

BLE HID Hardware-Erweiterungsmodul für Drohnenfernbedienungen

Studienarbeit

des Studiengangs IT-Automotive
an der Dualen Hochschule Baden-Württemberg Stuttgart

von

Fabian Kuffer

18. Mai 2023

Bearbeitungszeitraum
Matrikelnummer, Kurs
Betreuer

4. Oktober 2022 - 9. Juni 2023
2044882, TINF-20ITA
Prof. Dr. Karl Friedrich Gebhardt

Erklärung

Ich versichere hiermit, dass ich meine Studienarbeit mit dem Thema: *BLE HID Hardware-Erweiterungsmodul für Drohnenfernbedienungen* selbstständig verfasst und keine anderen als die angegebenen Quellen und Hilfsmittel benutzt habe. Ich versichere zudem, dass die eingereichte elektronische Fassung mit der gedruckten Fassung übereinstimmt, falls beide Fassungen gefordert sind.

Stuttgart, 18. Mai 2023

Fabian Kuffer

Kurzfassung

Ein wichtiger Bestandteil neben dem Multikopterfliegen stellt für Renn- und Freestyle-Quadrokopterpiloten das Training dar, welches in zwei Varianten durchgeführt werden kann. Einerseits am Flugplatz – wobei durch Abstürze hohe Reparaturkosten entstehen können. Andererseits kostengünstig im Simulator – am Rechner. Während des Trainings am Simulator ist es wünschenswert die gewohnte Fernsteuerung zu verwenden, um den Piloten eine gewohnte Umgebung zu bieten. Um dies zu erreichen, wird in dieser Arbeit ein **BLE**-Erweiterungsmodul für Multikopterfernsteuerungen entwickelt, womit der Pilot ohne weitere Treiber die Fernsteuerung mit einem Simulator auf einem Endgerät verbinden kann. Damit die Verbindung ohne Treiber funktioniert, werden die Fernsteuerungsdaten mittels **HOGP** verpackt. Ebenso werden Platinen konstruiert, mit denen das Erweiterungsmodul kompakt, mobil und benutzerfreundlich verwendet werden kann. Damit die entwickelten Platinen fest und kompakt im Modulschacht (Typ: Lite) befestigt werden können, wird zusätzlich noch ein Gehäuse entwickelt, welches mittels eines **FDM**-3D-Druckers gedruckt werden kann. Zuletzt wird noch die Latenz zwischen der integrierten **USB**-Verbindung der Fernsteuerung und der **BLE**-Verbindung des Erweiterungsmoduls verglichen. Dabei kann festgestellt werden, dass unter optimalen Bedingungen die **BLE**-Latenz durchschnittlich 20,84 ms größer ist als die **USB**-Latenz.

Abstract

In addition to multicopter flying, an important aspect for racing and freestyle quadrocopter pilots is training, which can be carried out in two ways. On the one hand, at the airfield – where crashes can result in high repair costs. On the other hand, inexpensive in the simulator – on a computer. During training on the simulator, it is desirable to use the familiar radio control in order to provide the pilots with a familiar environment. To achieve this, a **BLE** extension module for multicopter radio controls is developed in this project, which allows the pilot to connect the radio control to a simulator on a remote device without additional drivers. To ensure that the connection works without drivers, the radio control data is packaged using **HOGP**. In addition, circuit boards are being designed so that the extension module can be used in a compact, mobile and user-friendly fashion. So that the developed circuit boards can be fixed firmly and tightly in the module slot (type: Lite), a shell is developed, which can be printed using an **FDM** 3D printer. Finally, the latency between the integrated **USB** connection of the remote control and the **BLE** connection of the expansion module is compared. It can be measured that under optimal conditions, the **BLE** latency is on average 20.84 ms longer than the **USB** latency.

Inhaltsverzeichnis

Abkürzungsverzeichnis	V
Abbildungsverzeichnis	VII
Tabellenverzeichnis	IX
Quellcodeverzeichnis	X
1 Einleitung	1
1.1 Motivation	2
1.2 Stand der Technik	2
2 Aufgabenstellung	3
2.1 Softwareentwicklung	3
2.2 Platinenentwurf	3
2.3 Gehäuseerstellung	4
3 Technische Grundlagen	5
3.1 Human Interface Device (HID)	5
3.1.1 Allgemein	5
3.1.2 Report Deskriptor	5
3.2 Bluetooth	8
3.2.1 Allgemein	8
3.2.2 Benötigte Komponenten eines Bluetooth Low Energy (BLE)-Geräts	9
3.2.3 Sollanforderungen durch Apple	14
3.2.4 HID over GATT Profile (HOGP)	14
3.2.5 Bluetooth-Stacks	17
3.3 Übertragungsprotokolle am Fernbedienungsmodulschacht	18
3.3.1 Puls-Positions-Modulation (PPM)	18
3.3.2 CRSF	19
3.3.3 SBUS	20
3.3.4 MULTI	20
3.4 Mikrocontrollerfamilie ESP32 und Zertifizierungen	21
3.5 FreeRTOS	22
3.5.1 Tasks	22
3.5.2 Software Timer	23
3.5.3 Queues	24
3.5.4 Interrupts	24
3.5.5 Besonderheiten bei der Verwendung auf dem ESP32	24

3.6	Darstellung von Glyphen auf einem Monitor	24
3.7	Eingabeereignisbehandlung unter Linux in Bezug auf Gamepads und Joysticks .	26
4	Umsetzung	28
4.1	Softwareentwicklung	28
4.1.1	Auswahl der Mikrocontrollers	28
4.1.2	Auswahl des Bluetooth-Stacks	28
4.1.3	Kommunikation zwischen dem Mikrocontroller und dem Endgerät . . .	28
4.1.4	Kommunikationsprotokoll zwischen der Multikopterfernsteuerungen und dem Mikrocontroller	30
4.1.5	Statusausgabe des Mikrocontrollers mittels eines OLED -Displays . . .	31
4.1.6	Kombination aller Softwarekomponenten	32
4.1.7	Weiterführende Informationen	33
4.2	Platinenentwurf	33
4.2.1	Teilschaltungen	33
4.2.2	Referenzschaltungen	36
4.2.3	Weiterführende Informationen	37
4.3	Gehäuseerstellung	37
4.3.1	Weiterführende Informationen	39
5	Validierung und Gegenüberstellung	40
5.1	Validierung des Funktionsumfangs	40
5.1.1	Softwareentwicklung	40
5.1.2	Platinenentwurf	41
5.1.3	Gehäuseerstellung	41
5.2	Gegenüberstellung BLE -Modul und USB -Verbindung	42
5.2.1	Versuchsaufbauten	42
5.2.2	Auswertung	44
6	Rekapitulation und Ausblick	47
6.1	Rekapitulation	47
6.2	Ausblick	48
Literatur		49
Anhang		56

Abkürzungsverzeichnis

ADC	Analog-Digital-Wandler
API	application programming interface
ATT	Attribute Protocol
BBR	Bluetooth Basic Rate
BLE	Bluetooth Low Energy
CE	conformité européenne
CID	Kanalidentifizierer
CPU	central processing unit
CRC	Cyclic redundancy check
ESD	Electro-Static-Discharge
ESP-IDF	Espressif IoT Development Framework
evdev	Event Device
FCC	Federal Communications Commission
FDM	Fused Deposition Modeling
FIFO	First In First Out
GAP	Generic Access Profile
GATT	Generic Attribute Profile
GPIO	general purpose input/output
HCI	Host Controller Interface
HID	Human Interface Device
HOGP	HID over GATT Profile
IC	integrated circuit
IDE	integrated development environment
IOCTL	input output Control
ISM	Industrial, Scientific and Medical
I²C	inter integrated circuit
LDO	Low-dropout regulator
LED	light-emitting diode
LL	Link Layer
L2CAP	Logical Link Control and Adaption Protocol
MFi	Made for iPod/iPhone/iPad
OLED	organic light-emitting diode
PHY	Physical Layer
PPM	Puls-Positions-Modulation
RAM	Random-access memory
RED	Radio Equipment Directive
RPA	Resolvable Private Address
SAR	successive approximation
SDP	Service Discovery Protocol
SIG	Special Interest Group
SMP	Security Manager Protocol

UART	Universal Asynchronous Receiver Transmitter
USB	Universal Serial Bus
UUID	universal unique identifier
WLAN	Wireless Local Area Network

Abbildungsverzeichnis

1	HID Deskriptorenhierarchie; abgewandelt von [13, S. 4]	5
2	Beispielhafte Verwendung von Elementen, um eine Datenstruktur zu definieren; abgewandelt von [13, S. 24]	6
3	Frequenzband mit Kanälen von BLE; abgewandelt von [17, S. 4]	8
4	Benötigte Komponenten eines BLE-Geräts; abgewandelt von [16, S. 203, S. 1245]	9
5	GATT Hierarchie; abgewandelt von [16, S. 281]	13
6	Hierarchische Verwendung von Profilen; abgewandelt von [16, S. 1468]	13
7	Benötigte Dienste eines HID-Geräts; abgewandelt von [20, S. 11]	15
8	Darstellung einzelner Kanäle im Zeitverlauf bei PPM; abgewandelt von [36] . .	18
9	Taskzustände und deren Übergänge; angepasst von [57, S. 67]	23
10	Speichern der Glyphen U spaltenweise in einem Array aus Bytes; abgewandelt von [71]	25
11	Umwandlung einer Vektor-Schriftart zur Darstellung an einem Monitor; abgewandelt von [72]	26
12	Gegenüberstellung der Schriftartenspeicherverfahren	26
13	Verarbeitung eines Datenstreams für die Darstellung auf dem Erweiterungsmoduldisplay; abgewandelt von [89, S. 37]	32
14	Platinen des Erweiterungsmoduls	33
15	Pinbelegung des Fernsteuerungsmodulschachts; abgewandelt von [90]	34
16	Spannungsregulierung des Erweiterungsmoduls	34
17	ESP32 Programmierlogik	35
18	Hardwaretastenentprellung	36
19	Electro-Static-Discharge (ESD)-Schutzschaltung	36
20	Modell mit Überhängen für den 3D-Druck vorbereiten	37
21	Modell mit Überhängen für den 3D-Druck vorbereiten	38
22	Messing Gewindegarnituren zur Befestigung der einzelnen Modulkomponenten .	38
23	Eingebaute Platinen im Gehäuse	39
24	Tasterschutz für Taster des Erweiterungsmoduls	39
25	Zusammengebautes Erweiterungsmodul	39
26	Stützstruktur für einen Versuchsaufbau zum Betätigen eines Fernsteuerungstasters mittels eines Servos	43
27	Ersatzschaltbild eines Optokopplers; abgewandelt von [98]	43
28	Schaltplan des Versuchsaufbaus zur Bestimmung der Latenz mittels eines Optokopplers; abgewandelt von [96], [99, S. 8, S. 12]	43
29	Latenz aller Versuchsdurchläufe mittels USB-Verbindung	44
30	Latenz aller Versuchsdurchläufe mittels BLE-Verbindung	45
31	Latenz aller Versuchsdurchläufe die kleiner 100 ms sind mittels BLE-Verbindung	45
32	Schaltplan der Hauptplatine	57
33	Schaltplan für Ein- und Ausgabekomponenten	58

34	Schaltplan für die Verbindung zwischen Erweiterungsmodul und Multikopterfernsteuerung	59
35	Explosionszeichnung mit allen Modellen des Gehäuses	60

Tabellenverzeichnis

1	Datenstruktur einer Maus mit drei Knöpfen; abgewandelt von [15]	7
2	Liste der verfügbaren Geräteinformationsmerkmale	17
3	Aufbau eines CSRF-Pakets [38]	19
4	Ausschnitt aus den vorhandenen CSRF-Geräteadressen [39]	19
5	Vordefinierte CSRF Datentypen [39]	19
6	Paketaufbau von SBUS [42]	20
7	Paketaufbau von MULTI [44]	21
8	Liste der verfügbaren Geräteinformationsmerkmale	29

Quellcodeverzeichnis

1	Report Deskriptor einer Maus mit 3 Knöpfen [15]	7
2	Minimaler Aufbau eines Tasks	22
3	C-Strukuraufbau eines Eingabeereignisses von evdev [75]	26
4	Report Map Deskriptor des Erweiterungsmoduls	29
5	C-Strukuraufbau der aufbereiteten Kanaldaten	31

1 Einleitung

Multikopter beziehungsweise Quadrokopter haben in den letzten Jahren sowohl im privaten als auch im kommerziellen Sektor ein konstantes Wachstum erreicht. So sind beispielsweise in den Vereinigten Staaten von Amerika mit Stand vom 31. Mai 2022 über 865.000 Multikopter registriert. Davon sind über 500.000 privat und über 300.000 für die kommerzielle Nutzung registriert. [1], [2], [3], [4]

Quadrokopter lassen sich grob in zwei Kategorien einteilen. Zum einen gibt es die Consumerquadrokopter, welche viele Sensoren enthalten, um Unterstützungsfunctionen an die teils ungeübten Piloten bereitzustellen. Ein Beispiel für einen Quadrokopter dieser Kategorie ist die Mavic 3 Classic vom Unternehmen DJI. Diese hat Sichtsensoren, welche nach unten, oben, vorne und hinten ausgerichtet sind, um Objekte im Flugfeld zu erkennen und somit ausweichen zu können. Weitere Hilfsfunktionen, welche der Quadrokopter besitzt, ist der automatische Rückflug an den Startort, sowie die Möglichkeit beide Steuerknüppel loszulassen und dabei stabil die Lage in der Luft beizubehalten. [5]

Die zweite Kategorie von Quadrokoptern sind sogenannte Freestyle- beziehungsweise Rennquadrokopter. Diese sind im Gegensatz zu den Consumerquadrokoptern dazu ausgelegt möglichst leicht zu sein, um möglichst schnelle und beeindruckende Manöver machen zu können. Im Gegenzug wird auf die Unterstützungsfunctionen von Consumerquadrokoptern verzichtet. Eine weitere Besonderheit ist die Möglichkeit zwischen drei Flugmodi auszuwählen. Zum einen den Flugmodus *Angle Mode*. In diesem Modus wird der Quadrokopter bis zu einem fest vordefinierten Neigungswinkel automatisch begrenzt, wodurch Loopings und Rollen des Quadroopters unterbunden werden. Ebenso dreht sich der Quadrokopter wieder in die Ausgangslage zurück, wenn die Steuerknüppel zentriert werden. Der zweite Flugmodus ist der *Horizon Mode*, dieser bietet wie der *Angle Mode* die Funktion, dass sich der Quadrokopter wieder zur Ausgangslage zurückdreht, wenn die Steuerknüppel in die zentrale Stellung zurückgebracht werden. Jedoch können in diesem Flugmodus Loopings und Rollen gemacht werden. Der letzte verfügbar Flugmodus ist der *Air beziehungsweise Acro Mode*. In diesem Modus muss der Pilot sich um das Ausrichten der Drohne in alle Drehrichtungen selbst kümmern, da bei Loslassen der Steuerknüppel die vorhandenen Drehungen des Quadroopters beibehalten werden. Dieser Modus wird meist von Freestyle- und Rennpiloten verwendet. [6]

Neben dem Multikopterfliegen stellt für Renn- und Freestyle-Quadrokopterpiloten das Training einen wichtigen Bestandteil dar, um die Bedienung des Quadroopters im *Air beziehungsweise Acro Mode* zu verbessern. Das Training kann in zwei Varianten durchgeführt werden. Der Quadrokopterpilot trainiert entweder am Flugplatz – hier können aber durch Abstürze hohe Reparaturkosten und lange Reparaturzeiten entstehen –, oder der Quadrokopterpilot trainiert im Simulator am Rechner, wobei keine Reparaturkosten und Reparaturzeiten entstehen.

1.1 Motivation

Da in den letzten Jahren das Unternehmen Apple Tablets mit leistungsstarken Prozessoren, welche ursprünglich für Notebooks und Desktops gedacht waren, entwickelt hat [7], wäre es wünschenswert Quadrokopter-Simulatoren für die immer leistungsfähigeren mobilen Geräte bereitzustellen. Hierfür muss jedoch die Möglichkeit bestehen, die gewohnte Fernsteuerung der Quadrokopter mit Endgeräten zu verbinden, um den Piloten eine gewohnte Umgebung zu bieten. Die Verbindung einer Fernsteuerung mit einem Endgerät bieten einige Hersteller an, indem sich die Fernsteuerung per [USB](#) als [USB-HID-Joystick](#) identifiziert [8]. Das Problem hierbei ist jedoch, dass die Verbindung mittels [USB](#) mit mobilen Geräten nur eingeschränkt beziehungsweise unmöglich herzustellen ist. Beseitigt werden kann dieses Problem bei Fernsteuerung mit Modulschächten [9], mit deren Hilfe die Tasten- und Joysticksignale über andere Kommunikationswege übertragen werden können.

Ziel der Arbeit ist es daher ein Hardware-Erweiterungsmodul für Multikopterfernsteuerungen zu entwickeln, womit eine Fernsteuerung mit einem Endgerät verbunden werden kann, welches nicht [USB](#) zur Datenübertragung bereitstellt.

1.2 Stand der Technik

Damit Fernsteuerungen von Quadrokoptern für das Training im Simulator an Computern verwendet werden können, gibt es zurzeit drei Möglichkeiten. Die erste Möglichkeit ist die Verbindung der Fernsteuerung von ausgewählten Herstellern mittels [USB](#). Dadurch wird die Fernsteuerung am Computer als [USB-HID-Joystick](#) erkannt [8]. Die zweite Möglichkeit ist den Quadrokopter, auf dem die Firmware Betaflight vorhanden ist, mittels [USB](#) anzustecken und diesen als Empfänger für die Fernsteuerung zu benutzen [10]. Da diese zwei Möglichkeiten jeweils [USB](#) zur Datenübertragung verwenden, sind diese Varianten nicht für alle Endgeräte geeignet. Die letzte Möglichkeit ist die Verwendung eines Hardwaremoduls an einer Fernsteuerung mit Erweiterungsmodulschacht. Die Datenübertragung erfolgt hier mittels Bluetooth. Das einzige bekannte Modul dieser Art stellt das Unternehmen Orqa her [11]. Dieses Modul ist jedoch nur für Modulschächte des Typs JR geeignet.

2 Aufgabenstellung

Ziel der Arbeit ist es, ein Hardware-Erweiterungsmodul für Multikopterfernsteuerungen zu entwickeln. Vorausgesetzt wird im Rahmen dieser Arbeit, dass die Fernsteuerungen einen Modulschacht aufweisen und die Firmware OpenTX [12] beziehungsweise eine Abspaltung davon verfügbar ist. Das Erweiterungsmodul soll sich dabei durch **BLE** als **HID**-Gerät an Endgeräten authentifizieren, wodurch die Multikopterfernsteuerung als kabelloser Joystick an Endgeräten verwendet werden kann. Die Umsetzung dieser Arbeit lässt sich in nachfolgende drei Teilbereiche aufteilen.

2.1 Softwareentwicklung

Im Aufgabenbereich der Softwareentwicklung soll die Kommunikation zwischen dem ESP32-Entwicklerboard und Windows, Linux, iOS/ iPadOS und Android-Systemen hergestellt werden. MacOS soll kein Teil der unterstützten Betriebssysteme sein, da kein Endgerät mit MacOS zum Testen vorhanden ist. Die Kommunikation soll dabei mittels **BLE** stattfinden und das Entwicklerboard soll sich als **HID**-Gerät authentifizieren. Des Weiteren soll die Kommunikation zwischen dem ESP32-Entwicklerboard und der Fernsteuerung mittels des Modulschachts der Fernsteuerung implementiert werden. Dafür soll auf eines der vorhandenen Protokolle der Fernsteuerung zurückgegriffen werden, damit die Firmware der Fernsteuerung nicht angepasst werden muss. Der letzte Bestandteil dieses Aufgabenbereichs ist die Implementierung weiterer Möglichkeiten der Eingabe und Ausgabe an dem ESP32-Entwicklerboard. Dafür soll zum einen ein 0,91 Zoll großes **OLED**-Display verwendet werden, um kurze Statusnachrichten anzuzeigen. Ebenso sollen Status-**LEDs** die Interaktion mit dem Modul vereinfachen. Die Bestimmung des Akkustandes der Fernsteuerung soll mittels des integrierten Analog-Digital-Wandlers (**ADCs**) des ESP32-Entwicklerboard geschehen, da der Akkustand bei **HID**-Geräten bereitgestellt werden muss.

2.2 Platinenentwurf

In diesem Aufgabenbereich soll der erstellte Steckbrettaufbau, der während der Softwareentwicklung benötigt wurde, in eine Platine umgewandelt werden. Ein Bestandteil dieser Platine soll das ESP32-Modul sein, welches als primärer Mikrocontroller fungiert. Ebenso soll eine Spannungsregulierung für die Komponenten der Platine erstellt werden, da die Elektronik über die Stromversorgung der Fernsteuerung betrieben werden soll. Ein weiterer Bestandteil der Platine ist die Verbindung der Ein- und Ausabeelemente mit dem ESP32-Modul, um die Bedienung des Erweiterungsmoduls zu vereinfachen. Zur Umsetzung soll auf bereits vorhandene Referenzdesigns des ESP32-Entwicklerboards zurückgegriffen werden.

2.3 Gehäuseerstellung

Im letzten Aufgabenbereich soll ein Gehäuse für die erstellte Platine hergestellt werden, damit die Platine in den Modulschacht vom Typ Lite fest verbaut werden kann. Ebenso muss bei der Konstruktion beachtet werden, dass das Gehäuse möglichst ohne Stützstrukturen mittels eines 3D-Druckers gedruckt werden kann. Dadurch soll die Nachbearbeitung des Gehäuses nach dem Druck auf ein Minimum reduziert werden.

3 Technische Grundlagen

3.1 Human Interface Device (HID)

3.1.1 Allgemein

Das **USB** Protokoll kann Geräte beim Starten beziehungsweise beim Einsticken an ein Computersystem automatisch konfigurieren. Dafür werden Geräte in Klassen eingeteilt. Jede Klasse definiert dabei wie das gewöhnliche Verhalten und die verwendeten Protokolle der Geräte der Klasse sind. Eine dieser Klassen in **USB** ist die **HID** Klasse. Der primäre Einsatzzweck für Geräte in der **HID** Klasse ist die Bedienung von Computern durch Menschen. Beispiele für solche Geräte sind: Tastaturen, Mäuse, Joysticks, Barcodeleser und auch Simulationsgeräte. [13, S. 1f.]

Informationen eines **USB**-Geräts für ein Computersystem werden in Segmente, auch Deskriptoren genannt, des ROMs des jeweiligen **USB**-Geräts abgespeichert. Ein Gerät, welches zur **HID**-Klasse gehört, hat wie in Abbildung 1 zu sehen ist, drei Deskriptoren. Zunächst einmal den **HID** Deskriptor, welcher alle weiteren benötigten Deskriptoren für **USB-HID**-Geräte auflistet. Der zweite optionale Deskriptor ist der physikalische Deskriptor, welcher nicht genauer in dieser Arbeit betrachtet wird. Er stellt Informationen an das System bereit, wie einzelne Teile des **HID**-Geräts von einem Menschen bedient werden sollen. Der letzte Deskriptor ist der Report Deskriptor. Mittels dieses Deskriptors wird die Struktur der übermittelten Daten zwischen dem Rechnersystem und dem **HID**-Gerät beschrieben. [13, S. 4f.]

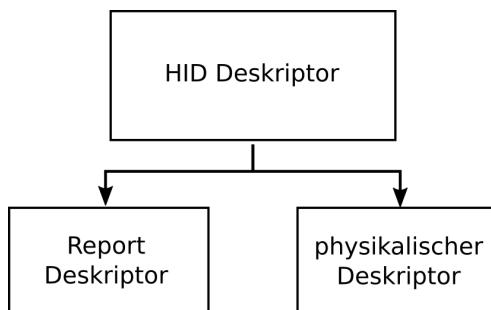


Abbildung 1: **HID** Deskriptorenhierarchie; abgewandelt von [13, S. 4]

3.1.2 Report Deskriptor

Das **USB**-Protokoll definiert meist in **USB**-Geräte-Klassen das zu verwendende Protokoll des Geräts durch Subklassen. Dies ist jedoch in der **USB-HID**-Klasse nicht der Fall. **USB-HID**-Geräte stellen nämlich durch den Report Deskriptor einem anderen System den Aufbau und die Datentypen der übermittelten Datenpakete bereit. [13, S. 8] Durch dieses Verfahren ist es möglich, dass Applikationen durch Lesen des Report Deskriptors die modular aufgebauten

Daten verarbeiten können [13, S. 24]. Die Länge des Deskriptors ist dabei für jedes Gerät variabel und hängt von der Menge der übermittelten Daten ab [13, S. 23].

Ein Report Deskriptor ist aus sogenannten Elementen aufgebaut. Ein Element stellt eine Teilinformation über ein **USB-HID**-Gerät dar. Jedes Element hat zu Beginn jeweils ein 1 Byte großes Präfix. In diesem Präfix befinden sich jeweils ein Element-Marker, ein Elementtyp und eine Elementengröße. Darauf folgend können optional Daten angefügt werden. Es kann dabei zwischen langen und kurzen Elementen unterschieden werden, wodurch die Größe zwischen 0 und 258 Byte groß sein kann. [13, S. 14]

Alle Elemente, die in einem Report Deskriptor enthalten sein müssen, sind in nachfolgender Aufzählung enthalten: Input (Output oder Feature), Usage, Usage_Page, Logical_Minimum, Logical_Maximum, Reprot_Size und Report Count. [13, S. 24]

Alle Elemente eines Report Deskriptors lassen sich in drei Gruppen einordnen. Zunächst gibt es die Hauptelemente. Diese werden verwendet, um Datenfelder zu definieren oder Datenfelder zu gruppieren. Die zweite Gruppe sind die globalen Elemente. Mit diesen werden die zu übermittelten Datenfelder beschrieben. Die letzte Gruppe umfasst die lokalen Elemente. Diese werden verwendet, um Merkmale eines Datenfelds zu beschreiben. [13, S. 16, S. 28, S. 35]

Die Einsatzzwecke der drei Gruppen stehen folgendermaßen in Beziehung. Mittels eines Hauptelements wird ein Datenfeld definiert. Durch globale und lokale Elemente werden erstellten Datenfeldern Definitionen hinzugefügt. Dabei gelten lokale Elemente nur für das nächst kommende Hauptelement. Globale Elemente gelten im Gegensatz dazu so lange, bis das globale Element durch ein anderes globales Element überschrieben wird. Dadurch ist es möglich Datenstrukturen wie in Abbildung 2 zu erstellen. [13, S. 24]

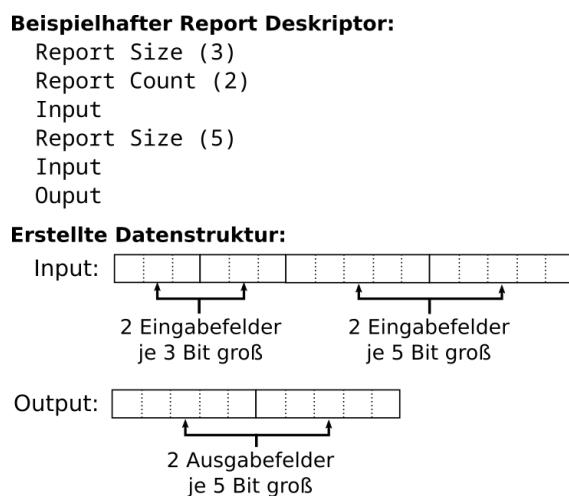


Abbildung 2: Beispielhafte Verwendung von Elementen, um eine Datenstruktur zu definieren; abgewandelt von [13, S. 24]

In der Gruppe der Hauptelemente gibt es fünf Element-Marker. Ein häufig verwendeter Marker ist der Input-Marker, mittels dessen Ausgabedatenfelder definiert werden können. Weitere wichtige Element-Marker für Hauptelemente sind Collection und End Collection, womit Datenfelder gruppiert werden können. [13, S. 23f., S. 30ff.]

In der Gruppe der globalen Elemente gibt es 13 Element-Marker. Wichtige Marker hierbei sind: Usage Page, Logical Minimum, Logical Maximum, Report ID, Report Size und Report Count. Mittels des Markers Report Size wird angegeben wie groß ein Datenfeld in Bits sein soll. Mit dem Marker Report Count wird angegeben wie viele Datenfelder mit den definierten Eigenschaften erstellt werden sollen. Mit dem Marker Report ID ist es möglich mehrere Datenstrukturen innerhalb eines Report Deskriptors zu erstellen und diese eindeutig zu identifizieren [13, S. 17]. [13, S. 35ff.]

Wichtige Element-Marker der Gruppe der lokalen Elemente, welche elf Element-Marker umfasst, sind: Usage, Usage Minimum und Usage Maximum [13, S. 40]. Durch den Element-Marker Usage wird der Einsatzzweck eines Datenfelds definiert. Ebenso können statt einzelnen Datenfeldern auch Kollektionen von Datenfeldern mit Einsatzzwecken markiert werden. Einsatzzwecke sind in Einsatzzweck-Seiten organisiert und werden mit dem Element-Marker Usage Page definiert. Beachtet werden sollte, dass ein Einsatzzweck so spezifisch wie nötig und so allgemein wie möglich gehalten werden sollte, damit das HID-Gerät alle gerätespezifischen Eigenschaften bereitstellen kann. [14, S. 15f.]

Schlussendlich können mittels Padding-Bits die enthaltenen Datenfelder byteorientiert ausgerichtet werden. In Tabelle 1 ist eine beispielhafte Datenstruktur für eine Maus mit dazugehörigen Report Deskriptor in Quellcode 1 zu sehen.

Tabelle 1: Datenstruktur einer Maus mit drei Knöpfen; abgewandelt von [15]

	Bit 7	Bit 6	Bit 5	Bit 4	Bit 3	Bit 2	Bit 1	Bit 0
Byte 0	unbenutzt	unbenutzt	unbenutzt	unbenutzt	unbenutzt	linke Taste	mittlere Taste	rechte Taste
Byte 1	relative X-Achsen Bewegung als signed Integer							
Byte 2	relative Y-Achsen Bewegung als signed Integer							

Quellcode 1: Report Deskriptor einer Maus mit 3 Knöpfen [15]

```

0x05, 0x01,      //USAGE_PAGE (Generic Desktop)
0x09, 0x02,      //USAGE (Mouse)
0xa1, 0x01,      //COLLECTION (Application)
0x09, 0x01,      //  USAGE (Pointer)
0xa1, 0x00,      //  COLLECTION (Physical)
0x05, 0x09,      //    USAGE_PAGE (Button)
0x19, 0x01,      //    USAGE_MINIMUM (Button 1)
0x29, 0x03,      //    USAGE_MAXIMUM (Button 3)
0x15, 0x00,      //    LOGICAL_MINIMUM (0)
0x25, 0x01,      //    LOGICAL_MAXIMUM (1)
0x95, 0x03,      //    REPORT_COUNT (3)
0x75, 0x01,      //    REPORT_SIZE (1)
0x81, 0x02,      //    INPUT (Data, Var, Abs)
0x95, 0x01,      //    REPORT_COUNT (1)
0x75, 0x05,      //    REPORT_SIZE (5)
0x81, 0x03,      //    INPUT (Cnst, Var, Abs)
0x05, 0x01,      //    USAGE_PAGE (Generic Desktop)
0x09, 0x30,      //    USAGE (X)
0x09, 0x31,      //    USAGE (Y)
0x15, 0x81,      //    LOGICAL_MINIMUM (-127)

```

```

0x25, 0x7f,      // LOGICAL_MAXIMUM (127)
0x75, 0x08,      // REPORT_SIZE (8)
0x95, 0x02,      // REPORT_COUNT (2)
0x81, 0x06,      // INPUT (Data, Var, Rel)
0xc0,            // END_COLLECTION
0xc0            //END_COLLECTION

```

3.2 Bluetooth

3.2.1 Allgemein

Bluetooth ist ein Kurzstreckenkommunikationssystem, bei welchem die Hauptmerkmale auf Robustheit, einen geringen Stromverbrauch und geringe Kosten gelegt wurde. Bluetooth wird in zwei Kategorien aufgeteilt. Die erste Kategorie ist Bluetooth Basic Rate (**BBR**). Die zweite Kategorie ist **BLE**. Beide Kategorien beinhalten dabei Mechanismen, um Bluetooth-Geräte zu entdecken, einen Verbindungsaufbau durchzuführen sowie eine Verbindung herzustellen. Das Augenmerk bei **BLE** Produkten liegt dabei auf einem niedrigen Stromverbrauch, was durch eine geringere Datenrate und eine geringere Einschaltzeit während des Datenaustauschs als bei **BBR** realisiert wird. Die Übertragungsrate bei **BLE** in der physikalischen Schicht beträgt 2 MB/s. Zu beachten ist, dass ein Bluetooth-Controller entweder **BLE**, **BBR** oder beide Bluetooth-Kategorien unterstützen kann. [16, S. 187]

Die Übertragungsfrequenz von **BLE** liegt im lizenzenfreien 2.4 GHz Industrial, Scientific and Medical (**ISM**)-Band von 2402 MHz bis 2489 MHz [17, S. 4], [16, S. 190]. Das Frequenzband ist in 40 physikalische Kanäle mit jeweils einer Bandbreite von 2 MHz aufgeteilt, wie in Abbildung 3 zu sehen ist [16, S. 190]. Drei dieser 40 physikalischen Kanäle sind für das sogenannte Advertising vorhanden [16, S. 190], welches für die Geräteentdeckung, den Verbindungsaufbau und für das Broadcasting von Nachrichten vorhanden ist [17, S. 4]. Die restlichen Kanäle sind für eine allgemeine Datenübertragung dar [16, S. 190]. Zusätzlich zu der Aufteilung des Frequenzbandes in Kanäle werden Kanäle in Zeiteinheiten aufgeteilt, welche Events genannt werden [16, S. 190]. Daten werden in Paketen innerhalb eines Events übertragen. Zusätzlich wird bei der Übertragung von Daten Frequenzhopping betrieben, welches zu Beginn jedes Events stattfindet [16, S. 190f.].

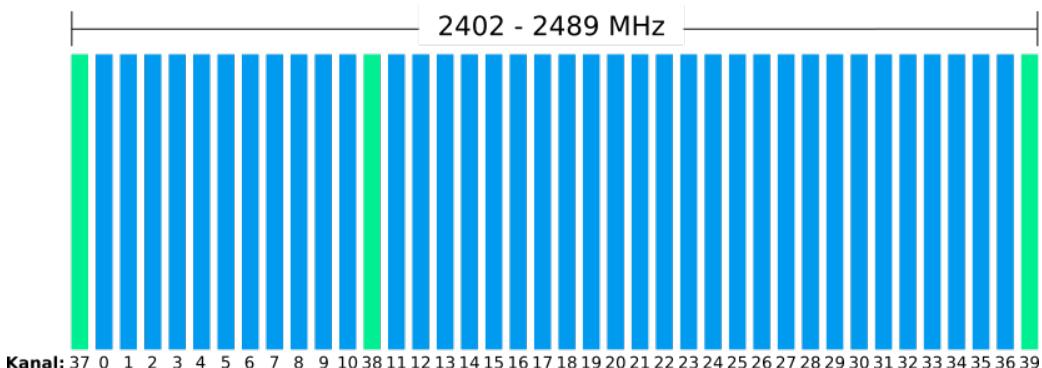


Abbildung 3: Frequenzband mit Kanälen von **BLE**; abgewandelt von [17, S. 4]

Die Kompatibilität zwischen Bluetooth-Geräten wird durch sogenannte Profile sichergestellt. Profile beschreiben Funktionen und Eigenschaften von jeder Schicht im Bluetoothsystem [16, S. 277]. Die benötigten Nachrichten und Prozeduren für die verwendeten Profile werden durch die Bluetooth Special Interest Group (**SIG**) spezifiziert [16, S. 1241].

Bluetooth-Geräten werden unterschiedliche Rollen zugewiesen welche entweder Observer, Broadcaster, Central oder Peripheral sein können. Ein Gerät mit der Rolle Broadcaster versendet Advertising-Pakete und ein Gerät, welches nur Advertising-Pakete empfangen kann, hat die Observer Rolle. So kann eine einseitige Kommunikation zwischen Geräten mittels Advertising-Paketen erfolgen. Eine andere Art der Kommunikation ist mittels einer Verbindung, bei dem das Initiatorgerät eine Verbindungsanfrage eines Broadcastergeräts annimmt. Daraufhin bekommt das Initiatorgerät die Rolle Central und das Gerät, welches ursprünglich in der Rolle Broadcaster war, die Rolle Peripheral. Anzumerken ist, dass ein Gerät zu jeder Zeit mehrere Rollen unterstützen kann, welche jedoch alle der Bluetooth-Controller unterstützen muss. [16, S. 190f., S. 278, S. 1246ff.]

3.2.2 Benötigte Komponenten eines **BLE**-Geräts

Ein **BLE**-Gerät benötigt einen Mindestumfang an Funktionen, damit es laut Bluetooth **SIG BLE** kompatibel ist. In Abbildung 4 sind die benötigten Funktionen und deren Zusammenspiel durch ein Schichtenmodell dargestellt. Die Funktionen können dabei in einen Hostteil und einen Controllerteil aufgeteilt werden. Im Hostteil befinden sich die Funktionen Logical Link Control and Adaption Protocol (**L2CAP**), Generic Access Profile (**GAP**), Attribute Protocol (**ATT**), Generic Attribute Profile (**GATT**), Service Discovery Protocol (**SDP**) und Security Manager Protocol (**SMP**). Im Controllerteil befinden sich die Funktionen Physical Layer (**PHY**) und Link Layer (**LL**). Die Kommunikation zwischen den Hostteil und dem Controllerteil findet mittels des Host Controller Interface (**HCI**) statt [16, S. 1735]. [16, S. 193]

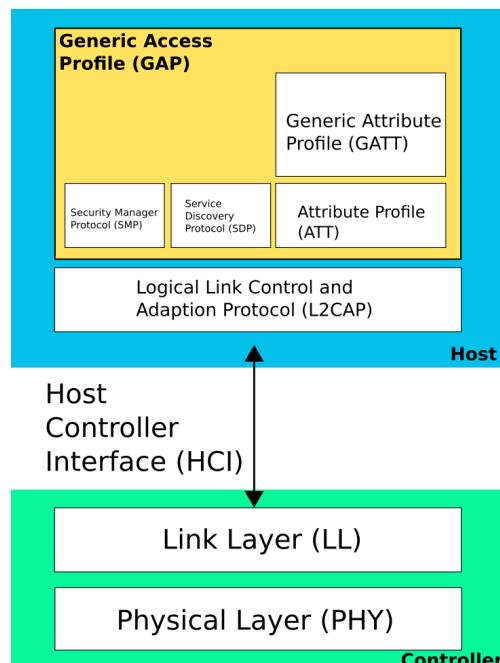


Abbildung 4: Benötigte Komponenten eines **BLE**-Geräts; abgewandelt von [16, S. 203, S. 1245]

In den nachfolgenden Unterkapiteln werden die wichtigsten Informationen jeder benötigten Funktion von **BLE** beschrieben.

Physical Layer (PHY)

Die physikalische Schicht in **BLE** ist zum Verschicken und Erhalten von Paketen über eines der physikalischen Funkkanäle verantwortlich. [16, S. 209]

Link Layer (LL)

Die Verbindungsschicht im **BLE**-System besteht aus mehreren Komponenten. Eine Komponente ist für die Erstellung, Modifizierung und das Freigeben von logischen Verbindungen zuständig. Eine weitere Komponente ist für das Kodieren und Dekodieren von Bluetooth Paketen zuständig. Es gibt eine weitere Komponente, welche für die Datenflusskontrolle, die Datenbestätigung und für die erneute Übertragung von Paketen zuständig ist. Die letzten Komponenten in der Verbindungsschicht sind für den Zugriff auf das Radiomedium zuständig. Dafür gibt es einen Scheduler, welcher Zeitschlüsse des physikalischen Mediums an die höherliegenden Dienste verteilt. [16, S. 207f.]

Host Controller Interface (HCI)

Das Host Controller Interface stellt die Möglichkeit bereit, dass der Hostteil die Funktionen des Controllerteils erreichen kann. Die Übertragung des **HCI** kann dabei wahlweise mittels **USB**, Universal Asynchronous Receiver Transmitter (**UART**) oder anderen Bussystemen stattfinden. [16, S. 1735f.]

Logical Link Control and Adaption Protocol (L2CAP)

Das Logical Link Control and Adaption Protocol ist die Schicht im **BLE**-Stack, welches eine kanalbasierte Abstraktion zu den Applikationen und Diensten der höheren Schichten bereitstellt. Diese Schicht kümmert sich zusätzlich um die Segmentierung, den Zusammenbau, das Multi- und Demultiplexing von Daten auf einer, beziehungsweise mehreren, logischen Verbindungen. [16, S. 195, S. 1013]

Logical Link Control and Adaption Protocol baut dabei auf dem Konzept von logischen Kanälen auf, wobei jeder Endpunkt eines logischen Kanals einen eindeutigen Kanalidentifizierer (**CID**) hat [16, S. 1021]. Die logischen Kanäle werden über logische Verbindungen der **LL**-Schicht übertragen [16, S. 1013].

Generic Access Profile (**GAP**)

Das Generic Access Profile beschreibt die Basisfunktionalitäten, welche ein **BLE**-Gerät benötigt [16, S. 207]. Dabei werden alle in diesem Kapitel vorgestellten Schichten als Mindestanforderung aufgelistet und alle benötigten Fähigkeiten, die eine **BLE**-Rolle enthalten muss [16, S. 277f., S. 1241].

Weitere wichtige Eigenschaften, die in **GAP** definiert sind, sind zum einen die Bluetooth-Geräteadressen. Die Geräteadresse wird verwendet, um ein Bluetooth-Gerät eindeutig zu identifizieren. Eine weitere Eigenschaft, welche in **GAP** definiert wird, ist der Gerätename. Dieser Name ist eine benutzerfreundliche Zeichenfolge die an entfernten Geräten angezeigt wird. Der Gerätename kann bis zu 248 Byte lang sein und sollte in UTF-8 kodiert sein. Es muss davon ausgegangen werden, dass ein Gerät nur die ersten 40 Zeichen auswerten kann. [16, S. 1251ff.]

Damit eine Verfolgung von Geräteadressen minimiert werden kann, gibt es in **BLE** zwei Arten von Geräteadressen. Zum einen eine sich verändernde öffentliche Adresse, welche an alle **BLE**-Geräte verschickt wird. Zum anderen gibt es sich nicht verändernde private Adressen, welche von Geräten, die schon einmal eine Verbindung mit einem bestimmten Gerät aufgebaut hatten, ausgerechnet werden können. Somit kann eine Überprüfung des Gegengeräts stattfindet. [17, S. 19]

Auch wird in **GAP** beschrieben, wie der Bluetooth-Pin für eine Authentifizierung zweier Geräte im Verbindungsmodus aufgebaut sein muss. Die Pin soll sechs Zeichen lang sein und aus Ziffern bestehen. [16, S. 1253]

Als letzten Bestandteil beschreibt **GAP** die verschiedenen Sicherheitsmodi, welche durch die verschiedenen **BLE**-Rollen implementiert sein müssen [16, S. 1337].

Service Discovery Protocol (**SDP**)

SDP ermöglicht es, die verfügbaren Dienste und die zugehörigen Merkmale eines Bluetooth-Geräts für entfernte Geräte sichtbar zu machen [16, S. 1173]. Dabei pflegt das Gerät eine Liste aller Dienste und Merkmale des Geräts [16, S. 1177].

Security Manager Protocol (**SMP**)

SMP definiert Methoden zum Verbindungsauflaufbau und zum Schlüsselaustausch zwischen Bluetooth-Geräten [16, S. 1554]. Die gerätespezifischen Schlüssel werden für die Identifizierung von Geräten und für den verschlüsselten Datenaustausch zwischen Geräten verwendet [16, S. 1556], [17, S. 18].

Der Verbindungsauflaufbau und der dazugehörige Schlüsselaustausch für die Identifizierung der Geräte erfolgt in 3 Phasen. In der ersten Phase wird ein Verbindungsauflaufbau angefragt. Die zweite Phase nach einer erfolgreichen Anfrage ist die Generierung eines Schlüssels mit einer kurzen oder langen Lebenszeit. In der letzten Phase wird der generierte Schlüssel an die Gegenstelle bereitgestellt. [16, S. 1556]

Zu beachten ist, dass es verschiedene Möglichkeiten gibt einen Verbindungsaufbau herzustellen, der abhängig von den Sicherheitsansprüchen der Anwendung definiert werden kann [17, S. 18].

Attribute Protocol (**ATT**)

ATT ist ein Teilnehmer-zu-Teilnehmer Protokoll zwischen zwei Geräten [16, S. 206]. **ATT** definiert dabei zwei Rollen, den Client und den Server [16, S. 1410]. **ATT** erlaubt es Geräten (Clients) kleine Werte (sogenannte Attribute [16, S. 279]), welche sich auf dem Gerät mit der Rolle Server befinden, zu lesen, zu schreiben und zu entdecken [16, S. 1409]. Ein Gerät kann sich simultan in der Rolle Server und Client befinden [16, S. 279].

Ein Attribut besteht jeweils aus drei Eigenschaften. Die erste Eigenschaft ist der Attribut-Typ, welcher durch einen universal unique identifier (**UUID**) definiert wird und in **SDP** definiert ist. Die zweite Eigenschaft ist der Attribut-Handle. Der Attribut-Handle ist ein einzigartiger, eindeutig definierter Identifikator für ein Attribut auf einem Gerät mit der Rolle Server. Die letzte Eigenschaft eines Attributs sind die Berechtigungen, welche durch eine höhere Schicht definiert werden müssen. [16, S. 1410ff.]

Attribut-Handles haben eine Länge von 16 Bit und können durch weitere spezielle Attribute gruppiert werden [16, S. 1412f.]. Die Entdeckung aller vorhandenen Attribute eines Servers durch einen Client erfolgt durch eine höhere Schicht des **BLE**-Stacks [16, S. 1410].

Die hinterlegten Werte eines Attributs bestehen aus einem Oktett-Array mit einer fixen oder variablen Länge [16, S. 1413].

Generic Attribute Profile (**GATT**)

GATT baut auf **ATT** auf und stellt ein Framework für die Daten, welche in **ATT** gespeichert werden, bereit. **GATT** definiert wie **ATT** zwei Rollen, den Server und den Client. Ebenso legt **GATT** das Format der Daten, welche auf dem **GATT**-Server gespeichert werden dürfen, in sogenannten Profilen fest. Attribute werden hierfür in Profile, Dienste und Merkmale untergliedert, wie in Abbildung 5 zu sehen ist. Ein Applikationsprofil besteht aus einen oder mehreren Diensten, um bestimmt definierte Use-Cases abzudecken und definiert darüber hinaus die benötigten Dienste, Merkmale und Attribute [16, S. 207]. Ein Dienst enthält eine Ansammlung von Merkmalen und kann andere Dienste inkludieren. Ein Merkmal enthält einen Wert sowie eine Menge von Deskriptoren. Durch diesen Aufbau kann ein Client die Daten eines bestimmten Profils auslesen, ohne davor den Aufbau der Attribute des Servers kennen zu müssen. [16, S. 280, S. 1480]

Anzumerken ist, dass jedes Attribut, welches in **ATT** vorhanden ist, entweder in einer Dienstdeklarierung oder in einer Dienstdefinition enthalten sein soll. [16, S. 1483]

Das **GATT**-Profil soll von anderen Profilen als Grundstruktur verwendet werden, damit eine reibungslose Kommunikation zwischen einem Client und Server sichergestellt werden kann, wie in Abbildung 6 zu sehen ist. [16, S. 1470]

Ein Dienst stellt unter **GATT** eine Ansammlung von Daten dar, um ein bestimmtes Verhalten des Servers zu erzielen. Ein Dienst kann zur Vereinfachung der Verhaltensdarstellung weitere

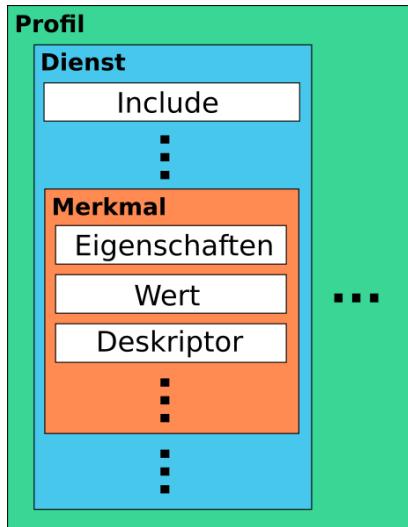


Abbildung 5: GATT Hierarchie; abgewandelt von [16, S. 281]

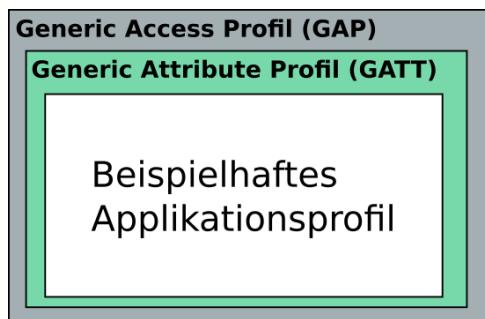


Abbildung 6: Hierarchische Verwendung von Profilen; abgewandelt von [16, S. 1468]

Dienste inkludieren. Dienste können in zwei Gruppen eingeteilt werden. Zunächst einmal in die primären Dienste. Primäre Dienste bieten alleinstehende Funktionalitäten an. Im Gegensatz dazu gibt es sekundäre Dienste, welche optionale Funktionalitäten enthalten und von mindestens einem primären Dienst inkludiert werden müssen. [16, S. 281]

Die Definition eines Dienstes umfasst die inkludierten Dienste sowie die benötigten und optionalen Merkmale [16, S. 1481].

Der Start eines Dienstes in der Liste der ATT-Attribute wird durch ein spezielles Attribut festgelegt, vom Attribut-Typ *primärer Dienst* oder *sekundärer Dienst*. Das Ende eines Dienstes wird durch eine Folgedeklaration eines neuen Dienstes festgelegt. [16, S. 1483]

Merkmale sind Werte eines Dienstes, welche aus mehreren ATT-Attributen besteht. Ein Merkmal besteht aus drei Komponenten. Der Deklaration, den Eigenschaften des Merkmals und dem dazugehörigen Wert. Zusätzlich können noch Deskriptoren in einem Merkmal enthalten sein, um die Berechtigungen des Merkmals zu setzen. [16, S. 281]

Der Start eines Merkmals in der Liste der ATT-Attribute wird durch ein spezielles Attribut festgelegt, vom Attribut-Typ *Merkmal* enthält. Das Ende eines Merkmals stellt eine neue Merkmaldeklaration oder eine neue Dienstdeklaration dar. [16, S. 1484ff.]

3.2.3 Sollanforderungen durch Apple

Im Apple Ökosystem muss Zubehör, welches Made for iPod/iPhone/iPad (**MF**i) lizenzierte Technologie zur Verbindung zu Apple Geräte verwendet, beispielsweise **MF**i Game Controller, von Apple geprüft werden. Eine Ausnahme stellen dabei **BLE**-Geräte dar. [18] Diese Geräte müssen einige Sollanforderungen in Bezug auf **BLE** erfüllen. Eine Anforderung ist, dass alle drei Advertising-Kanäle bei jedem Advertising-Event verwendet werden sollen [19, S. 186]. Dabei muss ein Advertising-Paket mindestens folgende Daten enthalten: TX Power Level, lokaler Name (ohne : und ;), Flags und den Identifikator des primären Dienstes des Geräts [19, S. 186f.]. Eine weitere Anforderung ist, dass die Advertising-Intervalle zunächst 20 ms für die ersten 30 Sekunden lang sind und danach auf andere Intervalle umgeschalten werden sollen, welche in der Tabelle [19, S. 187] stehen. Des Weiteren dürfen keine speziellen Berechtigungen benötigt werden, um Dienste und Merkmale eines Gerätes zu entdecken [19, S. 190]. Auch soll auf den **BLE**-Geräten der Geräteinformationsdienst implementiert sein, damit der Herstellername, die Modellnummer, die Firmwareversion und die Softwareversion ausgelesen werden können [19, S. 191]. Ebenso sollte Zubehör im **GATT**-Profil das Merkmal *Gerätename* implementiert haben und durch Apple-Geräte beschreibbar sein [19, S. 190]. Als weitere Anforderung ist zu nennen, dass die Datenpacketlängenerweiterung vorhanden sein sollte, damit der Datenteil eines Pakets statt 27 Byte 251 Byte lang sein kann [19, S. 189]. Die letzte Anforderung ist die Fähigkeit von **BLE**-Geräte private Gerätadressen auflösen zu können.[19, S. 189].

Apple-Geräte geben nicht alle **BLE**-Dienste an Drittanbieter-Apps weiter, sondern verarbeiten diese intern und geben daraufhin die verarbeiteten Daten an die Drittanbieter-Apps weiter. Die heraus gefilterten Dienste sind: **GAP**, **GATT** sowie **BLE HID**. [19, S. 192]

3.2.4 **HID over GATT Profile (HOGP)**

In diesem Abschnitt der Arbeit wird nur auf die Anforderungen eines **HID**-Geräts (Bereitstellung eines **GATT**-Servers [20, S. 9]) und nicht eines **HID**-Hosts (Bereitstellung eines **GATT**-Clients [20, S. 9]) eingegangen, da eine Implementierung des **HID**-Hosts in diesem Projekt nicht benötigt wird.

Mittels des **HOGPs** werden Prozeduren und Fähigkeiten definiert, welche ein **BLE-HID** fähiges Gerät benötigt, um als **HID**-Gerät von **HID**-Hosts wahrgenommen zu werden. Das Profil baut dabei auf der **USB HID** Spezifikation auf. [20, S. 9]

Das **HID over GATT Profile (HOGP)** benötigt weitere Profile und Dienste, welche auf einem **HID**-Gerät implementiert sein müssen. Dazu zählen das **GATT**, der Batteriedienst, der Geräteinformationsdienst, das Scan Parameters Profil und der **HID** Dienst. Dabei ist zu beachten, dass auf einem **HID**-Gerät ein oder mehrere Instanzen des **HID**-Dienstes und des Batteriedienstes, sowie nur eine Instanz des Geräteinformationsdienstes und optional eine Instanz des Scan Parameters Dienstes vorhanden sein darf. [20, S. 9, S. 11] In Abbildung 7 sind alle benötigten und optionalen Dienste grafisch dargestellt. Optionale Dienste werden dabei durch eine gestrichelte Linie angedeutet.

Im **HID over GATT Profile** werden für alle benötigten Dienste und Profile zusätzliche Bedingungen festgelegt, welche in den folgenden Unterkapiteln bei dem jeweiligen Dienst beziehungsweise Profil dargestellt sind.

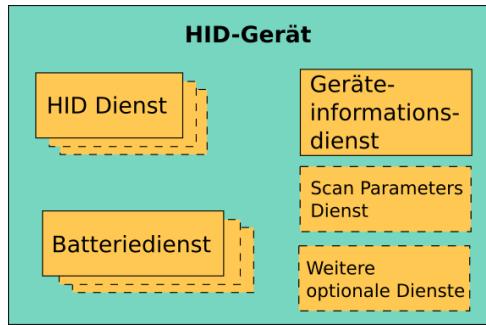


Abbildung 7: Benötigte Dienste eines HID-Geräts; abgewandelt von [20, S. 11]

HID-Dienst

Der **HID-Dienst** ist auf HID-Geräten zuständig für die Bereitstellung aller benötigten Daten für einen **HID-Host**. Dabei ist zu beachten, dass alle gespeicherten Merkmale des **GATT-Servers** mit dem niederwertigsten Oktett zuerst übertragen werden müssen. Der Dienst für den standardkonformen Betrieb muss zudem mindestens die Merkmale *Report Map*, *HID Information* und *HID Control Point* implementieren. [21, S. 8ff.]

Report Merkmal

Das Merkmal *Report* ist optional – jedoch ist es ein wichtiges Merkmal, da der Datentransfer zwischen HID-Gerät und HID-Host hauptsächlich über dieses Merkmal stattfindet. Das Merkmal *Report* kann dabei einen von drei Typen annehmen, nämlich Eingabe, Ausgabe oder Feature. Diese Typen finden sich ebenso in der **USB HID** Spezifikation wieder. [21, S. 11f.]

Da ein HID-Gerät mehrere Reports haben kann, muss für jeden Report ein eigenes Merkmal erstellt werden. Zur Unterscheidung der verschiedenen Reports muss jeweils ein Referenz-Merkmalsdeskriptor hinzugefügt werden, welcher eine eindeutige Report-ID und den Report-Typen enthält. Als zusätzliche Bedingung muss in allen Report-Merkmalen vom Typ Eingabe ein Konfigurationsdeskriptor vorhanden sein. Mittels dieses Deskriptors kann konfiguriert werden, ob bei Änderung des Merkmalswerts der HID-Host informiert werden soll oder nicht. Der Konfigurationsdeskriptor ist dabei verpflichtend hinzuzufügen. [21, S. 14.f]

Report Map Merkmal

Im Merkmal *Report Map* wird der **USB Report** Deskriptor abgespeichert (wie in der **USB HID** Spezifikation definiert [20, S. 21]), welcher den Aufbau und die Formatierung der einzelnen Report-Merkmale enthält [21, S. 11]. Pro HID-Dienst darf jeweils nur eine Instanz dieses Merkmals vorhanden sein und die maximale Größe ist auf 512 Oktette beschränkt [21, S. 16]. Mittels des zusätzlich benötigten *Report Referenz*-Merkmalsdeskriptors ist es den HID-Hosts möglich, die Informationen des *Report Map* Merkmals mit den *Report* Merkmalen zu verknüpfen [21, S. 17].

HID Information Merkmal

Dieses Merkmal enthält eine Ansammlung von Informationen, welche **HID** spezifische Werte sind. Zwei beispielhafte Werte ist zum einen der Wert *bcdHID*. Dieser wird verwendet, um

den **HID**-Host anzuzeigen, welche **USB**-Spezifikation im **HID**-Gerät implementiert wurde. Zum anderen gibt es den Wert *bCountryCode*. Mit diesem Wert wird angegeben, für welches Land das **HID**-Gerät entwickelt wurde. Da Geräte meist nicht für ein spezielles Land entwickelt werden, steht dieser Wert häufig auf 0x00. Das **HID Information** Merkmal darf pro **HID** Dienst nur einmal vorkommen und die Daten müssen statisch sein. [21, S. 20f.]

HID Control Point Merkmal

Dieses Merkmal wird von **HID**-Hosts verwendet, um dem **HID**-Gerät anzuzeigen, dass sich der **HID**-Host in den Schlafmodus oder in den normalen Betrieb versetzt. Dieses Merkmal darf nur einmal pro **HID** Dienst vorkommen. [20, S. 23], [21, S. 21]

Zusätzliche Bedingungen durch das HID over GATT Profile

Alle Merkmale, die in dem *Report Map* Merkmal beschrieben sind und nicht im **HID** Dienst enthalten sind, sollen mittels eines *Includes* in der **HID** Dienst Definition referenziert werden. Zusätzlich müssen alle referenzierten Merkmale den *Report Referenz* Merkmaldeskriptor enthalten. Alle **HID**-Dienste müssen als primärer Dienst initialisiert werden und während der Entdeckungsphase für einen Verbindungsaufbau als möglicher Dienst angegeben werden. [20, S. 13f.]

Batteriedienst

Mittels dieses Diensts wird dem **GATT**-Host der aktuelle Batteriestatus einer oder mehrerer Batterien des **GATT**-Servers bereitgestellt. Dabei gilt es zu beachten, dass alle bereitgestellten Merkmale des **GATT**-Servers mit dem niederwertigsten Oktett zuerst übertragen werden. [22, S. 6]

Für diesen Dienst muss ein Merkmal mit dem Namen *Battery Level* implementiert werden. Der Batteriestand wird dabei als ein Prozentwert zwischen 0 und 100 angegeben. Wobei 100 % einer voll aufgeladenen Batterie entspricht. Zusätzlich kann das Merkmal so eingerichtet werden, dass der **GATT**-Server den **GATT**-Client informiert, sobald sich der Wert geändert hat. [22, S. 8]

Zusätzliche Bedingungen durch das HID over GATT Profile

Es muss mindestens ein Batteriedienst als primärer Dienst auf dem **HID**-Gerät laufen. Falls ein Batteriestandsmerkmal Bestandteil des *Report Map* Merkmals ist, muss der Dienst mittels eines *Include* in der **HID** Dienst Definition referenziert werden. [20, S. 14]

Geräteinformationsdienst

Dieser Dienst stellt einem **GATT**-Client Informationen über den Hersteller und Anbieter des **GATT**-Servers bereit. Dabei darf jedes verfügbare Merkmal nur einmalig pro Dienst vorkommen. Zu beachten ist, dass alle Merkmale optional sind. [23, S. 6ff.]. In Tabelle 2 sind alle vorhandenen Merkmale mit einer kurzen Beschreibung aufgelistet.

Tabelle 2: Liste der verfügbaren Geräteinformationsmerkmale

Merkmalname	Kurzbeschreibung
Herstellername	Enthält den Namen des Herstellers [23, S. 8]
Modellnummer	Enthält die Modellnummer des Geräteanbieters [23, S. 8]
Seriennummer	Enthält die Seriennummer des Geräts [23, S. 8]
Hardwareversion	Enthält die Hardwareversion [23, S. 9]
Firmwareversion	Enthält die Firmwareversion [23, S. 9]
Softwareversion	Enthält die Softwareversion [23, S. 9]
System-ID	Enthält eine Kombination aus organisatorischer UID und Hersteller definierte ID. Diese ID ist eindeutig für jedes Gerät eines Produkts. [23, S. 9]
IEEE 11073-20601 Regulatory Certification Data Liste	Enthält eine Liste aller Regulations- und Zertifizierungsfromationen des Produkts [23, S. 9]
PNP-ID	Enthält eine eindeutige Geräte-ID. Diese besteht aus der Anbieter-ID-Quelle (Angabe, ob die Anbieter-ID durch Bluetooth SIG oder USB Implementer's Forum festgelegt wurde), der Anbieter-ID, der Produkt-ID (von Anbieter festgelegt) und einer Produktversion. Die Produktversion wird als binär-kodierte Dezimalzahl dargestellt. Zum Beispiel Version 2.13 = 0x0213 [23, S. 10f.]

Zusätzliche Bedingungen durch das **HID over GATT Profile**

Der Dienst muss als primärer Dienst gestartet werden und muss das *PNP-ID* Merkmal enthalten. [20, S. 14f.]

Scan Parameters Profil

Mittels dieses optionalen Profils beziehungsweise Diensts stellt ein **GATT**-Server einem **GATT**-Client Informationen zur Verfügung, die die Geräte unterstützen bei der Verwaltung von Verbindungszeitüberschreitungen und den Advertising-Paketen. Durch diese Informationen kann der Stromverbrauch sowie die Wiederverbindungslatenz optimiert werden. [24, S. 6]

3.2.5 Bluetooth-Stacks

Damit die Verwendung von Bluetooth auf dem verwendeten Mikrocontroller einfacher ist, bietet das Espressif IoT Development Framework (**ESP-IDF**) zwei Bluetooth-Stacks an. Zum einen den Stack Bluedroid, welcher **BBR** und **BLE** unterstützt. Zum anderen wird der Stack NimBLE bereitgestellt, welcher nur **BLE** unterstützt. [25]

Bluedroid ist ein von Broadcom Corporation bis 2012 entwickelter Bluetooth-Stack, welcher unter der Apache Lizenz steht [26]. Dieser Bluetooth-Stack wird von Google seit der Android Version 4.2 als Bluetooth Stack verwendet [27]. Heutzutage wird dieser Bluetooth-Stack weiterhin unter Android verwendet, mit dem Namen Fluoride [28], [29].

Apache NimBLE ist ein Open Source BLE-Stack, welcher vollständig mit der Bluetooth 5 Spezifikation konform ist [30] und Bestandteil des Apache Mynewt project ist [31].

3.3 Übertragungsprotokolle am Fernbedienungsmodulschacht

Die Multikopter-Fernsteuerungssoftware OpenTX bietet eine Vielzahl von verschiedenen Übertragungsmöglichkeiten zwischen der Fernsteuerung und den Modulen im Modulschacht. Die unterstützten Übertragungsmöglichkeiten sind hierbei: PPM, ACCST(D12, D8, LR12)[32], DSM, MULTI, ein Protokoll für R9M-Erweiterungsmodul [33] und SBUS. [34]

Zu beachten bei der Übertragung mittels des PPM-Ausgabepins am Modulschacht ist, dass dieser mittels der Batteriespannung der Fernbedienung betrieben wird, worüber auch das SBUS-Protokoll übertragen wird. Dadurch sollte ein Modul nur betrieben werden, wenn ein Spannungsteiler oder ein Pegelumsetzer vorhanden ist. [35]

Für die vorhandenen Übertragungsprotokolle ACCST, DSM und für das Protokoll der R9M-Erweiterungsmodul konnte keine Dokumentation gefunden werden, weshalb im folgenden Unterabschnitten nur die Übertragungsprotokolle PPM, CRSF, SBUS und MULTI betrachtet werden.

3.3.1 Puls-Positions-Modulation (PPM)

PPM ist ein Modulationsverfahren, womit Daten – auch Kanäle genannt – als Zeitdauer zwischen zwei steigenden Flanken zweier Impulse dargestellt werden - zu sehen in Abbildung 8. Ein Paket besteht dabei aus $n+1$ Impulsen, wobei n die Anzahl an Kanälen ist. Nach jedem Paket erfolgt eine Pause von 12 ms, damit eine Synchronisation zwischen Sender und Empfänger gegeben ist. Die Anzahl an Kanälen im Modellbau ist bei PPM auf acht Kanäle beschränkt. [36]

Die Gesamtlänge eines Pakets beträgt 22,5 ms mit inkludierter Pause. Die Pulse haben dabei eine Länge zwischen 0,7 ms bis 1,7 ms. [37]

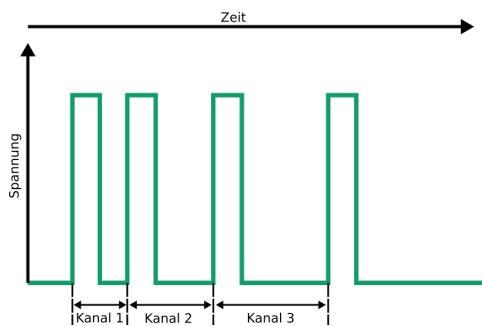


Abbildung 8: Darstellung einzelner Kanäle im Zeitverlauf bei PPM; abgewandelt von [36]

3.3.2 CSRF

Das CSRF-Protokoll verwendet eine Eindrahtleitung für eine halbduplex [UART](#)-Verbindung. Über diese Verbindung sendet der Master alle 6 ms ein Paket. Zwischen den Paketen des Masters kann der Slave den Master optional antworten. Optional zu Beginn eines Pakets gibt es ein Synchronisationsbyte mit den Daten 0xC8. [38], [39]

Die Symbolrate beträgt 420000 Baud bei einer 8N1 Übertragung, womit die Übertragungsrate 46 KByte/s entspricht. Die Übertragung findet invertiert statt (hohes Spannungsniveau = logisch niedrig [40]) und Daten werden im Big Endian-Format übertragen. [38]

Ein Paket hat eine maximale Größe von 64 Byte und besteht aus fünf Teilen, welche in Tabelle 3 zu sehen sind. [38]

Tabelle 3: Aufbau eines CSRF-Pakets [38]

Feld-Index	Feldtyp	Größe in Byte
0	Geräteadresse	1
1	Paketlänge	1
2	Typenfeld	1
3-62	Daten	maximal 60
63	Cyclic redundancy check (CRC)-Feld	1

Die Geräteadressen sind im CSRF-Protokoll vordefiniert. Ein Ausschnitt davon ist in Tabelle 4 zu sehen.

Tabelle 4: Ausschnitt aus den vorhandenen CSRF-Geräteadressen [39]

Empfängergerät	Adresse
CRSF Fernsteuerung	0xAE
CRSF Empfänger	0xCE
CRSF Sender	0xEE
CRSF Multikopterplatine	0x8C

Im Paketlängenfeld wird die Größe des Pakets in Byte angegeben, wobei das Typenfeld, das Datenfeld und das [CRC](#)-Feld in die Größe des Pakets mit einfließen. [38]

Im CSRF-Protokoll werden ebenso wie die Adressen, die Typen fest definiert. Ein Ausschnitt möglicher Typen ist in Tabelle 5 zu finden.

Tabelle 5: Vordefinierte CSRF Datentypen [39]

Datentyp	Typenwert
Batteriesensor	0x08
Verbindungsstatistiken	0x14
Kanaldaten	0x16

Multikopterflugmodus	0x21
----------------------	------

Der Datenteil eines Kanaldatenpakets wird in 16 Kanäle aufgeteilt. Jeder Kanal ist dabei 11 Bit groß. Der Wertebereich pro Kanal liegt zwischen 172 und 1811. [38]

Die [CRC](#)-Bildung erfolgt über das Typenfeld und das Datenfeld eines Pakets [38]. Das Generatorkoeffizientenpolynom lautet dafür: 0xD5 [41]

3.3.3 SBUS

Das SBUS-Protokoll ist ein invertiertes serielles Protokoll, welches über eine Leitung mit einer Symbolrate von 100000 Baud übertragen wird. Die Daten werden dabei im 8E2-Format übertragen. Die Länge eines SBUS-Pakets beträgt 25 Byte, mit welchem 18 Kanäle übertragen werden. [42]

Das Intervall zum Versenden von SBUS-Paketen kann in OpenTX zwischen 6 ms und 40 ms frei eingestellt werden. Der Aufbau eines Pakets ist in Tabelle 6 zu sehen.

Tabelle 6: Paketaufbau von SBUS [42]

Byte	Verwendungszweck
0	Kopf des Pakets. Immer 0x0F
1 - 22	16 Kanäle mit jeweils einer Größe von 11 Bit
23 Bit 0	Digitaler ein/aus Kanal 17
23 Bit 1	Digitaler ein/aus Kanal 18
23 Bit 2	Paketverlustanzeige. Anzeige, wenn ein Paket zwischen Sender und Empfänger verloren geht.
23 Bit 3	Paketausfallanzeige. Anzeige, wenn mehrere hintereinander verschickte Pakete zwischen Sender und Empfänger verloren gehen.
24	Paketfluss. Immer 0x00 [40]

Für die Synchronisation zwischen Sender und Empfänger gibt es Lücken innerhalb eines Pakets [40]. Ebenso gibt es eine weitere Version von SBUS, welche den Namen *Fast SBUS* hat und Daten mit einer Symbolrate von 200000 Baud überträgt [42]. Der Wertebereich der Kanäle 1 bis 16 liegt zwischen 172 und 1811 und kann auf den Wertebereich von 0 bis 2047 erweitert werden, um die vollen 11 Bit auszunutzen [42].

3.3.4 MULTI

Das MULTI-Protokoll wird für die Kommunikation zwischen einer Fernsteuerung, auf der OpenTX läuft, und einem 2,4 GHz Erweiterungsmodul verwendet. Mittels dieses Protokolls wird zum einen das Erweiterungsmodul konfiguriert und zum anderen werden die Daten der 16 zu übertragenden Kanäle an das Erweiterungsmodul geschickt. [43], [44]

Die Übertragung findet dabei seriell mittels des 8E2-Formats statt und mit einer Symbolrate von 100000 Baud. In Version 1 ist die Länge eines Pakets 26 Byte. In Version 2 ist die Länge eines Pakets zwischen 27 und 36 Byte groß. [44]. In Tabelle 7 ist der Aufbau eines MULTI-Pakets dargestellt.

Tabelle 7: Paketaufbau von MULTI [44]

Byte	Verwendungszweck
0	Paketkopf mit der Angabe welche Art von Daten übermittelt werden.
1	Das zu verwendende Protokoll, welches das Erweiterungsmodul zum Versenden der Daten verwenden soll.
2	Informationen über den Verbindungszustand zwischen dem Erweiterungsmodul und einem Empfänger sowie das zu verwendende Subprotokoll.
3	Optionale Protokollauswahl, welche nicht vordefiniert ist.
4 - 25	Daten der Kanäle oder die Daten, welche bei einem Paketausfall versendet werden.
26	Weitere Protokollinformationen und Telemetriedaten.
27 - 35	Weitere Möglichkeiten zur Protokolldefinition.

3.4 Mikrocontrollerfamilie ESP32 und Zertifizierungen

Die Mikrocontrollerfamilie ESP32 wird von Espressif Systems entwickelt und ist in mehreren Bauformen erhältlich. Entweder kann die ESP32-Familie als Chip, Platinenmodul oder Entwicklungsplatine erworben werden [45], [46], [47]. Als Besonderheit unterstützt dieser Mikrocontroller 2,4 GHz WLAN und Bluetooth sowie in einigen Modellen eine Zweikern-CPU [48], [49, S. 8], [49, S. 24]. Die Kerne des Mikrocontrollers basieren dabei auf den Xtensa 32-Bit LX6 Kernen – mit Harvard Architektur – und haben eine maximale Frequenz von 240 MHz [48], [49, S. 9], [49, S. 8], [49, S. 24]. Der ESP32 verfügt neben der Funkkommunikationseinheit über weitere Hardwarekomponenten. Beispielweise über eine Fließkommaeinheit, einen 12-Bit successive approximation (SAR) ADC, einige programmierbare general purpose input/outputs (GPIOs) mit konfigurierbaren Pull-Up- und Pull-Down-Widerständen sowie über mehrere weitere kabelgebundene Kommunikationseinheiten [49, S. 10f.], [49, S. 23], [49, S. 34]. Zusätzlich sind viele Platinenmodule von Espressif Systems nach der Federal Communications Commission (FCC) [50] und conformité européenne (CE) regulatorisch zertifiziert [51]. Die Entwicklung des ESP32 Mikrocontrollers kann durch viele verschiedene integrated development environments (IDEs) erfolgen, wobei alle auf dem Entwicklungsframeworks ESP-IDF aufbauen [48], [52].

Die FCC gibt verpflichtende Richtlinien für elektronische Geräte in den Vereinigten Staaten von Amerika heraus, um die Interferenzen zwischen elektronischen Geräten zu minimieren und die Geräte für den Endnutzer sicher zu gestalten. Falls auf einem Endprodukt das FCC-Zeichen vorhanden ist, ist dieses Produkt nach FCC-Vorgaben konform. [50]

Ebenso gibt es für die Europäische Union Richtlinien, welche für Endkundenfunkgeräte gelten [53], [54]. Diese Regularien sind in der Radio Equipment Directive (RED) festgeschrieben und können durch Hersteller des Produktes selbständig überprüft werden und ermächtigt den

Hersteller nach erfolgreichen Prüfungen zur Anbringung des CE-Zeichens [55, S. 14]. Die CE-Zertifizierung ist dabei nur für die alleinstehenden ESP32 Platinenmodule gültig und muss im eingebauten Zustand erneut zertifiziert werden [56].

3.5 FreeRTOS

FreeRTOS ist ein von der Real Time Engineers Ltd. entwickelter Echtzeitkernel für die parallele Ausführung von mehreren Threads (in FreeRTOS Tasks genannt), welcher unter der MIT-Lizenz publiziert wird [57, S. 2], [58], [59]. Der Kernel enthält einen Echtzeitscheduler, Komponenten für die Inter-Task-Kommunikation, Primitive für die zeitliche Koordination und Komponenten zur Synchronisation von Threads [58]. Eine Besonderheit des Kernels ist die geringe Speichergröße, welche normalerweise zwischen 6 KB und 12 KB liegt und in der Grundausführung aus 3 Dateien besteht [60], [61]. Erweiterungen des Kernels können nach Bedarf nachgeladen werden [61].

3.5.1 Tasks

Für das Scheduling von Tasks verwendet FreeRTOS ein preemptives Scheduling mit fixen Prioritäten. Falls mehrere Tasks dieselbe Priorität haben, wird Round-Robin Time-Slicing verwendet. Beim Time-Slicing wechselt der Scheduler bei jedem Tick-Interrupt zwischen den Tasks mit derselben Priorität. Ein Nachteil des Schedulingverfahrens ist, dass Tasks mit einer niedrigen Priorität verhungern können und der Programmierer während der Programmierung der Software darauf Acht geben muss. [62], [63]

Im FreeRTOS-Kernel werden Zeiten in Ticks gemessen. Dafür zählt ein Timer-Interrupt – auch Tick-Interrupt genannt – den sogenannten Tickzähler hoch, weshalb die Kernel-Zeitauflösung abhängig vom Interruptintervall des Tickzählers ist. Nach jedem Tick – auch TimeSlice genannt – überprüft der Kernel, ob ein Task in den blockierenden Zustand gesetzt oder aufgeweckt werden soll und entscheidet darauffolgend, welcher Task als Nächstes ausgeführt werden soll. [57, S. 61], [64]

Tasks müssen normalerweise während der gesamten Laufzeit des Mikrocontrollers laufen. Dies wird durch die Verwendung einer Endlosschleife, wie im Quellcode 2 zu sehen ist, umgesetzt. Vor der Endlosschleife werden alle benötigten Variablen deklariert. Nach der Endlosschleife wird als Sicherheitsmaßnahme der Task aus dem RAM gelöscht, damit keine Rückstände des Tasks im RAM bleiben. [57, S. 46]

Quellcode 2: Minimaler Aufbau eines Tasks; angepasst von [57, S. 47]

```
void ATTaskFunction (void *Parameters)
{
    /* Block fuer die Deklaration von Variablen und einmalig
       auzufuehrenden Code */
    for(;;)
    {
        /* Code der endlos ausgefuehrt werden soll */
    }
}
```

```

    /* Speicher leeren in Ausnahmefaellen */
    vTaskDelete(NULL);
}

```

Wie in Abbildung 9 zu sehen ist, gibt es vier Taskzustände. Ein Task befindet sich im Running-Zustand, wenn der Task ausgeführt wird. Die restlichen drei Zustände werden unter dem sogenannten Not-Running-Zustand zusammengefasst. Dieser Zustand tritt auf, sobald ein Task nicht für das Scheduling vorhanden ist (Suspended-Zustand), der Task auf ein Event wartet (Blocked-Zustand) oder ein Task auf die Ausführung wartet (Ready-Zustand). [57, S. 55], [57, S. 65f.]

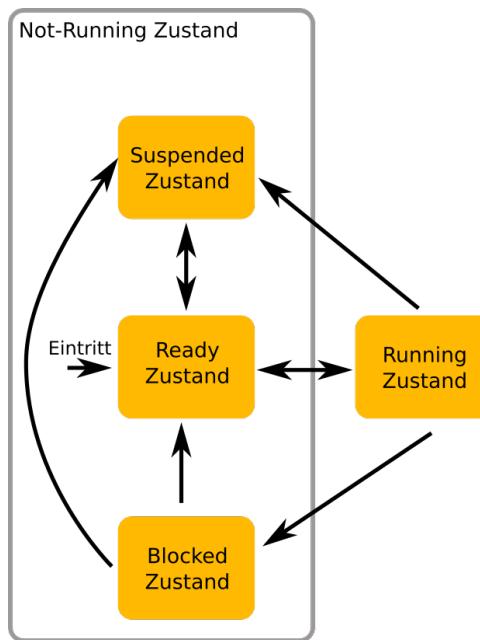


Abbildung 9: Taskzustände und deren Übergänge; angepasst von [57, S. 67]

Der sogenannte Idle-Task ist ein spezieller Task, welcher in FreeRTOS verwendet wird, wenn es keinen Task im Running-Zustand gibt, da in FreeRTOS immer ein Task im Running-Zustand sein muss. Der Idle-Task hat die niedrigst mögliche Priorität, damit der Task von allen anderen Tasks verdrängt werden kann. [57, S. 76]

3.5.2 Software Timer

Mittels Software Timern können Softwarefunktionen zu einem bestimmten Zeitpunkt in der Zukunft (one-shot Timer) oder in periodischen Intervallen (auto-reload Timer) ausgeführt werden. Ausgeführte Funktionen der Software Timer können nicht in den blockierenden Zustand wechseln und das System blockieren, bis die Funktion vollständig durchlaufen ist. [57, S. 149], [57, S. 151], [65]

3.5.3 Queues

Die primäre Form für die Inter-Task-Kommunikation in FreeRTOS findet mittels Queues statt. Queues können eine vordefinierte Anzahl an Elementen mit fixer Größe speichern. Die Größe eines Elements und die maximale Anzahl an Elementen in einer Queue müssen bereits während der Erstellung der Queue durch den Kernel vorgegeben werden. Die Kommunikation mittels Queues kann dabei zwischen Tasks oder zwischen Tasks und Interrupts erfolgen und ist nicht auf eine vordefinierte Anzahl an Teilnehmern begrenzt. Queues werden meist als First In First Out ([FIFO](#)) Buffer verwendet, es können jedoch auch Elemente am Start des Buffers angehängt werden. Elemente werden in einer Queue nicht als eine Referenz gespeichert, sondern das Element wird vollständig kopiert. [57, S. 104ff.], [66]

3.5.4 Interrupts

FreeRTOS unterstützt die Verwendung von Interrupts mit einer Einschränkung. Es dürfen nämlich nur FreeRTOS Funktionen in der Interrupt-Routine verwendet werden, welche die Endung *FromISR* haben. Auch müssen die Interrupt-Routinen zeitlich so kurz wie möglich gehalten werden, damit das Scheduling der Tasks weiter ausgeführt werden kann. Um eine möglichst kurze Ausführungszeit zu erreichen, kann das Verfahren *aufgeschobene Interrupts* verwendet werden. Dabei werden nur die benötigten Daten durch den Interrupt gesammelt und an einen Task weitergeleitet, welcher die Daten auswertet. [57, S. 185], [57, S. 195]

3.5.5 Besonderheiten bei der Verwendung auf dem ESP32

Das [ESP-IDF](#) bietet für den ESP32 Mikrocontroller eine angepasste Version des FreeRTOS an. Eine FreeRTOS-Anpassung ist die Unterstützung für symmetrisches Multiprocessing, da viele ESP32 über eine Zweikern-[CPU](#) mit symmetrischen Multiprocessing verfügen. Dabei wird zwischen dem [CPU](#)-Kern 0 (Protokoll [CPU](#)) und dem [CPU](#)-Kern 1 (Applikation [CPU](#)) unterschieden. Die Namensgebung der [CPU](#)-Kerne weist auf die präferierte Taskaufteilung hin. Um Tasks [CPU](#)-Kernen fest zuzuweisen, gibt es zusätzliche Funktionen in FreeRTOS. Als weitere Anpassungen enthält jeder CPU-Kern einen eigenen Idle-Task und die [CPU](#) 0 ist allein für die Ausführung der Tick-Interrupt-Routine zuständig. [67], [68]

Zudem wird der FreeRTOS-Kernel automatisch mit einem Task für die Inter-Processor-Aufrufe gestartet. Durch Inter-Processor-Aufrufe kann ein aufrufender [CPU](#)-Kern, Funktionen auf einem anderen [CPU](#)-Kern aufrufen. [69], [68]

3.6 Darstellung von Glyphen auf einem Monitor

Für die Darstellung von Zeichen auf einem Monitor gibt es mehrere Verfahren. Im nachfolgenden werden die drei meist verwendeten Verfahren beschrieben.

Als erstes Verfahren sind die Raster- beziehungsweise Bitmap-Schriftarten zu nennen [70]. Rasterschriftarten stellen die erste Generation von digitalen Schriftarten dar, da diese nur

eine geringe Rechenleistung für die Darstellung von Glyphen benötigen und sich dadurch für Rechner mit geringer Rechenleistung gut eignen. Eine Glyphe für ein Zeichen wird dabei durch ein Rechteck von Pixeln definiert und jedem Pixel wird ein fester Farbwert zugewiesen. Das Rechteck an Pixeln kann durch ein Byte-Array zeilen- oder spaltenweise effizient gespeichert werden, wie in Abbildung 10 zu sehen ist [71]. Die Vorteile von Raster-Schriftarten liegen in der geringen Rechenleistung zur Darstellung von Glyphen als auch in der guten Optimierung der Glyphen für eine bestimmte Schriftgröße. Der Nachteil bei Raster-Schriftarten ist jedoch, dass Glyphen für eine bestimmte Schriftgröße und Monitorauflösung definiert sind und dadurch geräteabhängig sind. Werden mehrere Größen und Monitorauflösungen unterstützt, wird viel Speicherplatz pro Schriftart benötigt, da für jede Größe und Monitorauflösung alle Glyphen erneut definiert werden müssen. [72], [70]

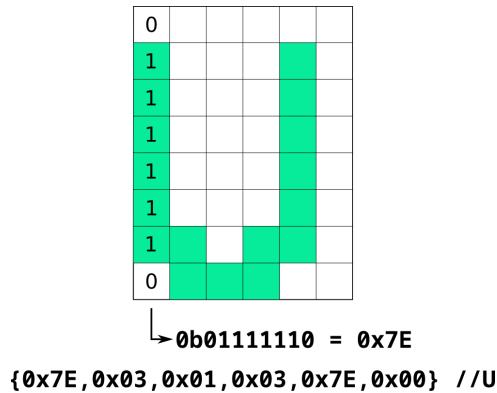


Abbildung 10: Speichern der Glyphe *U* spaltenweise in einem Array aus Bytes; abgewandelt von [71]

Das zweite Verfahren sind die Vektor-Schriftarten, bei denen einzelne Glyphen als Sammlung von Vektoren dargestellt werden [70]. Kurven in einer Glyphe werden durch viele kurze Vektoren approximiert [73, S. 24]. Durch die Verwendung von Vektoren können Glyphen mit einem geringeren Speicherplatz als Raster-Schriftarten geräteunabhängig skaliert werden [72], [70]. Jedoch ist die Darstellung der Glyphen langsamer und rechenintensiver als bei Raster-Schriftarten [70], [74]. Die Umwandlung von Vektor-Schriftarten findet nämlich in zwei Schritten statt. Der erste Schritt ist die Generierung der Umrandung der Glyphen aus den Schriftartdaten. Der zweite Schritt ist die Konvertierung der generierten Umrandungen in einzelne Pixel, indem berechnet wird, ob ein Pixel innerhalb oder außerhalb der Umrandung liegt und passend dazu eingefärbt wird. [72] Während der Umwandlung können ungewollte Artefakte entstehen, da es bei bestimmten Monitorauflösungen oder Schriftgrößen passieren kann, dass die Umrandung der Glyphen nur teilweise einzelne Pixel einschließen. Zu sehen ist das Problem in Abbildung 10.

Das letzte Verfahren sind Truetype- beziehungsweise Opentype-Schriftarten. Diese bauen auf dem Verfahren der Vektor-Schriftarten auf und erweitern die Daten der Glyphen um Kurven und zusätzliche Hinweise, um weitere Optimierungen während der Umwandlung zu erzielen. [70]

In Abbildung 12 sind die drei vorgestellten Schriftartenspeicherverfahren nebeneinandergestellt.



Abbildung 11: Umwandlung einer Vektor-Schriftart zur Darstellung an einem Monitor; abgewandelt von [72]



Abbildung 12: Gegenüberstellung der Schriftartenspeicherverfahren

3.7 Eingabeereignisbehandlung unter Linux in Bezug auf Gamepads und Joysticks

Unter Linuxsystemen gibt es zwei Möglichkeiten die Ereignisse von Gamepads und Joysticks abzufragen. Zum einen die Joystick Treiber application programming interface ([API](#)). Dieses ist im Linuxkernel aus Kompatibilitätsgründen für ältere Software enthalten und sollte nicht mehr für neue Projekte verwendet werden. Zum anderen gibt es das sogenannte Event Device ([evdev](#)) [75], welches die Joystick Treiber [API](#) durch den größeren Funktionsumfang ersetzen und als präferierte Schnittstelle verwendet werden soll. [76], [77]

[evdev](#) ist eine generische Eingabeereignisschnittstelle für Programme im Userspace sowie für Konsumenten im Kernel, welche Ereignisse von Eingabegeräten benötigen. Eingabeereignisse werden dabei als C-Struktur dargestellt und haben den Aufbau wie in Quellcode 3 zu sehen ist. Das erste Strukturelement ist der Zeitstempel, der den Ereigniszeitpunkt im Kernel wiedergibt. Als zweites Element ist der Typ des Ereignisses hinterlegt, welcher beispielsweise für einen Tastendruck den Wert *EV_KEY* hat. Das nächste Element ist der Ereigniscode, welcher hardwareunabhängig ist. Eine vollständige Liste aller Ereigniscodes ist unter Quelle [78] zu finden. Das letzte Element eines Ereignisses ist der Ereigniswert, welcher unterschiedliche Bedeutungen abhängig vom Ereignistyp hat. Beispielsweise liegt der Wertebereich für einen Knopfdruck zwischen 0 und 3. Der Wert 0 stellt dabei ein Loslassen der Taste dar und der Wert 1 das Drücken einer Taste. Der Wert 3 stellt das automatische erneute Drücken bei längerem Tastendruck dar. [75], [77]

Quellcode 3: C-Strukuraufbau eines Eingabeereignisses von evdev [75]

```
struct input_event {
```

```
    struct timeval time;
    unsigned short type;
    unsigned short code;
    unsigned int value;
};
```

Der Umgang mit [evdev](#)-Kernelgeräten in der Programmiersprache C wird durch die Bibliothek *libevdev* vereinfacht. Diese Bibliothek abstrahiert den Zugriff auf die sogenannte [evdev](#) input output Control ([IOCTL](#)) [79] und stellt dadurch ein Bindeglied zwischen dem Linux-Kernel und den Programmen im Userspace dar. [80], [81]

[IOCTL](#) ist unter Linux der meist verwendete Weg, um zwischen Programmen und Gerätetreibern zu interagieren. Die Interaktion findet dabei durch character devices, block devices, sockets oder spezielle Dateideskriptoren statt. [82]

4 Umsetzung

4.1 Softwareentwicklung

In diesem Abschnitt der Studienarbeit wird die Auswahl des Mikrocontrollers erklärt und das Zusammenspiel der Softwarekomponenten sowie einige Kernkomponenten detaillierter beschrieben.

4.1.1 Auswahl der Mikrocontrollers

Als Mikrocontroller wird das kostengünstige ESP32-WROOM-32E-Modul – zirka 5 € [45] – verwendet, da es in Hobbyprojekten gern verwendet wird [83], [84]. Folglich gibt es eine große Community, die sich bei Problemen während der Entwicklung von Softwareprojekten austauschen kann [83], [84]. Die [ESP-IDF](#) ist außerdem gut durch Kommentare im Sourcecode und durch Beispielprogramme dokumentiert. Ein weiterer Grund für die Verwendung des ESP32 ist, die Unterstützung mehrerer Bluetooth-Stacks, welche in Kapitel [3.2.5](#) beschrieben sind. Zuletzt ist noch anzumerken, dass der Mikrocontroller in kompakten Hardwaremodulen bezogen werden kann, in denen alle benötigten Elektronikkomponenten für den Betrieb des ESP32 enthalten sind. Dazu zählen unter anderen Kondensatoren, Widerstände und gegebenenfalls eine Antenne für den Betrieb von Bluetooth und [WLAN](#) [85, S. 14]. Die ESP32-Module besitzen auch meist eine CE-Zertifizierung, wie in Kapitel [3.4](#) beschrieben, womit das zu entwickelnde Fernsteuerungsmodul vereinfacht zertifiziert werden kann.

4.1.2 Auswahl des Bluetooth-Stacks

Da die Kommunikation zwischen dem Fernsteuerungserweiterungsmodul und den Endgeräten mittels [BLE](#) erfolgen soll, wird der Bluetooth-Stack Apache NimBLE verwendet. Dieser wird bei der ausschließlichen Verwendung von [BLE](#) empfohlen, da er eine geringe Codegröße hat und wenig Speicher zu Laufzeit benötigt [25].

4.1.3 Kommunikation zwischen dem Mikrocontroller und dem Endgerät

Für die Übermittlung der Daten zwischen dem Mikrocontroller zu einem Endgerät wird [BLE](#) verwendet, indem die Fernsteuerungsdaten mittels [HOGP](#) verpackt werden. [BLE](#) eignet sich, wie im Kapitel [3.1.1](#) beschrieben, gut durch den geringen Stromverbrauch, da das Fernsteuerungsmodul durch den Akku der Fernsteuerung mitbetrieben wird. Die Verwendung des [HID](#)-Datenformats ermöglicht dem Erweiterungsmodul, Daten für die Steuerung von Simulatoren an viele Endgeräte ohne zusätzlich benötigte Treiber zu übertragen [86]. Für die

Datenübertragung werden die **BLE**-Dienste und Merkmale, welche in Tabelle 8 zu sehen sind, verwendet. Zusätzlich enthält das Report-Merkmal einen Konfigurationsdeskriptor, womit sich Endgeräte für das automatische versenden von Daten abonnieren können.

Tabelle 8: Liste der verfügbaren Geräteinformationsmerkmale

BLE-Dienst	Merkmaile
Geräteinformationsdienst	Herstellernname
	Modellnummer
	Firmwareversion
	Softwareversion
Batteriedienst	Akkustand
HID-Dienst	Report-Map
	HID Information
	HID Control Point
	Report, definiert als Eingabe

Der finale Report-Map-Deskriptor ist für die Übertragung von Gamepaddaten konfiguriert. Diese Daten bestehen dafür aus acht analogen und acht digitalen Kanaldaten, welche jeweils die absoluten Stellungen der Fernsteuerungseingaben wiedergeben. Die analogen Kanäle haben eine Größe von 16 Bit und einen Wertebereich von 0 bis 2047. Die ersten vier analogen Kanäle werden für die Übertragung der Steuerknüppelpositionen verwendet. Die restlichen vier analogen Kanäle werden für die Stellung der Kippschalter mit jeweils drei Positionen verwendet. Die digitalen Kanäle haben jeweils eine Größe von 1 Bit und werden für Knöpfe mit 2 Stellungen benutzt. In Quellcode 4 ist der beschriebene Report Deskriptor zu sehen.

Damit das Erweiterungsmodul von Endgeräten als Gamepad während des Verbindungsbaus erkannt wird, enthalten die Advertising-Pakete ebenso Informationen über das Erweiterungsmodul.

Quellcode 4: Report Map Deskriptor des Erweiterungsmoduls

```

0x05, 0x01,          // Usage Page (Generic Desktop Ctrl)
0x09, 0x05,          // Usage (Game Pad)
0xA1, 0x01,          // Collection (Application)
0x85, 0x01,          // Report Id (1)
0xA1, 0x00,          // Collection (Physical)
0x05, 0x01,          //     Usage Page (Generic Desktop Ctrl)
0x09, 0x30,          //     Usage (X)
0x09, 0x31,          //     Usage (Y)
0x09, 0x32,          //     Usage (Z)
0x09, 0x33,          //     Usage (Rx)
0x09, 0x35,          //     Usage (Rz)
0x09, 0x34,          //     Usage (Ry)
0x09, 0x36,          //     Usage (Slider)
0x09, 0x36,          //     Usage (Slider)
0x15, 0x00,          // Logical Minimum (0)
0x26, 0xFF, 0x07,    // Logical Maximum (2047)
0x75, 0x10,          // Report Size (16)
0x95, 0x08,          // Report Count (8)

```

```

0x81, 0x02,          //      Input (Absolute)
0x05, 0x09,          //      Usage Page (Button)
0x19, 0x01,          //      Usage Minimum (0x01)
0x29, 0x08,          //      Usage Maximum (0x08)
0x15, 0x00,          //      Logical Minimum (0)
0x25, 0x01,          //      Logical Maximum (1)
0x95, 0x08,          //      Report Count (8)
0x75, 0x01,          //      Report Size (1)
0x81, 0x02,          //      Input (Absolute)
0xC0,                //      End Collection
0xC0,                //      End Collection

```

Zusätzlich zu den in Kapitel 3.2.3 beschriebenen Sollanforderungen durch Apple haben Geräte von Apple weitere nicht dokumentierte Anforderungen. Zum Beispiel muss das Erweiterungsmodul Resolvable Private Address ([RPA](#)) auflösen können, da sonst kein Verbindungsaufbau zum Datenaustausch zwischen den Geräten stattfindet. Eine weitere nicht dokumentierte Anforderung ist die verschlüsselte Datenübertragung zwischen dem Erweiterungsmodul und dem Applegerät, wenn es sich um [HID](#)-Daten handelt. Dafür werden im ersten Schritt die Geräte gekoppelt, was durch verschiedene Verfahren erfolgen kann. Die Kopplung mit dem Erweiterungsmodul findet durch die Anzeige und der Bestätigung eines Pins auf beiden Geräten statt. Im zweiten Schritt erfolgt das Bonding, womit die Daten der Kopplung gespeichert werden, um bei einem erneuten Verbindungsaufbau die Kopplungsphase zu überspringen [87].

Für die Ermittlung des aktuellen Verbindungszustands mit Endgeräten werden die auftretenden [GAP](#)-Events am Erweiterungsmodul ausgewertet. Ein verwendetes [GAP](#)-Event ist für die Kopplung der Geräte zuständig und enthält die Erstellung und Darstellung des Kopplungspins. Ein weiteres [GAP](#)-Event ist für das Abonnieren von Endgeräten zu [BLE](#)-Merkmälern zuständig. Zuletzt wird das [GAP](#)-Event für den Verbindungsaufbau verwendet, um eine Anfrage an das Endgerät zu schicken, damit die Übertragungsrate für die Verbindung erhöht wird.

4.1.4 Kommunikationsprotokoll zwischen der Multikopterfernsteuerungen und dem Mikrocontroller

Als Kommunikationsprotokoll zwischen der Multikopterfernsteuerung und dem Mikrocontroller wird CRSF verwendet, da wie in Kapitel 3.3 beschrieben das Protokoll die höchste Übertragungsrate bei möglichst kleinen Datenpaketen hat.

Da die CRSF-Daten mittels einer [UART](#)-Verbindung übertragen werden, findet das Auslesen der Daten auf dem ESP32 mittels eines [UART](#)-Treibers statt. Der [UART](#)-Treiber abstrahiert dafür den vorhandenen [UART](#)-Interrupt und stellt alle Ereignisse und Daten durch eine vereinfachte API bereit [88]. Der [UART](#)-Interrupt ist konfiguriert, dass empfange Daten erst verarbeitet werden, wenn entweder der interne [UART](#)-Buffer voll ist oder ein definierter Timeout zwischen empfangenen Bytes auftritt.

Die Auswertung der empfangenen CRSF-Daten findet in zwei Schritten statt. Im ersten Schritt findet eine Überprüfung der Geräteadresse – 0xEE –, der Länge der übermittelten Daten und des übermittelten Datentyps – 0x16 – statt. Wenn all diese Werte stimmen findet die Überprüfung der [CRC](#)-Prüfsumme statt, um festzustellen, ob alle Kanaldaten gültig sind. Im zweiten Schritt, werden alle Kanaldaten zunächst ausgelesen und darauffolgend im Wertebereich angepasst,

damit der vollständige Wertebereich des **HID**-Reports verwendet wird. Für die Anpassung des Wertebereichs werden die analogen Kanaldaten auf einen Wertebereich von 0 bis 2047 erweitert und digitale Kanaldaten bis zu einem Wert von 992 als logisch 0 und ab einem Wert von 993 als logisch 1 ausgewertet. Nach Anpassung des Wertebereichs werden die Daten in einer globalen Datenstruktur abgelegt, welche in Quellcode 5 zu sehen ist. Falls dabei eine Änderung des Wertes stattfindet, wird veranlasst, dass die Daten per **BLE** an abonnierte Endgeräte versendet werden. Falls ein Problem während der Auswertung stattfindet, wird das komplette Paket verworfen und auf ein neues Paket gewartet.

Quellcode 5: C-Strukuraufbau der aufbereiteten Kanaldaten

```
typedef struct ChannelDataStruct{
    uint16_t roll;           //roll = x
    uint16_t pitch;          //pitch = y
    uint16_t aux3;           //aux3 = z
    uint16_t yaw;            //yaw = rx
    uint16_t aux1;           //aux1 = rz
    uint16_t throttle;       //throttle = ry
    uint16_t aux4;           //aux4 = slide
    uint16_t aux2;           //aux2 = slide
    uint8_t buttons;          //buttons = aux12(b8) .. aux5(b1)
} ChannelDataStruct;
```

4.1.5 Statusausgabe des Mikrocontrollers mittels eines OLED-Displays

Wie in Kapitel 2.1 beschrieben, wird ein **OLED**-Display verwendet, um Statusinformationen für den Benutzer darzustellen. Dabei hat das Display eine Displaydiagonale von 0,91 Zoll, eine Auflösung von 128 zu 32 Pixel und den Displaycontroller SSD1306. Die Datenübertragung zwischen dem ESP32 und dem SSD1306 findet mittels inter integrated circuit (**I²C**) statt. Zur Ansteuerung einzelner Pixel im Display teilt der Displaycontroller das Display in vier Seiten mit jeweils 128 Segmenten auf. Jedes Segment hat dabei eine Größe von 8 Bit. Zu sehen ist die Aufteilung des Displays in Seiten und Segmente sowie die Pixelansteuerung durch einen übermittelten Datenstream in Abbildung 13.

Die Darstellung von Text auf dem Display erfolgt mittels einer Bitmap-Schriftart, da dadurch mit geringerem Rechenaufwand eine gute Lesbarkeit auf dem kleinen Display erreicht wird. Alle Glyphen der Schriftart werden in einem zweidimensionalen Array gespeichert und haben eine Höhe von 14 und eine Breite von 9 Pixel. Die Umwandlung von Zeichenketten in Glyphen für das Display findet in zwei Schritten statt. Im ersten Schritt werden alle Pixelinformationen für das komplette Displaybild in einen lokalen 492 Byte großen Buffer des ESP32 zwischengespeichert. Jedes Bit dieses Buffers repräsentiert dabei ein Pixel des Displays. Dadurch müssen die Glypheninformation aus dem zweidimensionalen Glyphenarray nur an die richtige Position des Buffers übertragen werden. Im zweiten Schritt wird der lokale Puffer mittels **I²C** an das Display für die Darstellung übertragen. Die Aufteilung der Darstellung in zwei Schritten hat den Vorteil, dass Inhalte auf dem Display ohne Artefakte überlappt werden können, was nicht möglich wäre, wenn nur die zu veränderten Pixel an das Display geschickt werden würden.



Abbildung 13: Verarbeitung eines Datenstreams für die Darstellung auf dem Erweiterungsmoduldisplay; abgewandelt von [89, S. 37]

4.1.6 Kombination aller Softwarekomponenten

Für die einfachere Integration von eigenen Softwarekomponenten mit bereits vorhandenen Bibliotheken wird für die Studienarbeit die Programmiersprache C verwendet, da eine Vielzahl an Bibliotheken und Beispielprogrammen in C geschrieben sind [52]. Die finale Software des Mikrocontrollers besteht aus fünf Komponenten, welche mittels FreeRTOS-Echtzeitkernel verwaltet werden.

Die erste Komponente für die **BLE**-Kommunikation und dem **BLE**-Verbindungsaufbau läuft in einen FreeRTOS-Task (**BLE**-Task). Die zweite Komponente läuft ebenso in einen FreeRTOS-Task und liest und verarbeitet CRSF-Daten von der Multikopterfernsteuerung (CRSF-Task). Die dritte Komponente, welche als FreeRTOS Software Timer integriert ist, bestimmt den aktuellen Akkustand. Hierfür wird mittels des integrierten **ADC** des ESP32 die aktuelle Spannung des Multikopterfernsteuerungsakkus bestimmt und in einen Prozentwert zwischen 0 und 100 umgewandelt. Dieser Akkustand wird durch **BLE** an das Endgerät weitergeschickt. Die vierte Komponente der ESP32-Software ist für die Erkennung von Tasteneingabeevents zuständig. Die Erkennung von Tasteneingaben erfolgt dabei mittels eines FreeRTOS-Interrupts und die Weitergabe der Daten an ein Task mittels FreeRTOS-Queues. Die letzte Softwarekomponente des ESP32 ist für die Steuerung des Displays vorgesehen. Da Anzeigänderungen am Display nur selten erfolgen und schnell abgearbeitet werden können, werden die Displayhilfsfunktionen innerhalb der zwei vorhandenen Tasks ausgeführt und nicht in einem zusätzlichen Task. Damit der ESP32-Mikrocontroller mit den zwei vorhandenen Kernen optimal ausgelastet wird, werden beide Tasks jeweils einem Kern fest zugewiesen. Dadurch blockieren sich die einzelnen Softwarekomponenten im Betrieb seltener.

Zur Abspeicherung der Multikopterfernsteuerungsdaten und zum Datenaustausch zwischen CRSF-Task und **BLE**-Task werden globale Variablen verwendet. Die Mitteilung über das Auslesen neuer Multikopterfernsteuerungsdaten findet mit zwei Funktionen von NimBLE statt. Zum einen durch die Funktion `ble_hs_mbuf_from_flat`. Mittels dieser Funktion werden die Fernsteuerungsdaten in einen internen **BLE**-Buffer geschrieben. Zum anderen durch die Funktion

`ble_gattc_notify_custom`. Mittels dieser Funktion werden alle gespeicherten Daten im BLE-Buffer automatisch an alle abonnierten Endgeräte versendet.

4.1.7 Weiterführende Informationen

Der vollständige Sourcecode der Studienarbeit ist für weitere Details öffentlich unter nachfolgendem Link auffindbar: <https://github.com/SimLinkModule/ModuleSoftware>

4.2 Platinenentwurf

Wie in Kapitel 2.2 beschrieben, soll eine Platine entwickelt werden, die alle benötigten Elektronikkomponenten des Erweiterungsmoduls enthält. Dadurch wird es möglich, das Erweiterungsmodul kompakt, mobil und benutzerfreundlich zu verwenden. Im finalen Entwurf sind alle Elektronikkomponenten auf drei Platinen, wie in Abbildung 14 zu sehen, untergebracht. Somit wird für die Gehäuseerstellung eine größtmögliche Flexibilität realisiert. *Platine 1* dient als Verbindungsglied zwischen der Multikopterfernsteuerung und dem ESP32-Mikrocontroller. Diese Platine enthält zum einen eine Buchsenleiste mit der dargestellten Pinbelegung wie in Abbildung 15 zu sehen. Zum anderen ist eine ESD-Schutzschaltung vorhanden, welche im Kapitel 4.2.1 genauer beschrieben wird. Auf der *Platine 2* befinden sich die Hauptkomponenten des Erweiterungsmoduls. Dazu zählen die Spannungsregulierung, der ESP32-Mikrocontroller und die Logik für das Beschreiben des ESP32 mit Programmdaten. Alle Eingabe- und Ausgabeelemente für die Benutzerinteraktionen befinden sich auf der *Platine 3*.

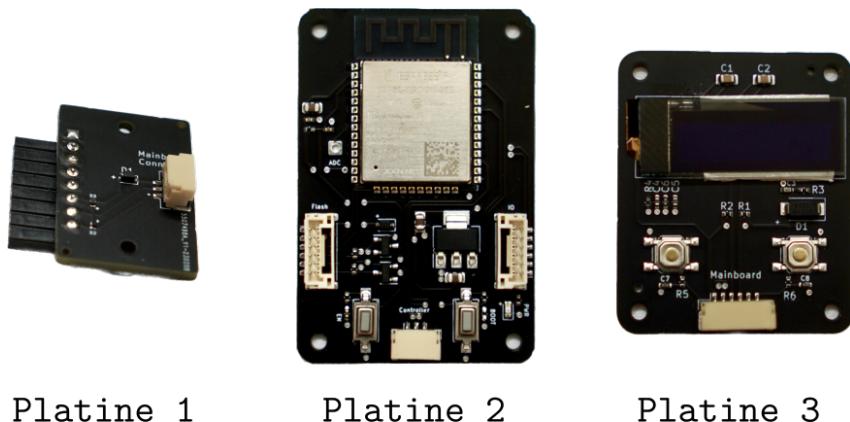


Abbildung 14: Platinen des Erweiterungsmoduls

4.2.1 Teilschaltungen

In den nachfolgenden Unterkapiteln werden die wichtigsten Teilschaltungen aller Platinen des Erweiterungsmoduls genauer erklärt.



Abbildung 15: Pinbelegung des Fernsteuerungsmodulschachts; abgewandelt von [90]

Spannungsregulierung

Für den Betrieb des Erweiterungsmoduls mit dem ESP32-Mikrocontroller wird eine Spannung von 3,3 V benötigt. Jedoch liegt die verfügbare Spannung des Fernsteuerungsmodulschachts auf einem konstanten Wert zwischen 6 V und 12 V, abhängig vom verwendeten Fernsteuerungsmodell. Mittels der integrierten Programmierbuchse besteht die Möglichkeit, die Platine mit einer Spannung von entweder 3,3 V oder 5 V zu betreiben. Zur Regulierung der eventuell zu hohen Spannungen wird ein Low-dropout regulator (LDO) integrated circuit (IC) verwendet, welcher eine Spannung, die mehr als 3,3 V beträgt, auf eine konstante Spannung von 3,3 V herunterregelt. Zu sehen ist die benötigte Schaltung für den Betrieb des LDOs in Abbildung 16. Zusätzlich enthält diese Schaltung im geregelten 3,3 V Spannungskreis eine LED, mit der bei Fehlbetrieb des Erweiterungsmoduls überprüft werden kann, ob eine Stromzufuhr zum ESP32-Mikrocontroller vorhanden ist.

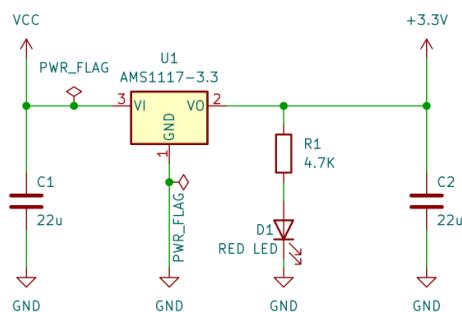


Abbildung 16: Spannungsregulierung des Erweiterungsmoduls

ESP32 Programmierlogik

Mittels einer seriellen Verbindung zwischen dem Entwicklercomputer und dem Mikrocontroller wird der ESP32-Mikrocontroller programmiert. Da jedoch heutzutage wenige Rechner eine serielle Buchse besitzen, gibt es grundlegend zwei Möglichkeiten den ESP32 zu programmieren.

Die erste Möglichkeit ist, ein USB-zu-Seriell-Programmiergerät zu verwenden, womit der Entwicklercomputer mittels USB die Programmierung durchführen kann. Die zweite Möglichkeit ist, auf der eigenentwickelten Platine ein USB-zu-Seriell-Converter IC zu integrieren, womit direkt die Programmierung des ESP32 mittels USB erfolgen kann. Jedoch entstehen bei dieser Methode zusätzliche Kosten und es wird essentieller Platz auf der Platine belegt, da das Erweiterungsmodul einmalig nach der Bestückung der Platine programmiert werden muss. Aus diesen genannten Einschränkungen wird die erste Möglichkeit zur Programmierung des ESP32 verwendet.

Damit der ESP32 für die Programmierung automatisch in den benötigten Programmiermodus schaltet, hat die verfügbare ESP32-Programmiersoftware des Herstellers einen fest definierten Programmierablauf. Der Programmierablauf verwendet dafür zwei vorhandene Statusleitungen der seriellen Verbindung. Zum einen die *Data Terminal Ready*-Leitung und zum anderen die *Request To Send*-Leitung. Zusätzlich zu den verwendeten Statusleitungen werden noch zwei Transistoren, angeordnet wie in Abbildung 17, auf der Erweiterungsmodulplatine benötigt. Mittels dieser Schaltung werden die Kontakte *EN* und *Boot* des ESP32 zu Beginn der Programmierung passend geschalten. Der Kontakt *EN* am ESP32 wird verwendet, um den ESP32 lauffähig zu betreiben (Pegel von 3,3 V) oder die Ausführung von Programmen auf dem ESP32 (Pegel von 0 V) zu verhindern. Mit dem Kontakt *Boot* kann während des Starts des ESP32 festgelegt werden, ob der normale Ausführungsmodus (Pegel von 3,3 V) oder der Programmiermodus (Pegel von 0 V) gestartet werden soll. Zusätzlich muss bei der Programmierung beachtet werden, dass der maximale Spannungspegel der seriellen Verbindung bei 3,3 V liegen muss. [91]

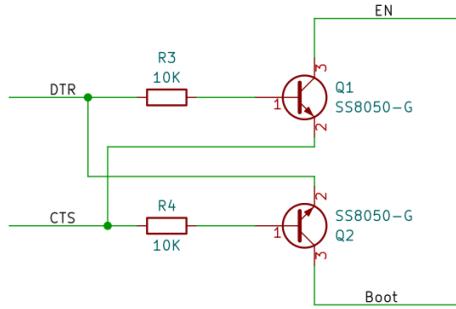


Abbildung 17: ESP32 Programmierlogik

Tastenentprellung

Zu Beginn der Betätigung eines Tasters entstehen Schwingungen zwischen der Massespannung und der Betriebsspannung, was zur fehlerhaften Auswertung mittels Mikrocontrollers führt. Um dieses ungewollte Verhalten zu minimieren, beziehungsweise zu verhindern, sollten Tasten entprellt werden. Eine einfache Methode ist die Entprellung mittels Hardwarekomponenten, wie in Abbildung 18 zu sehen. Das Hauptelement zur Entprellung ist dabei der parallel zum Taster platzierte Kondensator [92]. Damit bei Nichtbetätigung des Tasters eine Spannung von 3,3 V am ESP32-Kontakt anliegt, enthält jeder Kontakt des ESP32 einen internen Pull-Up Widerstand (45K Ohm). Eine Betätigung des Tasters zieht infolgedessen die Spannung des ESP32-Kontakts auf eine Spannung von 0 V.

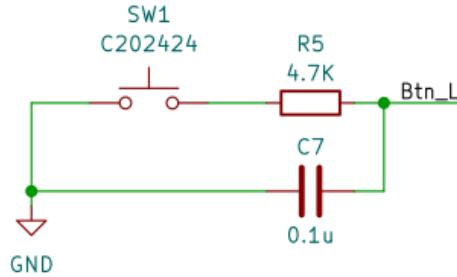


Abbildung 18: Hardwaretastenentprellung

Der Taster, welcher für den manuellen Start des Programmiermodus, auf der Platine des Erweiterungsmoduls vorhanden ist, darf jedoch nicht durch eine Hardwareschaltung entprellt werden. Während der Aufladungsphase des Kondensators liegt ansonsten die Spannung am ESP32-Kontakt *Boot* nahe bei 0 V und der ESP32 wird immer ungewollt im Programmiermodus gestartet.

Electro-Static-Discharge (ESD)-Schutz

Um zu vermeiden, dass durch elektrostatische Aufladung des Körpers das Erweiterungsmodul beschädigt wird, müssen die Kontakte des Erweiterungsmoduls geschützt werden. Der Schutz wird durch Zener-Dioden, welche in Gegenrichtung mit 0 V verbunden sind, realisiert. Zu sehen ist diese Schutzschaltung der Buchsenleiste des Erweiterungsmoduls in Abbildung 19. Die Zener-Dioden sind dabei so dimensioniert, dass Spannungen größer 12 V (Versorgungsleitung) beziehungsweise größer 3,3 V (Datenleitung) über die Zener-Dioden Richtung 0 V geleitet werden.

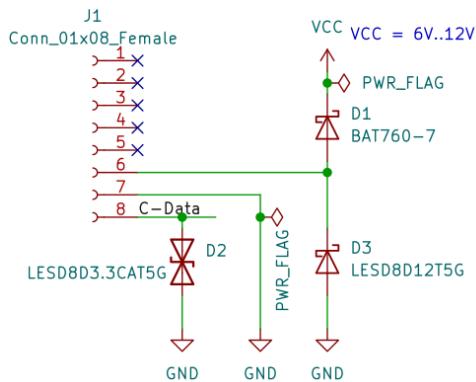


Abbildung 19: ESD-Schutzschaltung

4.2.2 Referenzschaltungen

Zur Vermeidung von Fehlern während des Schaltungsentwurfs und zur Minimierung von Platinenproduktionsdurchgängen werden als Grundlage für die Platinen des Erweiterungsmoduls Referenzdesigns aus nachfolgender Liste verwendet.

- OLED-Schaltplan von ShenZhen QDtech Co. LTD; Stand: 24. Juli 2019
- ESP32_DevKitc_V4-Schaltplan von Espressif Systems (Shanghai Co., Ltd.); Stand: 7. Juni 2018
- Produktspezifikation des OEL Display Module von Allvision technology Inc.; Version: B

4.2.3 Weiterführende Informationen

Alle Schaltpläne der Erweiterungsmodulplatinen sind im Anhang in den Abbildung 32, 33 und 34 zu finden. Die vollständigen Platinenprojektdaten sind öffentlich unter folgendem Link auffindbar: <https://github.com/SimLinkModule/PCB>

Die Platinen sind dabei mit der kostenlosen Open Source Software KiCad [93] entwickelt worden und die Produktion und die Bestückung der meisten Elektronikkomponenten fand durch das Unternehmen [JLCPCB](#) statt.

4.3 Gehäuseerstellung

Damit die entworfenen Platinen fest und kompakt im Modulschacht (Typ: Lite) der Fernsteuerung befestigt werden können, ist zusätzlich ein Kunststoffgehäuse entwickelt worden, welches mittels eines Fused Deposition Modeling ([FDM](#))-3D-Druckers hergestellt werden kann. Alle benötigten Komponenten des Gehäuses sind im Anhang als Explosionszeichnung in Abbildung 35 zu sehen.

Der Fokus beim Gehäuseentwurf liegt darin, das Gehäuse so zu drucken, dass eine möglichst geringe Nachbearbeitung der Oberfläche nötig ist. Eine Nachbearbeitung beim 3D-Druck mit dem [FDM](#)-Verfahren wird hauptsächlich an Oberflächen benötigt, welche mittels Stützstrukturen gedruckt werden. Um Stützstrukturen im Druck zu vermeiden, sollte auf Überhänge im Modell verzichtet werden. Diese Einschränkung geht aus dem [FDM](#)-Verfahren hervor, da nur ausgehend vom Druckbrett des 3D-Druckers gedruckt werden kann. Falls jedoch nicht auf Überhänge verzichtet werden kann, gibt es zwei bekannte Möglichkeiten, um Stützstrukturen zu vermeiden. Eine Möglichkeit ist, das Modell in mehrere Teilmodelle aufzuteilen, welche einzeln ohne Stützstrukturen gedruckt werden können. Zu sehen ist dieses Verfahren in Abbildung 20. Die zweite Möglichkeit ist, Stützstrukturen in das Modell zu integrieren. Diese Stützstrukturen sollten, wie in Abbildung 21 zu sehen ist, einen Winkel zwischen 45 und 90 Grad zum Druckbrett haben.



Abbildung 20: Modell mit Überhängen für den 3D-Druck vorbereiten

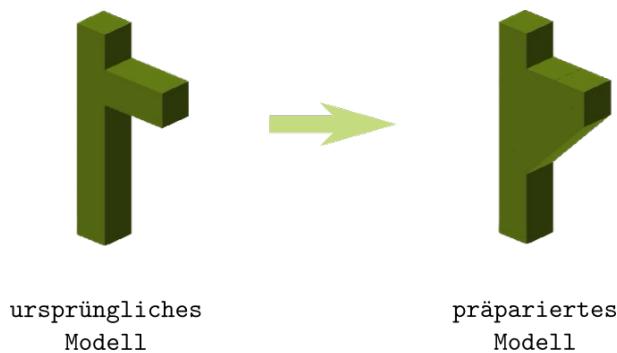


Abbildung 21: Modell mit Überhängen für den 3D-Druck vorbereiten

Zur Befestigung aller Komponenten im Kunststoffgehäuse sind mehrere Gewindegänge aus Messing integriert. Dies bietet den Vorteil, dass die einzelnen Komponenten des Erweiterungsmoduls mehrfach ein- und ausgebaut werden können, ohne dass integrierte Gewindegänge im Kunststoffgehäuse leicht überdreht und dadurch beschädigt werden können. Zu sehen sind alle benötigten Messinggewindegänge des Gehäuses in Abbildung 22.



Abbildung 22: Messing Gewindegänge zur Befestigung der einzelnen Modulkomponenten

Da der Gehäusedeckel auf einer Seite Befestigungen für die Platinen hat und sich auf der gegenüberliegenden Seite die Schienen des Modulschachts befinden, ist dieses 3D-Modell in zwei Teilmodelle aufgeteilt. Dies ist nötig, um sowohl ohne Stützstrukturen auszukommen als auch die filigranen Schienen mit einer guten Qualität drucken zu können. Für eine höhere Stabilität des Gehäusedeckels sollten die Teilmodelle nach dem Druck mittels Kleber verbunden werden.

Damit die Platine mit der Modulbuchse im Gehäuse befestigt werden kann, werden zusätzlich gedruckte Kunststoffhalterungen benötigt, da die Platine sehr nah an der Gehäuseaußenkante liegen muss, um eine Verbindung mit dem Stecker der Fernsteuerung herstellen zu können. Zu sehen sind die eingebauten Platinen in Abbildung 23 sowie die Position der Modulbuchse für die Verbindung mit der Multikopterfernsteuerung.

Zum Schutz und zur Vergrößerung der Tasterdruckfläche der Eingabe- und Ausgabeplatine ist ein integrierter Tasterschutz im Gehäuse vorhanden. Dieser Schutz und das Erweiterungsmodulgehäuse bilden dabei ein Bauteil, wodurch kein zusätzlicher Zusammenbau benötigt wird. Jedoch muss dafür das Verbindungsstück zwischen Tasterschutz und dem Gehäuse flexibel entworfen werden, indem die Schichtdicke des Verbindungsstücks verringert wird. Zu sehen ist

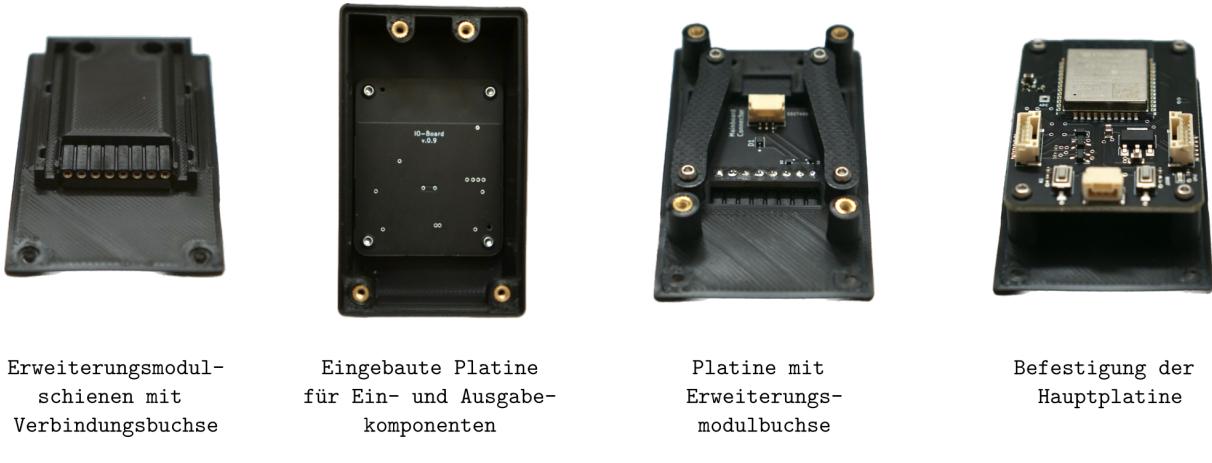


Abbildung 23: Eingebaute Platinen im Gehäuse

der Tasterschutz mit Verbindungsstück in Abbildung 24. Zusätzlich ist in Abbildung 24 ein konischer Zylinder auf dem Tasterschutz zu sehen, womit die Tastendruckfläche vergrößert und die Lücke zwischen der befestigten Platine und dem Erweiterungsmodulgehäuse überbrückt wird.



Abbildung 24: Tasterschutz für Taster des Erweiterungsmoduls

4.3.1 Weiterführende Informationen

In Abbildung 25 ist das vollständig montierte Gehäuse mit eingebauten Platinen zu sehen.



Abbildung 25: Zusammengebautes Erweiterungsmodul

Der Entwurf des Gehäuses fand in der kostenlosen und Open Source Software OpenSCAD [94] statt. Die zugehörigen Projektdateien sind öffentlich unter folgendem Link auffindbar: <https://github.com/SimLinkModule/Shell>

5 Validierung und Gegenüberstellung

5.1 Validierung des Funktionsumfangs

Dieser Abschnitt der Studienarbeit befasst mit dem Vergleich des definierten Aufgabenumfangs von Kapitel 2 zum realisierten Funktionsumfang. Falls Einschränkungen im realisierten Funktionsumfang vorhanden sind, werden diese erläutert.

5.1.1 Softwareentwicklung

Alle Anforderungen zur Software des Erweiterungsmoduls sind in Kapitel 2.1 definiert. Die erste definierte Anforderung ist die Unterstützung von verschiedenen Betriebssystemen der Endgeräte für die Übermittlung von Fernsteuerungsdaten. Die unterstützten Betriebssysteme sollten dabei Android, Windows, Linux und iOS/iPadOS sein. Getestet wurde der Datenaustausch zwischen dem Erweiterungsmodul und den genannten Betriebssystemen jeweils mit einer Betriebssystemversion und einer Simulatorsoftware. Android wurde in der Version 10 mit der Simulatorsoftware *FPV.SkyDive* getestet, wobei der vollständige Funktionsumfang nachgewiesen werden konnte. Unter Windows 11 mit der Simulatorsoftware *Velocidrone* konnte ebenso der vollständige Funktionsumfang des Erweiterungsmoduls nachgewiesen werden. Als Linux-Betriebssystem wurde *Pop! OS 22.04 LTS* mit der Simulatorsoftware *Velocidrone* verwendet. Auch hier konnte der vollständige Funktionsumfang nachgewiesen werden. Für die Überprüfung des Funktionsumfangs des Erweiterungsmoduls mit iOS/iPadOS Version 16.3.1 wurde die Simulatorsoftware *FPV.SkyDive* verwendet. Hier konnte nur eine eingeschränkte Funktionsfähigkeit nachgewiesen werden. Zum einen kann ein Verbindungsaufbau zwischen dem Erweiterungsmodul und dem iOS/iPadOS-Endgerät stattfinden. Zum anderen können vom Erweiterungsmodul übermittelte Daten mit dem iOS/iPadOS-Endgerät empfangen werden. Nachgewiesen werden kann dies mit der Software *packetLogger* und *libimobiledevice*, womit alle **HCI**-Nachrichten eines iOS/iPadOS-Endgeräts betrachtet werden können. Für weitere Betrachtungen wurde ein mit iOS/iPadOS kompatibler Nintendo Switch-Controller verwendet und der Kommunikationsaustausch zwischen dem iOS/iPadOS-Endgerät und dem Nintendo Switch-Controller untersucht. Dabei stellt sich heraus, dass der Nintendo Switch-Controller mittels **BBR** die Gamecontrollerdaten überträgt, weshalb dort keine weiteren Vergleiche gemacht werden können. Entgegen der ursprünglichen Annahme, welche in Kapitel 3.2.3 beschrieben ist, müssen **BLE**-Gamecontroller durch das **MFi**-Programm zertifiziert werden und ein zusätzliches Hardwaremodul enthalten [95].

Die zweite Softwareanforderung ist, die Kommunikation zwischen dem Erweiterungsmodul und den Endgeräten mittels **BLE** und die Authentifizierung des Erweiterungsmoduls als **HID**-Gerät. Die Umsetzung dieser Anforderung ist in Kapitel 4.1.2 und 4.1.3 beschrieben.

Die dritte Anforderung ist, die Kommunikation zwischen dem Erweiterungsmodul und der Multikopterfernsteuerung mittels des Modulschachts der Fernsteuerung. Auch soll die Kommunikation mithilfe eines vorhandenen Protokolls der Fernsteuerungsfirmware OpenTX oder einer

Abspaltung davon erfolgen. Als Kommunikationsprotokoll zwischen dem Erweiterungsmodul und der Multikopterfernsteuerung wird CSRF verwendet, wie in Kapitel 4.1.4 beschrieben. Getestet wurde die Erweiterungsmodulsoftware mit der Multikopterfernsteuerung *Tango 2* vom Unternehmen *Team Blacksheep* mit der Firmware *FreedomTX Version TBS-1.3.0*. Dabei konnten alle, von der Fernsteuerung mittels des CSRF-Protokolls versendeten Kanaldaten vom Erweiterungsmodul empfangen und verarbeitet werden.

Die vierte Anforderung sind verschiedene Ein- und Ausgabemöglichkeiten, damit Endanwender mit dem Erweiterungsmodul interagieren können. Dafür findet einerseits die Ausgabe von Statusnachrichten mittels eines **OLED**-Displays statt (nachzulesen in Kapitel 4.1.5). Andererseits gibt es mehrere Taster für Eingaben durch den Endanwender (nachzulesen in Kapitel 4.1.6). Zu dieser Anforderung zählt auch die Integration weiterer Statusindikatoren mittels **LEDs**. Dies ist jedoch nicht umgesetzt worden, da alle wichtigen Statusnachrichten für den Endanwender durch das **OLED**-Display angezeigt werden. Lediglich eine Status-**LED** ist vorhanden, um anzuzeigen, ob eine funktionierende Stromzufuhr zum Erweiterungsmodul vorhanden ist. Dies ist komplett in Hardware realisiert, wie in Abbildung 16 zu sehen ist.

Die letzte Softwareanforderung ist die Übermittlung des Akkustand der Multikopterfernsteuerung an ein verbundenes Endgerät. Die Softwarekomponente hierfür ist vollständig vorhanden und funktionsfähig. Jedoch bietet der Lite-Modulschachtstecker keinen Pin an zu Ermittlung der rohen Akkuspannung (zu sehen in Abbildung 15). Aus diesem Grund wird im **BLE**-Akkustand-Merkmal der **HOGP**-Daten immer der Wert 0 übertragen (Vorgabe von **HOGP**). Hiermit wird sichergestellt, dass der Endanwender des Erweiterungsmoduls selbst den aktuellen Akkustand der Multikopterfernsteuerung überprüfen muss, da der Endanwender davon ausgehen muss, dass das Erweiterungsmodul nicht den korrekten Akkustand übermittelt.

5.1.2 Platinenentwurf

Die Anforderungen an die entworfenen Platinen des Erweiterungsmoduls sind in Kapitel 2.2 aufgelistet. Dabei ist die Hauptanforderung, dass die Erweiterungsmodulplatine alle benötigten Elektronikkomponenten, welche im prototypischen Steckbrettaufbau vorhanden sind, enthalten muss. Zusätzlich sollte die Platine möglichst kompakt sein, damit die Platine an der Multikopterfernsteuerung verwendet werden kann, ohne dass das Erweiterungsmodul während der Verwendung der Fernsteuerung stört. Diese Anforderungen wurden in den Platinen, welche in Kapitel 4.2 vorgestellt wurden, umgesetzt. Die Platine enthält dafür den ESP32-Mikrocontroller, die benötigte Spannungsregulierung für alle Elektronikkomponenten sowie mehrere Taster, ein **OLED**-Display und eine Status-**LED** für die Interaktion mit dem Endanwender. Zusätzlich ist ein **ESD**-Schutz an der Erweiterungsmodulbuchse integriert, ebenso wie weitere Elektronikkomponenten für die komfortablere Programmierung des ESP32-Mikrocontrollers.

5.1.3 Gehäuseerstellung

Die Anforderungen an das Erweiterungsmodulgehäuse sind in Kapitel 2.3 aufgelistet und umfassen den Entwurf eines Kunststoffgehäuses, welches für Modulschächte des Typs *Lite* ist und möglichst ohne Nachbearbeitung verwendet werden kann. All diese Anforderungen sind

im entworfenen Gehäuse von Kapitel 4.3 realisiert worden. Das Gehäuse ist für Erweiterungsmodulschächte des Typs *Lite* und kann mit vier Stützstrukturen gedruckt werden. Da diese an nicht sichtbaren Stellen des Gehäuses gedruckt werden, entfällt die Nachbearbeitung der Gehäuseoberflächen.

5.2 Gegenüberstellung BLE-Modul und USB-Verbindung

Ein wichtiges Merkmal von Fernsteuerungen, sowohl während der Trainings im Simulator als auch während des Fliegens mit realen Multikoptern, ist die Latenz zwischen der Eingabe an der Fernsteuerung bis zur Verarbeitung an der Gegenstelle. Um diese Latenz zu bestimmen werden im nachfolgenden Abschnitt mögliche Versuchsaufbauten verglichen und die Ergebnisse des präferierten Versuchsaufbaus ausgewertet sowie verglichen mit weiteren Computereingabegeräten verglichen.

5.2.1 Versuchsaufbauten

Zur Bestimmung der Latenz der Fernsteuerung muss ein Versuchsaufbau erstellt werden, mit welchem sowohl der Zeitpunkt der Tastenbetätigung als auch der Zeitpunkt des Eingabeereignisses im Betriebssystem gemessen werden kann. Zusätzlich sollte der Versuchsaufbau ohne Veränderungen an der vorhandenen Multikopterfernsteuerung funktionieren.

Ein Versuchsaufbau, der ohne Änderung auskommt, ist die Aufforderung einer Person mittels eines Computerprogramms zur schnellstmöglichen Bestätigung einer bestimmten Taste an der Fernsteuerung zu bestimmten Zeitpunkten. Im Hintergrund wird durch das Computerprogramm die Zeit zwischen der Aufforderung und dem Zeitpunkt des Eingabeereignisses gemessen. Dieses Verfahren hat jedoch den Nachteil, dass in jeder Messung noch die Reaktionszeit der Person inbegriffen ist und diese in jedem Durchlauf unterschiedlich sein kann. Dadurch sind die Testergebnisse nicht repräsentativ, weshalb dieser Ansatz nicht weiter verfolgt wird.

Ein weiteres Verfahren, welches ohne Veränderungen an der Multikopterfernsteuerung möglich ist, ist eine angepasste Version des vorhergehenden Ansatzes. Dabei wird der Tastendruck von einer Person durch einen Tastendruck mittels eines Servomotors ausgetauscht. Der Servomotor kann dabei eigenständig durch das Computerprogramm angesteuert werden. Zur Befestigung des Servomotors an der Fernsteuerung muss zusätzlich eine Stützstruktur entwickelt werden, womit der Servomotor bei jedem Versuchsdurchlauf an der optimalen Position über dem Taster liegt. Zu sehen ist diese Stützstruktur mit dem Servomotor in Abbildung 26. Die Latenz kann hierbei bestimmt werden, indem zunächst der Zeitpunkt für den Befehl des Tastenloslassens vom Servomotor protokolliert wird. Darauffolgend wird der Zeitpunkt des Eingabeereignisses ermittelt. Die Differenz beider Zeitpunkte stellt dabei die Latenz dar. Die **USB**-Latenz beträgt in diesen Verfahren zirka 100 ms. Jedoch weicht die so bestimmte Latenz weit von den Ergebnissen der Arbeit, welche in Quelle [96] zu finden sind und realistische Werte bilden, ab. Da der Zeitpunkt des Tastenloslassens nur zu Beginn der Servomotorbewegung bestimmt werden kann und dadurch die Bewegungszeit des Servomotors in jeder Messung mit inbegriffen ist, kommt die oben genannte Abweichung zustande. Deshalb scheidet dieses Versuchsverfahren ebenso aus.



Abbildung 26: Stützstruktur für einen Versuchsaufbau zum Betätigen eines Fernsteuerungstasters mittels eines Servos

Für den final verwendeten Versuchsaufbau wird als Grundlage das Versuchsverfahren aus der Arbeit in Quelle [96] verwendet. Hierbei müssen Veränderungen an der Multikopterfernsteuerung durchgeführt werden. Die Betätigung des Tasters der Fernsteuerung findet mittels eines Optokopplers statt. Voraussetzung hierfür ist das Anlöten zweier Kabel am Fernsteuerungstaster.

Ein Optokoppler ist eine Elektronikkomponente, mit welcher Signale galvanisch getrennt übertragen werden können [97]. Das zu übertragende Signal wird dabei mittels einer LED – als Sendeelement – und einer Fotodiode – als Empfangselement – übertragen. Zu sehen ist das zugehörige Ersatzschaltbild eines Optokopplers in Abbildung 27.

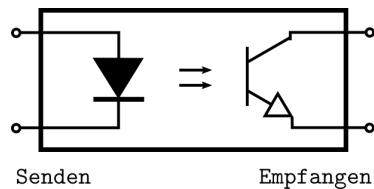


Abbildung 27: Ersatzschaltbild eines Optokopplers; abgewandelt von [98]

Für die Ausführung der Latenzmesssoftware wird der Einplatinencomputer Raspberry Pi Model B+ verwendet. Dieser bietet ansteuerbare GPIOs, womit die LED des Optokopplers geschaltet wird. Betrieben wird der Einplatinencomputer mit dem Betriebssystem *Raspbian GNU/Linux 11 (bullseye)* und dem Linux-Kernel Version 5.15.61+. Zur Auswertung der Eingabeereignisse im Linux-Kernel wird die Schnittstelle evdev, welche in Kapitel 3.7 beschrieben ist, verwendet. evdev kann sowohl für die Auswertung von BLE- als auch von USB-Eingabeereignisse verwendet werden. Als Latenz in diesem Versuchsaufbau wird die Zeit zwischen dem Deaktivieren der LED des Optokopplers und dem Auftreten des Eingabeereignisses im Kernel des Einplatinencomputers verwendet. Der zugehörige Versuchsschaltplan ist in Abbildung 28 zu sehen.

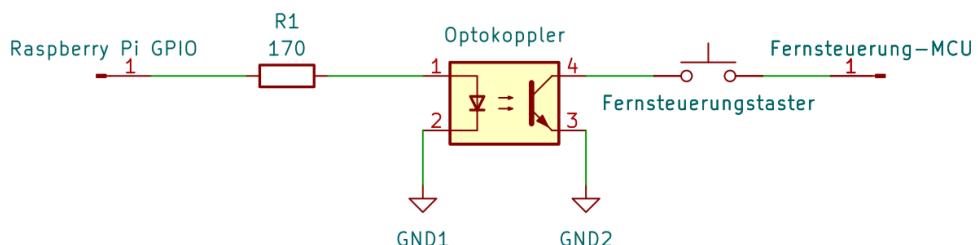


Abbildung 28: Schaltplan des Versuchsaufbaus zur Bestimmung der Latenz mittels eines Optokopplers; abgewandelt von [96], [99, S. 8, S. 12]

5.2.2 Auswertung

Sowohl für die Auswertung der **USB**-Latenz als auch für die Auswertung der **BLE**-Latenz erfolgten jeweils 5000 Versuchsdurchläufe. Die Versuchsergebnisse werden dabei als Schwarmplot dargestellt, bei dem jede Messung als eigenständiger Punkt aufgezeigt wird [96, S. 7]. Dadurch können die Versuchsergebnisse dieser Arbeit gut mit den Ergebnissen aus Quelle [96] verglichen werden, da dort die Ergebnisse im selben Format bereitgestellt werden.

USB-Latenz

In Abbildung 29 sind alle 5000 Durchläufe des Versuchsdurchlaufs als Schwarmplot dargestellt. Während des Versuchsdurchlaufs wurden alle 5000 Tastenbefehle an der Fernsteuerung durch den Einplatinencomputer als Eingabeereignis erkannt. Der Latenzmittelwert aller Durchläufe liegt bei 9,16 ms und die Standardabweichung bei 2,26 ms. Somit gehört die Latenz der **USB**-Verbindung der Multikopterfernsteuerung zu den 50 % der getesteten Eingabegeräten aus Quelle [96] mit einer geringeren Latenz.

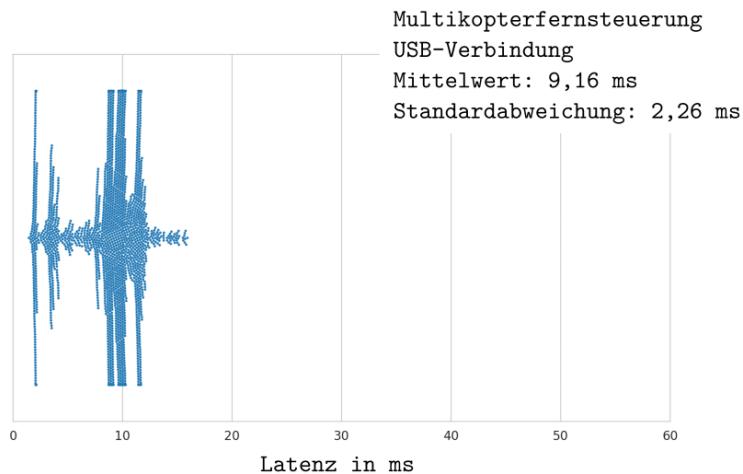


Abbildung 29: Latenz aller Versuchsdurchläufe mittels **USB**-Verbindung

BLE-Latenz

Von allen 5000 Versuchsdurchläufen mittels der **BLE**-Verbindung konnten am Einplatinencomputer sieben Eingabeereignisse nicht erkannt werden. Von allen erkannten Durchläufen lag dabei der Latenzmittelwert bei 52,22 ms und die Standardabweichung bei 97,32 ms. Die große Standardabweichung resultiert aus der großen Spreizung im Versuchsergebnisbereich. Wie in Abbildung 30 zu sehen ist liegen 267 Messergebnisse außerhalb von 100 ms. Werden jedoch die Messergebnisse größer 100 ms herausgerechnet, liegt der Latenzmittelwert bei 30,00 ms und die Standardabweichung bei 7,68 ms, wie in Abbildung 31 zu sehen ist. Im nachfolgenden Kapitel ist beschrieben, weshalb Messergebnisse größer 100 ms in der Praxis vernachlässigt werden können. Jedoch gehört in beiden Fällen die **BLE**-Verbindung des Fernsteuerungserweiterungsmoduls im Vergleich zu den Eingabegeräten der Quelle [96] zu den Eingabegeräten mit der größten Latenz.

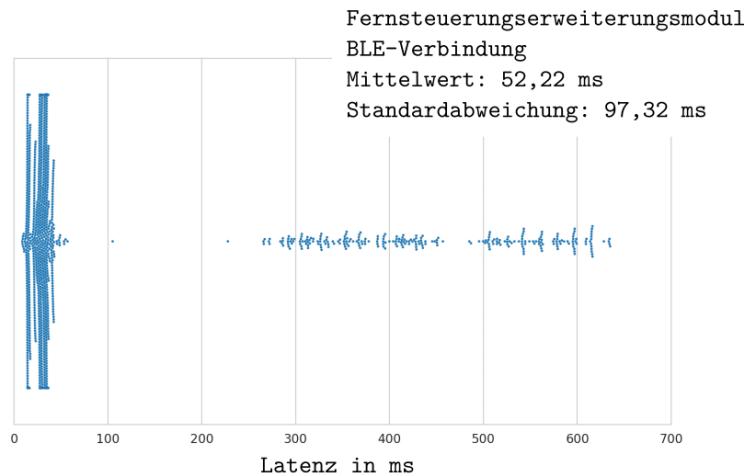


Abbildung 30: Latenz aller Versuchsdurchläufe mittels BLE-Verbindung

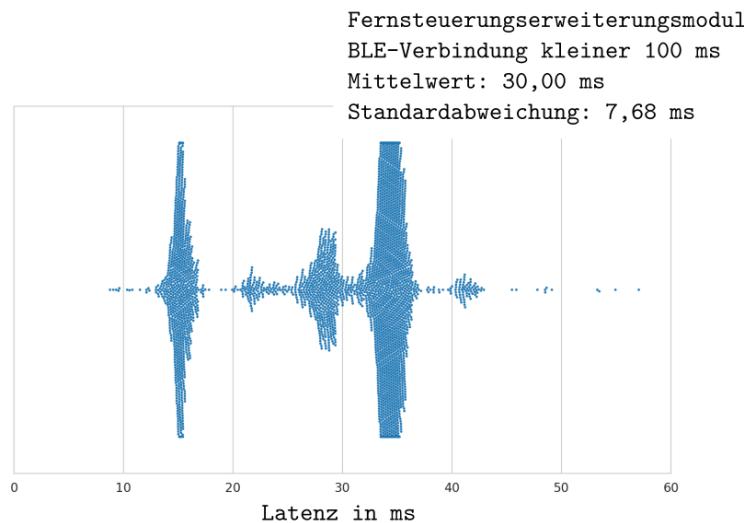


Abbildung 31: Latenz aller Versuchsdurchläufe die kleiner 100 ms sind mittels BLE-Verbindung

Ergebniserläuterung

Sowohl im **USB**- als auch im **BLE**-Schwarmplot gibt es bestimmte Regionen, an denen sich die Messergebnisse häufen. Dies liegt bei der **USB**-Verbindung daran, dass Eingabedaten durch das Endgerät in bestimmten Intervallen abgefragt werden und keine Daten ausgehend vom Eingabegerät versendet werden können [100, S. 48f., S. 277ff.], [96, S. 5]. Unter einer **BLE**-Verbindung ist dies nicht der Fall, da Werteänderungen eines Eingabegerätes an abonnierte Endgeräte durch das Eingabegerät selbstständig verschickt werden können [16, S. 1516]. Die größere Latenz durch das Erweiterungsmodul mit der **BLE**-Verbindung resultiert aus drei Fakten. Erstens müssen mehrfache Umwandlungen zwischen unterschiedlichen Protokollen stattfinden bis die Fernsteuerungsbefehle am Endgerät ankommen. Dazu müssen zunächst die Steuerungsdaten in der Fernsteuerung in CRSF-Pakete umgewandelt werden. Darauf folgend müssen diese Pakete im Erweiterungsmodul in BLE-Pakete umgewandelt werden, bevor diese vom Endgerät schlussendlich ausgewertet werden können. Hingegen müssen bei der **USB**-Übertragung nur die Steuerungsdaten in ein **USB**-Paket umgewandelt werden. Zweitens enthält

nicht jedes CSRF-Paket, welches über den Modulschacht verschickt wird, Steuerungsdaten, sondern wie in Kapitel 3.3.2 beschrieben auch weitere Statusinformationen. Dadurch entsteht in diesem Schritt der Datenübertragung eine Latenz, welche ein Vielfaches von 6 ms ist. Drittens kann das **BLE**-Übertragungsintervall zwischen dem Erweiterungsmodul und dem Endgerät dynamisch verhandelt werden. Die Anfrage zur Änderung der Verbindungsparameter wird an die Gegenstelle geschickt und diese erwidert oder lehnt die Änderung ab. Hierbei liegt das Intervall für den minimalen Datenaustausch bei 7,6 ms. In der Erweiterungsmodulsoftware ist dieser minimale Intervallwert auf 11,25 ms gelegt, da dies der Grenzwert bei Apple-Produkten ist, welcher aber nicht von jedem Endgerät angenommen werden muss [19, S. 188]. [101]

In der Praxis sollten Latenzen über 100 ms und nicht versendete Eingabeereignisse mittels des **BLE**-Erweiterungsmoduls seltener auftreten als im vorhandenen Versuchsaufbau. Im Versuchsaufbau wird nur immer eine spezielle Taste der Multikopterfernsteuerung betätigt, was jedoch nicht in der Realität vorkommt. Während der Verwendung des Erweiterungsmoduls durch einen Multikopterpiloten müssen nämlich ständig mehrere Eingabeereignisse nahezu simultan stattfinden, um den Multikopter in der gewünschten Flugbahn zu manövrieren. Daraus folgernd wird sehr häufig veranlasst, dass ein **BLE**-Paket verschickt werden muss, welches alle aktuellen Eingabedaten der Multikopterfernsteuerung enthält.

Durch die zusätzliche Latenz von 20,84 ms (Optimalfall) der **BLE**-Verbindung im Vergleich zur **USB**-Verbindung würde eine zusätzliche Distanz von ungefähr 0,75 m zurückgelegt werden, wenn eine Multikoptergeschwindigkeit von 130 km/h angenommen wird [102], [103], [104]. Hierbei muss jedoch mit einbezogen werden, dass es sich zwischen zwei gesendeten Eingabesignalen nicht um binäre Wertänderungen, sondern meist um kontinuierliche minimale Anpassungen an den Steuernüppeln handelt, wodurch es nur zu relativen Änderungen in der Flugbahn kommt. Zusätzlich finden große Änderungen der Steuernüppelpositionen meist nicht bei hohen Geschwindigkeiten statt. Auch können sich Multikopterpiloten in gewisser Weise auf die vorhandene Latenz des Eingabegeräts anpassen und dadurch die gewünschten Steuersignale nach kurzer Eingewöhnungsphase früher einleiten.

Zuletzt ist noch festzuhalten, dass die Testperson (Hobbydrohnenpilot) keinen merkbaren Unterschied zwischen der Steuerung des Simulators mittels **USB**- oder **BLE**-Verbindung feststellen konnte.

6 Rekapitulation und Ausblick

6.1 Rekapitulation

Die für diese Arbeit notwendigen Aufgaben wurden in vier Bereiche aufgeteilt. Im ersten Teilbereich der Softwareentwicklung wurde die nötige Kommunikation zwischen der Multikopterfernsteuerung und dem Erweiterungsmodul implementiert. Als Kommunikationsprotokoll wird CRSF verwendet, da dies die höchste Übertragungsrate bei möglichst kleinen Datenpaketen von allen vorhandenen Kommunikationsprotokollen der Fernsteuerung bietet. Ebenso wurde die Kommunikation zwischen dem Erweiterungsmodul und den Endgeräten entwickelt. Als Kommunikationsprotokoll wird hierfür **BLE** verwendet, indem die Fernsteuerungsdaten mittels **HOGP** verpackt werden. Damit ein Endanwender mit dem Erweiterungsmodul interagieren kann, wurden Eingabemöglichkeiten durch Taster hinzugefügt. Für die Ausgabe von Statusinformationen wird ein **OLED**-Display verwendet, welches für den Datenaustausch **I²C** verwendet. Der zweite Teilbereich befasste sich mit dem Entwurf von Platinen für das Erweiterungsmodul. Dies war nötig, damit das Erweiterungsmodul kompakt, mobil und benutzerfreundlich verwendet werden kann. Dafür sind final drei Platinen erstellt worden, welche alle Elektronikkomponenten enthalten, wie beispielsweise den ESP32-Mikrocontroller, das **OLED**-Display, mehrere Eingabetaster, eine Spannungsregulierung und eine Buchse für die Verbindung mit der Multikopterfernsteuerung. Der dritte Teilbereich umfasste die Entwicklung eines Gehäuses, um die entworfenen Platinen fest und kompakt im Modulschacht (Typ: Lite) der Fernsteuerung befestigen zu können. Hierbei wurde darauf geachtet, dass das Gehäuse mittels eines **FDM**-3D-Druckers gedruckt werden kann und eine möglichst geringe Nachbearbeitung benötigt. Der letzte Teilbereich befasste sich mit der Validierung des Funktionsumfangs und dem Latenzvergleich zwischen dem Erweiterungsmodul und der internen **USB**-Schnittstelle der Multikopterfernsteuerung. In der Validierung konnte festgestellt werden, dass größtenteils die ursprünglichen Anforderungen umgesetzt werden konnten. Nur die Verwendung des Erweiterungsmoduls unter iOS- und iPadOS-Geräten konnte nicht umgesetzt werden. Rein technisch ist diese Funktion umgesetzt, was durch die internen **HCI**-Daten des Endgeräts nachgewiesen werden kann. Es stellte sich jedoch heraus, dass das Erweiterungsmodul zusätzlich durch das **MFi**-Programm von Apple zertifiziert werden müsste, was einen großen Kosten- und Arbeitsaufwand mit sich bringt. Im Latenzvergleich zwischen der internen **USB**-Verbindung der Fernsteuerung und der **BLE**-Verbindung des Erweiterungsmoduls konnte festgestellt werden, dass die Latenz der **BLE**-Verbindung im Durchschnitt 20,84 ms länger ist (Optimalfall). Im Optimalfall beträgt die durchschnittliche Latenz der **BLE**-Verbindung 30 ms und hat eine Standardabweichung von 7,68 ms. Zugehörig ist in Kapitel 5.2.2 beschrieben, wie der Optimalfall der **BLE**-Verbindung definiert ist.

Hervorzuheben ist, dass die Latenz des **BLE**-Erweiterungsmoduls wie beschrieben, im Vergleich zu der vorhandenen **USB**-Verbindung, angestiegen ist. Ebenso werden nur die nötigsten **GAP**-Events durch das Erweiterungsmodul ausgewertet, wodurch gegebenenfalls hilfreiche Informationen dem Endnutzer vorenthalten werden. Auch fallen die Produktionskosten des Erweiterungsmoduls für die Eigenverwendung zu hoch aus (ungefähr 180 €). Alternativ kann

zur Produktion der Erweiterungsplatinen und dem 3D-Druck eines Gehäuses das Erweiterungsmodul auch mit einem ESP32-Entwicklungsboard und wenigen weiteren Elektronikkomponenten nachgebaut werden. Hierdurch können die Kosten auf ungefähr 50 € gesenkt werden.

Zusammenfassend ist mit dem entwickelten Erweiterungsmodul nun möglich modellunabhängig Multikopterfernsteuerungen mittels [BLE](#) mit einem Endgerät zu verbinden. Die Software, der Platinenentwurf sowie das Gehäusedesign werden unter der Open Source Lizenz *Apache-2.0* öffentlich zugänglich bereitgestellt. Einschränkungen hierbei sind, dass die Multikopterfernsteuerung das CSRF-Protokoll für die Übertragung am Modulschacht unterstützen muss und dass das Betriebssystem des Endgeräts Windows, Linux oder Android sein muss.

6.2 Ausblick

Aufbauend auf den Ergebnissen dieser Arbeit können weitere Anpassungen in den Bereichen Platinenentwurf, Gehäuseentwurf und Softwareentwicklung durchgeführt werden.

Im Bereich des Platinenentwurfs können Anpassungen erfolgen, um die Platinen kleiner und kompakter zu gestalten. Dafür kann zum einen die Verbindungsplatine zwischen der Multikopterfernsteuerung und dem Erweiterungsmodul in die Hauptplatine des Erweiterungsmoduls integriert werden. Zum anderen kann die Logik für die Programmierung des ESP32-Mikrocontrollers entfallen, da diese Logik nur selten benötigt wird und der Start des Mikrocontrollers in den Programmiermodus auch manuell durchgeführt werden kann (siehe Kapitel [4.2](#)). Zusätzlich kann die Platinengröße verringert werden, indem die benötigten Elektronikkomponenten beidseitig auf den Platinen angebracht werden.

Im Bereich des Gehäuseentwurfs kann einerseits ein Adapter konstruiert werden, um das Erweiterungsmodul (Typ: Lite) für Modulschächte mit einer Standardgröße vorzubereiten. Zusätzlich wird hierfür eine Adapterplatine benötigt, welche das Buchsenlayout der verschiedenen Modulschachtarten adaptiert. Andererseits kann durch die erwähnten Platinenanpassungen das Gehäuse kompakter gestaltet werden, wodurch das [OLED](#)-Display für eine bessere Lesbarkeit näher an der Gehäuseaußenkante angebracht werden kann.

Im Bereich der Softwareentwicklung kann die Auswertung der verfügbaren [GAP](#)-Events implementiert werden, um Endanwendern des Erweiterungsmoduls weiterführende Informationen anzubieten. Ebenso können weitere Kommunikationsprotokolle zwischen der Multikopterfernsteuerung und dem Erweiterungsmodul implementiert werden, um weitere Fernsteuerungsmodelle zu unterstützen. Dabei ist die Implementierung von digitalen Kommunikationsprotokollen ohne Hardwareanpassungen möglich. Für die Implementierung von analogen Kommunikationsprotokollen muss der analoge Pin des Modulschachts mit dem ESP32-Mikrocontroller verbunden werden.

Literatur

- [1] *Drones by the Numbers*, https://www.faa.gov/uas/resources/by_the_numbers/, Aufgerufen am: 16. November 2022, Federal Aviation Administration.
- [2] *Commercial Drones are Taking Off*, <https://www.statista.com/chart/17201/commercial-drones-projected-growth/>, Aufgerufen am: 16. November 2022, Katharina Buchholz.
- [3] *Drones: A Tech Growth Market in the United States*, <https://www.statista.com/chart/9525/sales-of-consumer-drones-to-dealers-in-the-us/>, Aufgerufen am: 16. November 2022, Dyfed Loesche.
- [4] *The Economic Impact Of The Commercial Drone Sector*, <https://www.statista.com/chart/3898/the-economic-impact-of-the-commercial-drone-sector/>, Aufgerufen am: 16. November 2022, Niall McCarthy.
- [5] *DJI Mavic 3 Classic*, <https://www.dji.com/de/mavic-3-classic>, Aufgerufen am: 16. November 2022, DJI.
- [6] *Learn the Different FPV Drone Flight Modes & How to Set Up*, <https://wedio.com/fpv-drone-flight-modes/>, Aufgerufen am: 16. November 2022, Wedio.
- [7] *Apple introduces next-generation iPad Pro, supercharged by the M2 chip*, <https://www.apple.com/newsroom/2022/10/apple-introduces-next-generation-ipad-pro-supercharged-by-the-m2-chip/>, Aufgerufen am: 16. November 2022, Apple Inc.
- [8] *Joystick emulation*, https://doc.open-tx.org/manual-for-opentx-2-2/advanced-features/radio_joystick, Aufgerufen am: 16. November 2022, OpenTX.
- [9] *Taranis IO ports*, <https://github.com/opentx/opentx/wiki/Taranis-IO-ports#external-module-bay-pinout>, Aufgerufen am: 16. November 2022, OpenTX.
- [10] *HID Joystick Support*, <https://github.com/betaflight/betaflight/wiki/HID-Joystick-Support>, Aufgerufen am: 16. November 2022, Betaflight.
- [11] *Orqa FPV.JR Bluetooth*, <https://github.com/betaflight/betaflight/wiki/HID-Joystick-Support>, Aufgerufen am: 16. November 2022, Orqa.
- [12] *Welcome to OpenTX*, <https://www.open-tx.org/>, Aufgerufen am: 16. November 2022, OpenTX.
- [13] *Device Class Definition for Human Interface Devices (HID), Firmware Specification*, Version 1.11, USB Implementers' Forum, Mai 2001.
- [14] *HID Usage Tables for Universal Serial Bus (USB)*, Version 1.3, USB Implementers' Forum, 2002.
- [15] F. Zhao, *Tutorial about USB HID Report Descriptors*, <https://eleccelerator.com/tutorial-about-usb-hid-report-descriptors/>, Aufgerufen am: 15. Oktober 2022.

- [16] *Bluetooth Core Specification*, Revision v5.3, Bluetooth SIG, 2021.
- [17] *UG103.14: Bluetooth LE Fundamentals*, Revision 0.7, SILICON LABS.
- [18] *MFi Program, Frequently Asked Questions*, <https://mfi.apple.com/en/faqs.html>, Aufgerufen am: 05. Oktober 2022, Apple Inc.
- [19] *Accessory Design Guidelines for Apple Devices*, Release R18, Apple Inc., 2022.
- [20] *HID OVER GATT PROFILE SPECIFICATION*, Revision v10r00, Bluetooth SIG, Dez. 2011.
- [21] *HID SERVICE SPECIFICATION*, Revision v10r00, Bluetooth SIG, Dez. 2011.
- [22] *BATTERY SERVICE SPECIFICATION*, Revision v10r00, Bluetooth SIG, Dez. 2011.
- [23] *DEVICE INFORMATION SERVICE*, Revision v11r00, Bluetooth SIG, Dez. 2011.
- [24] *SCAN PARAMETERS PROFILE SPECIFICATION*, Revision v10r00, Bluetooth SIG, Dez. 2011.
- [25] *Bluetooth API*, <https://docs.espressif.com/projects/esp-idf/en/latest/esp32/api-reference/bluetooth/index.html>, Aufgerufen am: 16. November 2022, Espressif Systems (Shanghai) Co., Ltd.
- [26] *esp-idf/components/bt/host/bluedroid/main/bte_main.c*, https://github.com/espressif/esp-idf/blob/ac99c0ad6ba783e99d21fe142fc610001dc93457/components/bt/host/bluedroid/main/bte_main.c, Aufgerufen am: 16. November 2022, Espressif.
- [27] J. Edge, *Returning BlueZ to Android*, <https://lwn.net/Articles/597293/>, Aufgerufen am: 16. November 2022.
- [28] *Fluoride Bluetooth stack*, <https://cs.android.com/android/platform/superproject/+/master:packages/modules/Bluetooth/>, Aufgerufen am: 16. November 2022, Google.
- [29] Anchao, *Fluoride Bluetooth stack*, <https://github.com/anchao/fluoride>, Aufgerufen am: 16. November 2022.
- [30] *BLE User Guide*, <https://mynewt.apache.org/latest/network/>, Aufgerufen am: 16. November 2022, Apache.
- [31] Apache mynewt, <https://github.com/apache/mynewt-nimble/blob/b7c1dd7a62dab4de17984f382e8ee101c5361c7d/README.md>, Aufgerufen am: 16. November 2022, Apache.
- [32] O. Liang, *RC Protocols Explained: SBUS, CRSF, PWM, FPort and More*, <https://oscarliang.com/rc-protocols/>, Aufgerufen am: 22. Oktober 2022.
- [33] *R9M*, <https://www.frsky-rc.com/product/r9m/>, Aufgerufen am: 22. Oktober 2022, FrSky.
- [34] *Model Setup*, https://doc.open-tx.org/manual-for-opentx-2-2/software-overview/model_menus/model_setup, Aufgerufen am: 22. Oktober 2022, OpenTX.
- [35] *FAQ*, <https://doc.open-tx.org/manual-for-opentx-2-2/faq>, Aufgerufen am: 22. Oktober 2022, OpenTX.
- [36] U. Horn und H. Schneider, *PPM*, <https://wiki.rc-network.de/wiki/PPM>, Aufgerufen am: 22. Oktober 2022.

- [37] *opentx/radio/src/pulses/ppm.cpp*, <https://github.com/opentx/opentx/blob/d67d1aa0c09d2f485c3ef7ca8c4fb1e9214a2ee7/radio/src/pulses/ppm.cpp>, Aufgerufen am: 22. Oktober 2022, OpenTX.
- [38] *cleanflight/src/main/rx/crsf.c*, <https://github.com/cleanflight/cleanflight/blob/acc56ce09dc4cf67dd6712d7c228352659133ce3/src/main/rx/crsf.c#L74>, Aufgerufen am: 22. Oktober 2022, Cleanflight.
- [39] *cleanflight/src/main/rx/crsf_protocol.h*, https://github.com/cleanflight/cleanflight/blob/acc56ce09dc4cf67dd6712d7c228352659133ce3/src/main/rx/crsf_protocol.h, Aufgerufen am: 22. Oktober 2022, Cleanflight.
- [40] *Protocol_decoder:sbus_futaba*, https://sigrok.org/wiki/Protocol_decoder:Sbus_futaba, Aufgerufen am: 22. Oktober 2022, sigrok.
- [41] *cleanflight/src/main/common/crc.c*, <https://github.com/cleanflight/cleanflight/blob/acc56ce09dc4cf67dd6712d7c228352659133ce3/src/main/common/crc.c#L67>, Aufgerufen am: 22. Oktober 2022, Cleanflight.
- [42] *sbus/README.md*, <https://github.com/bolderflight/sbus/blob/61a9d25eb964b9a75cca51ce047715570b14cac8/README.md>, Aufgerufen am: 22. Oktober 2022, Bolder Flight.
- [43] P. Langer, *DIY-Multiprotocol-TX-Module/docs/Transmitters.md*, <https://github.com/pascallanger/DIY-Multiprotocol-TX-Module/blob/75c9fb40a7eeafbd7716ca12373936706017be05/docs/Transmitters.md>, Aufgerufen am: 22. Oktober 2022.
- [44] P. Langer, *DIY-Multiprotocol-TX-Module/Multiprotocol/Multiprotocol.h*, <https://github.com/pascallanger/DIY-Multiprotocol-TX-Module/blob/75c9fb40a7eeafbd7716ca12373936706017be05/Multiprotocol/Multiprotocol.h#L834>, Aufgerufen am: 22. Oktober 2022.
- [45] *Modules*, <https://www.espressif.com/en/products/modules>, Aufgerufen am: 14. Januar 2023, Espressif Systems.
- [46] *Development Boards*, <https://www.espressif.com/en/products/devkits>, Aufgerufen am: 14. Januar 2023, Espressif Systems.
- [47] *SoCs*, <https://www.espressif.com/en/products/socs>, Aufgerufen am: 14. Januar 2023, Espressif Systems.
- [48] *Get Started*, <https://docs.espressif.com/projects/esp-idf/en/latest/esp32/get-started/index.html>, Aufgerufen am: 14. Januar 2023, Espressif Systems (Shanghai) Co., Ltd.
- [49] *ESP32, Technical Reference Manual*, Version 4.8, Espressif Systems, 2022.
- [50] *What Needs FCC Approval?* <https://compliancetesting.com/what-needs-fcc-approval/>, Aufgerufen am: 14. Januar 2023, Compliance Testing.
- [51] *Certificates*, <https://www.espressif.com/en/support/documents/certificates>, Aufgerufen am: 14. Januar 2023, Espressif Systems.
- [52] *Espressif IoT Development Framework*, <https://github.com/espressif/esp-idf>, Aufgerufen am: 14. Januar 2023, Espressif Systems.

- [53] *CE marking*, https://europa.eu/youreurope/business/product-requirement-s/labels-markings/ce-marking/index_en.htm, Aufgerufen am: 14. Januar 2023, European Union.
- [54] *Radio Equipment Directive (RED)*, https://single-market-economy.ec.europa.eu/sectors/electrical-and-electronic-engineering-industries-eei/radio-equipment-directive-red_en, Aufgerufen am: 14. Januar 2023, European Comission.
- [55] *RICHTLINIE 2014/53/EU DES EUROPÄISCHEN PARLAMENTS UND DES RATES vom 16. April 2014 über die Harmonisierung der Rechtsvorschriften der Mitgliedstaaten über die Bereitstellung von Funkanlagen auf dem Markt und zur Aufhebung der Richtlinie 1999/5/EG*, Europäischen Union.
- [56] H. Naumann, *GSM / NB-IoT antenna and radio certification*, <https://www.gsm-modem.de/M2M/m2m-components/gsm-nb-iot-antenna-radio-certification-ce-red-fcc/>, Aufgerufen am: 14. Januar 2023.
- [57] R. Barry, *Mastering the FreeRTOS Real Time Kernel, a Hands-On Tutorial Guide*, 2016.
- [58] *What is An RTOS?* <https://www.freertos.org/about-RTOS.html>, Aufgerufen am: 16. Januar 2023, Real Time Engineers Ltd.
- [59] *License Details*, <https://www.freertos.org/a00114.html>, Aufgerufen am: 16. Januar 2023, Real Time Engineers Ltd.
- [60] *The FreeRTOS Kernel*, <https://www.freertos.org/RTOS.html>, Aufgerufen am: 16. Januar 2023, Real Time Engineers Ltd.
- [61] *Source Organization*, <https://www.freertos.org/a00017.html>, Aufgerufen am: 16. Januar 2023, Real Time Engineers Ltd.
- [62] *FAQ - Scheduling*, <https://www.freertos.org/FAQSched.html>, Aufgerufen am: 16. Januar 2023, Real Time Engineers Ltd.
- [63] *FreeRTOS scheduling*, <https://www.freertos.org/single-core-amp-smp-rtos-scheduling.html>, Aufgerufen am: 16. Januar 2023, Real Time Engineers Ltd.
- [64] *The RTOS Tick*, <https://www.freertos.org/implementation/a00011.html>, Aufgerufen am: 16. Januar 2023, Real Time Engineers Ltd.
- [65] *Software Timers*, <https://www.freertos.org/RTOS-software-timer.html>, Aufgerufen am: 16. Januar 2023, Real Time Engineers Ltd.
- [66] *FreeRTOS Queues*, <https://www.freertos.org/Embedded-RTOS-Queues.html>, Aufgerufen am: 16. Januar 2023, Real Time Engineers Ltd.
- [67] *ESP-IDF FreeRTOS (SMP)*, <https://docs.espressif.com/projects/esp-idf/en/latest/esp32/api-guides/freertos-smp.html>, Aufgerufen am: 16. Januar 2023, Espressif Systems (Shanghai Co., Ltd.)
- [68] *FreeRTOS*, <https://docs.espressif.com/projects/esp-idf/en/latest/esp32/api-reference/system/freertos.html>, Aufgerufen am: 16. Januar 2023, Espressif Systems (Shanghai Co., Ltd.)

- [69] *Inter-Processor Call*, <https://docs.espressif.com/projects/esp-idf/en/latest/esp32/api-reference/system/ipc.html>, Aufgerufen am: 16. Januar 2023, Espressif Systems (Shanghai Co., Ltd.)
- [70] *Raster, Vector, TrueType, and OpenType Fonts*, <https://learn.microsoft.com/en-us/windows/win32/gdi/raster--vector--truetype--and-opentype-fonts>, Aufgerufen am: 15. Januar 2023, Microsoft.
- [71] J. Sanson, *Custom Fonts for Microcontrollers*, <https://jared.geek.nz/2014/jan/custom-fonts-for-microcontrollers>, Aufgerufen am: 15. Januar 2023.
- [72] I. Strizver, *A Brief History of Digital Type*, <https://www.fonts.com/content/learning/fyti/using-type-tools/digital-format>, Aufgerufen am: 15. Januar 2023.
- [73] A. Hershey, *Calligraphy for Computers*, U.S. Naval Weapons Laboratory, Dahlgren, Virginia, Aug. 1967.
- [74] *TrueType Fundamentals*, <https://learn.microsoft.com/en-us/typography/opentype/spec/ttch01>, Aufgerufen am: 15. Januar 2023, Microsoft.
- [75] V. Pavlik, *Linux Input drivers v1.0*, <https://www.kernel.org/doc/Documentation/input/input.txt>, Aufgerufen am: 15. Januar 2023.
- [76] R. H. Espinosa, *The Linux Input Documentation »Linux Input Subsystem userspace API »6. Linux Joystick support »6.6. Programming Interface*, <https://www.kernel.org/doc/html/v4.17/input/joydev/joystick-api.html?highlight=joystick%20api>, Aufgerufen am: 15. Januar 2023.
- [77] V. Pavlik, *Docs »The Linux Input Documentation »Linux Input Subsystem userspace API »1. Introduction*, <https://www.kernel.org/doc/html/v4.17/input/input.html>, Aufgerufen am: 15. Januar 2023.
- [78] *linux/include/uapi/linux/input-event-codes.h*, <https://github.com/torvalds/linux/blob/master/include/uapi/linux/input-event-codes.h>, Aufgerufen am: 15. Januar 2023, Linux.
- [79] *7.1 Talking to Device Files (writes and IOCTLs)*, <https://tldp.org/LDP/lkmpg/2.4/html/x856.html>, Aufgerufen am: 15. Januar 2023, The Linux Documentation Project.
- [80] *libevdev Documentation*, <https://www.freedesktop.org/software/libevdev/doc/latest/index.html>, Aufgerufen am: 15. Januar 2023, freedesktop.org.
- [81] *libevdev*, <https://www.freedesktop.org/wiki/Software/libevdev/>, Aufgerufen am: 15. Januar 2023, freedesktop.org.
- [82] *ioctl based interface*, <https://docs.kernel.org/driver-api/ioctl.html>, Aufgerufen am: 15. Januar 2023, The Linux Kernel.
- [83] *ESP32 - WiFi-enabled microcontrollers from Espressif*, <https://www.reddit.com/r/esp32/>, Aufgerufen am: 15. Februar 2023, Reddit Inc.
- [84] *ESPRESSIF ESP32*, <https://www.esp32.com/>, Aufgerufen am: 15. Februar 2023, Espressif Systems (Shanghai Co., Ltd.)
- [85] *ESP32, Hardware Design Guidelines*, Version 3.3, Espressif Systems, 2022.

- [86] *Introduction to Human Interface Devices (HID)*, <https://learn.microsoft.com/en-us/windows-hardware/drivers/hid/>, Aufgerufen am: 24. Februar 2023, Microsoft.
- [87] *BLE Pairing and Bonding*, https://technotes.kynetics.com/2018/BLE_Pairing_and_bonding/, Aufgerufen am: 11. März 2023, Kynetics.
- [88] *Universal Asynchronous Receiver/Transmitter (UART)*, <https://docs.espressif.com/projects/esp-idf/en/latest/esp32/api-reference/peripherals/uart.html>, Aufgerufen am: 24. Februar 2023, Espressif Systems (Shanghai Co., Ltd.)
- [89] *SSD1306, Advance Information, 128 x 64 Dot Matrix, OLED/PLED Segment/Common Driver with Controller*, Rev 1.5, Solomon Systech Limited, 2010.
- [90] P. Seidel, *FrSky Taranis X-Lite Fernsteuerung*, <https://blog.seidel-philipp.de/frsky-taranis-x-lite-fernsteuerung/>, Aufgerufen am: 20. März 2023.
- [91] *Boot Mode Selection*, <https://docs.espressif.com/projects/esptool/en/latest/esp32/advanced-topics/boot-mode-selection.html>, Aufgerufen am: 20. März 2023, Espressif Systems (Shanghai Co., Ltd.)
- [92] *EMBED WITH ELLIOT: DEBOUNCE YOUR NOISY BUTTONS, PART I*, <https://hackaday.com/2015/12/09/embed-with-elliot-debounce-your-noisy-buttons-part-i/>, Aufgerufen am: 13. März 2023, Elliot Williams.
- [93] *About KiCad*, <https://www.kicad.org/about/kicad/>, Aufgerufen am: 11. März 2023, KiCad.
- [94] *About OpenSCAD*, <https://openscad.org/about.html>, Aufgerufen am: 11. März 2023, OpenSCAD.
- [95] societyofrobots, *clarification for iOS compatibility note #50*, <https://github.com/lemmingDev/ESP32-BLE-Gamepad/issues/50#issuecomment-862770124>, Aufgerufen am: 10. April 2023.
- [96] R. Wimmer, A. Schmid und F. Bockes, „On the Latency of USB-Connected Input Devices,” in *Proceedings of the 2019 CHI Conference on Human Factors in Computing Systems*, Ser. CHI ’19, Glasgow, Scotland Uk: Association for Computing Machinery, 2019, S. 1–12, ISBN: 9781450359702. DOI: [10.1145/3290605.3300650](https://doi.org/10.1145/3290605.3300650). Adresse: <https://doi.org/10.1145/3290605.3300650>.
- [97] E. Kompendium, *Optokoppler / Opto-Koppler*, <https://www.elektronik-kompendium.de/sites/bau/0411091.htm>, Aufgerufen am: 17. April 2023.
- [98] M. Harris, *Was ist ein Optokoppler und welcher ist für Ihr Signal geeignet?* <https://resources.altium.com/de/p/which-type-opto-isolator-right-your-signal>, Aufgerufen am: 17. April 2023.
- [99] *Datasheet LTV-817 / 827 / 847*, BNS-OD-C131/A4, LITE-ON TECHNOLOGY CORPORATION.
- [100] *Universal Serial Bus Specification*, Revision 2.0, Compaq Computer Corporation, Hewlett-Packard Company, Intel Corporation, Lucent Technologies Inc, Microsoft Corporation, NEC Corporation, Koninklijke Philips Electronics N.V., 2000.
- [101] T. Instruments, *Generic Access Profile (GAP)*, https://software-dl.ti.com/lprf/simplelink_cc2640r2_latest/docs/blestack/ble_user_guide/html/ble-stack-3.x/gap.html, Aufgerufen am: 18. April 2023.

- [102] D. Vergleich, *FPV-Drohnen: Renndrohnen, Drone Racing & FPV-Racer selber bauen*, <https://www.drohnen-vergleich.net/fpv-racing-drohnen/>, Aufgerufen am: 18. April 2023.
- [103] Drohnen, *DJI FPV: Was ist die maximale Geschwindigkeit?* <https://www.drohnen.de/35104/dji-fpv-geschwindigkeit/>, Aufgerufen am: 18. April 2023.
- [104] D. Rodman, *What is the Top Speed of a FPV Drone?* <https://dronejay.com/what-is-the-top-speed-of-a-fpv-drone>, Aufgerufen am: 18. April 2023.

Anhang

- A. Schaltpläne
- B. Explosionszeichnung des Gehäuses

A. Schaltpläne

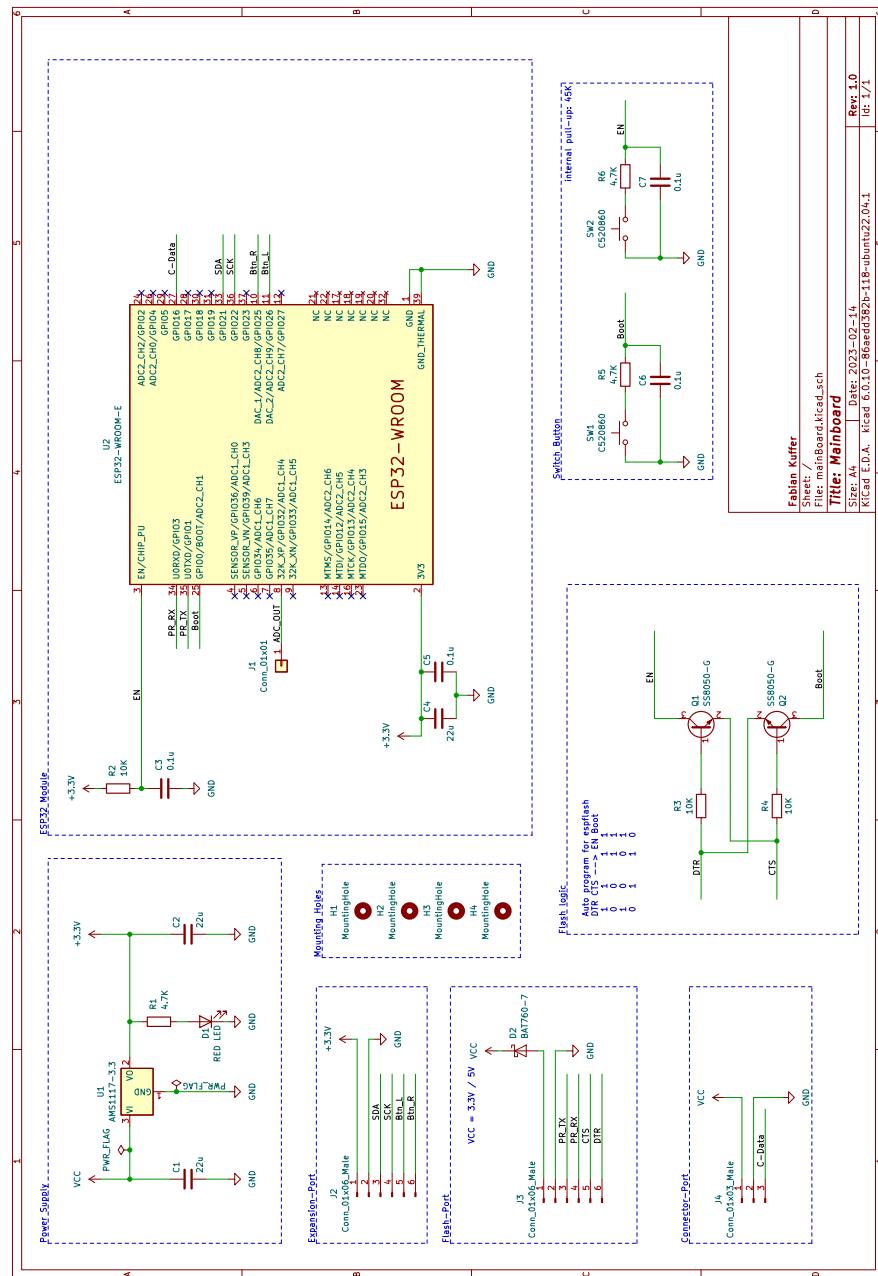


Abbildung 32: Schaltplan der Hauptplatine

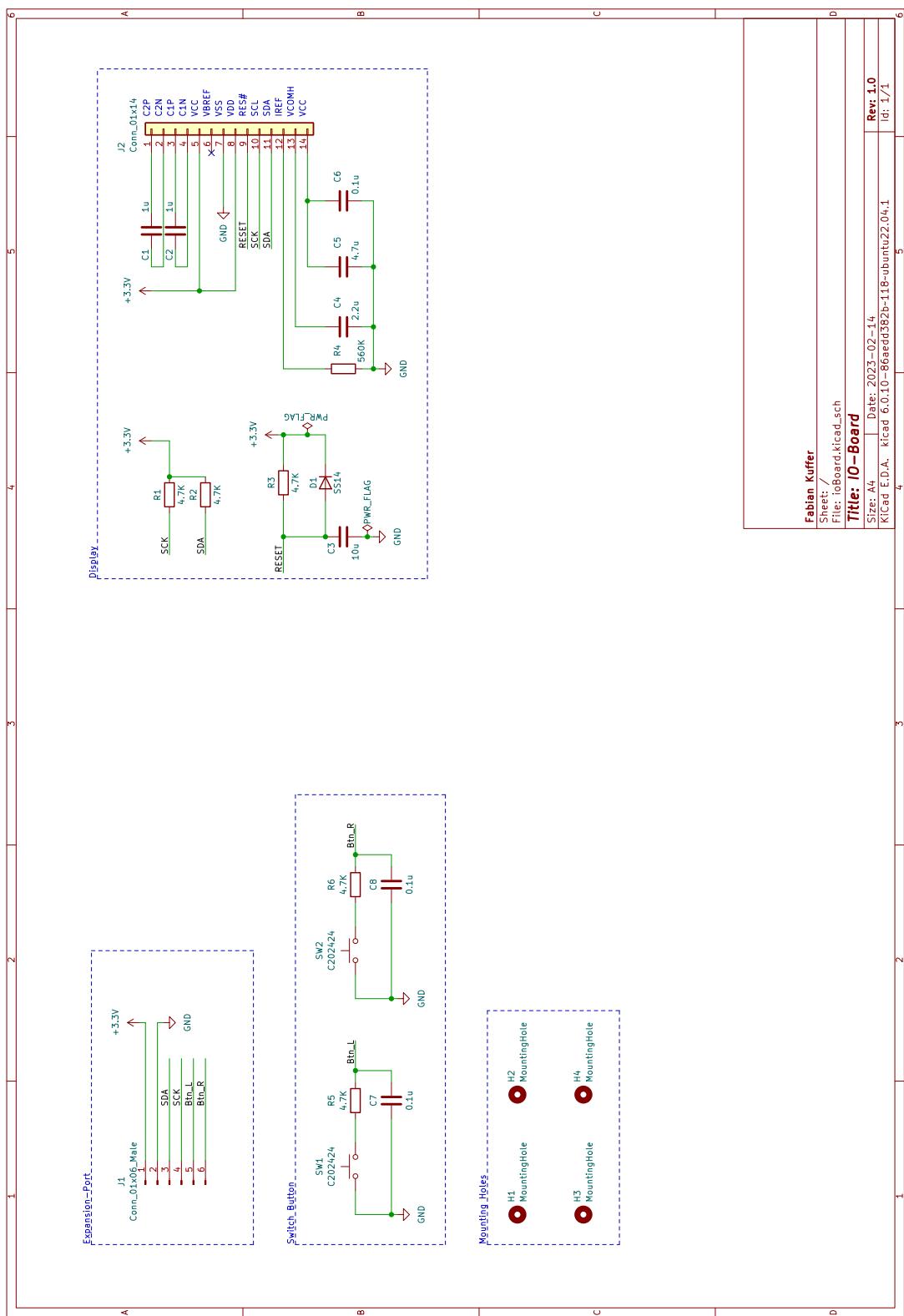


Abbildung 33: Schaltplan für Ein- und Ausgabekomponenten

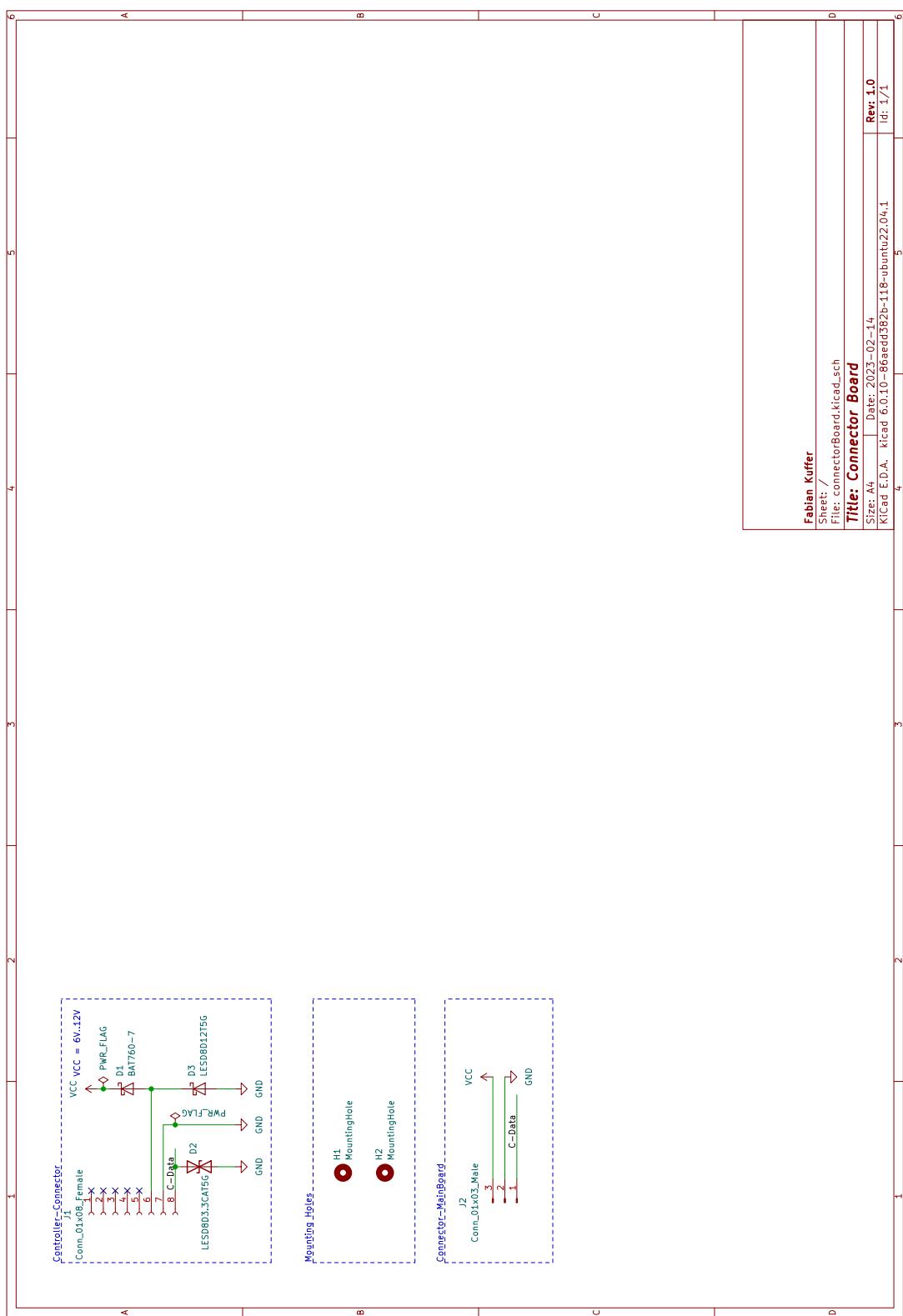


Abbildung 34: Schaltplan für die Verbindung zwischen Erweiterungsmodul und Multikopterfernsteuerung

B. Explosionszeichnung des Gehäuses

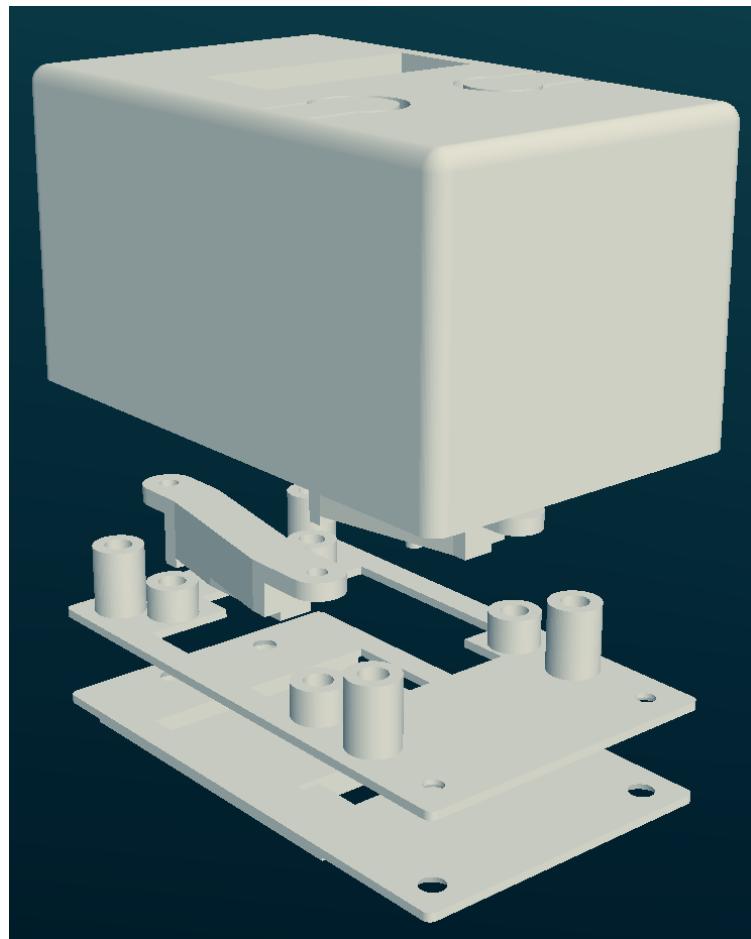


Abbildung 35: Explosionszeichnung mit allen Modellen des Gehäuses