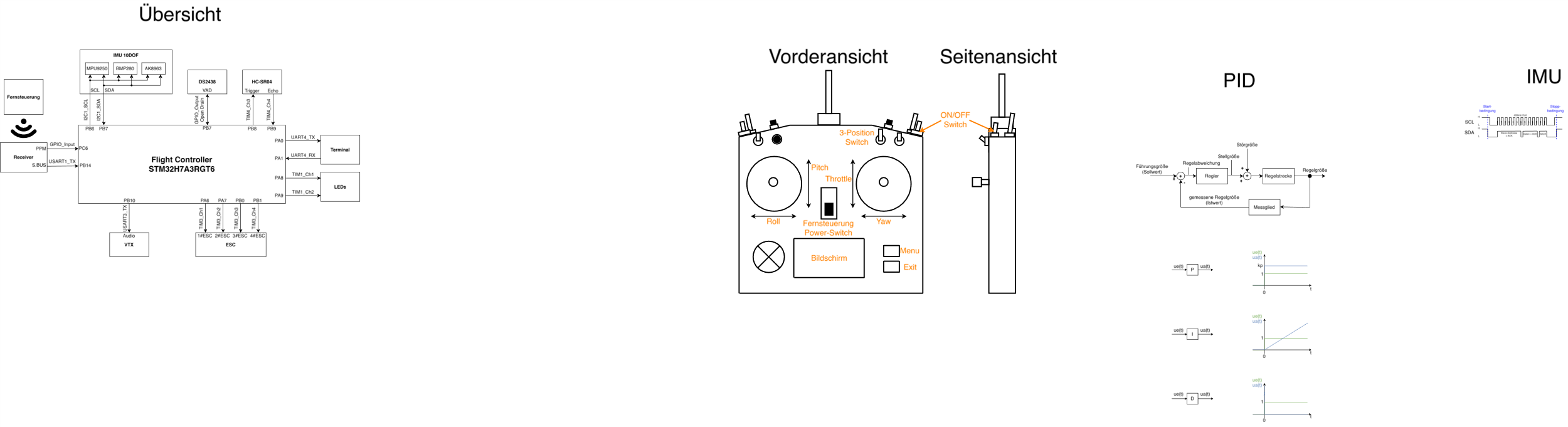


Abbildung 5: I-Glied Sprungantwort

**Vor- (+) und Nachteile (-):**

+ kann Regelabweichung zum Verschwinden bringen

- langsames Anregeln

- verringert die Stabilität (φ = -90°)

- neigt zum Überschwingen

### Differenzialglied (D-Glied)

Das Differenzialglied setzt das Ausgangssignal zur momentanen Änderung des Eingangssignals.

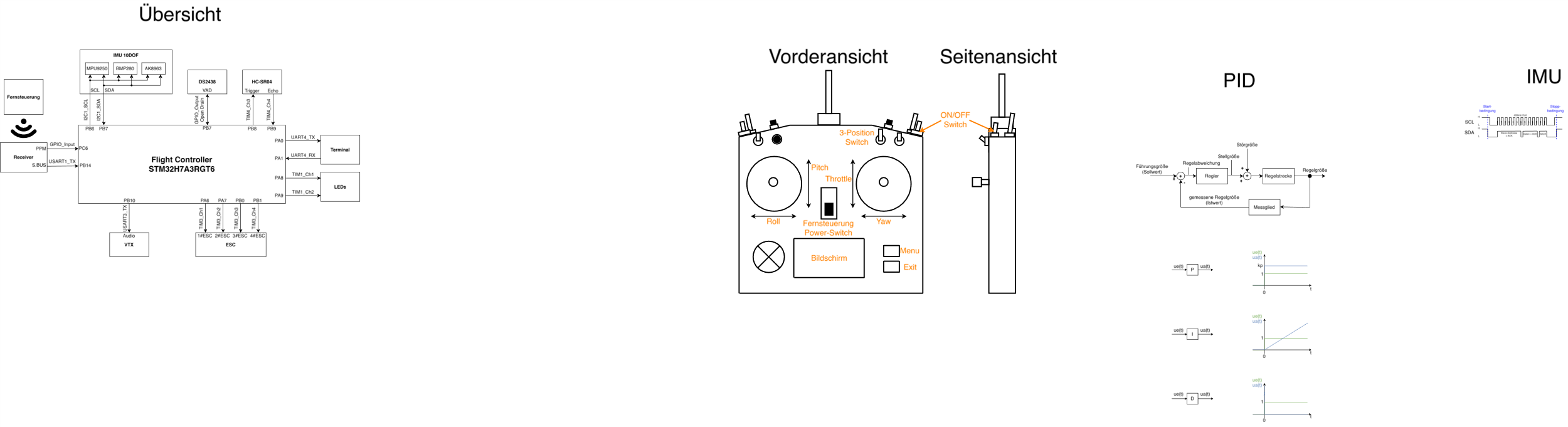


Abbildung 6: D-Glied Schaltsymbol

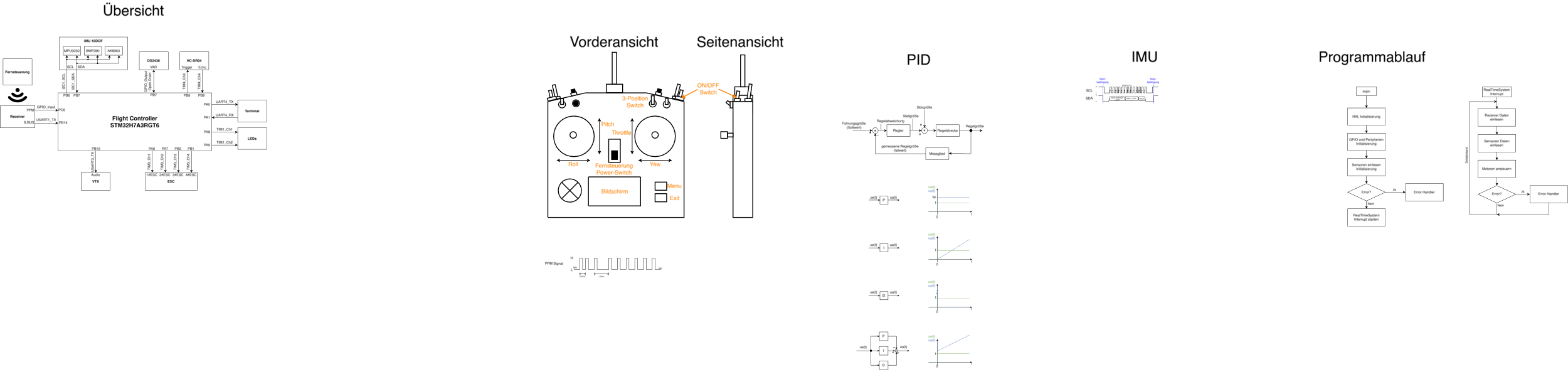


Abbildung 7: D-Glied Sprungantwort

**Vor- (+) und Nachteile (-):**

- kann allein nicht Regeln

In Kombination mit anderen Gliedern:

+ schnelles Anregeln

+ verbessert die Stabilität (φ = +90°)

### PID-Regler

Der PID-Regler kombiniert alle Ausgangssignale der einzelnen Glieder.

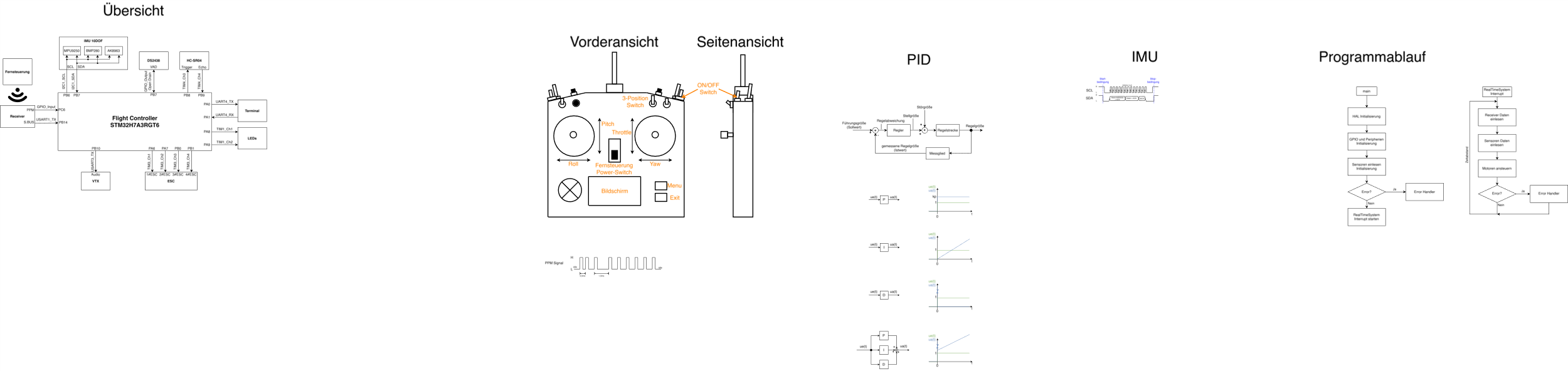


Abbildung 8: PID-Regler Schaltsymbol

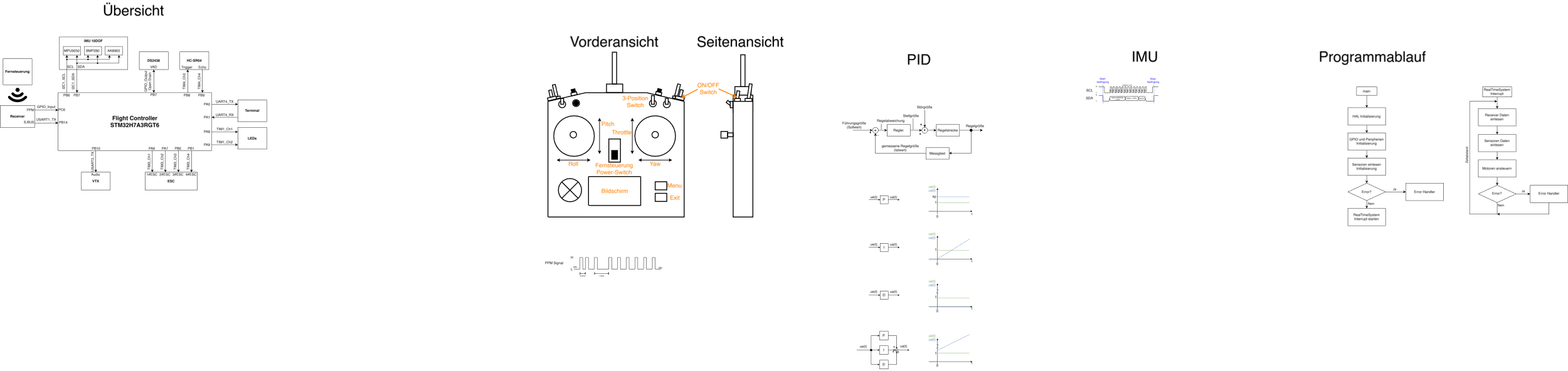


Abbildung 9: PID-Regler Sprungantwort

**Vor- (+) und Nachteile (-):**

+ schnelles Anregeln (durch P- und D-Glied)

+ kann Regelabweichung zum Verschwinden bringen (P und I) und halten (I)

+ verbessert die Stabilität (D)

- kann Überschwingen (I)

# Mechanischer Aufbau

### FPV – Drohne Gesamtaufbau

### 3D – Modelle

#### Propellerschutz

#### Groundstation

# Elektronik FPV-Drohne (BIE)

## Allgemeines

### Grundlegendes Hardwarekonzept

### Anforderungen

### Komponentenauswahl

## Flight Controller

### Allgemeines

### Spannungsversorgungskonzept

### Mikrocontroller

### Altium PCB Design

### Pinbelegung

## Electronic Speed Controller (ESC)

### Übersicht

### Aufbau

### Funktionsweise

### Technische Daten

## Motoren

### Übersicht

### Aufbau

### Funktionsweise

### Technische Daten

## Receiver Fernsteuerung

### Übersicht

### Funktionsweise

### Technische Daten

## Video Transmitter (VTx)

### Übersicht

### Funktionsweise

### Technische Daten

## Live Kamera

### Übersicht

### Funktionsweise

### Technische Daten

## VR-Brille

### Übersicht

### Funktionsweise

# Steuerungssoftware

## Softwarearchitektur

Die Software des Flight Controllers hat die Aufgabe die Daten der Fernsteuerung über einen Receiver und die Messwerte der Sensoren einzulesen und diese umzuwandeln, damit diese an die ESC, VTX, Status-LEDs und Terminal senden zu können.

Die Architektur ist sehr zeitkritisch und benötigt genaue Interrupts, damit ein stabiler und sicherer Flug möglich ist. Daher wird das gesamte System von dem Real Time System Interrupt gesteuert, welcher in einem Zeitbereich von ein paar Millisekunden auslöst und mithilfe der Sensorik die gesamte FPV-Drohne steuert.

### Hauptprogramm

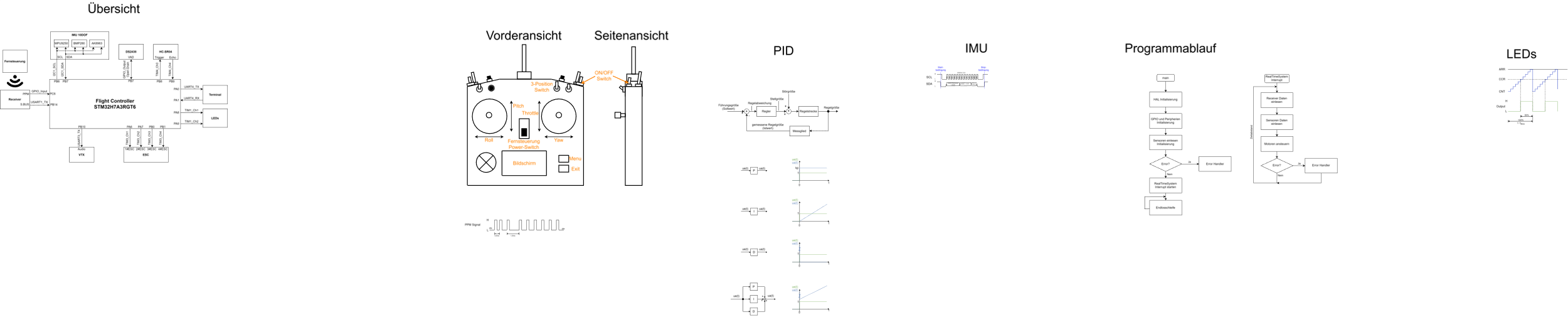
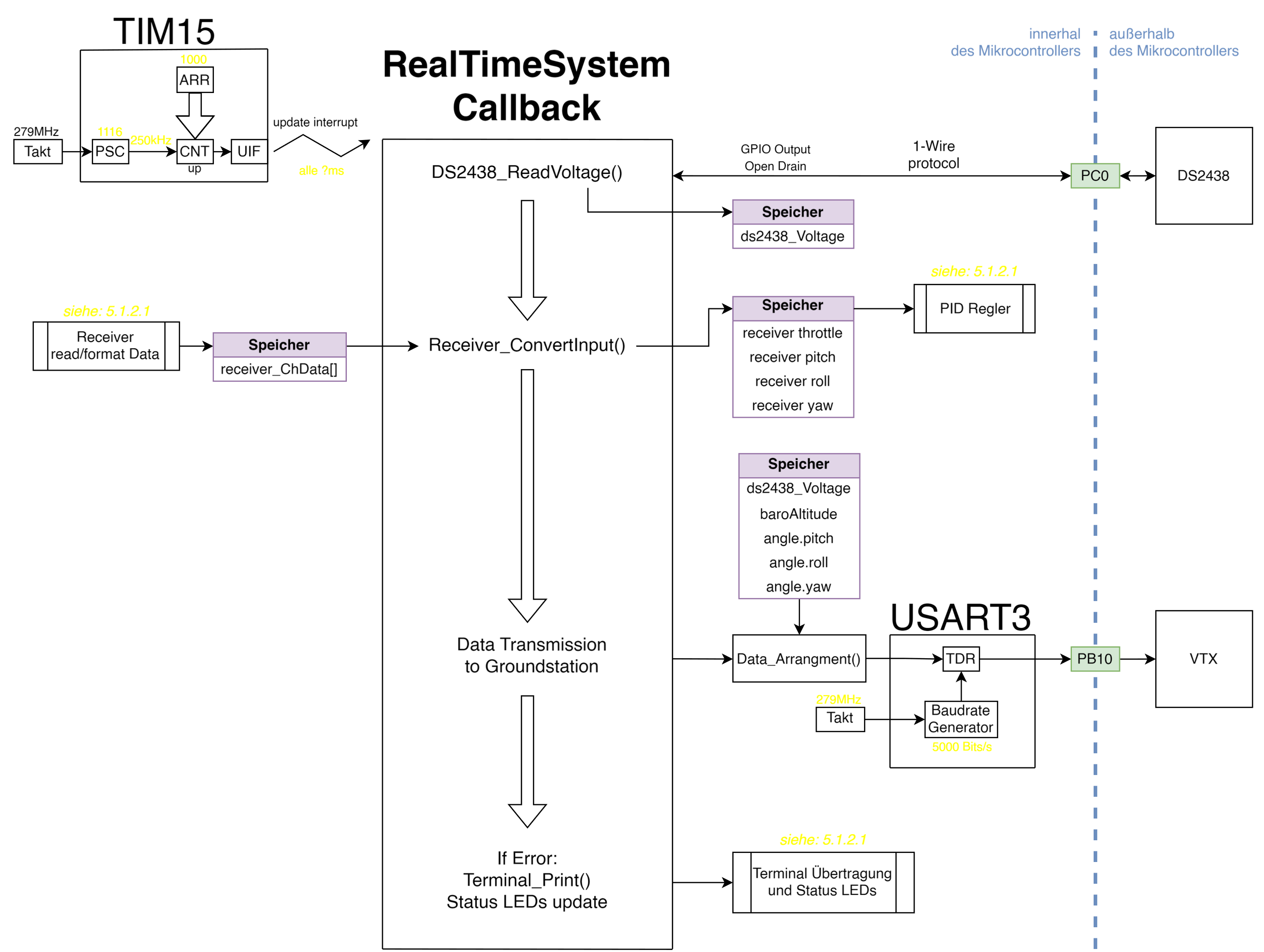


Abbildung 10: Flussdiagramm Programmablauf

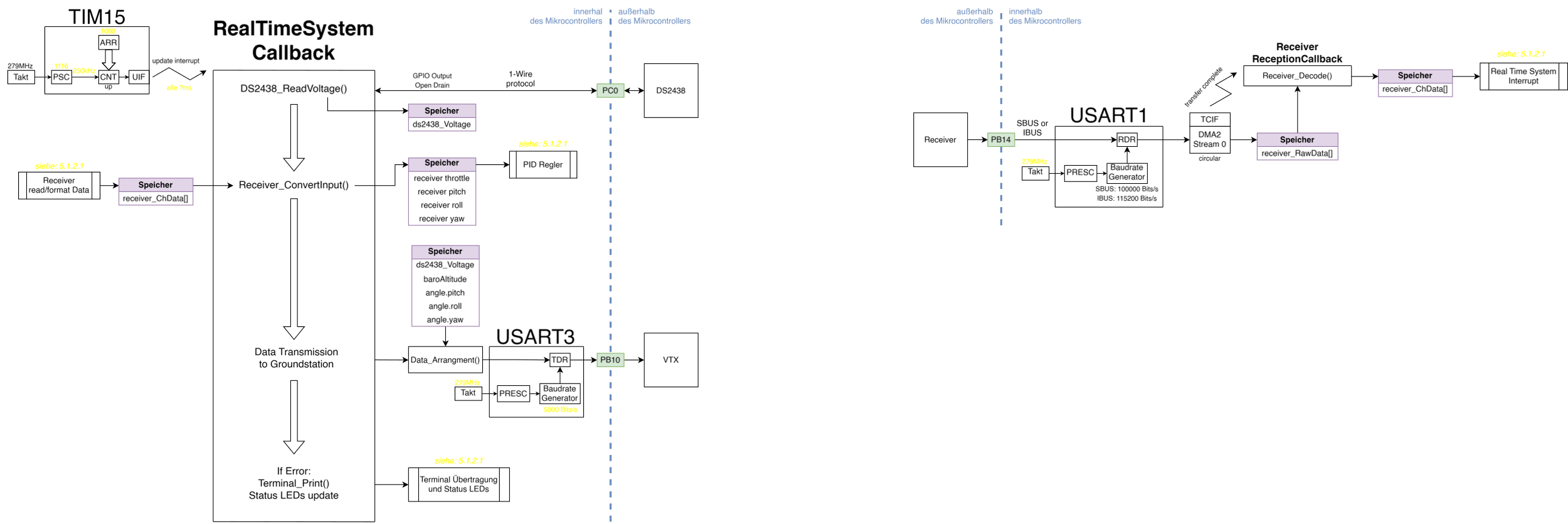
Am Beginn des Hauptprogramms (main) wird die gesamte HAL-Struktur initialisiert. Danach werden alle GPIO-Ports und Peripherien mit den Angaben aus STM32CubeMX eingestellt. Weiters werden alle Sensoren mit den gewünschten Einstellungen initialisiert und auf Fehler überprüft *(siehe: 5.2.3 Umgang mit Initialisierungsfehler)*.

Als letzten Schritt wird der Timer für das Real-Time-System-Interrupt gestartet *(siehe: 5.2.2 Real Time System)* und das Hauptprogramm geht in eine Endlosschleife über.

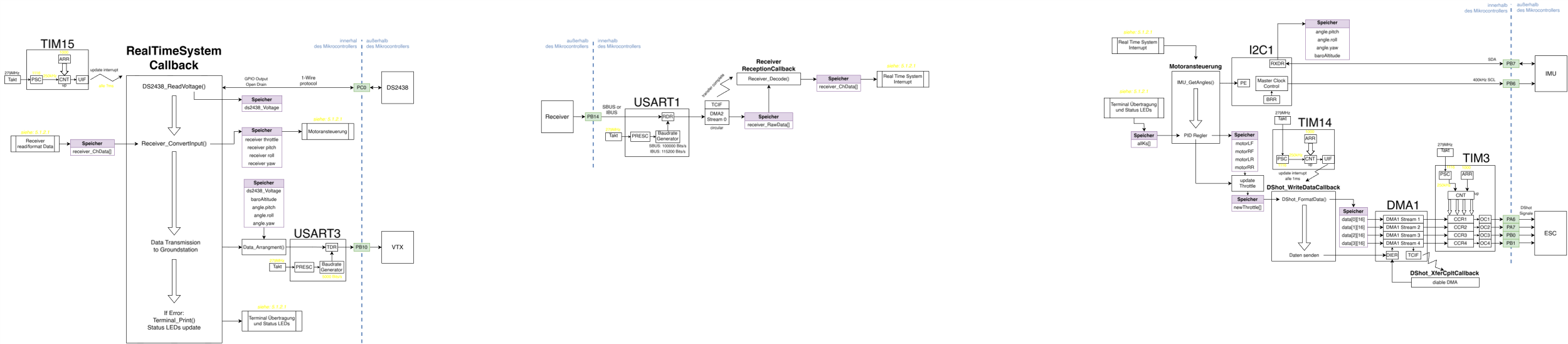
### Real Time System Interrupt



#### Receiver read/format data



#### Motoransteuerung



#### Terminal Übertragung und Status LEDs

### Umgang mit Initialisierungsfehler

Wenn während des Initialisierungsprozesses ein Error auftritt, wird die folgende Funktion aufgerufen:

Dateiname: status\_handling.c

/\*\*

 \* @brief This function completely stops the program

 \* @param sens what sensor has the error

 \* @param errorCode

 \* @retval None

 \*/

void Sensor\_ErrorHandler(Sensors sens, int8\_t errorCode)

{

  char txt[100];

  // choose error source

  switch(sens)

  {

    case DATA\_TRANSMIT:

      sprintf(txt, "DATA TRANSMIT ERROR | Code: %d\n\r", errorCode);

      break;

    case DS2438:

      sprintf(txt, "DS2438 ERROR | Code: %d\n\r", errorCode);

      break;

    case IMU:

      sprintf(txt, "IMU ERROR | Code: %d\n\r", errorCode);

      break;

    case RECEIVER:

      sprintf(txt, "RECEIVER ERROR | Code: %d\n\r", errorCode);

      break;

    case DSHOT:

      sprintf(txt, "DSHOT ERROR | Code: %d\n\r", errorCode);

      break;

    default:

      sprintf(txt, "wrong sensor ERROR | Code: %d\n\r", errorCode);

      break;

  }

  // output error message

  Terminal\_Print(txt);

  // turn red LED on and the blue LED off

  \_\_HAL\_TIM\_SET\_COMPARE(LED\_TIM, LED\_RED\_CHANNEL, 10000);

  \_\_HAL\_TIM\_SET\_COMPARE(LED\_TIM, LED\_BLUE\_CHANNEL, 0);

  // disable all interrupts

  \_\_disable\_irq();

  // infinite loop

  while(1);

}

Diese Funktion gibt über das Terminal die Errorquelle mit dem Errorcode aus. Weiters wird die rote LED durchgehend eingeschalten und die blaue LED ausgeschalten. Alle Interrupts werden deaktiviert und das Programm wird durchgehend mit einer Endlosschleife pausiert. Um den Initialisierungsprozess neu zu starten, muss am Mikrocontroller ein Reset ausgelöst werden.

#### Übersicht Fehlercodes

Für jede Verbindung gibt es eigene Fehlercodes, die sich in enum-Objekte befinden. Diese werden in den Header-Dateien der einzelnen Komponente als Datentyp mit den Namen *<Komponente>\_Status* definiert. Zusätzlich hat jedes Objekt einen Wert, der angibt, dass kein Fehler aufgetreten ist: diese sind mit *<Komponente>\_OK* definiert.

**IMU-Fehlercodes:**

Dateiname: IMU\_10DOF.h

typedef enum IMU\_Status

{

    IMU\_OK = 0,

    IMU\_ADDRESS\_ERROR = 1,      // wrong I2C slave address

    IMU\_I2C\_ERROR = 2,          // no I2C typedef set

    IMU\_TIM\_ERROR = 3,          // no TIM typedef set

    IMU\_MPU\_WHOAMI\_ERROR = 10,  // MPU9250 who am i value wrong

    IMU\_MAG\_WHOAMI\_ERROR = 11,  // AK8963 who am i value wrong

    IMU\_BARO\_CHIPID\_ERROR = 12, // BMP280 who am i value wrong

    IMU\_BARO\_INIT\_ERROR = 13    // BMP280 init timeout

} IMU\_Status;

**DS2438 Fehlercodes:**

Dateiname: DS2438.h

typedef enum DS2438\_Status

{

    DS2438\_OK = 0,

    DS2438\_ERROR = 1,           // sensor not found or initialisation error

    DS2438\_VOLTAGE\_ERROR = 2    // battery voltage too low

} DS2438\_Status;

**Receiver Fehlercodes:**

Dateiname: receiver.h

typedef enum Receiver\_Status

{

    RECEIVER\_OK = 0,                // receiver ok

    RECEIVER\_UART\_ERROR = 1,        // uart configuration doesnt match selected protocol

    RECEIVER\_PWM\_ERROR = 2,         // pwm timer not set

    RECEIVER\_PPM\_ERROR = 3,         // IBUS selected: PPM not configured correctly

    RECEIVER\_TIMEOUT = 4,           // no data signal found

    PROTOCOL\_ERROR = 5,             // selected protocol wrong

    IBUS\_ERROR = 6,                 // IBUS UART DMA not starting

    IBUS\_HEADER\_ERROR = 7,          // IBUS header is wrong

    IBUS\_CHECKSUM\_ERROR = 8,        // IBUS checksum is wrong

    IBUS\_SIGNAL\_LOST\_ERROR = 9,     // IBUS signal lost

    SBUS\_ERROR = 10,                // SBUS UART DMA not starting

    SBUS\_HEADER\_ERROR = 11,         // SBUS header is wrong

    SBUS\_FOOTER\_ERROR = 12,         // SBUS footer is wrong

    SBUS\_SIGNAL\_LOST = 13,          // SBUS signal lost flag is set

    SBUS\_SIGNAL\_FAILSAFE = 14       // SBUS signal failsafe flag is set

} Receiver\_Status;

**DShot Fehlercodes:**

Dateiname: dshot\_own.h

typedef enum DShot\_Status

{

    DSHOT\_OK = 0,

    DSHOT\_TIM\_ERROR = 100 // no TIM typedef set

} DShot\_Status;

## Fernsteuerung

Um eine FPV-Drohne steuern zu können, muss mindestens ein 4-Kanal Sender und Empfänger verwendet werden, um die gewünschten Steuerungsdaten, Throttle, Pitch, Roll und Yaw, zu senden. Mit weiteren Kanälen können zusätzliche Funktionen, wie zum Beispiel ON/OFF-Switch, realisiert werden.

Für das Projekt wurde der Turnigy 9X 9Ch Mode 2 Transmitter mit dem TGY-iA6C Receiver ausgewählt, da diese eine große Auswahl an Kanälen, Schalter und digitalen Signalausgang ermöglichen.



Abbildung 12: Fernsteuerung



Abbildung 13: Receiver

In der Abbildung 3 wird die verwendete Tastenbelegung auf der Fernsteuerung dargestellt:



Abbildung 14: Fernsteuerung Tastenbelegung

Mit den zwei großen Joysticks kann die Drohne schon bedient werden. Für eine bessere Bedienung wird zusätzlich eine ON/OFF-Switch, der die Motoren der Drohne an- und ausschaltet, und ein 3-Position-Switch, womit zwischen mehreren Flugmodi unterschieden werden kann, verwendet. Um eine richtige Funktionalität der Schalter zur gewährleisten - [*siehe: 5.3.1 Konfiguration Fernsteuerung*](#_Konfiguration_Fernsteuerung)

Wenn der ON/OFF-Switch nach unten zeigt, dann ist die Drohne aus und die Motoren hören auf sich zu drehen. Wenn der Schalter nach oben zeigt, wirkt der 3-Position-Switch als Modus Auswahl.

In der oberen Stellung befindet sich die Drohne im „Safe-Mode“. Das bedeutet, dass der Throttle-Wert, der zur ESC geschickt wird, begrenzt wird.

In der mittleren Stellung schaltet wird der „Normal-Mode“ eingeschaltet. Dieser Modus verhält sich gleich, wie der „Safe-Mode“, nur erlaubt er eine schnellere Motordrehzahl.

Die untere Position stellt einen Hover-Mode ein. Die Drohne versucht jetzt sich selber gerade zu halten, ohne abzustützen.

Genauere Informationen und Grenzwerte: *(siehe: Motoransteuerung und Hovermodus)*

Wichtig:

Wenn die Versorgungsspannung der Fernsteuerung weniger als 8,5V beträgt, beginnt ein Buzzer alle 5 Sekunden den Benutzer zu alarmieren. Die aktuelle Spannung kann auf dem Bildschirm der Fernsteuerung überprüft werden.

**Switch Error:**

Beim Starten der Fernsteuerung, kann es vorkommen, dass am Bildschirm „switch-error!“ steht. Dieser Fehler wird angegeben, wenn die Schalter nicht auf ihrer High-Position sind. Das bedeutet beim Starten der Fernsteuerung, müssen alle Schalter nach oben zeigen, beziehungsweise die Schalter, die auf der Oberseite montiert worden sind, müssen nach hinten zeigen, wie in Abbildung 3 (Nummer ändert sich noch) dargestellt ist.

### Konfiguration Fernsteuerung

Damit die ausgewählte Fernsteuerung mit unserem System funktioniert, müssen grundlegende Vorbereitungen vor der Inbetriebnahme getroffen und kontrolliert werden.

**Verbindung mit Empfänger:**

Um die Verbindung zu testen, schalte die Fernsteuerung und den Receiver ein. Die eingebaute Status-LED des Receivers fängt schnell zum Blinken an. Wenn die LED nach ein paar Sekunden anfängt durchgehend zu leuchten, ist die Fernsteuerung mit dem Receiver verbunden.

Wenn die LED anfangt langsamer zu blinken, wurde die Verbindung nicht gefunden und die Fernsteuerung muss mit dem Receiver neu gekoppelt werden:

1. Schalte die Fernsteuerung und den Receiver aus
2. Halte den Bind-Knopf auf der Rückseite der Fernsteuerung, während diese angeschaltet wird
3. Schalte den Receiver ein
4. Warte, bis die Status-LED auf dem Receiver durchgehend leuchtet
5. Lasse den Bind-Knopf los und starte die Fernsteuerung neu, um die Koppelung zu testen

**Einstellungen in Fernsteuerung:**

Damit die Signale richtig von der Flugsoftware interpretiert werden können, müssen folgende Einstellungen in der Fernsteuerung getroffen werden:

Beim längeren gedrückt halten der MENU-Taste wird eine Auswahl zwischen „System Setting“ und „Function Setting“ angezeigt.

|  |  |
| --- | --- |
| **System Setting** | |
| Type Select | ACRO |
| Modeuat | PPM |
| Stick Set | MODEL 1 |
| Output Select | PPM s-BUS |

Die dargestellten Einstellungen sind die empfohlenen Werte. Die Einstellungen Stick Set und Output Select kann vom Benutzer in der Software festgelegt werden *(siehe: Stick Set Änderung und Output Select Änderung)*

|  |  |  |
| --- | --- | --- |
| **Function Setting** | | |
| AUX-CH  (für ON/OFF Switch) | CH5 Gear | |
| PROG. MIX  (für 3-Position-Switch) | MIX1 | STATE: ACT  MASTER: GYR  SLAVE: FLP  OFFSET: 000  UPRATE: -100  DNRATE: 100  SW: NOR |
| MIX2 | STATE: ACT  MASTER: GYR  SLAVE: FLP  OFFSET: 000  UPRATE: 000  DNRATE: 000  SW: ID1 |
| MIX3 | STATE: ACT  MASTER: GYR  SLAVE: FLP  OFFSET: 000  UPRATE: 100  DNRATE: -100  SW: ID2 |
| DISPLAY | Kontrolle der Kanal-Ausgänge | |

Diese Einstellungen sind notwendig, damit der ON/OFF Switch und der 3-Position-Switch richtig dekodiert werden und eine richtige Funktionalität nachweisen können.

### Unterstützte Protokolle

Der Receiver unterstützt eine parallele digitale und analoge Signalausgabe. Ein Pin gibt immer ein PPM-Signal aus, während der andere Pin entweder ein S.Bus oder I.Bus Signal ausgibt. Die Ausgabe kann in den Fernsteuerungseinstellungen festgelegt werden. *(*[*siehe: 5.3.1 Konfiguration*](#_Konfiguration)*)*

#### PPM

Das PPM-Signal ist das einzige analoge Signal, das der Receiver ausgibt. Die Daten können mit der Timer-Peripherie eingelesen werden, indem die Länge der Periodendauer bestimmt wird. Die Daten kommen in 9 Kanälen mit einem 8,1ms low-aktiven Ruhezustand. Die Kanalwerte befinden sich in den Bereich 0,5ms (0% Throttle) bis 1,5ms (100% Throttle).

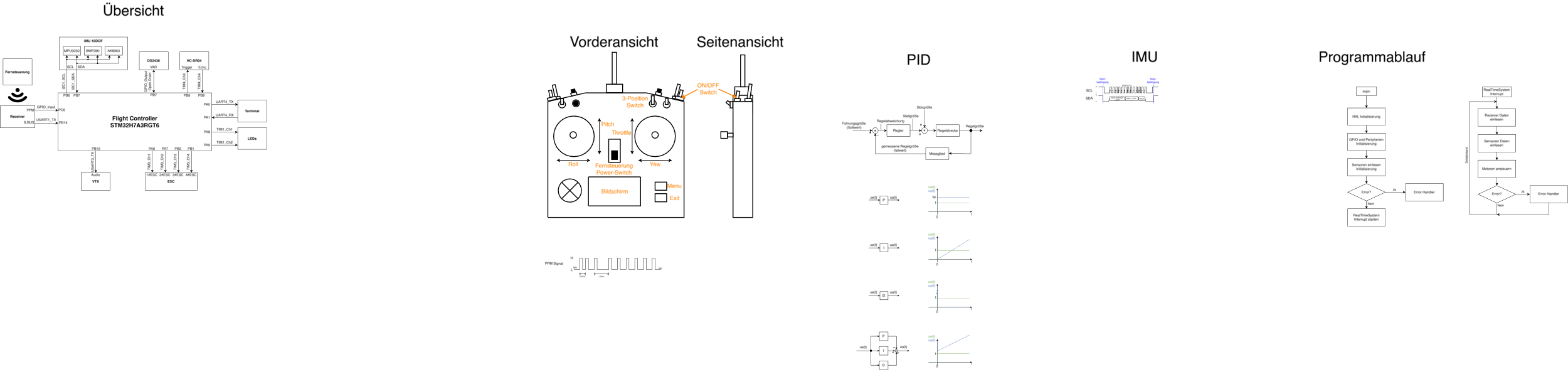


Abbildung 15: Beispiel PPM-Signal

Dadurch, dass die digitalen Protokolle, um ein Vielfaches, schneller und nicht sehr fehleranfällig sind, unterstützt die Steuerungssoftware das PPM-Protokoll nicht. Das PPM-Signal wird nur bei der Initialisierung für einen Verbindungstest mit GPIO-Input und nicht für das Fliegen der Drohne verwendet.

#### S.Bus

Das S.Bus-Protokoll ist das empfohlene Protokoll für die Benutzung der Drohne. Es handelt sich um ein digitales Protokoll, das mittels der UART-Peripherie eingelesen wird. Das Protokoll ist schneller als das analoge Protokoll PPM und weniger fehleranfällig als das I.Bus-Protokoll, da das Signal mit invertierten high- und low-Zuständen übertragen wird. Die Datenpakete werden kontinuierlich gesendet, sind ungefähr 3ms lang und besitzen einen ungefähr 4,7ms langen low-aktiven Ruhezustand. Der digitale Wertebereich befindet sich zwischen 350 und 1680.

**UART-Konfiguration in STM32CubeMX**:

Ein Bild, das Text, Screenshot, Software, Webseite enthält.

Automatisch generierte Beschreibung

Abbildung 16: STM32CubeMX Einstellungen S.Bus

Die wichtigsten UART-Einstellungen sind in der folgenden Tabelle dargestellt:

|  |  |
| --- | --- |
| **Einstellung** | **Wert** |
| Mode | Single Wire (Half-Duplex) |
| Baud Rate | 100000 Bits/s |
| Word Length | 9 Bits (including Parity) |
| Parity | Even |
| Stop Bits | 2 |
| RX Pin Active Level Inversion | Enable |

**Protokolldaten:**

Das S.Bus Protokoll besteht aus 25 Bytes:

|  |  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- | --- |
| Byte[0] | S.Bus header, 0x0F | | | |
| Byte[1…22] | Daten, 16 Kanäle | | | |
| Byte[23] | Bit[0] (0x01)  Kanal 17 | Bit[1] (0x02)  Kanal 18 | Bit[2] (0x04)  Frame Lost Flag | Bit[3] (0x08)  Failsafe Flag |
| Byte[24] | S.Bus footer, 0x00 | | | |

Die Bytes[1…22] beinhalten die Daten der einzelnen Kanäle. Jeder Kanal besteht aus 11 Bits, die nacheinander gesendet werden, wobei die ersten Bits des Kanals den niedrigsten Stellenwert haben.

Beispiel für eine Dekodierung:

|  |  |  |  |  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- |
| **Byte** | 0 | 1 | 2 | 3 | … | 23 | 24 |
| **Daten**  header  0b001 0011 0001  Kanal 1  0b001 1001 0001  Kanal 2  flags  footer | 0x0F | 0b00110001 | 0b00110001 | 0b00110001 | … | 0b00000000 | 0x00 |

#### I.Bus

Das I.Bus-Protokoll ist das zweite digitale Protokoll, welches der Receiver ausgeben kann. Die Daten werden über die UART-Peripherie eingelesen. Die Datenpakete werden kontinuierlich gesendet, sind ungefähr 3ms lang und besitzen einen ungefähr 4,7ms langen high-aktiven Ruhezustand. Im Gegensatz zum S.Bus Protokoll kann mit I.Bus keine Signalverlust festgestellt werden, da dieses keine Flags besitzt. Der digitale Werteberiech befindet zwischen 1070 und 1920.

**UART-Konfiguration in STM32CubeMX**:

Ein Bild, das Text, Screenshot, Software, Computersymbol enthält.

Automatisch generierte Beschreibung

Abbildung 17: STM32CubeMX Einstellungen I.Bus

Die wichtigsten UART-Einstellungen sind in der folgenden Tabelle dargestellt:

|  |  |
| --- | --- |
| **Einstellung** | **Wert** |
| Mode | Single Wire (Half-Duplex) |
| Baud Rate | 115200 Bits/s |
| Word Length | 8 Bits (including Parity) |
| Parity | None |
| Stop Bits | 1 |
| RX Pin Active Level Inversion | Disable |

**Protokolldaten:**

Das I.Bus Protokoll besteht aus 32 Bytes:

|  |  |
| --- | --- |
| Byte[0] | Protokolllänge, 0x20 |
| Byte[1] | Command Code, 0x40 |
| Byte[2…29] | Daten, 14 Kanäle |
| Byte[30…31] | Checksumme |

Die Bytes[2…29] beinhalten die Daten der einzelnen Kanäle. Jeder Kanal besteht aus 2 Bytes, welche in der little-endian-byte-order geschickt werden. Die Checksumme besteht auch aus 2 Byte, welche in der little-endian-byte-order gesendet werden. Die Checksumme berechnet sich aus 0xFFFF weniger der Summe der ersten 30 Bytes.

Beispiel für die Dekodierung:

|  |  |  |  |  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- |
| **Byte** | 0 | 1 | 2 | 3 | … | 30 | 31 |
| **Daten**  Protokolllänge  Command Code  0x05DC  Kanal 1  0x3412  Checksumme | 0x20 | 0x40 | 0xDC | 0x05 | … | 0x12 | 0x34 |

Beispiel Checksumme:

### Initialisierung der Empfangssoftware

Dadurch, dass der Receiver die Daten kontinuierlich sendet, wird ein DMA-Controller zum Einlesen verwendet, der durchgehend auf die Werte wartet und diese einliest.

**DMA-Konfiguration in STM32CubeMX:**

Ein Bild, das Text, Screenshot, Software, Zahl enthält.

Automatisch generierte Beschreibung

Abbildung 18: Einstellungen DMA für Receiver in STM32CubeMX

Die wichtigen Einstellungen sind, dass der Modus als *Circular* eingestellt wird. Dadurch wird der DMA-Stream automatisch neu gestartet, wenn dieser den Einlesevorgang abgeschlossen hat. Dies ermöglicht durchgehendes Einlesen.

Dateiname: receiver.c

/\*\*

 \* @brief This function calibrates and starts uart receive dma with selected protocol

 \* @param proto protocol to use (SBUS / IBUS)

 \* @param huart pointer to a UART\_HandleTypeDef structure (input u(s)art)

 \* @return Receiver\_Status

 \*/

Receiver\_Status Receiver\_Init(Receiver\_Protocol proto, UART\_HandleTypeDef \*huart)

{

  receiver\_InputUART = huart;         // set input uart

  receiver\_SelectedProtocol = proto;  // set serial protocol

  // set custom reception complete ISR

  HAL\_UART\_RegisterCallback(receiver\_InputUART, HAL\_UART\_RX\_COMPLETE\_CB\_ID, Receiver\_ReceptionCallback);

  switch(receiver\_SelectedProtocol)

  {

    case IBUS:

    {

      // check if uart is configured via baudrate

      if(receiver\_InputUART->Init.BaudRate != 115200)

        return RECEIVER\_UART\_ERROR;

      // check if trnasmitter is connected (ppm signal reception)

      uint8\_t timeout = 0;

      int8\_t tmp\_PinState = HAL\_GPIO\_ReadPin(RECEIVER\_PPM\_GPIO\_Port, RECEIVER\_PPM\_Pin);

      while(tmp\_PinState == HAL\_GPIO\_ReadPin(RECEIVER\_PPM\_GPIO\_Port, RECEIVER\_PPM\_Pin))

      {

        // if the ppm signal doesn't change in 10ms -> error

        if(timeout++ > 10)

          return RECEIVER\_PPM\_ERROR;

        HAL\_Delay(1);

      }

      uint8\_t tmp[2] = {0};

      timeout = 0;

      // calibrate reception to begin of protocol

      while(!(tmp[0] == 0x20 && tmp[1] == 0x40))

      {

        // if the header is wrong 100x -> error

        if(timeout++ > 100)

          return RECEIVER\_TIMEOUT;

        HAL\_UART\_Receive(receiver\_InputUART, tmp, 2, 3);

      }

      HAL\_Delay(4); // wait to sync to next data packet

      // start DMA read i.bus signal

      if(HAL\_UART\_Receive\_DMA(receiver\_InputUART, receiver\_RawData, 32) != HAL\_OK)

        return IBUS\_ERROR;

      // set min/max values of receiver input data

      receiver\_InputLimits.min = 1070;

      receiver\_InputLimits.max = 1920;

      break;

    }

    case SBUS:

    {

      // check if uart is configured via baudrate

      if(receiver\_InputUART->Init.BaudRate != 100000)

        return RECEIVER\_UART\_ERROR;

      // check if transmitter is connected (ppm signal reception)

      uint8\_t timeout = 0;

      int8\_t tmp\_PinState = HAL\_GPIO\_ReadPin(RECEIVER\_PPM\_GPIO\_Port, RECEIVER\_PPM\_Pin);

      while(tmp\_PinState == HAL\_GPIO\_ReadPin(RECEIVER\_PPM\_GPIO\_Port, RECEIVER\_PPM\_Pin))

      {

        // if the ppm signal doesn't change in 10ms -> error

        if(timeout++ > 10)

          return RECEIVER\_PPM\_ERROR;

        HAL\_Delay(1);

      }

      uint8\_t tmp = 0;

      timeout = 0;

      // calibrate reception to begin of protocol

      while(tmp != 0x0F)

      {

        // if the header is wrong 100x -> error

        if(timeout++ > 100)

          return RECEIVER\_TIMEOUT;

        HAL\_UART\_Receive(receiver\_InputUART, &tmp, 1, 4);

      }

      HAL\_Delay(4); // wait to sync to next data packet

      // start DMA read s.bus signal

      if(HAL\_UART\_Receive\_DMA(receiver\_InputUART, receiver\_RawData, 25) != HAL\_OK)

        return SBUS\_ERROR;

      // set min/max values of receiver input data

      receiver\_InputLimits.min = 350;

      receiver\_InputLimits.max = 1680;

      break;

    }

    // wrong or no protocol selected

    case NO\_PROTO:

    default:

      return PROTOCOL\_ERROR;

      break;

  }

  // set value range and half value

  receiver\_InputLimits.delta = receiver\_InputLimits.max - receiver\_InputLimits.min;

  receiver\_InputLimits.half = (receiver\_InputLimits.max + receiver\_InputLimits.min) / 2;

  return RECEIVER\_OK;

}

In den Programm *Receiver\_Init()* wird je nach ausgewählten Empfangsprotokoll (SBUS oder IBUS) die UART-Peripherie mit den Datenpaketen synchronisiert und dann mit dem DMA-Controller (direct memory access) durchgehend eingelesen.

Wenn ein Packet fertig eingelesen worden ist, wird ein Interrupt mit der Funktion *Receiver\_ReceptionCallback()* aufgerufen:

Dateiname: receiver.c

void Receiver\_ReceptionCallback(UART\_HandleTypeDef \*huart)

{

  currentStatus = Receiver\_Decode();

  if(receiver\_SelectedProtocol == IBUS && currentStatus == RECEIVER\_OK)

    Receiver\_IBusFailsafeCheck();

}

Diese Funktion dekodiert das gerade empfangene Signal.

Da das I.Bus-Protokoll keine Failsafe Flags besitzt, wird der Verbindungsstatus mit der Funktion *Receiver\_IBusFailsafeCheck()* überprüft.

Dateiname: receiver.c

/\*\*

 \* @brief This function saves the current channel data and check if its the same as before

 \* @param huart pointer to UART\_HandleTypeDef

 \* @retval None

 \*/

void Receiver\_IBusFailsafeCheck(void)

{

  // only used for IBUS because SBUS does have a signal lost / failsafe flag

  if(receiver\_SelectedProtocol != IBUS)

    return;

  static uint16\_t receiver\_OldChData[16] = {0};   // previous channel data

  // when off -> don't check

  if(receiver\_ChData[RECEIVER\_ONOFF\_SWITCH\_CHANNEL] < receiver\_InputLimits.half)

  {

    receiver\_SameDataCounter = 0; // reset counter

  }

  else

  {

    int8\_t same = 1; // data is same flag

    for(int8\_t i = 0; i < 14 && same == 1; i++)

    {

      // check if the old channel data is not the same as the current

      if(receiver\_OldChData[i] != receiver\_ChData[i])

      {

        receiver\_SameDataCounter = 0; // reset channel data check

        same = 0;

      }

      // increment receiver\_SameDataCounter when data is the same

      else if(i == 14 - 1)

        (receiver\_SameDataCounter == UINT16\_MAX - 10) ? receiver\_SameDataCounter = 260 : receiver\_SameDataCounter++;

    }

  }

  // save current channel data

  for(int8\_t i = 0; i < 14; i++)

    receiver\_OldChData[i] = receiver\_ChData[i];

}

Im Falle des Verbindungsverlust sendet der Receiver durchgehend die exakt selben Kanalwerte. Daher zählt diese Funktion, wie oft alle Kanaldaten denselben Wert aufweisen und erhöht den Zähler (die Variable *receiver\_SameDataCounter*), um eine Stelle. Wenn der Wert über 250 ist, liefert das Dekodierungsprogramm *Receiver\_Decode()* einen Failsafe-Error.

### Empfangssoftware

Dateiname: receiver.c

/\*\*

 \* @brief This function decodes the receiver raw data depending on the protocol

 \* @details

 \* i.bus channel values from 1070 - 1920

 \* s.bus channel values from 350 - 1680

 \*

 \* what channel does what depends on the defines found in receiver.h:

 \*  - RECEIVER\_YAW\_CHANNEL

 \*  - RECEIVER\_PITCH\_CHANNEL

 \*  - RECEIVER\_THROTTLE\_CHANNEL

 \*  - RECEIVER\_ROLL\_CHANNEL

 \*  - RECEIVER\_ONOFF\_SWITCH\_CHANNEL

 \*  - RECEIVER\_MODESEL\_SWTICH\_CHANNEL

 \* @return Receiver\_Status

 \*/

Receiver\_Status Receiver\_Decode(void)

{

  switch(receiver\_SelectedProtocol)

  {

    case IBUS:

    {

    // if reception input start at the last byte -> reorder for correct order (rotate left)

      if(receiver\_RawData[1] == 0x20 && receiver\_RawData[2] == 0x40)

      {

        uint8\_t tmp = receiver\_RawData[0];

        for(int8\_t i = 1; i < 32; i++)

          receiver\_RawData[i - 1] = receiver\_RawData[i];

        receiver\_RawData[31] = tmp;

      }

      // check if protocol header is correct

      if(receiver\_RawData[0] != 0x20 || receiver\_RawData[1] != 0x40)

        return IBUS\_HEADER\_ERROR;

    // check if checksum is correct (0xFFFF - sum of other 30 bytes = checksum)

      uint16\_t sum = 0;

      for(int8\_t i = 0; i < 30; i++)

        sum += receiver\_RawData[i];

      uint16\_t checksum = (receiver\_RawData[31] << 8) | receiver\_RawData[30];

      if((0xFFFF - sum) != checksum)

        return IBUS\_CHECKSUM\_ERROR;

    // decode channel data (14 channels, 2 bytes each, little endian byte order)

      for(int8\_t i = 0, j = 0; i < 14; i++, j += 2)

        receiver\_ChData[i] = (receiver\_RawData[j + 3] << 8) | receiver\_RawData[j + 2];

    // check disconnection

      Receiver\_IBusFailsafeCheck();

      if(receiver\_SameDataCounter > 250)

        return IBUS\_SIGNAL\_LOST\_ERROR;

      break;

    }

    case SBUS:

    {

    // if reception input start at the last byte -> reorder for correct order (rotate left)

      if(receiver\_RawData[0] == 0x00 && receiver\_RawData[1] == 0x0F)

      {

        uint8\_t tmp = receiver\_RawData[0];

        for(int8\_t i = 1; i < 25; i++)

          receiver\_RawData[i - 1] = receiver\_RawData[i];

        receiver\_RawData[24] = tmp;

      }

      // check if protocol header is correct

      if(receiver\_RawData[0] != 0x0F)

        return SBUS\_HEADER\_ERROR;

    // check if protocol footer is correct

      if(receiver\_RawData[24] != 0x00)

        return SBUS\_FOOTER\_ERROR;

    // check signal lost flags

      if(receiver\_RawData[23] & 0x04)

        return SBUS\_SIGNAL\_LOST;

    // check signal failsafe flag

      if(receiver\_RawData[23] & 0x08)

        return SBUS\_SIGNAL\_FAILSAFE;

    // decode channel data (16 channels, 11 bits each, lsb first)

      for(int8\_t i = 0, j = 0; i < 16; i += 8, j += 11)

      {

        receiver\_ChData[i + 0] = ((receiver\_RawData[j + 1] >> 0) | (receiver\_RawData[j + 2] << 8)) & 0x7FF;

        receiver\_ChData[i + 1] = ((receiver\_RawData[j + 2] >> 3) | (receiver\_RawData[j + 3] << 5)) & 0x7FF;

        receiver\_ChData[i + 2] = ((receiver\_RawData[j + 3] >> 6) | (receiver\_RawData[j + 4] << 2) | (receiver\_RawData[5] << 10)) & 0x7FF;

        receiver\_ChData[i + 3] = ((receiver\_RawData[j + 5] >> 1) | (receiver\_RawData[j + 6] << 7)) & 0x7FF;

        receiver\_ChData[i + 4] = ((receiver\_RawData[j + 6] >> 4) | (receiver\_RawData[j + 7] << 4)) & 0x7FF;

        receiver\_ChData[i + 5] = ((receiver\_RawData[j + 7] >> 7) | (receiver\_RawData[j + 8] << 1) | (receiver\_RawData[9] << 9)) & 0x7FF;

        receiver\_ChData[i + 6] = ((receiver\_RawData[j + 9] >> 2) | (receiver\_RawData[j + 10] << 6)) & 0x7FF;

        receiver\_ChData[i + 7] = ((receiver\_RawData[j + 10] >> 5) | (receiver\_RawData[j + 11] << 3)) & 0x7FF;

      }

      break;

    }

    // wrong or no protocol selected

    case NO\_PROTO:

    default:

      return PROTOCOL\_ERROR;

      break;

  }

  return RECEIVER\_OK;

}

Diese Funktion wandelt die empfangenen Daten in S.Bus/I.Bus Kanalwerte um.

Es wird kontrolliert, ob keine Protokollfehler, wie zum Beispiel Header- oder Footer-Error, vorkommen. Im Fall eines Fehlers wird der dazugehörige Fehlercode von der Funktion zurückgegeben – [*siehe 5.2.1.2 Übersicht Fehlercodes*](#_Übersicht_Fehlercodes)

## Inertial Measurement Unit (IMU)

Inertial Measurement Unit (IMU) ist ein Sammelbegriff für alle Sensoren, die die Kräfte auf einen Körper messen. Typischerweise besteht ein IMU aus einem Gyroskop und einen Beschleunigungsmesser (Accelerometer). In komplexeren Systemen sind weitere Sensoren, wie ein Kompass (Magnetometer) und ein Luftdrucksensor (Barometer) zusätzlich vorhanden.

Der Sensor wird meistens mit dem Begriff „Degrees Of Freedom / DOF“ beschrieben. Dieser Parameter gibt an, wie viele Achsen der Sensor messen kann.

Das heißt, dass zum Beispiel ein 6DOF-IMU, der aus einem Gyroskop und einen Accelerometer besteht, um sechs Achsen messen kann – pro Sensor die x-, y- und z-Achse, ergibt sechs Achsen.

Für die FPV-Drohne wird ein 10DOF-IMU mit einem Gyroskop, Accelerometer, Barometer und Magnetometer verwendet, die auf dem IMU-Breakout vorhanden sind. Mit diesen Sensoren werden die Lagewinkel, die Flughöhe, Temperatur und Regelgrößen für PID-Regler gemessen.

### I²C Protokoll

Das IMU-Breakout auf der FPV-Drohne kann nur mit dem I²C-Protokoll angesprochen werden. Dieses Protokoll besteht aus drei Leitungen: SDA (Datenleitung), SCL (Taktleitung) und GND (Masseleitung) und basiert auf dem Master-Slave-Prinzip.

Um die Datenübertragung zu starten, muss eine Startbedingung erfüllt werden: während die SCL-Leitung im high-Ruhezustand ist, wechselt die SDA-Leitung auf einen low-Zustand.

Nach der Startbedingung schickt der Master im System (Flight Controller) ein 400kHz Rechtecksignal mit einen Duty Cycle von 50% auf die SCL-Leitung. Zuerst wird auf der SDA-Leitung wird die I²C-Addresse des I²C-Slaves geschickt. Danach werden gleichzeitig die Daten gesendet beziehungsweise empfangen und bei einer steigenden Flanke der SCL-Leitung interpretiert. Nach jedem Datenbyte schickt der Empfänger der Daten ein Acknowledge-Bit (ACK / 0), um den Empfang der Daten zu bestätigen. Wenn das Acknowledge-Bit einen high-Pegel hat (not Acknowledge, NACK), kam bei der Übertragung ein Fehler auf.

Am Ende jeder Übertragung wird ein not-Acknowledge-Bit (NACK / 1) empfangen. Darauf folgt eine Stoppbedingung, die eine zeitlich invertierte Startbedingung ist. Während die SCL-Leitung sich in den high-Ruhezustand befindet, wechselt die SDA-Leitung von einen low-Zustand auch in den high-Ruhezustand.



Abbildung 19: I²C Datentransfer

**I²C Einstellung in STM32CubeMX:**

Ein Bild, das Text, Screenshot, Software, Webseite enthält.

Automatisch generierte Beschreibung

Abbildung 20: STM32CubeMX Einstellungen IMU

Um die schnellste Kommunikation mit dem IMU-Breakout festzulegen, muss die Einstellung *I2C Speed Mode* auf *Fast Mode* und *I2C Speed Frequency (KHz)* auf *400* gesetzt werden.

Um zwischen mehreren I²C Geräten zu unterscheiden, hat jedes Gerät eine eigene I²C-Adresse. Die Adresse besteht aus einer 7-Bit-Zahl. Während der Kommunikation muss nach der Sensoradresse ein achtes Bit (R/W Bit) zur Adresse hinzugefügt werden, welches bei Schreibzyklen auf 0 gesetzt und bei Lesezyklen auf 1 gesetzt werden muss.

|  |  |  |
| --- | --- | --- |
| **Sensor** | **Slave Adressen + R/W Bit** | |
| **Schreiben** | **Lesen** |
| MPU9250 | 0xD0 | 0xD1 |
| BMP280 | 0xEE | 0xEF |
| AK8963 | 0x18 | 0x19 |

Damit mit den Sensoren des IMUs kommuniziert werden kann, müssen bestimmte Lese- und Schreibzyklen eingehalten werden:

#### Schreibzyklus IMU

Ein Bild, das Text, Screenshot, Reihe, Schrift enthält.

Automatisch generierte Beschreibung

Abbildung 21: I²C Schreibzyklus

|  |  |
| --- | --- |
| **Signal** | **Beschreibung** |
| S | Startbedingung |
| AD+W | Slave-Adresse + Write Bit |
| ACK | Acknowledge Bit |
| RA | Register Adresse |
| P | Stoppbedingung |

Es können mehrere Byte direkt hintereinander geschickt werden. Dabei können beliebig viele Datenbyte mit Acknowledge-Bit vor der Stoppbedingung gesendet werden. Ein interner Zeiger erhöht die Register Adresse um eine Stelle pro Datenbyte.

**Schreiben zu IMU-Register**:

Dateiname: IMU\_10DOF.c

/\*\*

 \* @brief This function writes an amount of bytes to registers from the IMU

 \* @param sensor MPU9250, AK8963 (MAG), BMP280 (BARO)

 \* @param regAddr register address

 \* @param data data to write

 \* @return IMU\_Status

 \*/

IMU\_Status IMU\_WriteRegister(IMU\_Sensor sensor, uint8\_t regAddr, uint8\_t data)

{

  // determine the I2C device address

  uint16\_t devAddress;

  switch(sensor)

  {

    case MPU9250:

      devAddress = IMU\_MPU\_I2C\_ADDR;

      break;

    case AK8963:

      devAddress = IMU\_MAG\_I2C\_ADDR;

      break;

    case BMP280:

      devAddress = IMU\_BARO\_I2C\_ADDR;

      break;

    default:

      return IMU\_ADDRESS\_ERROR;

  }

  // read register(s)

  HAL\_I2C\_Mem\_Write(imu\_ComI2C, devAddress, regAddr, I2C\_MEMADD\_SIZE\_8BIT, &data, 1, 1000);

  return IMU\_OK;

}

Die Funktion *HAL\_I2C\_Mem\_Write()* sendet automatisch die angegeben Daten und Befehle an den I²C-Peripheriebaustein, die für die Kommunikation notwendig sind. Wenn nach einer Sekunde die Kommunikation noch nicht abgeschlossen ist, liefert die Funktion einen Timeout-Error.

#### Lesezyklus IMU

Ein Bild, das Text, Reihe, Screenshot, Schrift enthält.

Automatisch generierte Beschreibung

Abbildung 22: I²C Lesezyklus

|  |  |
| --- | --- |
| **Signal** | **Beschreibung** |
| S | Startbedingung |
| AD+W | Slave-Adresse + Write Bit |
| ACK | Acknowledge Bit |
| RA | Register Adresse |
| AD+R | Slave-Adresse + Read Bit |
| NACK | not Acknowledge Bit |
| P | Stoppbedingung |

Wie beim Schreibablauf können auch mehrere Byte direkt hintereinander eingelesen werden. Dabei wird die Kommunikation mit NACK vom Master im System beendet. Ein interner Zeiger erhöht die Register Adresse, um eine Stelle, pro Datenbyte.

**Lesen von IMU-Register/n:**

Dateiname: IMU\_10DOF.c

/\*\*

 \* @brief This function reads an amount of bytes from registers from the IMU

 \* @param sensor MPU9250, AK8963 (MAG), BMP280 (BARO)

 \* @param regAddr register address

 \* @param data data pointer

 \* @param rxBytes amount of bytes to read

 \* @return IMU\_Status

 \*/

IMU\_Status IMU\_ReadRegister(IMU\_Sensor sensor, uint8\_t regAddr, uint8\_t \*data, uint8\_t rxBytes)

{

  // determine the I2C device address

  uint16\_t devAddress;

  switch(sensor)

  {

    case MPU9250:

      devAddress = IMU\_MPU\_I2C\_ADDR;

      break;

    case AK8963:

      devAddress = IMU\_MAG\_I2C\_ADDR;

      break;

    case BMP280:

      devAddress = IMU\_BARO\_I2C\_ADDR;

      break;

    default:

      return IMU\_ADDRESS\_ERROR;

  }

  // read register(s)

  HAL\_I2C\_Mem\_Read(imu\_ComI2C, devAddress, regAddr, I2C\_MEMADD\_SIZE\_8BIT, data, rxBytes, 1000);

  return IMU\_OK;

}

Die Funktion *HAL\_I2C\_Mem\_Read()* sendet automatisch die Befehle an den I²C-Peripheriebaustein, die für die Kommunikation notwendig sind und speichert die Daten in der angegeben Variable. Wenn nach einer Sekunde die Kommunikation noch nicht abgeschlossen ist, liefert die Funktion einen Timeout-Error.

### IMU-Verbindungstest

Alle drei Sensoren haben ein Who-Am-I-Register. Diese Register haben festgelegte Werte, die nicht geändert werden können. Es werden alle Sensoren überprüft, obwohl der Magnetometer nicht verwendet wird, damit eine vollständige Verbindungsüberprüfung mit dem gesamten IMU-Breakout durchgeführt werden kann.

|  |  |  |
| --- | --- | --- |
| **Sensor** | **Who Am I Register Adresse** | **Registerinhalt** |
| MPU9250 | 0x75 | 0x71 |
| BMP280 | 0xD0 | 0x58 |
| AK8963 | 0x00 | 0x48 |

**Verbindungstest aller IMU-Sensoren:**

Dateiname: IMU\_10DOF.c

/\*\*

 \* @brief This function checks the connection of all sensors on the IMU

 \* @attention This function enables the bypass mode in the MPU9250

 \* @return IMU\_Status

 \*/

IMU\_Status IMU\_CheckConnection(void)

{

  uint8\_t regVal[3] = {0x71, 0x48, 0x58};

  uint8\_t regAddr[3] = {IMU\_MPU\_WHOAMI\_ADDR, IMU\_MAG\_WHOAMI\_ADDR, IMU\_BARO\_CHIPID\_ADDR};

  uint8\_t sensor[3] = {MPU9250, MAG, BARO};

  uint8\_t timeout, data = 0x00;

  for(int8\_t i = 0; i < 3; i++)

  {

    timeout = 0;

    while(data != regVal[i])

    {

      if(IMU\_ReadRegister(sensor[i], regAddr[i], &data, 1) != IMU\_OK)

        return IMU\_ADDRESS\_ERROR;

      if(timeout++ > 100)

        return IMU\_MPU\_WHOAMI\_ERROR + i;

    }

    if(sensor[i] == MPU9250)

    {

      // enable bypass mode

      if(IMU\_WriteRegister(MPU9250, IMU\_MPU\_INT\_PIN\_CFG\_ADDR, 0x02) != IMU\_OK)

        return IMU\_ADDRESS\_ERROR;

      IMU\_DelayUs(10000);

    }

  }

  return IMU\_OK;

}

Damit der Magnetometer und auf das Barometer zugegriffen werden kann, muss im MPU9250 im bypass enable Register das BYPASS\_EN – Bit gesetzt werden. Dadurch werden die I²C-Leitung durch den Sensor durchgeführt und auf den anderen Sensoren kann zugegriffen werden.

Wenn nach 100 Lesezyklen der Registerwert immer noch falsch ist, liefert die Funktion einen *IMU\_<Sensor>\_WHOAMI\_ERROR*.

### Gyroskop und Accelerometer - MPU9250

#### Registerübersicht MPU9250

In der folgenden Abbildung wird die Registerübersicht, der verwendeten Registern des MPU9250 dargestellt:

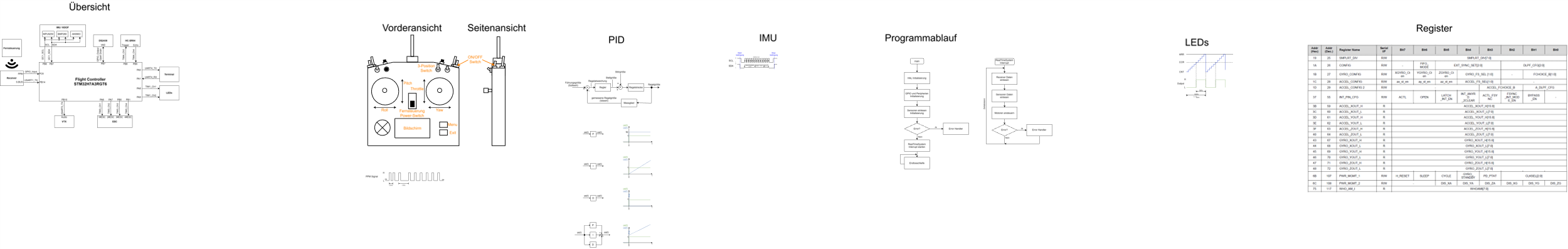


Abbildung 23: Registerübersicht MPU9250

|  |  |
| --- | --- |
| **Register** | **Verwendungszweck** |
| SMPLRT\_DIV | dividiert die interne Abtastrate |
| CONFIG | digitaler Tiefpassfilter für Gyroskop |
| GYRO\_CONFIG | Messbereich für Gyroskop |
| ACCEL\_CONFIG | Messbereich für Accelerometer |
| ACCEL\_CONFIG 2 | digitaler Tiefpassfilter für Accelerometer |
| INT\_PIN\_CFG | direkter I²C-Zugriff auf Magnetometer |
| ACCEL\_<Achse>OUT\_H/L | Messwerte von Accelerometer  <Achse>: X/Y/Z - Messachse  H/L: hoch- oder niederwertiges Byte |
| GYRO\_<Achse>OUT\_H/L | Messwerte von Gyroskop  <Achse>: X/Y/Z - Messachse  H/L: hoch- oder niederwertiges Byte |
| PWR\_MGMT\_1 | Sensor reset und Taktquelle |
| PWR\_MGMT\_2 | Sensoren aktivieren |
| WHO\_AM\_I | Überprüfung der Verbindung |

#### Initialisierung Accelerometer und Gyroskop

Dateiname: IMU\_10DOF.c | Ausschnitt aus IMU\_Init() Funktion

/\*\*

 \* @brief This function initialzes the 10DOF IMU (accel, gyro, mag, baro)

 \* @param imuInit pointer to IMU\_InitTypeDef

 \* @return IMU\_Status

 \*/

IMU\_Status IMU\_Init(IMU\_InitTypeDef \*imuInit)

{

...

// reset MPU

  IMU\_WriteRegister(MPU9250, IMU\_MPU\_PWR\_MGMT\_1\_ADDR, 0x00);

  IMU\_DelayUs(10000);

  // auto select best clk source

  IMU\_WriteRegister(MPU9250, IMU\_MPU\_PWR\_MGMT\_1\_ADDR, 0x01);

  // enable gyro and accel

  IMU\_WriteRegister(MPU9250, IMU\_MPU\_PWR\_MGMT\_2\_ADDR, 0x00);

  // select full scale range for gyro and accel

  IMU\_WriteRegister(MPU9250, IMU\_MPU\_ACCEL\_CONFIG\_ADDR, imuInit->accelFS << 3);

  IMU\_WriteRegister(MPU9250, IMU\_MPU\_GYRO\_CONFIG\_ADDR, imuInit->gyroFS << 3);

  // select digital low pass filter for gyro and accel

  IMU\_WriteRegister(MPU9250, IMU\_MPU\_ACCEL\_CONFIG\_2\_ADDR, imuInit->accelDLPF);

  IMU\_WriteRegister(MPU9250, IMU\_MPU\_CONFIG\_ADDR, imuInit->gyroDLPF);

  // select fastest sample rate

  IMU\_WriteRegister(MPU9250, IMU\_MPU\_SMPLRT\_DIV\_ADDR, 0x00);

  // calculate sensitivity scale factor (LSB/g and LSB/(°/s))

  accelSens = IMU\_ACCEL\_RES\_MAX / (1 << imuInit->accelFS);

  gyroSens = IMU\_GYRO\_RES\_MAX / (1 << imuInit->gyroFS);

  // calibrate gyro

  uint16\_t amount = 2000;

  IMU\_RegCoordinates tempGyro = {0};

  int32\_t tempX = 0, tempY = 0, tempZ = 0;

  for(uint16\_t i = 0; i < amount; i++)

  {

    tempGyro = IMU\_MPU\_ReadGyro();

    tempX += tempGyro.x;

    tempY += tempGyro.y;

    tempZ += tempGyro.z;

    IMU\_DelayUs(3000);

  }

  gyroOffset.x = (float)tempX / (float)amount;

  gyroOffset.y = (float)tempY / (float)amount;

  gyroOffset.z = (float)tempZ / (float)amount;

...

  return IMU\_OK;

}

Bemerkung:

Die Punkte ... bedeuten, dass vor und nach dem Ausschnitt noch weiterer Programmcode, der nicht in direkte Verbindung mit dem MPU9250 steht.

Die Messwerte eines Gyroskops driften bei Bewegung in einer Richtung *(siehe: Gyroskop Erklärung vom Drift)*. Um dem dagegen zu wirken, wird ein Gyroskop Offset bestimmt. Es wird nach 2000 Messung der durchschnittliche Messwert bestimmt, der als Offsetwert verwendet wird. Im Programm wird das Ergebnis in der globalen Variable ‚gyroOffset‘ gespeichert.

#### Einlesen der Accelerometer- und Gyroskop-Daten

Die Messdaten des Accelerometers werden in den Registern 59 ACCEL\_XOUT\_H bis zum Register 64 ACCEL\_ZOUT\_L gespeichert. XOUT, YOUT und ZOUT bestimmt die einzelne Messachse und \_H und \_L bestimmt das high- und low-Byte des Messwertes.

**Auslesen der Accelerometer-Daten**:

Dateiname: IMU\_10DOF.c

/\*\*

 \* @brief This function reads accelerometer register data (x,y,z)

 \* @return IMU\_RegCoordinates

 \*/

IMU\_RegCoordinates IMU\_MPU\_ReadAccel(void)

{

  uint8\_t buffer[6] = {0};

  IMU\_ReadRegister(MPU9250, IMU\_MPU\_ACCEL\_XOUT\_H\_ADDR, buffer, 6);

  IMU\_RegCoordinates accelData = {0};

  accelData.x = ((int16\_t)buffer[0] << 8) | buffer[1];

  accelData.y = ((int16\_t)buffer[2] << 8) | buffer[3];

  accelData.z = ((int16\_t)buffer[4] << 8) | buffer[5];

  return accelData;

}

In dem Programm werden die Daten beginnend mit dem Register 59 nacheinander bis zum Register 64 eingelesen und danach zusammengefügt.

Die Messung des Gyroskops funktioniert gleich mit dem Accelerometer. Die Messdaten des werden in den Registern 67 GYRO\_XOUT\_H bis zum Register 72 GYRO\_ZOUT\_L gespeichert. XOUT, YOUT und ZOUT bestimmt die einzelne Messachse und \_H und \_L bestimmt das high- und low-Byte des Messwertes.

**Auslesen der Gyroskop-Daten**:

Dateiname: IMU\_10DOF.c

/\*\*

 \* @brief This function reads gyroscope register data (x,y,z)

 \* @return IMU\_RegCoordinates

 \*/

IMU\_RegCoordinates IMU\_MPU\_ReadGyro(void)

{

    uint8\_t buffer[6] = {0};

    IMU\_ReadRegister(MPU9250, IMU\_MPU\_GYRO\_XOUT\_H\_ADDR, buffer, 6);

    IMU\_RegCoordinates gyroData = {0};

    gyroData.x = ((int16\_t)buffer[0] << 8) | (int16\_t)buffer[1];

    gyroData.y = ((int16\_t)buffer[2] << 8) | (int16\_t)buffer[3];

    gyroData.z = ((int16\_t)buffer[4] << 8) | (int16\_t)buffer[5];

    return gyroData;

}

Bemerkung:

Bei beide Programmen werden nur die Registerwerte zurückgeliefert. Um die eigentlichen Messwerte zu bekommen, müssen die Werte mit dem sensitivity scale factoren des Accelerometers und des Gyroskops gerechnet werden. Diese Faktoren werden im Initialisierungsprogramm berechnet und in den globalen Variablen *accelSens* und *gyroSens* gespeichert [*(siehe: 5.4.3.2 Initialisierung)*](#_Initialisierung).

Um die Drift vom Gyroskop entgegenzuwirken wird der Registerwert noch mit dem Gyroskop-Offset gerechnet werden. Diese Werte werden auch im Initialisierungsprogramm bestimmt und in der globalen Variable ‚gyroOffset‘ gespeichert [*(siehe: 5.4.3.2 Initialisierung)*](#_Initialisierung).

**Berechnung der eigentlichen Messwerte**:

IMU\_RegCoordinates gyroData = IMU\_MPU\_ReadGyro();

IMU\_RegCoordinates accelData = IMU\_MPU\_ReadAccel();

gyro.x = (gyroData.x - gyroOffset.x) / gyroSens;

gyro.y = (gyroData.y - gyroOffset.y) / gyroSens;

gyro.z = (gyroData.z - gyroOffset.z) / gyroSens;

accel.x = (accelData.x / accelSens) - 0.01f;

accel.y = (accelData.y / accelSens) - 0.02f;

accel.z = (accelData.z / accelSens) - 0.1f;

Die Offsetwerte bei der Beschleunigungsberechnung (0,020; 0,021 und 0,140) müssen händisch bestimmt werden. Wenn der Sensor auf einer ebenen Fläche gerade liegt, muss der Sensor eine Beschleunigung von 1g auf der z-Achse messen. Der Offset ergibt sich aus der eigentlichen Messung auf einer ebenen Fläche von 1,14g. Dieser Vorgang muss mit 90° Drehungen mit allen Achsen wiederholt werden, um die restlichen Offsetwerte zu bestimmen.

#### Komplementärfilter

Um die Lagewinkel Pitch, Roll und Yaw zu bestimmen, wird ein Komplementärfilter auf die Messwerte des MPU9250 angewendet [*(siehe: 2.2.5 Komplementärfilter)*](#_Komplementärfilter).

**Anwendung des Komplementärfilters:**

Dateiname: IMU\_10DOF.c

/\*\*

 \* @brief This function calculates pitch,roll and yaw

 \* @details data gets stored in the global variable 'angle'

 \* @retval None

 \*/

void IMU\_GetAngles(void)

{

  // read counter value since last function call

  uint16\_t tmpTime = \_\_HAL\_TIM\_GET\_COUNTER(imu\_DelayTIM);

  // reset timer

  \_\_HAL\_TIM\_SET\_COUNTER(imu\_DelayTIM, 0);

  // start first time call

  static int8\_t firstTimeFlag = 0;

  if(firstTimeFlag == 0)

  {

    tmpTime = 0;

    firstTimeFlag = 1;

  }

  // calculate delta time

  imu\_DeltaTime = (float)tmpTime / 1E6f;

  // read sensors

  IMU\_RegCoordinates gyroData = IMU\_MPU\_ReadGyro();

  IMU\_RegCoordinates accelData = IMU\_MPU\_ReadAccel();

  // calculate actual values

  gyro.x = (gyroData.x - gyroOffset.x) / gyroSens;

  gyro.y = (gyroData.y - gyroOffset.y) / gyroSens;

  gyro.z = (gyroData.z - gyroOffset.z) / gyroSens;

  accel.x = (accelData.x / accelSens) - 0.01f;

  accel.y = (accelData.y / accelSens) - 0.02f;

  accel.z = (accelData.z / accelSens) - 0.1f;

  // invert axis because the sensor is upside down

  accel.z = -accel.z;

  // apply complementary filter to calc angles

  float accelPitch = atan2(accel.y, accel.z) \* RAD2DEG;

  float accelRoll = atan2(accel.x, accel.z) \* RAD2DEG;

  angle.roll = 0.98f \* (angle.roll + gyro.y \* imu\_DeltaTime) + 0.02f \* accelRoll;

  angle.pitch = 0.98f \* (angle.pitch - gyro.x \* imu\_DeltaTime) + 0.02f \* accelPitch;

  angle.yaw += gyro.z \* imu\_DeltaTime;

}

Bemerkung:

Die aktuellen Werte für Pitch, Roll und Yaw werden in der globalen Variable *angle* gespeichert.

### Barometer / Luftdrucksensor - BMP280

#### Registerübersicht BMP280

In der folgenden Abbildung wird die Registerübersicht, der verwendeten Registern des BMP280 dargestellt:

Ein Bild, das Text, Screenshot, Reihe, Zahl enthält.

Automatisch generierte Beschreibung

Abbildung 24: Registerübersicht BMP280

|  |  |
| --- | --- |
| **Register** | **Verwendungszweck** |
| temp\_xlsb | Temperatur Messwerte |
| temp\_lsb/msb |
| press\_xlsb | Luftdruck Messwerte |
| press\_lsb/msb |
| config | Zeitkonstanten |
| ctrl\_meas | Oversampling- und Modus-Auswahl |
| status | Status überprüfen |
| reset | Sensor zurücksetzen |
| id | Überprüfung der Verbindung |
| calib25…calib00 | Kompensationsparameter auslesen |

#### Initialisierung Barometer

Dateiname: IMU\_10DOF.c | Ausschnitt aus IMU\_Init() Funktion

/\*\*

 \* @brief This function initialzes the 10DOF IMU (accel, gyro, mag, baro)

 \* @param imuInit pointer to IMU\_InitTypeDef

 \* @return IMU\_Status

 \*/

IMU\_Status IMU\_Init(IMU\_InitTypeDef \*imuInit)

{

...

  IMU\_WriteRegister(BMP280, IMU\_BARO\_RESET\_ADDR, 0xB6); // reset barometer

  // check status of device

  uint8\_t timeout = 0, status = 1;

  while(status != 0x00)

  {

    IMU\_ReadRegister(BMP280, IMU\_BARO\_STATUS\_ADDR, &status, 1);

    if(timeout++ > 100)

      return IMU\_BARO\_INIT\_ERROR;

  }

  IMU\_BARO\_ReadCompensationValues();

  // set standby time and time constant of IIR filter

  uint8\_t config = ((imuInit->baroSBT << 5) | (imuInit->baroCoeff << 2));

  IMU\_WriteRegister(BMP280, IMU\_BARO\_CONFIG\_ADDR, config);

  // set oversampling settings for temperature and pressure measurement and set normal mode

  uint8\_t ctrl = (imuInit->baroTempOS << 5) | (imuInit->baroPressOS << 2) | 0x03;

  IMU\_WriteRegister(BMP280, IMU\_BARO\_CTRL\_MEAS\_ADDR, ctrl);

  // get current altitude level

  IMU\_DelayUs(UINT16\_MAX - 1);

  float baroSum = 0;

  for(uint16\_t i = 0; i < amount; i++)

  {

    IMU\_BARO\_ReadBaro();

    baroSum += baroAltitude;

    IMU\_DelayUs(1000);

  }

  baroAltitudeOffset = baroSum / amount;

  return IMU\_OK;

}

Das Barometer wird immer im Normal-Mode betrieben.

Für die richtige Luftdruck- und Höhenbestimmung müssen die Registerwerte kompensiert werden. Diese Kompensationswerte werden vom Sensor zur Verfügung gestellt und müssen vor Beginn der Werteberechnung eingelesen werden. Das Einlesen wird mit der Funktion *IMU\_Baro\_ReadCompensationValues()* realisiert.

**Kompensationswerte für Barometermessung auslesen:**

Dateiname: IMU\_10DOF.c

/\*\*

 \* @brief This function reads the temperature and pressure compensation values

 \* @details values get stored in variable "baroCompensation"

 \* @retval None

 \*/

void IMU\_BARO\_ReadCompensationValues(void)

{

  uint8\_t buffer[24];

  IMU\_ReadRegister(BMP280, IMU\_BARO\_DIG\_T1\_L\_ADDR, buffer, 24);

  baroCompensation.T1 = (buffer[1] << 8) | buffer[0];

  baroCompensation.T2 = (buffer[3] << 8) | buffer[2];

  baroCompensation.T3 = (buffer[5] << 8) | buffer[4];

  baroCompensation.P1 = (buffer[7] << 8) | buffer[6];

  baroCompensation.P2 = (buffer[9] << 8) | buffer[8];

  baroCompensation.P3 = (buffer[11] << 8) | buffer[10];

  baroCompensation.P4 = (buffer[13] << 8) | buffer[12];

  baroCompensation.P5 = (buffer[15] << 8) | buffer[14];

  baroCompensation.P6 = (buffer[17] << 8) | buffer[16];

  baroCompensation.P7 = (buffer[19] << 8) | buffer[18];

  baroCompensation.P8 = (buffer[21] << 8) | buffer[20];

  baroCompensation.P9 = (buffer[23] << 8) | buffer[22];

}

Die Daten befinden sich in den Registern 0x88 dig\_T1 bis zu den Register 0x9F dig\_P9 [*(siehe: 5.4.4.1 Registerübersicht)*](#_Registerübersicht). Die Werte werden zusammengefügt und in der globalen Variable *baroCompensation* gespeichert.

#### Einlesen der Barometer-Daten

Die Messdaten vom BMP280 werden in den Registern 0xF7 press\_msb bis 0xFC temp\_xlsb gespeichert [*(siehe: 5.4.4.1 Registerübersicht)*](#_Registerübersicht).

**Einlesen der Barometerwerte:**

Dateiname: IMU\_10DOF.c | Ausschnitt aus IMU\_BARO\_ReadBaro() Funktion

/\*\*

 \* @brief This function reads the barometer values and calculates temperature, pressure and altitude

 \* @details values gets stored in global variables 'baroTemperature', 'baroPressure' and 'baroAltitude'

 \* @retval None

 \*/

void IMU\_BARO\_ReadBaro(void)

{

  uint8\_t buffer[6] = {0};

  IMU\_ReadRegister(BMP280, IMU\_BARO\_PRESS\_ADDR, buffer, 6);

  int32\_t adcPress = ((int32\_t)buffer[0] << 12) | ((int32\_t)buffer[1] << 4) | ((int32\_t)buffer[2] >> 4);

  int32\_t adcTemp = ((int32\_t)buffer[3] << 12) | ((int32\_t)buffer[4] << 4) | ((int32\_t)buffer[5] >> 4);

  int32\_t fineTemp;

  int32\_t temp = IMU\_BARO\_CompensateTemp(adcTemp, &fineTemp);

  uint32\_t press = IMU\_BARO\_CompensatePress(adcPress, fineTemp);

  baroTemperature = (float)temp / 100.0;

  baroPressure = (float)press / 256.0;

...

}

Für die Berechnung müssen die Temperatur und der Luftdruck kompensiert werden. Dafür werden die Funktionen *IMU\_BARO\_CompensateTemp()* und *IMU\_BARO\_CompensatePress()* verwendet. Diese Funktionen sind im Datenblatt des Sensors vom Hersteller vorgegeben und wurden für die Nutzung in der Steuerungssoftware angepasst und übernommen.

**Barometer Temperatur- und Luftdruckwerte kompensieren:**

Dateiname: IMU\_10DOF.c

/\*\*

 \* @brief This function compensates the temperature according to the datasheet

 \* @details

 \* Returns temperature in DegC, resolution is 0.01 DegC. Output value of “5123” equals 51.23 DegC.

 \* @param adcTemp measured temperature

 \* @param fineTemp

 \* @return int32\_t (temperature)

 \*/

int32\_t IMU\_BARO\_CompensateTemp(int32\_t adcTemp, int32\_t \*fineTemp)

{

  int32\_t var1, var2, T;

  var1 = ((((adcTemp >> 3) - ((int32\_t)baroCompensation.T1 << 1))) \* ((int32\_t)baroCompensation.T2)) >> 11;

  var2 = (((((adcTemp >> 4) - ((int32\_t)baroCompensation.T1)) \* ((adcTemp >> 4) - ((int32\_t)baroCompensation.T1))) >> 12) \* ((int32\_t)baroCompensation.T3)) >> 14;

  \*fineTemp = var1 + var2;

  T = (\*fineTemp \* 5 + 128) >> 8;

  return T;

}

/\*\*

 \* @brief This function compensates the pressure according to the datasheet

 \* @details

 \* Returns pressure in Pa as unsigned 32 bit integer in Q24.8 format (24 integer bits and 8 fractional bits).

 \* Output value of “24674867” represents 24674867/256 = 96386.2 Pa = 963.862 hPa

 \* @param adcPress measured pressure

 \* @param fineTemp

 \* @return uint32\_t (pressure)

 \*/

uint32\_t IMU\_BARO\_CompensatePress(int32\_t adcPress, int32\_t fineTemp)

{

  int64\_t var1, var2, p;

  var1 = ((int64\_t)fineTemp) - 128000;

  var2 = var1 \* var1 \* (int64\_t)baroCompensation.P6;

  var2 = var2 + ((var1 \* (int64\_t)baroCompensation.P5) << 17);

  var2 = var2 + (((int64\_t)baroCompensation.P4) << 35);

  var1 = ((var1 \* var1 \* (int64\_t)baroCompensation.P3) >> 8) + ((var1 \* (int64\_t)baroCompensation.P2) << 12);

  var1 = (((((int64\_t)1) << 47) + var1)) \* ((int64\_t)baroCompensation.P1) >> 33;

  if(var1 == 0)

  {

    return 0; // avoid exception caused by division by zero

  }

  p = 1048576 - adcPress;

  p = (((p << 31) - var2) \* 3125) / var1;

  var1 = (((int64\_t)baroCompensation.P9) \* (p >> 13) \* (p >> 13)) >> 25;

  var2 = (((int64\_t)baroCompensation.P8) \* p) >> 19;

  p = ((p + var1 + var2) >> 8) + (((int64\_t)baroCompensation.P7) << 4);

  return (uint32\_t)p;

}

#### Berechnung der Höhe

Mit dem gemessenen Luftdruck kann die aktuelle Höhe über dem Meeresspiegel ausgerechnet werden.

Ein Bild, das Text, Schrift, Diagramm, Reihe enthält.

Automatisch generierte Beschreibung

Abbildung 25: Formel Berechnung Höhe über Meeresspiegel

altitude … Höhe über den Meeresspiegel in Meter (m)

p … gemessener Luftdruck in Hektopascal (hPa)

p0 … typischer Luftdruck am Meeresspiegel, normalerweise 1013,25hPa

**Höhe über Meeresspiegel bestimmen:**

IMU\_10DOF.c | Ausschnitt aus IMU\_BARO\_ReadBaro() Funktion

/\*\*

 \* @brief This function reads the barometer values and calculates temperature, pressure and altitude

 \* @details values gets stored in global variables 'baroTemperature', 'baroPressure' and 'baroAltitude'

 \* @retval None

 \*/

void IMU\_BARO\_ReadBaro(void)

{

...

  // convert pressure to altitude according to datasheet

  float presshPa = baroPressure / 100;

  baroAltitude = (44330.0 \* (1.0 - pow(presshPa / 1013.25, 1.0 / 5.255))) - baroAltitudeOffset;

}

Dadurch, dass in der Berechnung die Variable ‚baroAltitudeOffset‘ berücksichtigt wird, wird die relative Höhe der Drohne berechnet. Wenn dieser Teil der Berechnung entfernt wird, kann die absolute Höhe bestimmt werden.

Problem mit Höhenmessung mit Barometer (langsam und so)

## Smart Battery Monitor - DS2438

Für die Diplomarbeit wird der DS2438 für die Spannungsüberwachung des Akkus verwendet, um zu verhindert, dass die Akkuspannung unter einen kritischen Grenzwert fällt und die Drohne abstürzt. Die Kommunikation zwischen dem Flight-Controller und dem DS2438 findet mit dem One-Wire Protokoll statt.

Als Vorlage für die Programmierung wurde ein, in der 4. Klasse erstelltes, Projekt verwendet. Nach Absprache mit den Autoren (Lukas Lindmayr und Marcel Bieder) wurde die Erlaubnis für die Verwendung und Anpassung an die FPV-Drohne Diplomarbeit, erteilt.

### One-Wire Protokoll

Der Flight Controller kommuniziert mit dem DS2438 über das One-Wire Protokoll. Dieses besteht aus einer einzelnen halbduplexen, bidirektionalen Leitung. Der Cortex-M7 hat keine One-Wire Peripherie, deswegen muss das Protokoll selbstständig implementiert werden. Die Kommunikation mit dem DS2438 beginnt immer aus einer Initialisierungssequenz. Als nächstes wird ein ROM-Funktionsbefehl ausgeführt. Danach wird ein Memory-Funktionsbefehl gesendet, und am Ende werden die Daten ausgetauscht.

**GPIO-Einstellungen in STM32CubeMX**:

Ein Bild, das Text, Screenshot, Software, Zahl enthält.

Automatisch generierte Beschreibung

Abbildung 26: STM32CubeMX Einstellungen DS2438

Der Pin PC0 wird am Flight-Controller für DS2438\_DQ (Datenleitung) verwendet. Bei anderen Systemen kann der Pin beim Aufruf von *DS2438\_Init()* bestimmt werden. *(siehe: Init Progamm)*

Damit die Kommunikation funktionieren kann, muss in STM32CubeMX der *GPIO mode* auf *Output Open Drain* und der *GPIO Pull-up/Pull-down* auf *No pull-up and no pull-down* gesetzt werden.

#### One-Wire Schreibzyklen

Bei der Kommunikation wird das niederwertigste Bit immer zuerst gesendet.

**Um das Bit 1 zu senden, müssen folgende Zeitbedingungen eingehalten werden:**

Ein Bild, das Text, Diagramm, Reihe, Schrift enthält.

Automatisch generierte Beschreibung

Abbildung 27: One-Wire Bit 1 senden

**Um das Bit 0 zu senden, müssen andere Zeitbedingungen eingehalten werden**:

Ein Bild, das Text, Reihe, Diagramm, Quittung enthält.

Automatisch generierte Beschreibung

Abbildung 28: One-Wire Bit 0 senden

**Ein Byte zum DS2438 senden:**

Dateiname: DS2438.c

/\*\*

 \* @brief This function writes one byte to the DS2438

 \* @param byte byte to write

 \* @retval None

 \*/

void DS2438\_WriteByte(uint8\_t byte)

{

  for(int8\_t i = 0; i < 8; i++)

  {

    DS2438\_WriteBit(byte & 0x01);

    byte >>= 1;

  }

}

/\*\*

 \* @brief This function writes one bit to the DS2438

 \* @param bit bit to write

 \* @retval None

 \*/

void DS2438\_WriteBit(int8\_t bit)

{

  if(bit == 1)

  {

    HAL\_GPIO\_WritePin(ds2438\_GPIOPort, ds2438\_GPIOPin, GPIO\_PIN\_RESET);

    DS2438\_DelayUs(10);

    HAL\_GPIO\_WritePin(ds2438\_GPIOPort, ds2438\_GPIOPin, GPIO\_PIN\_SET);

    DS2438\_DelayUs(70);

  }

  else

  {

    HAL\_GPIO\_WritePin(ds2438\_GPIOPort, ds2438\_GPIOPin, GPIO\_PIN\_RESET);

    DS2438\_DelayUs(60);

    HAL\_GPIO\_WritePin(ds2438\_GPIOPort, ds2438\_GPIOPin, GPIO\_PIN\_SET);

    DS2438\_DelayUs(10);

  }

}

Um auf eine bestimmte Page Daten schreiben zu können, müssen diese zuerst auf das Scratchpad geschrieben werden. Danach muss das Scratchpad in den ROM oder RAM kopiert werden.

Zuerst wird die Initialisierungssequenz ausgeführt, und danach wird der Skip-ROM- (0xCC) und der Write-Scratchpad-Befehl (0x4E) ausgeführt. Anschießend muss die gewünschte Page-Nummer übertragen werden. Darauf folgen die Daten und eine zweite Initialisierungssequenz. Damit die Daten vom Scratchpad auch in den Speicher des Sensors übertragen werden, muss noch ein Skip-ROM- (0xCC) und ein Copy-Scratchpad-Befehl (0x48), gefolgt von der Page-Nummer, ausgeführt werden.

**Zu einer Page Daten senden:**

Dateiname: DS2438.c

/\*\*

 \* @brief This function writes the data to one page of the DS2438

 \* @param page page number (0 - 7)

 \* @param pageData data of page

 \* @return DS2438\_Status

 \*/

DS2438\_Status DS2438\_WritePage(uint8\_t page, int16\_t \*pageData)

{

  // reset + presence pulse

  if(DS2438\_Reset() == DS2438\_ERROR)

    return DS2438\_ERROR;

// copy current data to scratchpad

  DS2438\_WriteByte(DS2438\_SKIP\_ROM);

  DS2438\_WriteByte(DS2438\_WRITE\_SP);

  DS2438\_WriteByte(page);

  for(uint8\_t i = 0; i < 9; i++)

    DS2438\_WriteByte(pageData[i]);

// reset + presence pulse

  if(DS2438\_Reset() == DS2438\_ERROR)

    return DS2438\_ERROR;

  DS2438\_WriteByte(DS2438\_SKIP\_ROM);

  DS2438\_WriteByte(DS2438\_COPY\_SP);

  DS2438\_WriteByte(page);

  return DS2438\_OK;

}

#### One-Wire Lesezyklen

Genau wie bei den Schreibzyklen gibt es auch spezielle Zeitkriterien, die bei den Lesezyklen eingehalten werden müssen. Es wird auch das niederwertigste Byte zuerst empfangen.

Ein Bild, das Text, Diagramm, Reihe, Schrift enthält.

Automatisch generierte Beschreibung

Abbildung 29: One-Wire Bit empfangen

**Ein Byte vom DS2438 auslesen:**

Dateiname: DS2438.c

/\*\*

 \* @brief This function reads one byte from the DS2438 (LSB first)

 \* @return uint8\_t

 \*/

uint8\_t DS2438\_ReadByte(void)

{

  uint8\_t byte = 0;

  for(int8\_t i = 0; i < 8; i++)

    byte |= (DS2438\_ReadBit() << i);

  return byte;

}

/\*\*

 \* @brief This function reads one bit from the DS2438

 \* @return int8\_t

 \*/

int8\_t DS2438\_ReadBit(void)

{

  int8\_t bit = 0;

  HAL\_GPIO\_WritePin(ds2438\_GPIOPort, ds2438\_GPIOPin, GPIO\_PIN\_RESET);

  DS2438\_DelayUs(10);

  HAL\_GPIO\_WritePin(ds2438\_GPIOPort, ds2438\_GPIOPin, GPIO\_PIN\_SET);

  DS2438\_DelayUs(10);

  // read current pin level

  bit = HAL\_GPIO\_ReadPin(ds2438\_GPIOPort, ds2438\_GPIOPin) == GPIO\_PIN\_SET;

  DS2438\_DelayUs(60);

  return bit;

}

Um von einer bestimmen Page Daten lesen zu können, müssen diese zuerst vom Sensor auf das Scratchpad geschrieben werden. Danach müssen die Daten vom Scratchpad eingelesen werden.

Zuerst wird die Initialisierungssequenz ausgeführt und danach wird der Skip-ROM- (0xCC) und der Recall-Memory-Befehl (0xB8) ausgeführt. Anschließend muss die gewünschte Page-Nummer übertragen werden. Darauf folgt eine zweite Initialisierungssequenz. Um jetzt die Daten vom Scratchpad zu lesen, muss ein Skip-ROM- (0xCC) und ein Read-Scratchpad-Befehl (0xBE), gefolgt von der Page-Nummer, ausgeführt werden. Danach können die Daten auf der One-Wire-Leitung empfangen werden.

**Von einer Page Daten auslesen:**

Dateiname: DS2438.c

/\*\*

 \* @brief This function reads the data from one page of the DS2438

 \* @param page page number (0 - 7)

 \* @param pageData data of page

 \* @return DS2438\_Status

 \*/

DS2438\_Status DS2438\_ReadPage(uint8\_t page, int16\_t \*pageData)

{

    // reset + presence pulse

  if(DS2438\_Reset() == DS2438\_ERROR)

    return DS2438\_ERROR;

// copy current data to scratchpad

  DS2438\_WriteByte(DS2438\_SKIP\_ROM);

  DS2438\_WriteByte(DS2438\_RECALL\_MEM);

  DS2438\_WriteByte(page);

  // reset + presence pulse

  if(DS2438\_Reset() == DS2438\_ERROR)

    return DS2438\_ERROR;

// read scratchpad data

  DS2438\_WriteByte(DS2438\_SKIP\_ROM);

  DS2438\_WriteByte(DS2438\_READ\_SP);

  DS2438\_WriteByte(page);

  for(int8\_t i = 0; i < 9; i++)

    pageData[i] = DS2438\_ReadByte();

  return DS2438\_OK;

}

#### Initialisierungssequenz

Die Initialisierungssequenz besteht immer aus einen Reset- und einen Presence-Puls, die die folgenden zeitlichen Anforderungen einhalten müssen:

Ein Bild, das Text, Diagramm, Reihe, parallel enthält.

Automatisch generierte Beschreibung

Abbildung 30: One-Wire Initialisierungssequenz

Wenn der One-Wire Slave bei dem Presence-Puls nicht nach 60µs bis 240µs die Leitung in den high-Zustand setzt, besteht ein Problem bei der Kommunikation zwischen Master und Slave.

**Initialisierungssequenz DS2438:**

Dateiname: DS2438.c

/\*\*

 \* @brief This function resets / checks device presence

 \* @return DS2438\_Status

 \*/

DS2438\_Status DS2438\_Reset(void)

{

  // reset DS2438

  // send reset pulse (min 480us)

  HAL\_GPIO\_WritePin(ds2438\_GPIOPort, ds2438\_GPIOPin, GPIO\_PIN\_RESET);

  DS2438\_DelayUs(480);

  // release line -> change to receive mode

  HAL\_GPIO\_WritePin(ds2438\_GPIOPort, ds2438\_GPIOPin, GPIO\_PIN\_SET);

  // wait until slave sends presence pulse

  DS2438\_DelayUs(70);

  // read current pin state

  int8\_t pin = HAL\_GPIO\_ReadPin(ds2438\_GPIOPort, ds2438\_GPIOPin);

  DS2438\_DelayUs(410);

  // check pin state (0 -> found, 1 -> not found)

  if(pin == GPIO\_PIN\_SET)

    return DS2438\_ERROR;

  return DS2438\_OK;

}

#### ROM-Funktionsbefehl

Es gibt viele verschiedene ROM-Funktionsbefehle. Für das Spannungsmonitoring ist nur der SKIP-ROM-Befehl (0xCC) wichtig. Dieser Befehl erlaubt es dem Master direkt einen Memory-Funktionsbefehl zu senden, ohne einen ROM-Code senden zu müssen. Dadurch wird Zeit gespart.

Vllt Liste von allen Befehlen mit Beschreibung

#### Memory-Funktionsbefehl

Der einzige Memory-Funktionsbefehl, der wichtig für das Spannungsmonitoring wichtig ist, ist der CONVERT-V (0xB4) Befehl. Diese Anweisung startet die Analog-Digital-Spannungswandlung des Sensors. Wenn die Umwandlung beendet ist, wird das ADB-Flag (A/D Conversion Busy Flag) auf 0 gesetzt.

Vllt Liste von allen Befehlen mit Beschreibung

### Registerübersicht DS2438

Der DS2438 ist unterschiedliche Register (Pages) unterteilt, die alle notwendigen Einstellungen und Messdaten des Sensors beinhalten.

Ein Bild, das Text, Screenshot, Schrift, Zahl enthält.

Automatisch generierte Beschreibung

Abbildung 31: Registerübersicht DS2438

Für die Spannungsüberwachung ist nur die Page 0 wichtig, da hier alle Einstellungen und Messwerte gesetzt beziehungsweise ausgelesen werden.

|  |  |
| --- | --- |
| **Byte** | **Verwendungszweck** |
| 0 | Einstellungen setzen |
| 3 und 4 | Nieder- und hochwertiges Byte des Spannung-Messwertes |

### Initialisierung DS2438

Dateiname: DS2438.c

/\*\*

 \* @brief This function initializes the DS2438

 \* @param htim pointer to TIM\_HandleTypeDef (timer for us delay)

 \* @param gpio\_Port GPIOx (port of DQ Pin)

 \* @param gpio\_Pin GPIO\_PIN\_x (pin of DQ Pin)

 \* @return DS2438\_Status

 \*/

DS2438\_Status DS2438\_Init(TIM\_HandleTypeDef \*htim, GPIO\_TypeDef \*gpio\_Port, uint16\_t gpio\_Pin)

{

  if(htim == NULL)

    return DS2438\_ERROR;

  DS2438\_DelayTimer = htim;

  HAL\_TIM\_Base\_Start(DS2438\_DelayTimer); // start timer for DS2438\_DelayUs

  ds2438\_GPIOPort = gpio\_Port;

  ds2438\_GPIOPin = gpio\_Pin;

  if(DS2438\_Reset() == DS2438\_ERROR)

    return DS2438\_ERROR;

// set Vad as A/D converter input

  int16\_t pageData[9] = {0x00};

  if(DS2438\_ReadPage(0x00, pageData) == DS2438\_ERROR)

    return DS2438\_ERROR;

// pageData[0] |= 0x08; // supply voltage

  pageData[0] &= 0xF7;    // external input

  if(DS2438\_WritePage(0x00, pageData) == DS2438\_ERROR)

    return DS2438\_ERROR;

// check current voltage

  int8\_t errorCode = DS2438\_ReadVoltage();

  if(errorCode != DS2438\_OK)

    return errorCode;

  return DS2438\_OK;

}

Der/Die BenutzerIn kann sich aussuchen, ob die Versorgungsspannung oder die Spannung am Eingang vom A/D-Wandler gemessen werden soll. Dies funktioniert mit dem AD-Bit in der Page 0 im Byte[0]. Wenn das AD-Bit auf 1 gesetzt wird, wird die Versorgungsspannung gemessen. Wenn das Bit auf 0 gesetzt wird, misst der Sensor die Eingangsspannung vom A/D-Wandler.

**Beispiel Aufruf vom Programm**:

errorCode = DS2438\_Init(&htim16, GPIOC, GPIO\_PIN\_0);

if(errorCode != DS2438\_OK)

  Sensor\_ErrorHandler(DS2438, errorCode);

### Spannungsüberwachung

Die eingelesen Spannungswerte werden in folgendem Format gespeichert:

Ein Bild, das Text, Schrift, Zahl, Reihe enthält.

Automatisch generierte Beschreibung

Abbildung 32: DS2438 Spannungsregister Format

Um mit den eingelesenen Werten einen Spannungswert zu bilden, müssen MSB und LSB zusammengefügt werden. Da die Werte im Spannungsregisters eine Auflösung von 10mV pro LSB haben, muss der Registerwert mit 10mV multipliziert oder durch 100 gerechnet werden, um den eigentlichen Spannungswert zu bestimmen.

**Spannung einlesen:**

Dateiname: DS2438.c

/\*\*

 \* @brief This function reads the current voltage value of the DS2438

 \* @attention the voltage gets stored in the global variable 'ds2438\_Voltage'

 \* @return DS2438\_Status

 \*/

DS2438\_Status DS2438\_ReadVoltage(void)

{

  // start measurement (send CONVERT T command)

  if(DS2438\_StartVoltageMeasurement() == DS2438\_ERROR)

    return DS2438\_ERROR;

// wait for measurement to be complete (ADB flag: 1 = busy, 0 = ready)

  while(DS2438\_ReadControlVoltageFlag());

  int16\_t pageData[9] = {0x00};

  // read data

  if(DS2438\_ReadPage(0x00, pageData) == DS2438\_ERROR)

    return DS2438\_ERROR;

// extracting voltage bytes

  int16\_t voltageLSB = pageData[3];

  int16\_t voltageMSB = pageData[4];

  ds2438\_Voltage = (((voltageMSB & 0x3) << 8) | (voltageLSB)) / 100.0;

  ds2438\_Voltage \*= 3; // times 3 because of resistor voltage divider

  if(ds2438\_Voltage <= DS2438\_MIN\_VOLTAGE)

      return DS2438\_VOLTAGE\_ERROR;

  return DS2438\_OK;

}

Da der A/D-Wandler des DS2438 nur einen Spannungsbereich von 0-10V hat, muss die Eingangsspannung vor dem Sensor geteilt werden. Auf der Platine des Flight-Controllers ist vor dem Eingang des A/D-Wandlers des DS2438 ein 3:1 Spannungsteiler eingebaut. Um die richtige Akkuspannung zu bekommen, muss der eingelesen Spannungswert mit dem Faktor drei multipliert werden.

## Motoransteuerung

### DShot Protokoll

Zum Ansteuern der Motoren müssen Befehle an die ESC geschickt werden. Dafür wird das DShot-Protokoll verwendet. Im Vergleich zur analogen PWM-Ansteuerung der ESC, werden die DShot-Signale um ein Vielfaches schneller gesendet und dadurch, dass es sich um ein digitales Protokoll handelt, wird keine Kalibrierungssequenz der Throttle Minimal- und Maximalwerte benötigt.

Das Protokoll besteht aus 16 Bits. Um zwischen 0 und 1 zu unterscheiden, wird der PWM Duty-Cycle des Signals verändert. Das Protokoll gibt es mehreren Geschwindigkeiten (DShot150, DShot300, DShot600, DShot1200), wobei die Zahl angibt, in welcher Frequenz (fDShot in Kilohertz) ein Bit gesendet wird. Der/Die BenutzerIn kann aussuchen mit welcher Geschwindigkeit die Bits gesendet werden soll – *siehe Initialisierung Motoransteuerung*

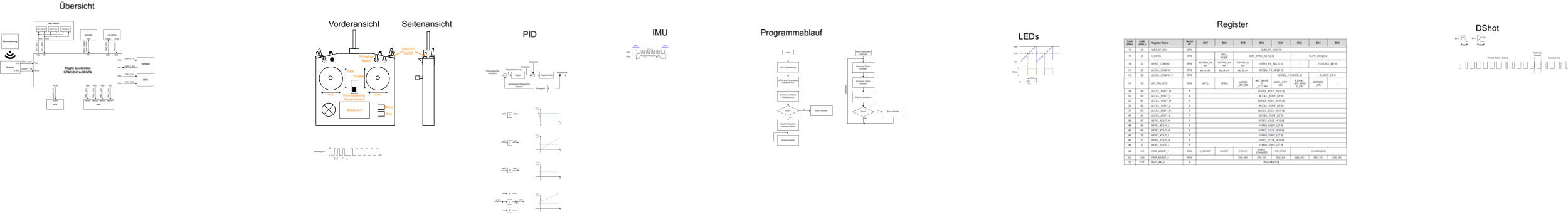


Abbildung 33: DShot Bit 0/1 Duty Cycle + Geschwindigkeit

Die ersten 11 Bits beinhalten den Throttle-Wert in Prozent, wobei 48 = 0% Throttle und 2048 = 100% Throttle. Die Zahlenwerte 0 bis 47 sind für spezielle Befehle reserviert.

Mit dem nächsten Bit kann eine Telemetrie-Anfrage gesendet werden, die bei einer erweiterten Version des Protokolls (bidirektionalen DShot) verwendet werden kann. Die ESC, die für die Diplomarbeit verwendet wird, unterstützt diese Variante nicht.

Die letzten 4 Bits bilden eine Checksumme, die aus der XOR-Verknüpfung der ersten 12 Bits in jeweils Viererblöcken gebildet wird. Die Ruhezeit zwischen Paketen ist im low-Zustand.

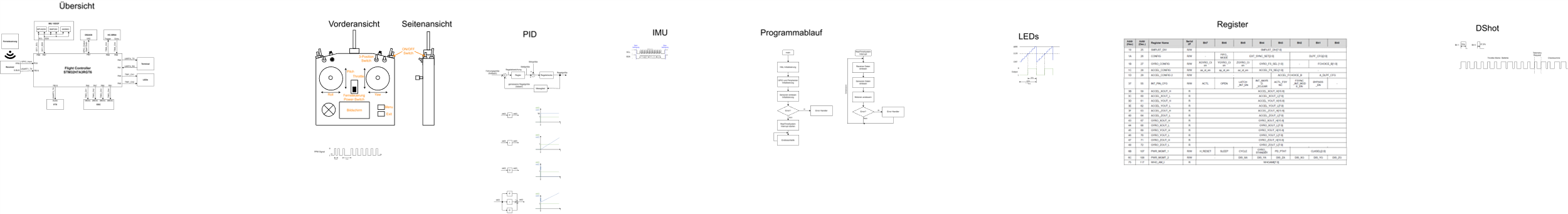


Abbildung 34: DShot Beispiel Übertragung

In der Beispielübertragung wird der Zahlenwert 0b10000011000 (1048) geschickt. Dieser entspricht einen Throttle-Wert von 50%. Die Telemetry Request ist ausgeschaltet und die Berechnung der Checksumme ergibt dem Wert 0b1011, der am Ende des Pakets ausgegeben wird.

### Initialisierung Motoransteuerung

Dateiname: dshot\_own.c

/\*\*

 \* @brief This function initializes the output ESC DShot signal

 \* @param htim pointer to TIM\_HandleTypeDef (output timer)

 \* @param protocol DSHOT150, DSHOT300, DSHOT600

 \* @param updateTim pointer to TIM\_HandleTypeDef (executes 1ms interrupt)

 \* @return DShot\_Status

 \*/

DShot\_Status DShot\_Init(TIM\_HandleTypeDef \*htim, ESC\_OutputProtocol protocol, TIM\_HandleTypeDef \*updateTim)

{

  // set and check timer pointer

  DShot\_OutputTim = htim;

  if(DShot\_OutputTim == NULL)

    return DSHOT\_TIM\_ERROR;

  // set the right timer frequency, 279MHz / (prescaler \* autoreload)

  \_\_HAL\_TIM\_SET\_PRESCALER(DShot\_OutputTim, 1 - 1);

  \_\_HAL\_TIM\_SET\_AUTORELOAD(DShot\_OutputTim, protocol - 1);

  oneDC = ceil((float)protocol \* 0.75);   // calculate duty cycle for sending bit 1

  zeroDC = ceil((float)protocol \* 0.375); // calculate duty cycle for sending bit 0

  // define custom transfer complete ISR

  DShot\_OutputTim->hdma[ESC\_LF\_DMA\_ID]->XferCpltCallback = DShot\_DMA\_XferCpltCallback;

  DShot\_OutputTim->hdma[ESC\_RF\_DMA\_ID]->XferCpltCallback = DShot\_DMA\_XferCpltCallback;

  DShot\_OutputTim->hdma[ESC\_LR\_DMA\_ID]->XferCpltCallback = DShot\_DMA\_XferCpltCallback;

  DShot\_OutputTim->hdma[ESC\_RR\_DMA\_ID]->XferCpltCallback = DShot\_DMA\_XferCpltCallback;

  // set output low

  \_\_HAL\_TIM\_SET\_COMPARE(DShot\_OutputTim, ESC\_LF\_TIM\_CH, 0);

  \_\_HAL\_TIM\_SET\_COMPARE(DShot\_OutputTim, ESC\_RF\_TIM\_CH, 0);

  \_\_HAL\_TIM\_SET\_COMPARE(DShot\_OutputTim, ESC\_LR\_TIM\_CH, 0);

  \_\_HAL\_TIM\_SET\_COMPARE(DShot\_OutputTim, ESC\_RR\_TIM\_CH, 0);

  // start all timers in pwm output mode

  HAL\_TIM\_PWM\_Start(DShot\_OutputTim, ESC\_LF\_TIM\_CH);

  HAL\_TIM\_PWM\_Start(DShot\_OutputTim, ESC\_RF\_TIM\_CH);

  HAL\_TIM\_PWM\_Start(DShot\_OutputTim, ESC\_LR\_TIM\_CH);

  HAL\_TIM\_PWM\_Start(DShot\_OutputTim, ESC\_RR\_TIM\_CH);

  // set custom ISR for 1ms interrupt + start timer

  HAL\_TIM\_RegisterCallback(updateTim, HAL\_TIM\_PERIOD\_ELAPSED\_CB\_ID, DShot\_WriteDataCallback);

  HAL\_TIM\_Base\_Start\_IT(updateTim);

  if(DShot\_SendThrottle(0, 0, 0, 0) != DSHOT\_OK)

    return DSHOT\_TIM\_ERROR;

  HAL\_Delay(5000);

  return DSHOT\_OK;

}

Es wird mit DMA ausgegeben.

Interrupt erklären

SendThrottle() Programm

## PID-Regler

### Hover Modus

Schalter auf Fernsteuerung Erkennung im Programm

PID-Algorithmus Programm

ChangeKs Programm

### Failsafe

Wann?

Wie?

Programm

## Debugging

### Terminal Ausgabe

Die Terminal Ausgabe ist essenziell für die Programmkontrolle, da der aktuelle Inhalt von Variablen direkt ausgegeben werden kann. Im Vergleich zum Debuggen wird das Programm dabei nur kurz unterbrochen, was bei Interrupt gesteuerten System zu Problemen führen kann.

Die Kommunikation findet mithilfe der UART-Peripherie statt. Diese ist mit einer Zusatzplatine verbunden, um den Datenaustausch mit einem externen System zu ermöglichen *(siehe Kapitel Marcel)*.

**UART-Einstellungen in STM32CubeMX:**

Ein Bild, das Text, Screenshot, Software, Website enthält.

Automatisch generierte Beschreibung

Abbildung 35: STM32CubeMX Einstellungen Terminal

Für den Empfang der Daten wird die Erweiterung „Serial Monitor“ [SERM] für Visual Studio Code verwendet.

Bild vom Serial Monitor mit Daten + Erklärung der Knöpfe

Erklärung dass Baudrate gleich sein muss

Dateiname: status\_handling.c

/\*\*

 \* @brief This function prints a string to the terminal

 \* @param string

 \* @retval none

 \*/

void Terminal\_Print(char \*string)

{

  HAL\_UART\_Transmit(&huart4, (uint8\_t \*)string, strlen(string), HAL\_MAX\_DELAY);

}

**Beispiel Programmaufruf:**

// with only text

Terminal\_Print("wichtige Daten\n\r");

// with variable

char text[] = "wichtige Daten\n\r";

Terminal\_Print(text);

### Status – LEDs

Auf der Flight-Controller Platine befinden sich eine rote und eine blaue LED. Die blaue wird zum Initialisierungsstatus und die rote LED wird für zur Anzeige von Errors verwendet.

|  |  |  |
| --- | --- | --- |
| **Blaue LED** | leuchtet nicht | Problem bei Programmstart |
| blinkt alle 0,5 Sekunden | DS2438 initialisiert |
| blinkt alle 0,4 Sekunden | IMU initialisiert |
| blinkt alle 0,3 Sekunden | PID initialisiert |
| blinkt alle 0,2 Sekunden | DShot initialisiert |
| blinkt alle 0,1 Sekunden | Receiver initialisiert |
| leuchtet durchgehend | Initialisierungen abgeschlossen |
| **Rote LED** | leuchtet nicht | kein Error |
| leuchtet durchgehend | Error während Initialisierungen |
| blinkt alle 0,1 Sekunden | Failsafe von Receiver oder DS2438 ausgelöst |

**Einstellungen STM32CubeMX:**

**Ein Bild, das Text, Screenshot, Software, Computersymbol enthält.

Automatisch generierte Beschreibung**

Abbildung 36: STM32CubeMX Einstellungen LEDs

Für die Änderung der Frequenz des PWM-Signals wird folgende Formel verwendet:

fBlink … Ausgangsfrequenz

fTimer … Timer Eingangsfrequenz, für Diplomarbeit 279MHz

PSC … prescaler Registerwert

ARR … auto-reload Registerwert, für Diplomarbeit fixiert auf 10000-1

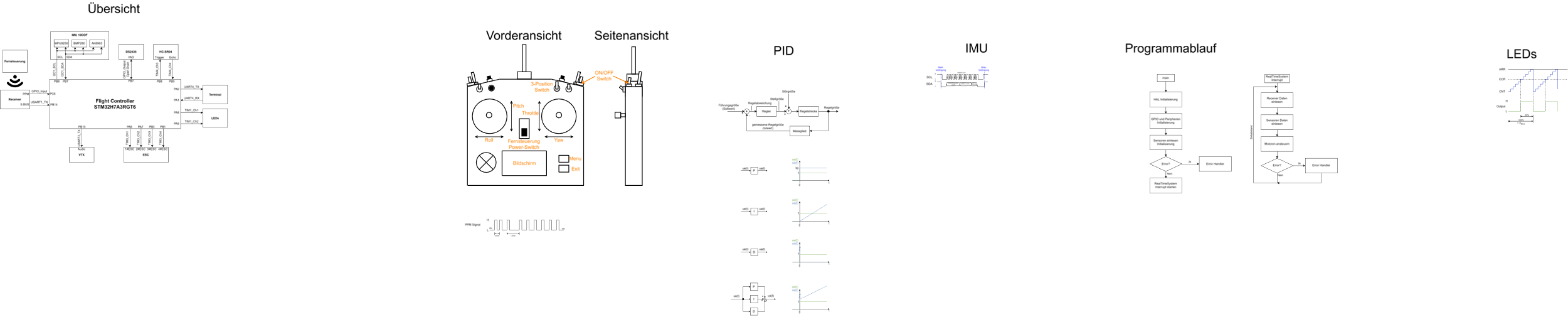


Abbildung 37: Beispiel PWM-Signalverlauf

Wenn der Wert im Counter-Register (CNT) unter dem Wert im capture/compare Register (CCR) ist, wird ein low-Zustand ausgegeben. Wenn der CNT-Wert größer ist als der CCR-Wert ist, dann wird ein high-Zustand ausgegeben. Durch die Änderung des CCR-Wertes kann der Duty Cycle verändert werden.

Für die Ansteuerung der LEDs wird ein Duty-Cycle von 50% verwendet. Dafür muss der Wert im CCR-Register die Hälfte des Wertes im ARR-Register gesetzt werden – *siehe Abbildung 46*

Um die Werte im während der Programmlaufzeit ändern zu können, können folgende Funktionen verwendet werden:

// set duty cycle for LEDs

\_\_HAL\_TIM\_SET\_COMPARE(&htim1, TIM\_CHANNEL\_1, 0);

\_\_HAL\_TIM\_SET\_COMPARE(&htim1, TIM\_CHANNEL\_2, 5000);

// set frequency ~2Hz

\_\_HAL\_TIM\_SET\_PRESCALER(&htim1, 14000 - 1);

// start timer for LEDs

HAL\_TIM\_PWM\_Start(&htim1, TIM\_CHANNEL\_1);

HAL\_TIM\_PWM\_Start(&htim1, TIM\_CHANNEL\_2);

Hinweis:

Die Funktionen erlauben es auch die Registerwerte zu ändern, ohne die Signal-Ausgabe unterbrechen zu müssen.

# Datenübertragung der Mess- und Videodaten (Ben)

## Überblick Datenübertragung

Blockschaltbild und schaltung

## Kommunikation: Flight Controller und Sender

### *Aufbau Sendermodul (VTx)*

### ASK – Modulation

Überblick und wieso nicht verwendet

### Transmit – Programm auf Cortex µC

#### Gleitkommadarstellung (memcpy)

#### Code

### Testen der Übertragung

+ probleme

## Kommunikation: Sender und Empfänger

### Aufbau Empfängermodul

### Verbindungsaufbau

### Testen der Übertragung

## Kommunikation: Empfänger und Raspberry Pi

### Empfangsprogramm auf Raspberry Pi

#### UART auf dem Raspberry Pi

#### Code

### Senden der Daten auf dem MQTT-Server

## Testen der Datenübertragungskette

# Visualisierungs-App

## Applikation

### Einführung – Dart / Flutter - Framework

#### Allgemeines

#### Pub Dev / Package Installer

#### Dart Syntax

#### State Management

##### Stateful vs. Stateless Widgets

##### Provider

### Allgemeines zur App

#### Usersystem

#### Datenvisualiserung

#### 3D-Model-Viewer

#### Livestream-Viewer

### UI-Konzept

### Projektstruktur und -umgebung

#### Editor – Visual Studio Code

#### Flutter Installation

#### Projekterstellung

#### Projektstruktur

#### Packages

##### Pubspec.yaml

##### Installieren neuer Packages

### Splash + Willkommensscreen

#### Native Splash Screen

#### Willkommensbildschirm

#### Logo-Design

### Login + Registrierung

#### E-Mail-Login

#### Google-Login

#### Passwort vergessen

#### Registrierung

### Homepage

#### Bottom Navigation Bar / GNav-Bar

#### Serverdatendialog

#### Flugdatenvisualisierung

##### MQTT-Datenstreams

##### Syncfusion Cartesian Charts

##### Echtzeitdaten + Animierte Diagramme

##### Speicherung der Daten

#### 3D-Model-Viewer

##### Flutter Cube

##### MQTT-Datenstream

##### 3D-Dronenmodell

###### Optimierungen in Blender

##### Extrabedienungen

#### Live-View

##### VLC-Plugin

##### Darstellung eines Netzwerkstreams

##### Video-Overlay

### Sidemenu / Drawer

#### Userprofil

##### Darstellung der Userdaten

##### Profilbildauswahl

##### Änderung der Userdaten

#### Credits

#### Vorherige Flüge

##### Darstellung aller gespeicherten Flüge

##### Sortiermöglichkeiten

##### Einsicht in vorherigen Flug

#### Einstellungen

##### Dark- / Light-Mode

##### 3D-Model Ausrichtung

#### Logout´

## Firebase Backend

### Installation via Firebase CLI

##### Firebase CLI – Setup

##### Firebase für Dart / Flutter aktivieren

##### Flutter App mit Flutterfire konfigurieren

### Einbindung in Flutter

##### Flutterfire Configure

##### Benutzten Firebase Packages hinzufügen

### Nutzen der verschiedenen Datenbanksysteme

#### Auth

##### E-Mail + Passwort – Login

##### Google Login

#### Firestore Database

##### Struktur

##### Allgemeine Userdaten

##### Flugdaten

##### Einstellungen

#### Realtime Database

##### Allgemein

##### Sinn der verschiedenen Flags

#### Storage

##### Allgemein

##### Referenz zu User in Firestore

# Videostreaming

## Allgemeiner Aufbau

### Anforderungen

### Übertragungskette

## CADFPX Analog Kamera

### Allgemein

### Produktinformationen

### Verwendungszweck

### Verbindungstest via USB-Camera App

## USB2.0 VHS Video Grabber

## RTMP-Server via NGINX aufsetzen

### RTMP Allgemein

### NGINX

#### Allgemein

#### Installation

#### RTMP-Konfiguration

#### Serverstatus einsehen

## RTMP-Stream erstellen

### FFMPEG Allgemein

### Aufbau der Konvertierung

#### Simple Konvertierung

#### Optimierungen

##### Encodervergleich

##### Optimierungsflags

##### Unoptimiert vs. Optimiert

# Videoserver-Port Forwarding

## Allgemein

## Routereinstellungen

## Kontakt mit Routerfirma zur Freischaltung

## Testen der Ports

### Portchecker.co

## Testen des Videostreams

### VLC-Player

#### Devicestream direkt testen

#### Netzwerkstream im selben Netzwerk

#### Netzwerkstream via Public IP

# Ergebnisse

Entweder Gesamt System irgendwelche Bilder

Oder wenn nicht, dann einzelne Teile die funktionieren zeigen / beschreiben

Das Kapitel ist, um die Ergebnisse zu verkaufen, basically alles was geht

Name könnte sich noch ändern

# Anhang

## Einführung CAD – Software (Fusion 360) (Ben)

### UI und Projekterstellung

### Skizze anfertigen

### Körper erstellen

### Schrift und Bilder einfügen

## 3D – Druck (Ben)

### 3D – Drucker

### Filamente

### 3D – Drucker Software (Ultimaker Cura)

## Inbetriebnahme Anleitung

## Projektplan

## Projektkosten

## Projekttagebuch

## Einführung Entwicklungsumgebung - Steuerungssoftware

Um den Mikroprozessor STM32H7A3RGT6 auf der Flight-Controller Platine zu programmieren, wird die Entwicklungsumgebung Keil µVision5 in der Version V5.38.0.0 in Kombination mit STM32CubeMX in der Version 6.10.0 und Vision Studio Code verwendet. Programmiert wird dieser mithilfe eines DAPLink (CMSIS-DAP) – Interface über die SWD-Schnittstelle.

Mit STM32CubeMX können die Grundeinstellungen des Mikrocontrollers, wie die Peripherie- und Taktversorgungseinstellungen, mit einer grafischen Oberfläche einfach getätigt und automatisch eine Initialisierungssoftware in der Programmiersprache C generiert werden. Diese Software wird mithilfe von HAL (hardware abstraction layer) erstellt. Dieses System bietet eine Menge APIs, die es ermöglichen mit einfachen Funktionen komplexe Befehle und Einstellungen in einen STM32 Mikrocontroller zu tätigen.

Keil µVision5 bietet eine integrierte Entwicklungsumgebung mit eingebautem Assembler, Compiler und Debugger. Es gibt eine beschränkte kostenlose Version im Internet, die aber nicht für die Programmgröße der Diplomarbeit ausreicht. Daher muss eine kostenlose Community-Lizenz von Keil aktiviert werden [KLIZ].

Für die Programmierung des C-Sourcecodes wird Visual Studio Code verwendet. Mit der Erweiterung „Keil Assistent“ [KASS] kann Keil µVision5 direkt von einer Benutzeroberfläche gesteuert werden. Visual Studio Code bietet eine Vielfalt von Funktionen, die den Arbeitsablauf produktiver und einfacher gestalten.

**STM32CubeMX Projekt erstellen:**

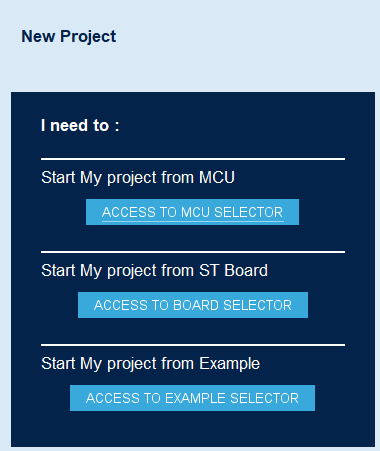


Abbildung 38: STM32CubeMX access to MCU selector

Nach dem Starten von der Software muss der zu programmierende Mikrocontroller ausgewählt werden.

Bei vorgefertigten Entwicklungsplatinen, kann „access to board selector“ oder „access to example selector“ verwendet werden.

Für die Diplomarbeit wird eine eigenerstellte Platine mit Mikrocontroller verwendet, daher wird die Option „access to MCU selector“ verwendet.

Nach der Auswahl werden die aktuellen Informationen der Mikrocontroller und Entwicklungsplatinen von der STM32 Datenbank runtergeladen.

Ein Bild, das Text, Screenshot, Zahl, Schrift enthält.

Automatisch generierte Beschreibung

Abbildung 39: STM32CubeMX Liste von Mikrocontroller

Mit einer Menge von Filtern und Suchoptionen kann der gewünschte Mikrocontroller ausgewählt werden. Bevor das Projekt erstellt wird, können die Eigenschaften der Auswahl kontrolliert. Um das Projekt zu erstellen, muss der Knopf „Start Project“ gedrückt werden.

Ein Bild, das Text, Screenshot, Schrift, Software enthält.

Automatisch generierte Beschreibung

Abbildung 40: STM32CubeMX Auswahl Mikrocontroller

Mit der grafischen Oberfläche können die gewünschten Peripherie-, Pin-, Takt- und Projekteinstellungen getätigt werden.

Ein Bild, das Text, Screenshot, Software, Multimedia-Software enthält.

Automatisch generierte Beschreibung

Abbildung 41: STM32CubeMX grafische Oberfläche

Um die effizienteste Programmstruktur für die Diplomarbeit zu erstellen, müssen wichtige Eistellungen getätigt werden.

Als Erstes muss die Taktquelle ausgewählt werden. Da externe Quarzoszillatoren verwendet werden, muss in der Kategorie RCC für „High Speed Clock (HSE)“ und „Low Speed Clock (LSE)“ die Einstellung „Crystal/Ceramic Resonator“ ausgewählt werden.

Ein Bild, das Text, Software, Computersymbol, Webseite enthält.

Automatisch generierte Beschreibung

Abbildung 42: STM32CubeMX HSE/LSE Einstellung

Mit der „Clock Configuration“ kann die gesamte Taktstruktur nach Anforderungen verändert werden:

Ein Bild, das Diagramm, Text, Reihe, Plan enthält.

Automatisch generierte Beschreibung

Abbildung 43: STM32CubeMX clock configuration

Wichtig: Wenn externe Oszillatoren verwendet werden, muss auf der linken Seite, die Einstellung „Input frequency“ auf die vorhandene Frequenz gesetzt werden.

Für die Diplomarbeit wird ein 8MHz Quarz Oszillator, der auf eine Systemfrequenz von 279MHz erhöht wird, verwendet.

Um den genierten Code mit der Keil µVision5 Entwicklungsumgebung verwenden zu können, müssen unter Project Manager gewisse Einstellungen getätigt werden:

Ein Bild, das Text, Screenshot, Reihe, Zahl enthält.

Automatisch generierte Beschreibung

Abbildung 44: STM32CubeMX project settings

Eine für die Drohne notwendige Einstellung ist unter Project Manager 🡪 Advanced Settings 🡪 Register Callback. In diesen Bereich können für einzelne Peripherien eigenerstellte Callback-Funktionen aktiviert werden.

Für die FPV-Drohne ist die Einstellung für die TIM-, UART- und USART-Peripherie aktiviert werden.



Abbildung 45: STM32CubeMX register callback

Eine Callback-Funktion wird beim Auslösen eines Interrupts von der ISR (Interrupt Service Routine) ausgelöst.

Zum Beispiel: *void HAL\_TIM\_PeriodElapsedCallback (TIM\_HandleTypeDef \* htim)* wird jedes Mal ausgeführt, wenn eine Timer-Peripherie einen Überlauf-Interrupt auslöst. Diese Funktion ist in der Datei *stm32h7xx\_hal\_tim.c* mit dem Präfix *\_\_weak* definiert. Das bedeutet, wenn die Funktion in einer anderen Datei ausprogrammiert wird, wird diese mit der neuen Version ersetzt.

Die Einstellung von Register Callback erlaubt es die Funktion mit einer eigenen zu ersetzen. Dafür muss die Funktion *HAL\_TIM\_RegisterCallback()* aufgerufen werden.

Zum Beispiel:

|  |
| --- |
| HAL\_TIM\_RegisterCallback(&htim15, HAL\_TIM\_PERIOD\_ELAPSED\_CB\_ID, RealTimeSystemCallback); |

Von der Timer15-Peripherie wird das Überlauf-Interrupt-Callback mit der Funktion *RealTimeSystemCallback()* ersetzt.

Nach der fertigen Einstellung des Projekts, können die Programmdateien mit dem Knopf „Generate Code“ erstellt werden. Daraufhin wird folgende Ordnerstruktur erstellt:

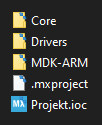


Abbildung 46: STM32CubeMX Ordnerstruktur

* Core: alle Programm- und Headerdateien
* Drivers: alle HAL-Dateien, die für das Projekt notwendig sind
* MDK-ARM: Keil µVision5 Projektdateien

**Keil µVision5 Einstellungen:**

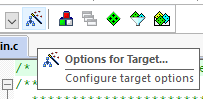


Abbildung 47: µVision Zauberstab

Die Einstellungen des Projekts können mit dem Zauberstab „Options for Target…“ eingestellt werden.

Die wichtigsten Einstellungen sind die Target- und Debug-Einstellungen:

Ein Bild, das Text, Screenshot, Display, Zahl enthält.

Automatisch generierte Beschreibung

Abbildung 48: µVision Target Einstellungen

Ein Bild, das Text, Screenshot, Zahl, Display enthält.

Automatisch generierte Beschreibung

Abbildung 49: µVision Debug Einstellungen

Für die Diplomarbeit wird der default compiler version 6 und der CMSUS-Dap Debugger verwendet.

Das von STM32CubeMX erstellte Programm, muss nicht geändert werden und eigener Code soll zwischen den Kommentaren „USER CODE BEGIN“ und „USER CODE END“ eingefügt werden, damit wenn neuer Code generiert wird, der eigene nicht überschrieben wird.

Um das Programm auf den Mikrocontroller zu spielen, müssen folgende Knöpfe verwendet werden:



Abbildung 50: µVision Build/Flash Knöpfe

# Quellen

## Gedruckte Medien

Für die Quellenangabe bei Fachbüchern ist, wie nachfolgend dargestellt, vorzugehen (löschen):

Vorname Nachname: Titel. Untertitel. - Verlagsort: Verlag, Jahr.

Vorname Nachname: Titel. Untertitel. Auflage - Verlagsort: Verlag, Jahr.

z.B.:

[REI13] Jürgen Reichhardt: Lehrbuch Digitaltechnik - Eine Einführung mit VHDL  
 3. Auflage, München: Oldenbourg Verlag, 2013  
 ISBN: 978-3-486-72765-4

## Online

|  |  |
| --- | --- |
| [KLIZ] | ARM Keil: Community Lizenz Anleitung  <https://www.keil.arm.com/mdk-community/>  (letzter Aufruf: 28.02.2024) |
| [KASS] | Visual Studio Marketplace: Keil Assistant Erweiterung  <https://marketplace.visualstudio.com/items?itemName=CL.keil-assistant>  (letzter Aufruf: 28.02.2024) |
| [SERM] | Visual Studio Marketplace: Serial Monitor Erweiterung  <https://marketplace.visualstudio.com/items?itemName=ms-vscode.vscode-serial-monitor>  (letzter Aufruf: 28.02.2024) |
| [SBDW] | digitalwire: Futaba S-Bus Protokoll  <https://digitalwire.ch/de/projekte/futaba-sbus/>  (letzter Aufruf: 28.02.2024) |
| [IBDSP] | The FlySky iBus protocol  <https://blog.dsp.id.au/posts/2017/10/22/flysky-ibus-protocol/>  (letzter Aufruf: 28.02.2024) |
| [IBGH] | STM32 HAL iBUS  <https://github.com/mokhwasomssi/stm32_hal_ibus>  (letzter Aufruf: 28.02.2024) |
| [DSBW] | Brushless Whoop: DSHOT – the missing handbook  <https://brushlesswhoop.com/dshot-and-bidirectional-dshot/>  (letzter Aufruf: 28.02.2024) |
| [IMUWS] | Waveshare: 10 DOF IMU Sensor  <https://www.waveshare.com/wiki/10_DOF_IMU_Sensor_(C)>  (letzter Aufruf: 28.02.2024) |
| [M7] | STM32H7A3RGT6 Datenblätter  <https://www.st.com/en/microcontrollers-microprocessors/stm32h7a3rg.html>  (letzter Aufruf: 28.02.2024) |
| [M7HAL] | STM32H7 HAL Datenblätter  <https://www.st.com/en/embedded-software/stm32cubeh7.html#documentation>  (letzter Aufruf: 28.02.2024) |
| [DS2438] | DS2438 Datenblatt  <https://www.analog.com/media/en/technical-documentation/data-sheets/DS2438.pdf>  (letzter Aufruf: 28.02.2024) |
| [COFIL] | Complementary filter and relative orientation with MPU9250  <https://www.hackster.io/hibit/complementary-filter-and-relative-orientation-with-mpu9250-d4f79d>  (letzter Aufruf: 28.02.2024) |

# Verzeichnis der Abbildungen

[Abbildung 1: Regler-Blockschaltbild 21](#_Toc160104693)

[Abbildung 2: P-Glied Sprungantwort 22](#_Toc160104694)

[Abbildung 3: P-Glied Schaltsymbol 22](#_Toc160104695)

[Abbildung 4: I-Glied Schaltsymbol 22](#_Toc160104696)

[Abbildung 5: I-Glied Sprungantwort 22](#_Toc160104697)

[Abbildung 6: D-Glied Schaltsymbol 23](#_Toc160104698)

[Abbildung 7: D-Glied Sprungantwort 23](#_Toc160104699)

[Abbildung 8: PID-Regler Schaltsymbol 23](#_Toc160104700)

[Abbildung 9: PID-Regler Sprungantwort 23](#_Toc160104701)

[Abbildung 10: Flussdiagramm Programmablauf 27](#_Toc160104702)

[Abbildung 11: Fernsteuerung 33](#_Toc160104703)

[Abbildung 12: Receiver 33](#_Toc160104704)

[Abbildung 13: Fernsteuerung Tastenbelegung 34](#_Toc160104705)

[Abbildung 14: Beispiel PPM-Signal 37](#_Toc160104706)

[Abbildung 15: STM32CubeMX Einstellungen S.Bus 38](#_Toc160104707)

[Abbildung 16: STM32CubeMX Einstellungen I.Bus 39](#_Toc160104708)

[Abbildung 17: Einstellungen DMA für Receiver in STM32CubeMX 41](#_Toc160104709)

[Abbildung 18: I²C Datentransfer 50](#_Toc160104710)

[Abbildung 19: STM32CubeMX Einstellungen IMU 50](#_Toc160104711)

[Abbildung 20: I²C Schreibzyklus 51](#_Toc160104712)

[Abbildung 21: I²C Lesezyklus 52](#_Toc160104713)

[Abbildung 22: Registerübersicht MPU9250 56](#_Toc160104714)

[Abbildung 23: Registerübersicht BMP280 62](#_Toc160104715)

[Abbildung 24: Formel Berechnung Höhe über Meeresspiegel 66](#_Toc160104716)

[Abbildung 25: STM32CubeMX Einstellungen DS2438 68](#_Toc160104717)

[Abbildung 26: One-Wire Bit 1 senden 69](#_Toc160104718)

[Abbildung 27: One-Wire Bit 0 senden 69](#_Toc160104719)

[Abbildung 28: One-Wire Bit empfangen 72](#_Toc160104720)

[Abbildung 29: One-Wire Initialisierungssequenz 74](#_Toc160104721)

[Abbildung 30: Registerübersicht DS2438 76](#_Toc160104722)

[Abbildung 31: DS2438 Spannungsregister Format 78](#_Toc160104723)

[Abbildung 32: STM32CubeMX Einstellungen Terminal 84](#_Toc160104724)

[Abbildung 33: STM32CubeMX Einstellungen LEDs 86](#_Toc160104725)

[Abbildung 34: Beispiel PWM-Signalverlauf 87](#_Toc160104726)

[Abbildung 35: STM32CubeMX access to MCU selector 95](#_Toc160104727)

[Abbildung 36: STM32CubeMX Liste von Mikrocontroller 95](#_Toc160104728)

[Abbildung 37: STM32CubeMX Auswahl Mikrocontroller 96](#_Toc160104729)

[Abbildung 38: STM32CubeMX grafische Oberfläche 97](#_Toc160104730)

[Abbildung 39: STM32CubeMX HSE/LSE Einstellung 97](#_Toc160104731)

[Abbildung 40: STM32CubeMX clock configuration 98](#_Toc160104732)

[Abbildung 41: STM32CubeMX project settings 98](#_Toc160104733)

[Abbildung 42: STM32CubeMX register callback 98](#_Toc160104734)

[Abbildung 43: STM32CubeMX Ordnerstruktur 99](#_Toc160104735)

[Abbildung 44: µVision Zauberstab 99](#_Toc160104736)

[Abbildung 45: µVision Target Einstellungen 100](#_Toc160104737)

[Abbildung 46: µVision Debug Einstellungen 100](#_Toc160104738)

[Abbildung 47: µVision Build/Flash Knöpfe 100](#_Toc160104739)

# Begleitprotokoll

# Anhang

## — Projektdokumentation (Kostendarstellung, Besprechungsprotokolle etc.)

## — Technische Dokumentation (technische Beschreibungen, Berechnungen,

## Konstruktionszeichnungen, Versuchsberichte, betriebswirtschaftliche Kalkulationen etc.)

## Schaltungen, Zeichnungssätze, sonstiges