

BLE HID Hardware-Erweiterungsmodul für Drohnenfernbedienungen

Studienarbeit

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

von

Fabian Kuffer

24. Februar 2023

Bearbeitungszeitraum
Matrikelnummer, Kurs
Betreuer

4. Oktober 2022 - 8. 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.

Stuttgart, 24. Februar 2023

Fabian Kuffer

Kurzfassung

TODO: Kurzfassung

Abstract

TODO: Abstract

Inhaltsverzeichnis

Abkürzungsverzeichnis	V
Abbildungsverzeichnis	VI
Tabellenverzeichnis	VII
Quellcodeverzeichnis	VIII
1 Einleitung	1
1.1 Motivation	2
1.2 Stand der Technik	2
2 Aufgabenstellung	3
2.1 Softwareentwicklung	3
2.2 Platinendesign	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 Mikrocontroller 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	29
4.1.5	Statusausgabe des Mikrocontrollers mittels eines OLED-Displays	30
4.1.6	Kombination aller Softwarekomponenten	30
4.2	Platinenentwurf	30
4.3	Gehäuseerstellung	30
5	Validierung und Gegenüberstellung	31
5.1	Validierung des Funktionsumfangs	31
5.2	Gegenüberstellung BLE-Modul und USB-Verbindung	31
6	Rekapitulation und Ausblick	32
	Literatur	33
	Anhang	39

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
ESP-IDF	Espressif IoT Development Framework
evdev	Event Device
FCC	Federal Communications Commission
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
IOCTL	input output Control
ISM	Industrial, Scientific and Medical
I²C	inter integrated circuit
L2CAP	Logical Link Control and Adaption Protocol
LL	Link Layer
MFi	Made for iPhone/iPad/iPad
PHY	Physical Layer
PPM	Puls-Positions-Modulation
RAM	Random-access memory
RED	Radio Equipment Directive
SAR	successive approximation
SDP	Service Discovery Protocol
SIG	Special Interest Group
SMP	Security Manager Protocol
UART	Universal Asynchronous Receiver Transmitter
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]	10
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 <i>U</i> spaltenweise in einem Array aus Bytes; abgewandelt von [71]	25
11	Umwandlung einer Vektor-Schriftart zur Darstellung an einem Monitor; abge- wandelt von [72]	26
12	Gegenüberstellung der Schriftartenspeicherverfahren	26

Tabellenverzeichnis

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

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]	27
4	C-Strukuraufbau der aufbereiteten Kanaldaten	29

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 Unterstützungsfunktionen 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 Quadrokopfern sind sogenannte Freestyle- beziehungsweise Rennquadrokopter. Diese sind im Gegensatz zu den Consumerquadrokopfern dazu ausgelegt möglichst leicht zu sein, um möglichst schnelle und beeindruckende Manöver machen zu können. Im Gegenzug wird auf die Unterstützungsfunktionen von Consumerquadrokopfern 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 Quadrokopfers 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 Quadrokopfers 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 Quadrokopfers 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 Quadrocopter-Simulatoren für die immer leistungsfähigeren mobilen Geräte bereitzustellen. Hierfür muss jedoch die Möglichkeit bestehen, die gewohnte Fernsteuerung der Quadrocopter 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 Quadrocoptern 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 Quadrocopter, 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 Anwendung 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 Platinendesign

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 Ausgabeelemente 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 Einstecken 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.]

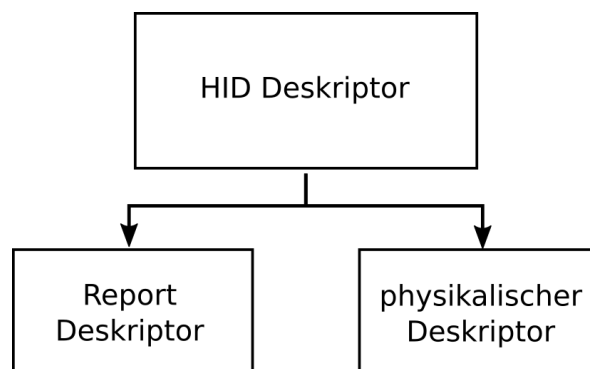


Abbildung 1: **HID** Deskriptorenhierarchie; abgewandelt von [13, S. 4]

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 255 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]

Beispielhafter Report Deskriptor:

Report Size (3)
Report Count (2)
Input
Report Size (5)
Input
Output

Erstellte Datenstruktur:

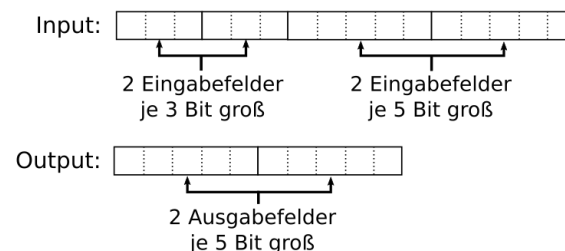


Abbildung 2: Beispielhafte Verwendung von Elementen, um eine Datenstruktur zu definieren; abgewandelt von [13, S. 24]

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 Einschaltdauer 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 lizenzfreien 2.4 GHz Industrial, Scientific and Medical (ISM)-Band von 2402 MHz bis 2480 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 da [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.].

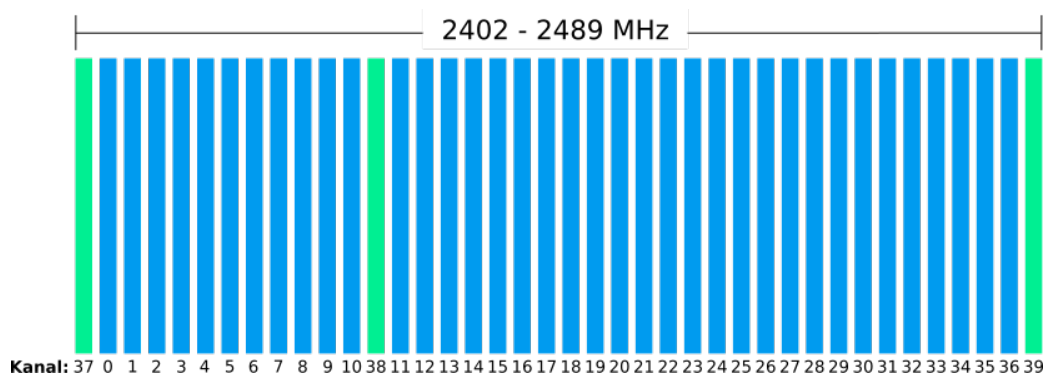


Abbildung 3: Frequenzband mit Kanälen von BLE; abgewandelt von [17, S. 4]

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 verschickt 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]

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

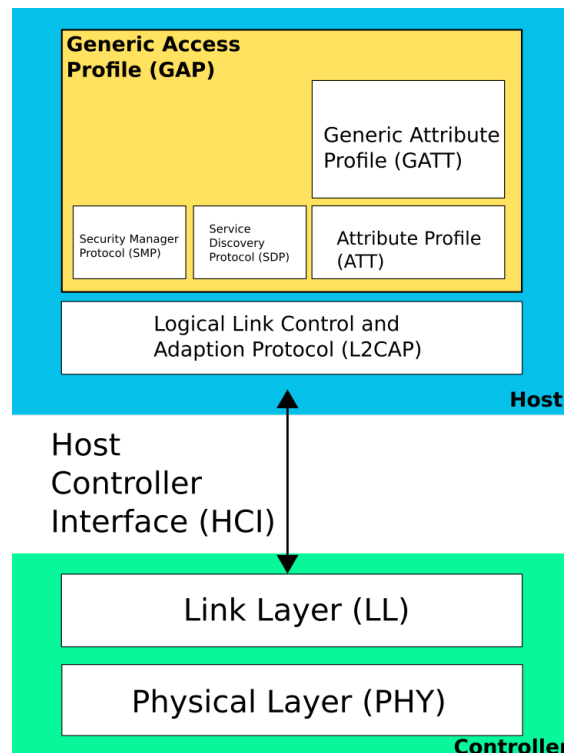


Abbildung 4: Benötigte Komponenten eines BLE-Geräts; abgewandelt von [16, S. 203, S. 1245]

Scheduler, welcher Zeitschlitze 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, 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, welche 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 Gerätenamen. Dieser Name ist eine benutzerfreundliche Zeichenfolge die an entfernten Geräten angezeigt wird. Der Gerätenamen 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 stattfinden. [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 Verbindungsaufbau 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 Verbindungsaufbau und der dazugehörige Schlüsselaustausch für die Identifizierung der Geräte erfolgt in 3 Phasen. In der ersten Phase wird ein Verbindungsaufbau 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

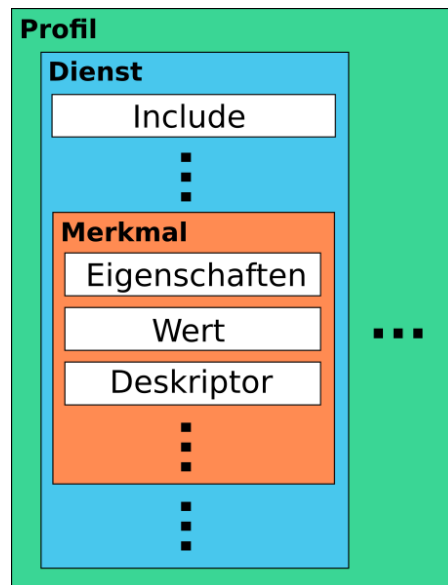


Abbildung 5: GATT Hierarchie; abgewandelt von [16, S. 281]

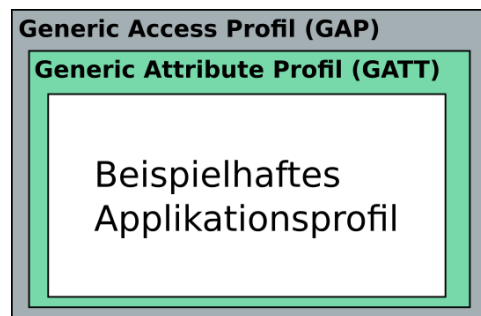


Abbildung 6: Hierarchische Verwendung von Profilen; abgewandelt von [16, S. 1468]

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 iPhone/iPad/iPad (MFi) lizenzierte Technologie zur Verbindung zu Apple Geräte verwendet, beispielsweise MFi 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 umgeschaltet 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 Datenpaketlängenerweiterung 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 Geräteadressen 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.

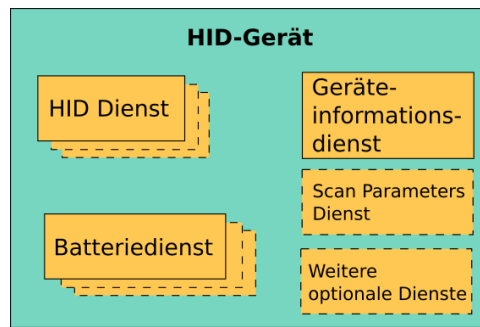


Abbildung 7: Benötigte Dienste eines HID-Geräts; abgewandelt von [20, S. 11]

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* Merkmalsdeskriptor 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 Zertifizierungsinformationen 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-Erweiterungsmodule [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-Erweiterungsmodule konnte keine Dokumentation gefunden werden, weshalb im folgenden Unterabschnitt 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]

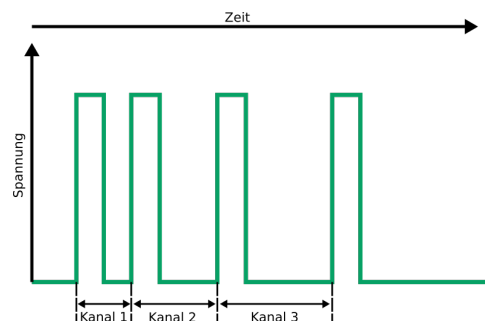


Abbildung 8: Darstellung einzelner Kanäle im Zeitverlauf bei [PPM](#); abgewandelt von [36]

3.3.2 CRSF

Das CRSF-Protokoll verwendet eine Eindrahtleitung für eine halbduplex Universal Asynchronous Receiver Transmitter (**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 CRSF-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 CRSF-Protokoll vordefiniert. Ein Ausschnitt davon ist in Tabelle 4 zu sehen.

Tabelle 4: Ausschnitt aus den vorhandenen CRSF-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 CRSF-Protokoll werden ebenso wie die Adressen, die Typen fest definiert. Ein Ausschnitt möglicher Typen ist in Tabelle 5 zu finden.

Tabelle 5: Vordefinierte CRSF Datentypen [39]

Datentyp	Typenwert
Batteriesensor	0x08
Verbindungsstatistiken	0x14
Kanaldaten	0x16
Weitere Datentypen auf der nächsten Seite	

Datentyp	Typenwert
Multikopterflugmodus	0x21

Der Datenteil eines Pakets 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 Generatorpolynom 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 Mikrocontroller ESP32 und Zertifizierungen

Der Mikrocontroller ESP32 ist eine von Espressif Systems vertriebene integrierte Schaltung, welche sowohl als Chip, Platinenmodul als auch Entwicklungsplatine erworben werden kann [45], [46], [47]. Die Besonderheit dieses Mikrocontrollers ist die integrierte Unterstützung von 2,4 GHz WLAN und Bluetooth, sowie die vorhandene Zweikern-CPU in einigen Modellen [48], [49, S. 8], [49, S. 24]. Die Kerne des Mikrocontrollers basieren auf den Xtensa 32-Bit LX6 Kernen mit einer Frequenz bis zu 240 MHz, welche die Harvard Architektur verwenden und von TSMC mittels dem 40 nm Verfahren hergestellt werden [48], [49, S. 9], [49, S. 8], [49, S. 24]. Weitere Komponenten, welche der Mikrocontroller besitzt, sind eine Fließkommaeinheit, Hardwarebeschleunigung für kryptografische Verfahren, 12-Bit successive approximation (SAR) ADC, programmierbare general purpose input/outputs (GPIOs) mit konfigurierbaren Pull-Up und Pull-Down Widerständen, inter integrated circuit (I²C), UART und weitere Schnittstellen [49, S. 10f.], [49, S. 23], [49, S. 34]. Die Entwicklung des ESP32 findet mittels des Entwicklungsframework ESP-IDF statt [48], [50]. Viele der durch die Espressif Systems angebotenen Platinenmodule sind nach der Federal Communications Commission (FCC) [51] und conformité européenne (CE) regulatorisch zertifiziert [52].

Die FCC stellt verpflichtende Richtlinien für elektronische Geräte in den Vereinigten Staaten von Amerika bereit, welche zum Ziel haben die Interferenz zwischen elektronischen Geräten zu minimieren und die Geräte für den Endnutzer sicher zu gestalten. Falls das FCC-Zeichen auf einen Endprodukt vorhanden ist, ist dieses Produkt nach FCC-Vorgaben konform. [51]

Ebenso gibt es für die Europäische Union Richtlinien, welche für Radio-Equipment für Endkunden gelten [53], [54]. Diese Regularien sind in der Radio Equipment Directive (RED) festgeschrieben und können durch Hersteller des Produktes selbständig durchgeführt werden und ermächtigt, nach erfolgreichen Prüfungen, den Hersteller zur Anbringung des CE-Zeichens [55, S. 14].

Beachtet werden muss bei der CE-Zertifizierung, dass die ESP32 Platinenmodulzertifizierung nur für das Modul alleinstehend gültig ist und in Verbindung mit einer weiteren Platine eine erneute Zertifizierung stattfinden muss [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) und wird unter der MIT-Lizenz publiziert [57, S. 2], [58], [59]. Die bereitgestellten Komponenten von FreeRTOS sind für das Echtzeitscheduling, Inter-Task Kommunikation und Primitive für das Timing und die Synchronisation von Software [58]. Eine Besonderheit ist die geringe Dateigröße des Kernels, die normalerweise zwischen 6 KB und 12 KB liegt und im Grundzustand nur 3 Dateien umfasst [60], [61]. Erweiterungen kann der Kernel durch weitere Funktionen nachgeladen werden müssen [61].

3.5.1 Tasks

Für das Scheduling von Tasks verwendet FreeRTOS ein preemptives Scheduling mit fixen Prioritäten mit Round-Robin Time-Slicing für Tasks mit derselben Priorität. Beim Time-Slicing wechselt der Scheduler bei jedem Tick-Interrupt zwischen den Tasks mit derselben Priorität. Ein Nachteil, welcher durch das verwendete Schedulingverfahren entsteht ist, dass Tasks mit einer geringeren Priorität verhungern können und der Programmierer sich selbst um dieses Problem kümmern muss. [62], [63]

Im FreeRTOS-Kernel werden Zeiten in Ticks gemessen. Dafür zählt ein Timer-Interrupt auch Tick-Interrupt genannt den sogenannten Tickzähler hoch. Daraus ergibt sich, dass die Kernel-Zeitauflösung abhängig von dem Interruptintervall ist. Zusätzlich überprüft der Kernel nach jedem Tick – auch TimeSlice genannt –, ob ein Task in den blockierenden Zustand gesetzt oder aufgeweckt werden soll und entscheidet welcher Task als nächstes ausgeführt werden soll. [57, S. 61], [64]

Eine Besonderheit von Tasks ist, dass diese normalerweise für immer ausgeführt werden sollen. Dies geschieht durch die Verwendung einer Endlosschleife wie im Quellcode 2 zu sehen ist. Zuvor werden alle benötigten Variablen deklariert und nach der Endlosschleife wird für Sicherheitsmaßnahmen Code hinzugefügt, um den Tasks zu löschen, damit keine Rückstände im RAM erhalten bleiben. [57, S. 46]

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

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

```

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

```

Wie in Abbildung 9 zu sehen ist, gibt es vier verschiedene Taskzustände. Zum einen den Running-Zustand, welcher Eintritt, wenn der Task ausgeführt wird. Die restlichen Zustände werden unter den sogenannten Not-Running-Zustand zusammengefasst. Diese treten auf, wenn ein Task entweder nicht für den Scheduler 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.]

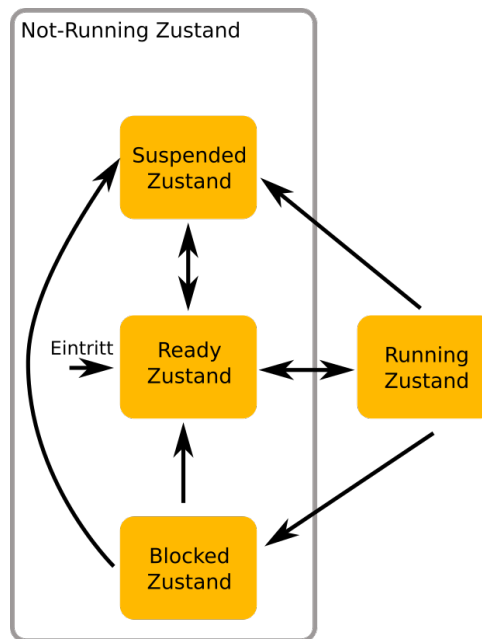


Abbildung 9: Taskzustände und deren Übergänge; angepasst von [57, S. 67]

Der sogenannte Idle-Task ist ein spezieller Task, welcher in FreeRTOS verwendet wird, wenn es keinen Task im Running-Zustand gibt. Dies hat den Hintergrund, dass in FreeRTOS immer ein Task im Running-Zustand vorhanden sein muss, was durch den Idle-Task realisiert wird. Der Idle-Task hat dabei die niedrigste Priorität, damit dieser Task von allen anderen Tasks verdrängt werden kann. [57, S. 76]

3.5.2 Software Timer

Software Timer erlauben das Ausführen von Funktionen zu einem bestimmten Zeitpunkt (one-shot Timer) in der Zukunft oder in periodischen Intervallen (auto-reload Timer). Beachtet werden muss bei Software Timern, dass diese nicht in einen blockierenden Zustand wechseln dürfen. [57, S. 149], [57, S. 151], [65]

3.5.3 Queues

Die primäre Form für die Inter-Task-Kommunikation findet in FreeRTOS 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 während der Erstellung durch den Kernel vorgegeben werden. Die Kommunikation mittels Queues kann dabei zwischen Tasks oder zwischen Tasks und Interrupts erfolgen und ist dabei 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 der Queue werden nicht als Referenz zwischengespeichert, sondern als Kopie. [57, S. 104ff.], [66]

3.5.4 Interrupts

FreeRTOS unterstützt die Verwendung von Interrupts. Dabei muss jedoch beachtet werden, dass nur FreeRTOS Funktionen in der Interrupt-Routine verwendet werden dürfen, welche die Endung *FromISR* haben. Des Weiteren sollte beachtet werden, dass die Interrupt-Routine zeitlich so kurz wie möglich gehalten werden sollte, damit schnellstmöglich die normalen Tasks abgearbeitet werden können. Dafür sollten die Interrupt-Daten nur empfangen und an Tasks weitergeleitet werden, welche dann die Daten auswerten. Dieses Verfahren wird aufgeschobene Interrupts genannt. [57, S. 185], [57, S. 195]

3.5.5 Besonderheiten bei der Verwendung auf dem ESP32

Das ESP-IDF bietet für die ESP32 Mikrocontroller eine angepasste Version des FreeRTOS an. Eine Anpassung bezieht sich dabei auf das symmetrische Multiprocessing mittels FreeRTOS, da viele ESP32 über eine Zweikern CPU mit symmetrischen Multiprocessing verfügen. Für das symmetrische Multiprocessing wird zwischen dem CPU-Kern 0 (Protokoll CPU) und dem CPU-Kern 1 (Applikation CPU) unterschieden. Die Namensgebung der CPU-Kerne weist dabei auf die präferierte Taskaufteilung hin. Um Tasks CPU-Kernen fest zuzuweisen, gibt es zusätzliche Funktionen. Trotz Mehrkern-CPU wird das Schedulingverfahren beibehalten. Jedoch ist CPU 0 allein zuständig für die Ausführung der Tick-Interrupt-Routine und jeder CPU-Kern hat einen eigenen Idle-Task. [67], [68]

Eine weitere Anpassung ist, dass der FreeRTOS-Kernel automatisch gestartet wird und ein Standardtask vorhanden ist zur Bereitstellung von Inter-Processor Calls. Inter-Processor Calls erlaubt es den aufrufenden CPU-Kern Funktionen auf einen anderen CPU-Kern aufzurufen. [69], [68]

3.6 Darstellung von Glyphen auf einem Monitor

Hauptsächlich gibt es drei Verfahren wie Zeichen auf einem Monitor dargestellt werden können.

Zunächst sind Raster- beziehungsweise Bitmap-Schriftarten zu nennen [70]. Rasterschriftarten stellen die erste Generation von digitalen Schriftarten dar, da diese eine geringe Rechenleistung benötigten. Das Verfahren zur Definition einzelner Glyphen ist, dass jedes Zeichen ein Rechteck von Pixeln zugeordnet wird und jeder Pixel fest mit einem Farbwert vordefiniert wird. Eine effiziente Art diese Art von Glyphen abzuspeichern ist es, die Glyphen in Arrays von Bytes abzulegen, indem jedes Byte eine Zeile oder eine Spalte des Pixelrasters darstellt wie in Abbildung 10 zu sehen ist [71]. Der Vorteil von Raster-Schriftarten liegt dabei in der geringen Rechenleistung zur Darstellung einer Glyphe als auch in der guten Optimierung der Glyphen für eine bestimmte Schriftgröße. Die Nachteile bei Raster-Schriftarten sind jedoch, dass Glyphen für eine bestimmte Schriftgröße und Monitorauflösung definiert sind und dadurch geräteabhängig sind. Werden mehrere Größen und Monitorauflösungen benötigt wird viel Speicherplatz pro Schriftart benötigt. [72], [70]

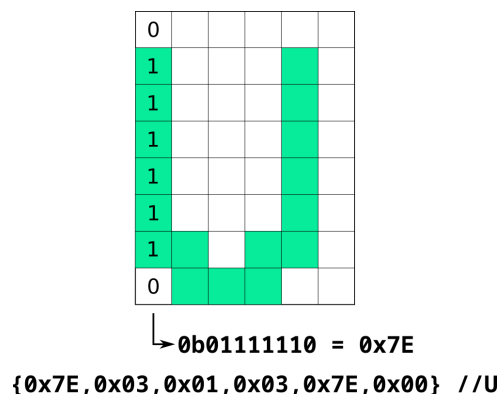


Abbildung 10: Speichern der Glyphe U spaltenweise in einem Array aus Bytes; abgewandelt von [71]

Die zweite Art von Schriftarten sind die Vektor-Schriftarten. Dabei werden einzelne Glyphen als Sammlung von Vektoren dargestellt und Kurven werden durch Polynome approximiert [70], [73, S. 24]. Dadurch können die Glyphen skaliert werden und sind dadurch geräteunabhängig und benötigen weniger Speicherplatz als Raster-Schriftarten [72], [70]. Jedoch ist die Umwandlung für die Darstellung am Monitor langsamer und rechenintensiver [70], [74].

Die Umwandlung von Vektor-Schriftarten erfolgt in zwei Schritten. Der erste Schritt ist die Generierung der Umrandung der Glyphen aus den Schriftartdaten. Der zweite Schritt ist die Konvertierung der Umrandungen in einzelne Pixeln zum Anzeigen an einem Monitor, indem berechnet wird, ob ein Pixel innerhalb oder außerhalb der Umrandung liegt. [72] Bei diesem Umwandlungsverfahren können jedoch ungewollte Artefakte in den Glyphen entstehen, wie in Abbildung 10 zu sehen ist. Bei bestimmten Monitorauflösungen oder Schriftgrößen kann es auftreten, dass die Umrandung der Glyphen nur teilweise Pixel einschließen und dadurch die Pixel verwendet werden oder auch nicht und dadurch Glyphen schwerer lesbar werden.

Die letzte Art von Schriftarten sind die TrueType- beziehungsweise OpenType-Schriftarten. Diese bauen auf dem Verfahren der Vektor-Schriftarten auf und erweitern die Glyphenspeicherung um Kurven und zusätzliche Hinweise, um Optimierungen während der Umwandlung zu Pixeln bereitzustellen. [70]

In Abbildung 12 sind die unterschiedlichen Schriftartenspeicherverfahren nebeneinandergestellt.

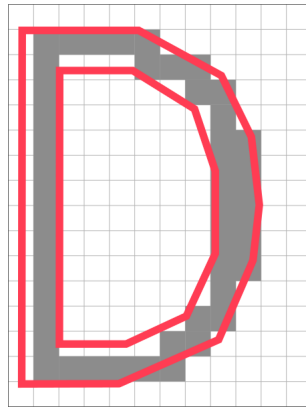


Abbildung 11: Umwandlung einer Vektor-Schriftart zur Darstellung an einem Monitor; abgewandelt von [72]



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](#)). Diese ist nur noch 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 unter anderen die Joystick Treiber [API](#) ersetzt, sowie einen größeren Funktionsumfang bietet. [evdev](#) stellt unter Linux die präferierte Schnittstelle für den Zugriff auf Eingabeereignisse dar. [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 Ereigniselement ist der Zeitstempel wann das Ereignis im Kernel aufgetreten ist. Als zweites Element befindet sich der Typ des Ereignisses. Der Typ hat beispielsweise für einen Tastendruck den Wert `EV_KEY`. Das nächste Element ist der Ereigniscode, welcher unter allen Prozessorarchitekturen gleich und hardwareunabhängig ist. Eine vollständige Liste aller Ereigniscodes ist unter Quelle [78] zu finden. Das letzte Element eines Ereignisses ist der Ereigniswert, welcher unterschiedliche Bedeutungen hat abhängig vom Ereignistyp. Beispielsweise ist der Wertebereich bei einem Knopfdruck von 0 bis 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 einer Taste dar, bei längerem Tastendruck. [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;  
};
```

Um den Umgang mit [evdev](#)-Kernelgeräten in der Programmiersprache C zu vereinfachen, gibt es die Bibliothek *libevdev*. Diese abstrahiert den Zugriff auf die sogenannte [evdev](#) input output Control ([IOCTL](#)) [79] und verhindert damit den direkten Zugriff auf [IOCTLs](#). Diese Bibliothek stellt das Bindeglied zwischen dem Linux-Kernel und dem Programm, welches die Bibliothek verwendet 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 auch spezielle Dateideskriptoren statt. [82]

4 Umsetzung

4.1 Softwareentwicklung

In diesen Abschnitt werden einige Kernkomponenten der Software detaillierter dargestellt und die Auswahl des Mikrocontrollers beschrieben.

4.1.1 Auswahl der Mikrocontrollers

Als Mikrocontroller wird das ESP32-WROOM-32E-Modul verwendet. Dies hat mehrere Gründe, welche nachfolgend zu finden sind. Als erster Grund, welcher für die Verwendung des ESP32 spricht, ist die große Beliebtheit des Mikrocontrollers in Hobbyprojekten und daraus folgernd eine große Community die bei Problemen in der Entwicklung unterstützen kann [83], [84]. Ebenfalls ist eine gute Dokumentation der [ESP-IDF](#) durch Kommentare im Sourcecode, sowie durch Beispielprogramme gegeben. Als weiterer Grund für die Verwendung des ESP32 spricht, die Unterstützung mehrerer Bluetooth-Stacks, welche in Kapitel 3.2.5 beschrieben sind. Als letzter Grund ist noch die Verfügbarkeit der Mikrocontroller in kompakten Hardwaremodulen, in denen alle benötigten Hauptkomponenten für den Betrieb des Mikrocontrollers enthalten sind, wie Kondensatoren, Widerständen und in manchen Modulen ebenso die benötigte Antenne für den Betrieb von Bluetooth oder [WLAN](#) [85, S. 14]. Auch haben die ESP32-Module meist eine CE-Zertifizierung, wie in Kapitel 3.4 beschrieben ist und dadurch könnte das entwickelte Fernsteuerungsmodul vereinfacht für den Vertrieb zertifiziert werden. Trotz den vorhandenen Funktionsumfang und Ökosystem ist das ESP32-Modul kostengünstig und im Bereich um 5 € zu erwerben [45].

4.1.2 Auswahl des Bluetooth-Stacks

Als Bluetooth-Stack für den ESP32 wird der Open Source [BLE](#)-Stack Apache NimBLE verwendet. Dies hat den Hintergrund, dass die Kommunikation ausschließlich zwischen dem Fernsteuerungserweiterungsmodul und Endgeräten mittels [BLE](#) erfolgen soll. Für diesen Einsatzzweck wird die Verwendung von Apache NimBLE empfohlen, da dieser kompakter in der Codegröße ist und weniger Speicher zur 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 Daten mittels [HOGP](#) verpackt werden. [BLE](#) wird verwendet, da es sich besser für eine mobile Anwendung eignet – beschrieben in Kapitel 3.1.1 –, da die

Multikopterfernsteuerung und das Erweiterungsmodul mittels dem selben Akku betrieben werden. Als Datenformat wird [HID](#) verwendet, da es dadurch möglich ist ohne speziell entwickelten Treibern die Daten am Endgerät auszuwerten und dadurch der Datenaustausch zwischen dem Modul und vielen Endgeräten sichergestellt werden kann [\[86\]](#).

4.1.4 Kommunikationsprotokoll zwischen der Multikopterfernsteuerungen und dem Mikrocontroller

Als Kommunikationsprotokoll zwischen der Multikopterfernsteuerung und des Mikrocontroller wird CRSF verwendet. Dies hat den Hintergrund, dass wie in Kapitel [3.3](#) das CRSF-Protokoll die höchste Übertragungsrate hat und dabei die geringste Menge an nicht verwendeten Daten versendet, da das Protokoll leicht durch die Geräteadressen und Datentypenidentifikatoren gefiltert werden kann.

Da CRSF die Daten mittels einer [UART](#)-Verbindung überträgt, findet das Auslesen der CRSF-Daten mittels dem Mikrocontroller durch einen sogenannten Treiber statt. Durch den [UART](#)-Treiber werden vorhandene [UART](#)-Interrupt abstrahiert und durch eine [API](#) bereitgestellt, wodurch die Kommunikation mittels [UART](#) vereinfacht wird [\[87\]](#). Die [UART](#)-Interrupt sind definiert, dass empfangene Daten erst verarbeitet werden, wenn entweder der interne [UART](#)-Buffer voll ist oder ein definierter Timeout zwischen empfangenen Bytes entsteht.

Die Auswertung der empfangenen Daten ist in zwei Teile gegliedert. Im ersten Teil findet eine Überprüfung der Geräteadresse (muss 0xEE sein), der Länge der übermittelten Daten und des übermittelten Datentyps statt (muss 0x16 sein). Wenn all diese Werte stimmen findet die Überprüfung der [CRC](#)-Prüfsumme statt, um festzustellen ob alle Kanaldaten gültig sind. Im zweiten Teil, werden alle Kanaldaten zunächst ausgelesen und darauf im Wertebereich angepasst, damit der vollständige Wertebereich des [HID](#)-Reports verwendet wird. Dafür werden die analogen Kanaldaten auf einen Wertebereich von 0 bis 2047 erweitert und digitale Kanaldaten wie zum Beispiel bei Knöpfen bis zu einem Wert von 992 als logisch 0 und ab einem Wert von 993 als logisch 1 gewertet. Nach Anpassung des Wertebereichs werden die Daten in einer globalen Datenstruktur abgelegt, welche in Quellcode [4](#) zu sehen ist. Falls dabei eine Änderung zwischen alten und aktuellen Wert festgelegt wird, wird veranlasst, dass die Daten per [BLE](#) an das Endgerät versendet werden. Anzumerken ist, dass wenn es ein Problem während der Auswertung stattfindet, das komplette Paket verschmissen wird und auf ein neues Paket gewartet wird.

Quellcode 4: C-Strukturaufbau 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

4.1.6 Kombination aller Softwarekomponenten

Als Programmiersprache wird C verwendet

4.2 Platinenentwurf

4.3 Gehäuseerstellung

5 Validierung und Gegenüberstellung

TODO: Validierung und Gegenüberstellung

5.1 Validierung des Funktionsumfangs

5.2 Gegenüberstellung BLE-Modul und USB-Verbindung

6 Rekapitulation und Ausblick

TODO: Rekapitulation und Ausblick

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://academy.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] *Espressif IoT Development Framework*, <https://github.com/espressif/esp-idf>, Aufgerufen am: 14. Januar 2023, Espressif Systems.
- [51] *What Needs FCC Approval?* <https://compliancetesting.com/what-needs-fcc-approval/>, Aufgerufen am: 14. Januar 2023, Compliance Testing.
- [52] *Certificates*, <https://www.espressif.com/en/support/documents/certificates>, Aufgerufen am: 14. Januar 2023, Espressif Systems.

- [53] *CE marking*, https://europa.eu/youreurope/business/product-requirements/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-componets/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] *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.)

Anhang

TODO: Anhang