

# **BLE HID Hardware-Erweiterungsmodul für Drohnenfernbedienungen**

## **Studienarbeit**

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

von

**Fabian Kuffer**

12. November 2022

**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, 12. November 2022

---

Fabian Kuffer

## **Kurzfassung**

Lorem ipsum dolor sit amet, consectetur adipiscing elit. Ut purus elit, vestibulum ut, placerat ac, adipiscing vitae, felis. Curabitur dictum gravida mauris. Nam arcu libero, nonummy eget, consectetur id, vulputate a, magna. Donec vehicula augue eu neque. Pellentesque habitant morbi tristique senectus et netus et malesuada fames ac turpis egestas. Mauris ut leo. Cras viverra metus rhoncus sem. Nulla et lectus vestibulum urna fringilla ultrices. Phasellus eu tellus sit amet tortor gravida placerat. Integer sapien est, iaculis in, pretium quis, viverra ac, nunc. Praesent eget sem vel leo ultrices bibendum. Aenean faucibus. Morbi dolor nulla, malesuada eu, pulvinar at, mollis ac, nulla. Curabitur auctor semper nulla. Donec varius orci eget risus. Duis nibh mi, congue eu, accumsan eleifend, sagittis quis, diam. Duis eget orci sit amet orci dignissim rutrum.

## **Abstract**

Lorem ipsum dolor sit amet, consectetur adipiscing elit. Ut purus elit, vestibulum ut, placerat ac, adipiscing vitae, felis. Curabitur dictum gravida mauris. Nam arcu libero, nonummy eget, consectetur id, vulputate a, magna. Donec vehicula augue eu neque. Pellentesque habitant morbi tristique senectus et netus et malesuada fames ac turpis egestas. Mauris ut leo. Cras viverra metus rhoncus sem. Nulla et lectus vestibulum urna fringilla ultrices. Phasellus eu tellus sit amet tortor gravida placerat. Integer sapien est, iaculis in, pretium quis, viverra ac, nunc. Praesent eget sem vel leo ultrices bibendum. Aenean faucibus. Morbi dolor nulla, malesuada eu, pulvinar at, mollis ac, nulla. Curabitur auctor semper nulla. Donec varius orci eget risus. Duis nibh mi, congue eu, accumsan eleifend, sagittis quis, diam. Duis eget orci sit amet orci dignissim rutrum.

# Inhaltsverzeichnis

<b>Abkürzungsverzeichnis</b>	<b>IV</b>
<b>Abbildungsverzeichnis</b>	<b>V</b>
<b>Tabellenverzeichnis</b>	<b>VI</b>
<b>Quellcodeverzeichnis</b>	<b>VII</b>
<b>1 Einleitung</b>	<b>1</b>
1.1 lorem ipsum . . . . .	1
1.1.1 asdf . . . . .	1
<b>2 Motivation</b>	<b>2</b>
<b>3 Stand der Technik</b>	<b>3</b>
<b>4 Technische Grundlagen</b>	<b>4</b>
4.1 Bluetooth . . . . .	4
4.1.1 Allgemein . . . . .	4
4.1.2 Benötigte Komponenten eines Bluetooth Low Energy (BLE)-Geräts . .	5
<b>5 Umsetzung</b>	<b>7</b>
<b>6 Validierung und Gegenüberstellung</b>	<b>8</b>
6.1 Validierung des Funktionsumfangs . . . . .	8
6.2 Validierung der Leistung . . . . .	8
6.3 Gegenüberstellung BLE-Modul und USB-Verbindung . . . . .	8
<b>7 Rekapitulation und Ausblick</b>	<b>10</b>
<b>Literatur</b>	<b>11</b>
<b>Anhang</b>	<b>12</b>

# Abkürzungsverzeichnis

BBR	Bluetooth Basic Rate
BLE	Bluetooth Low Energy
SIG	Special Interest Group
HCI	Host Controller Interface
L2CAP	Logical Link Control and Adaption Protocol
GAP	Generic Access Profile
ATT	Attribute Protocol
GATT	Generic Attribute Profile
SMP	Security Manager Protocol
PHY	Physical Layer
LL	Link Layer
SDP	Service Discovery Protocol

# Abbildungsverzeichnis

1	Frequenzband mit Kanälen von BLE [4, S. 4] . . . . .	4
---	--	---

# Tabellenverzeichnis

# Quellcodeverzeichnis



# 1 Einleitung

Enthält Problemstellung, Ziel und Vorgehensweise der Arbeit (Gegenstand und Ziele der Arbeit/Aufgabenbeschreibung, geplante Vorgehensweise, Einführung in Thema, Motivation der Aufgabenstellung/Vorausblick)

Grundlagen (z.B. Stand der Technik/Forschung)

Hauptteil (Anforderungsdefinition, Anforderungsanalyse, Lösungsgenerierung, Lösungsbewertung, Umsetzung), ggf. in mehreren sinnvollen Gliederungspunkten

Kritische Reflexion und Ausblick —

Aufteilung in T2000: Einleitung, Stand zu Beginn der Arbeit, Aufgabenstellung (mit den einzelnen Bestandteilen), Stand der Technik, Technische Grundlagen, Umsetzung, Rekapitulation und Ausblick

[\[1\]](#), [\[2\]](#)

## 1.1 lorem ipsum

### 1.1.1 asdf

jklö

## 2 Motivation

Lorem ipsum dolor sit amet, consectetur adipiscing elit. Ut purus elit, vestibulum ut, placerat ac, adipiscing vitae, felis. Curabitur dictum gravida mauris. Nam arcu libero, nonummy eget, consectetur id, vulputate a, magna. Donec vehicula augue eu neque. Pellentesque habitant morbi tristique senectus et netus et malesuada fames ac turpis egestas. Mauris ut leo. Cras viverra metus rhoncus sem. Nulla et lectus vestibulum urna fringilla ultrices. Phasellus eu tellus sit amet tortor gravida placerat. Integer sapien est, iaculis in, pretium quis, viverra ac, nunc. Praesent eget sem vel leo ultrices bibendum. Aenean faucibus. Morbi dolor nulla, malesuada eu, pulvinar at, mollis ac, nulla. Curabitur auctor semper nulla. Donec varius orci eget risus. Duis nibh mi, congue eu, accumsan eleifend, sagittis quis, diam. Duis eget orci sit amet orci dignissim rutrum.

# 3 Stand der Technik

Lorem ipsum dolor sit amet, consectetur adipiscing elit. Ut purus elit, vestibulum ut, placerat ac, adipiscing vitae, felis. Curabitur dictum gravida mauris. Nam arcu libero, nonummy eget, consectetur id, vulputate a, magna. Donec vehicula augue eu neque. Pellentesque habitant morbi tristique senectus et netus et malesuada fames ac turpis egestas. Mauris ut leo. Cras viverra metus rhoncus sem. Nulla et lectus vestibulum urna fringilla ultrices. Phasellus eu tellus sit amet tortor gravida placerat. Integer sapien est, iaculis in, pretium quis, viverra ac, nunc. Praesent eget sem vel leo ultrices bibendum. Aenean faucibus. Morbi dolor nulla, malesuada eu, pulvinar at, mollis ac, nulla. Curabitur auctor semper nulla. Donec varius orci eget risus. Duis nibh mi, congue eu, accumsan eleifend, sagittis quis, diam. Duis eget orci sit amet orci dignissim rutrum.

# 4 Technische Grundlagen

## 4.1 Bluetooth

### 4.1.1 Allgemein

Bluetooth ist ein Kurzstreckenkommunikationssystem, bei welchen 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 Bluetooth Low Energy (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 einen niedrigen Stromverbrauch, welche durch eine geringere Datenrate und eine geringere Einschaltdauer während den Datenaustausch 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 nur BLE, BBR oder beide Bluetooth-Kategorien unterstützen kann. [3, S. 187]

Die Übertragungsfrequenz von BLE ist im lizenzfreien 2.4 GHz ISM-Band von 2402 MHz bis 2480 MHz [4, S. 4], [3, S. 190]. Das Frequenzband ist in 40 physikalische Kanäle mit jeweils einer Bandbreite von 2 MHz aufgeteilt, wie in Abbildung 1 zu sehen ist [3, S. 190]. Drei dieser 40 physikalischen Kanäle sind für das sogenannte Advertising vorhanden [3, S. 190], welches für die Geräteentdeckung, den Verbindungsaufbau und für das Broadcasting von Nachrichten vorhanden ist [4, S. 4]. Die restlichen Kanäle sind für eine allgemeine Datenübertragung vorhanden [3, S. 190]. Zusätzlich zu der Aufteilung des Frequenzbandes in Kanäle werden Kanäle in Zeiteinheiten aufgeteilt, welche Events genannt werden [3, 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 [3, S. 190f.].

Bild anpassen und schreiben, abgewandelt von ...

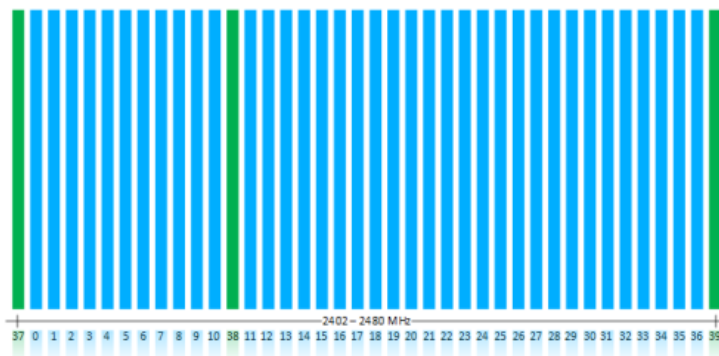


Abbildung 1: Frequenzband mit Kanälen von BLE [4, S. 4]

Die Kompatibilität zwischen Bluetooth-Geräten wird durch sogenannte Profile sichergestellt. Profile beschreiben dafür Funktionen und Eigenschaften von jeder Schicht im Bluetoothsystem [3, S. 277]. Ebenso werden die benötigten Nachrichten und Prozeduren für die verwendeten Profile durch die Bluetooth Special Interest Group (SIG) spezifiziert [3, S. 1241].

Bluetooth-Geräten werden unterschiedliche Rollen zugewiesen. Dafür gibt es die Rollen Observer, Broadcaster, Central und Peripheral. Ein Gerät in 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. [3, S. 190f., S. 278, S. 1246ff.]

### 4.1.2 Benötigte Komponenten eines BLE-Geräts

Ein BLE-Gerät benötigt einen Mindestumfang an Funktionen damit es laut Bluetooth SIG BLE kompatibel ist. In Abbildung 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 dem Hostteil und dem Controllerteil findet mittels dem Host Controller Interface (HCI) statt [3, S. 1735]. [3, S. 193]

Referenz  
hinzufügen

Bild erstellen

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

#### Physical Layer (PHY)

Die physikalische Schicht in BLE ist zum Versenden und Erhalten von Paketen über eines der physikalischen Funkkanäle verantwortlich. [3, 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. Auch gibt es eine Komponente welche für die Datenflusskontrolle, die Datenbestätigung und für die Wiederübertragung von Paketen zuständig ist. Die letzte Komponente in der Verbindungsschicht ist für den Zugriff auf das Radiomedium zuständig. Dafür gibt es einen

Scheduler, welcher Zeitschlitze des physikalischen Mediums an die höherliegenden Dienste verteilt. [3, S. 207f.]

### **Host Controller Interface (HCI)**

Das Host Controller Interface stellt die Möglichkeit bereit, dass der Hostteil die Funktionen des Controllerteil erreichen kann. Die Übertragung des HCI kann dabei wahlweise mittels USB, UART oder anderen Bussystemen stattfinden. [3, 2. 1735f.]

## 5 Umsetzung

Lorem ipsum dolor sit amet, consectetur adipiscing elit. Ut purus elit, vestibulum ut, placerat ac, adipiscing vitae, felis. Curabitur dictum gravida mauris. Nam arcu libero, nonummy eget, consectetur id, vulputate a, magna. Donec vehicula augue eu neque. Pellentesque habitant morbi tristique senectus et netus et malesuada fames ac turpis egestas. Mauris ut leo. Cras viverra metus rhoncus sem. Nulla et lectus vestibulum urna fringilla ultrices. Phasellus eu tellus sit amet tortor gravida placerat. Integer sapien est, iaculis in, pretium quis, viverra ac, nunc. Praesent eget sem vel leo ultrices bibendum. Aenean faucibus. Morbi dolor nulla, malesuada eu, pulvinar at, mollis ac, nulla. Curabitur auctor semper nulla. Donec varius orci eget risus. Duis nibh mi, congue eu, accumsan eleifend, sagittis quis, diam. Duis eget orci sit amet orci dignissim rutrum. asdf

# 6 Validierung und Gegenüberstellung

## 6.1 Validierung des Funktionsumfangs

Lorem ipsum dolor sit amet, consectetur adipiscing elit. Ut purus elit, vestibulum ut, placerat ac, adipiscing vitae, felis. Curabitur dictum gravida mauris. Nam arcu libero, nonummy eget, consectetur id, vulputate a, magna. Donec vehicula augue eu neque. Pellentesque habitant morbi tristique senectus et netus et malesuada fames ac turpis egestas. Mauris ut leo. Cras viverra metus rhoncus sem. Nulla et lectus vestibulum urna fringilla ultrices. Phasellus eu tellus sit amet tortor gravida placerat. Integer sapien est, iaculis in, pretium quis, viverra ac, nunc. Praesent eget sem vel leo ultrices bibendum. Aenean faucibus. Morbi dolor nulla, malesuada eu, pulvinar at, mollis ac, nulla. Curabitur auctor semper nulla. Donec varius orci eget risus. Duis nibh mi, congue eu, accumsan eleifend, sagittis quis, diam. Duis eget orci sit amet orci dignissim rutrum.

## 6.2 Validierung der Leistung

Lorem ipsum dolor sit amet, consectetur adipiscing elit. Ut purus elit, vestibulum ut, placerat ac, adipiscing vitae, felis. Curabitur dictum gravida mauris. Nam arcu libero, nonummy eget, consectetur id, vulputate a, magna. Donec vehicula augue eu neque. Pellentesque habitant morbi tristique senectus et netus et malesuada fames ac turpis egestas. Mauris ut leo. Cras viverra metus rhoncus sem. Nulla et lectus vestibulum urna fringilla ultrices. Phasellus eu tellus sit amet tortor gravida placerat. Integer sapien est, iaculis in, pretium quis, viverra ac, nunc. Praesent eget sem vel leo ultrices bibendum. Aenean faucibus. Morbi dolor nulla, malesuada eu, pulvinar at, mollis ac, nulla. Curabitur auctor semper nulla. Donec varius orci eget risus. Duis nibh mi, congue eu, accumsan eleifend, sagittis quis, diam. Duis eget orci sit amet orci dignissim rutrum.

## 6.3 Gegenüberstellung BLE-Modul und USB-Verbindung

Lorem ipsum dolor sit amet, consectetur adipiscing elit. Ut purus elit, vestibulum ut, placerat ac, adipiscing vitae, felis. Curabitur dictum gravida mauris. Nam arcu libero, nonummy eget, consectetur id, vulputate a, magna. Donec vehicula augue eu neque. Pellentesque habitant morbi tristique senectus et netus et malesuada fames ac turpis egestas. Mauris ut leo. Cras viverra metus rhoncus sem. Nulla et lectus vestibulum urna fringilla ultrices. Phasellus eu tellus sit amet tortor gravida placerat. Integer sapien est, iaculis in, pretium quis, viverra ac, nunc. Praesent eget sem vel leo ultrices bibendum. Aenean faucibus. Morbi dolor nulla, malesuada eu, pulvinar at, mollis ac, nulla. Curabitur auctor semper nulla. Donec varius orci eget risus.



Duis nibh mi, congue eu, accumsan eleifend, sagittis quis, diam. Duis eget orci sit amet orci dignissim rutrum.

## 7 Rekapitulation und Ausblick

Lorem ipsum dolor sit amet, consectetur adipiscing elit. Ut purus elit, vestibulum ut, placerat ac, adipiscing vitae, felis. Curabitur dictum gravida mauris. Nam arcu libero, nonummy eget, consectetur id, vulputate a, magna. Donec vehicula augue eu neque. Pellentesque habitant morbi tristique senectus et netus et malesuada fames ac turpis egestas. Mauris ut leo. Cras viverra metus rhoncus sem. Nulla et lectus vestibulum urna fringilla ultrices. Phasellus eu tellus sit amet tortor gravida placerat. Integer sapien est, iaculis in, pretium quis, viverra ac, nunc. Praesent eget sem vel leo ultrices bibendum. Aenean faucibus. Morbi dolor nulla, malesuada eu, pulvinar at, mollis ac, nulla. Curabitur auctor semper nulla. Donec varius orci eget risus. Duis nibh mi, congue eu, accumsan eleifend, sagittis quis, diam. Duis eget orci sit amet orci dignissim rutrum.

# Literatur

- [1] *Accessory Design Guidelines for Apple Devices*, Release R18, Apple Inc., 2022.
- [2] *MFi Program, Frequently Asked Questions*, <https://mfi.apple.com/en/faqs.html>,  
Aufgerufen am: 05. Oktober 2022, Apple Inc.
- [3] *Bluetooth Core Specification*, Revision v5.3, Bluetooth SIG, 2021.
- [4] *UG103.14: Bluetooth LE Fundamentals*, Revision 0.7, SILICON LABS.

# Anhang

- A. Assignment
- B. List of CD Contents
- C. CD

## **B. List of CD Contents**