

Entwicklung eines Systems für die Mobile Sensordatenerfassung zur Erkennung von Ganzkörpergesten in Echtzeit

**Development of a system for mobile sensor data acquisition to recognize full body gestures
in real time**

Bachelor-Arbeit

Pascal Dornfeld

KOM-B-0645



**TECHNISCHE
UNIVERSITÄT
DARMSTADT**

Fachbereich Elektrotechnik
und Informationstechnik
Fachbereich Informatik (Zweitmitglied)
Fachgebiet Multimedia Kommunikation
Prof. Dr.-Ing. Ralf Steinmetz

Entwicklung eines Systems für die Mobile Sensordatenerfassung zur Erkennung von Ganzkörpergesten in Echtzeit

Development of a system for mobile sensor data acquisition to recognize full body gestures in real time

Bachelor-Arbeit

Studiengang: Informatik

KOM-B-0645

Eingereicht von Pascal Dornfeld

Tag der Einreichung: 23. Juli 2019

Gutachter: Prof. Dr.-Ing. Ralf Steinmetz

Betreuer: Philipp Müller und Augusto Garcia-Agundez

Technische Universität Darmstadt

Fachbereich Elektrotechnik und Informationstechnik

Fachbereich Informatik (Zweitmitglied)

Fachgebiet Multimedia Kommunikation (KOM)

Prof. Dr.-Ing. Ralf Steinmetz

Erklärung zur Abschlussarbeit gemäß § 23 Abs. 7 APB der TU Darmstadt

Hiermit versichere ich, Pascal Dornfeld, die vorliegende Bachelor-Arbeit ohne Hilfe Dritter und nur mit den angegebenen Quellen und Hilfsmitteln angefertigt zu haben. Alle Stellen, die Quellen entnommen wurden, sind als solche kenntlich gemacht worden. Diese Arbeit hat in gleicher oder ähnlicher Form noch keiner Prüfungsbehörde vorgelegen.

Mir ist bekannt, dass im Falle eines Plagiats (§38 Abs.2 APB) ein Täuschungsversuch vorliegt, der dazu führt, dass die Arbeit mit 5,0 bewertet und damit ein Prüfungsversuch verbraucht wird. Abschlussarbeiten dürfen nur einmal wiederholt werden.

Bei der abgegebenen Bachelor-Arbeit stimmen die schriftliche und die zur Archivierung eingereichte elektronische Fassung überein.

Darmstadt, den 23. Juli 2019

Pascal Dornfeld



Inhaltsverzeichnis

1 Einleitung	3
1.1 Motivation	3
1.2 Problemstellung und Beitrag	4
1.3 Gliederung	5
2 Hintergrund	7
2.1 Sensor	7
2.1.1 Beschleunigungssensor	7
2.1.2 Gyrosensor	7
2.2 Chipkommunikation	8
2.2.1 I2C	8
2.2.2 SPI	9
2.3 Endgerätekommunikation	9
2.4 Lithiumknopfzelle	10
3 Aktueller Stand der Technik	11
3.1 Bestehende Lösungen	11
3.1.1 Texas Instruments CC2650STK	11
3.1.2 aconno ACNSENSA	11
3.1.3 Arduino Primo Core	12
3.2 Zusammenfassung und verwandte Arbeiten	12
4 Design und Planung	13
4.1 Anforderungen	13
4.2 Spannungsversorgung	13
4.3 Datenübertragung zwischen Wearable und Endgerät	13
4.4 Wahl der Hauptkomponenten	15
4.4.1 MCU	15
4.4.2 IMU	15
4.5 Zusammenwirken der Komponenten	16
4.6 BLE Schnittstelle	17
4.7 Applikation des Android Smartphones	17
5 Implementierung	19
5.1 Wearable Programm	19
5.1.1 Entwicklungsumgebung	19
5.1.2 Programmaufbau	19
5.1.3 BLE-Service	20
5.1.4 IMU Integration	21
5.2 Wearable Hardwareumsetzung	25
5.3 Android App	26
5.4 Zusammenfassung	29
6 Evaluation	31
6.1 Ziele	31

6.2	Methoden	31
6.3	Ergebnisse	33
6.4	Auswertung	33
6.4.1	Strommessung mithilfe eines Widerstandes	33
6.4.2	Stromeinfluss der Parameter	38
6.4.3	Standardabweichung der ankommenden Datenrate	39
7	Fazit	41
7.1	Zusammenfassung	41
7.2	Zukünftige Arbeiten	41
	Literaturverzeichnis	42

Zusammenfassung

In dieser Arbeit wird ein Wearable entwickelt, das eine mobile Datenerfassung zur Ganzkörperbewegungserkennung möglich macht. Im Gegensatz zu den bereits genutzten Systemen in der Unterhaltungselektronik, Filmindustrie und Gesundheitsbranche verzichtet es auf Kabel, soll lange von einer Batterie mit Spannung versorgt und durch eine geringe Größe unterwegs genutzt werden. Gleichzeitig soll der Aufwand gering sein, die Komponenten zu ersetzen, sodass sich das Wearable für verschiedene Anwendungen anpassen lässt.

Es werden verschiedene Komponenten verglichen und ein Prototyp entworfen, auf dem zwei unterschiedliche Sensoren implementiert werden. Die Daten der Sensoren sollen zu einem Android Smartphone übertragen und graphisch dargestellt werden. Im Anschluss wird ein Wearable aus den Komponenten gebaut, das auch mobil eingesetzt werden kann. Der Prototyp und das Wearable werden anhand von Stromaufnahme und Schwankungen in der Datenrate bei unterschiedlichen Parametern evaluiert.



1 Einleitung

1.1 Motivation

Die Nachfrage nach Wearables steigt kontinuierlich. Abbildung 1.1 zeigt, dass sich der Absatz in den letzten vier Jahren versechsfacht hat. Wearables sind Geräte, die am Körper getragen werden, um zum Beispiel mithilfe von Sensoren Daten zu erfassen [Ben19].

Ein weit verbreiteter Anwendungsfall ist die Herzfrequenzmessung beim Sport mit einem Fitnessarmband. Durch das Auswerten dieser Daten kann die Trainingsintensität in Echtzeit an die Person angepasst und somit die Effektivität gesteigert werden.

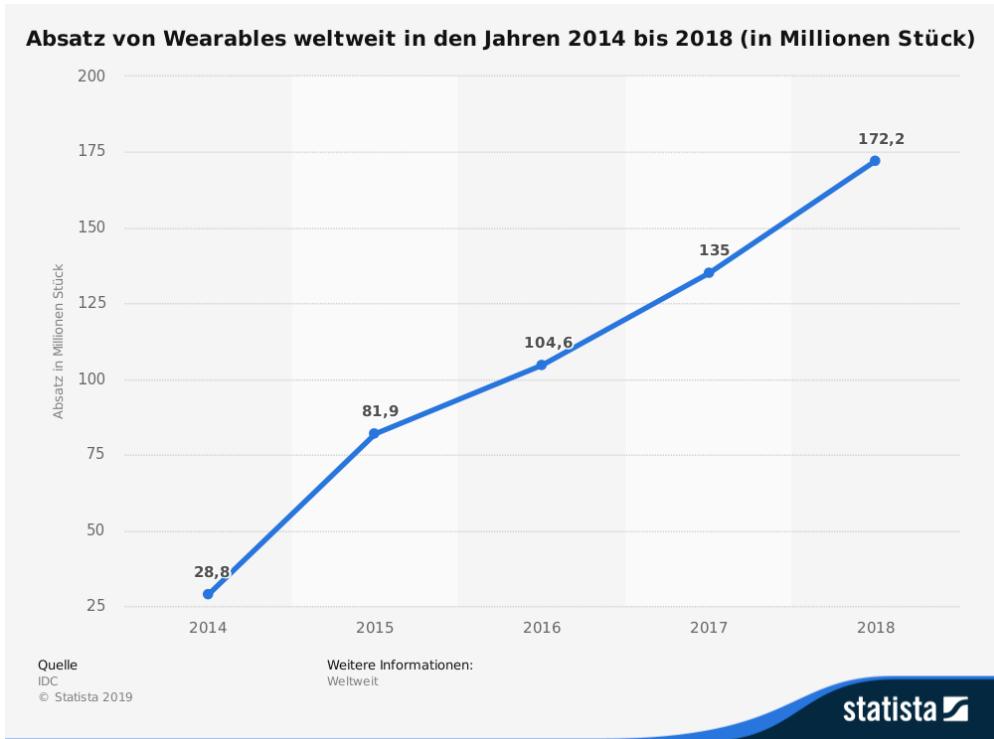


Abbildung 1.1: Absatz von Wearables [Int19]

Statt zur Herzfrequenzmessung wird in dieser Arbeit hingegen ein Wearable entworfen, das die Position und Rotation von Gelenken erfasst. Auf der Analyse dieser Daten aufbauend können dann weiterführende Anwendungsfälle entwickelt werden. Folgende sind zum Beispiel interessante Anwendungen:

- Das Erkennen von falsch ausgeführten Übungen beim Sport oder von einer falschen Haltung beim Sitzen oder Stehen im Alltag. Dadurch können negative gesundheitliche Folgen vermieden werden.
- Eine Lösung für die mobile Ganzkörperbewegungserkennung zum Erstellen von Animationen in Filmen oder Videospielen. Mit der Anzahl der Wearables kann der Detailgrad der Bewegung proportional zum Preis skaliert werden.
- Ein Echtzeitsystem zur Übersetzung von Gestensprache in gesprochene Sprache zur Kommunikation von stummen Menschen.
- Für die Bewegungserkennung in Videospielen und Virtual Reality. Abbildung 1.2 zeigt, dass die Nintendo Wii die bisher fünftmeist-verkaufte Konsole ist (Stand: Dezember 2018) und damit die Geschichte der Videospielkonsolen prägt. Die Fernbedienung übernimmt dabei vor allem eine Funktion: Das Tracken der Handposition. Zusätzlich kann mit dem Nunchuk per Kabel ein

zweiter Sensor für die andere Hand angeschlossen werden. Würde stattdessen eine Konsole mit dem hier entwickelten Wearable entworfen werden, könnten die Hände beim Spielen frei bleiben, das Kabel zwischen den Händen wegfallen und weitere Gliedmaßen getrackt werden. VR-Headsets und die Xbox Kinect nutzen dagegen Kameras zur Ganzkörperbewegungserkennung. Diese Lösung ist jedoch nicht mobil einsetzbar und anfällig auf Störeinflüsse wie fehlender Sichtkontakt.

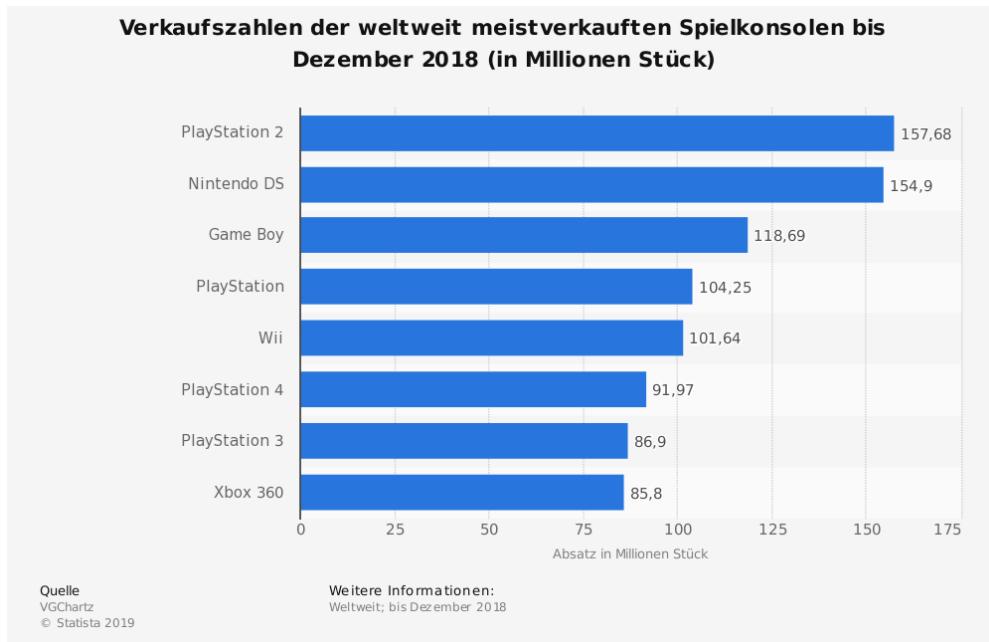


Abbildung 1.2: Verkaufszahlen der weltweit meistverkauften Spielkonsolen [VGC19]

Das Wearable kann also in vielen Bereichen Anwendung finden. Von Medizin über Kommunikation bis zur Produktivität und Unterhaltung.

1.2 Problemstellung und Beitrag

Folgende Ziele ergeben sich für diese Arbeit:

1. Um eine gute Mobilität zu gewährleisten, muss das Wearable klein und leicht sein, damit es auch beim Sport komfortabel zu nutzen bleibt.
2. Die Datenübertragung muss ausreichend schnell sein, um die Datenrate zu übertragen, die für Gestenerkennung nötig ist.
3. Die Batteriekapazität und die Stromaufnahme müssen verhältnismäßig zueinander abgestimmt sein. Würde die Batterie öfter als ein Mal pro Tag geladen oder gewechselt werden müssen, wäre das Wearable nicht mehr praktikabel. Die Batterie soll keinesfalls öfter als einmal pro Tag geladen oder gewechselt werden müssen.
4. Die eingesetzten Protokolle sollen weit verbreitet sein, damit möglichst viele Endgeräte von dem Wearable profitieren können und einzelne Komponenten des Wearables mit wenig Aufwand durch neuere oder dem Anwendungsfall angepasste Komponenten ersetzt werden können.

Wegen der hohen Mobilität und Verbreitung wurde als Empfänger der Daten ein Smartphone ausgewählt, wobei durch die Implementierung der Schnittstelle später auch andere Geräte genutzt werden können. Das Smartphone soll die Schnittstelle exemplarisch implementieren und die Daten sowie Verbindungsstatistiken zur Auswertung anzeigen. Das Wearable soll bei Verbindung Sensordaten mit variabler Rate bereitstellen, um Datenübertragung und Stromaufnahme bei verschiedenen Konfigurationen auswerten zu können.

1.3 Gliederung

Zunächst werden verschiedene Protokolle und Komponententypen vorgestellt, die für das Wearable wichtig sind. Dann werden bestehende Lösungen vorgestellt und geprüft, welche Vor- und Nachteile sie bieten. Im Anschluss werden die eingesetzten Komponenten ausgewählt und beschrieben, wie sie miteinander interagieren sollen. In der Implementierung wird die Beschaltung beschrieben und es werden die Probleme benannt, die während der Implementierung aufgetreten sind. Zum Schluss wird das System anhand der genannten Ziele evaluiert und ein Fazit gezogen.



2 Hintergrund

2.1 Sensor

Um Gelenkstellungen anzugeben, wird eine Position und Rotation gebraucht. Diese Daten werden von einem Beschleunigungssensor und einem Gyrosensor erfasst und bestehen aus je 3 Achsen. Die Sensoren sind platz- und energiesparend zusammen in einem Chip, der Inertialen Messeinheit (IMU), erhältlich. Im Folgenden wird ein Einblick in die Funktionsweise der beiden Sensorentypen gegeben.

2.1.1 Beschleunigungssensor

Beschleunigungssensoren können die Beschleunigung messen, die auf den Sensor einwirkt. Im Bereich der kleinen Bauteile werden zwei Techniken dafür eingesetzt.

Beim kapazitiven Sensor, der in Abbildung 2.1 illustriert ist, wird eine Masse senkrecht-federnd parallel zu einer Platte befestigt. Mit der Platte bildet die Masse einen Kondensator. Bei einer Beschleunigung bewegt sich die Masse zur Platte hin oder davon weg und die Kapazität des Kondensators ändert sich. Durch diese Änderung lässt sich dann der Wert für die Beschleunigung berechnen. [Pat19d]

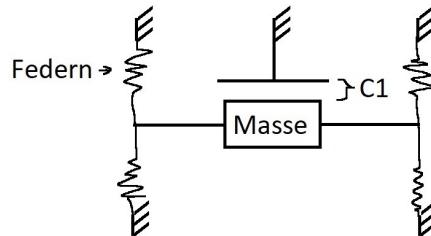


Abbildung 2.1: Funktionsweise eines kapazitiven Beschleunigungssensors. Basierend auf [sen18]

Beim piezoresistiven Sensor, der in Abbildung 2.2 dargestellt ist, wird ein Stoff genutzt, der bei Dehnung seinen Widerstand ändert (Piezoresistiver Effekt). Eine Masse wird an diesen piezoresistiven Stoff befestigt. Durch die Beschleunigung wird der Stoff gedehnt, wodurch die Beschleunigung durch die Änderung des Widerstands berechnet werden kann. [Pat19b]

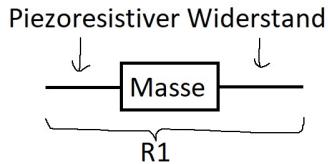


Abbildung 2.2: Funktionsweise eines piezoresistiven Beschleunigungssensors. Basierend auf [sen18]

2.1.2 Gyrosensor

Mit einem Gyrosensor, zu sehen in Abbildung 2.3, wird die Drehung gemessen. Eine Masse wird dabei senkrecht-federnd parallel zu einer Platte befestigt, sodass wieder ein Kondensator entsteht. Parallel zu der Platte wird die Masse von außen zum Schwingen gebracht. Dieses Konstrukt gibt es ein zweites Mal in die andere Richtung schwingend. Durch die Subtraktion der beiden Kapazitäten der Kondensatoren

kann die Drehgeschwindigkeit berechnet werden. Da die Schwingung gegensätzlich ist, bewegen sich die Massen bei einer Drehung in entgegengesetzte Richtungen (Coriolis Effekt) und die Differenz der Kapazitäten ändert sich. Bei einer geraden Beschleunigung bewegen sich beide Massen in die selbe Richtung und die Differenz der Kapazitäten ändert sich nicht. [VPdN⁺¹⁰]

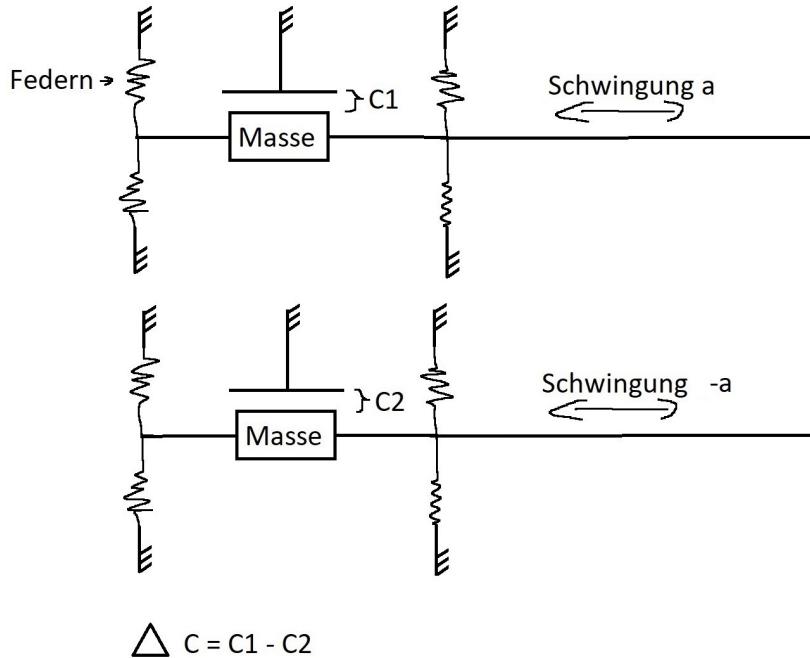


Abbildung 2.3: Funktionsweise eines Gyrosensors [eigene Darstellung]

Da konstant eine Schwingung auf der Masse gehalten werden muss, damit der Coriolis Effekt auftritt, benötigt der Gyrosensor mehr Strom als der Beschleunigungssensor.

2.2 Chipkommunikation

Eine IMU enthält in der Regel keine programmierbare Chiparchitektur sondern wird mit einer Mikrocontroller Unit (MCU) betrieben. Die MCU beinhaltet unter anderem eine Recheneinheit und einen Programmspeicher. Zur Kommunikation zwischen IMU und MCU kann wiederum zwischen einigen Systemen gewählt werden. Die verwendeten IMUs unterstützen die weit verbreiteten Master-Slave-Systeme Inter-Integrated Circuit (I2C) und Serial Peripheral Interface (SPI), die beide auf der gewählten MCU laufen. Die Chipkommunikation läuft in der Regel mit einer langsameren Frequenz als die Recheneinheit. Einerseits kann die Übertragungsfrequenz von der Software emuliert werden, indem Takte der Recheneinheit übersprungen werden, wodurch die Recheneinheit nicht in den Schlafmodus gehen kann. Andererseits kann die Recheneinheit einen weiteren Chip nutzen, der mit einem Buffer die Übertragung effizient abarbeiten kann.

2.2.1 I2C

Bei dem I2C-Protokoll sieht die Verdrahtung Serial Clock (SCL) und Serial Data (SDA) mit Pull-Up Widerständen vor. Der Master startet eine Datenübertragung mit START indem er SDA auf Masse zieht während SCL auf Spannung ist. Dann gibt der Master den Takt auf SCL vor. Es folgt ein Paket mit 7 Bits für die Slaveadresse und 1 Bit für Read oder Write. Der Slave bestätigt den Empfang mit ACK, indem er SDA für eine Bitübertragung auf Masse zieht. Nun können 8-Bit-Datenpakete übertragen werden, die

jeweils mit ACKs bestätigt werden. Zum Schluss sendet der Master STOP, indem er SDA auf Spannung setzt während SCL auch auf Spannung ist. [NXP14]

2.2.2 SPI

Bei dem SPI-Bussystem sind Chip Select (CS), Serial Clock (SCK), Master-In-Slave-Out (MISO) und Master-Out-Slave-In (MOSI), meist mit Pull-Up Widerständen, verkabelt. Der Master startet die Übertragung, indem er CS auf Masse zieht und anschließend auf SCK den Takt vorgibt. Auf MISO kann der Slave dann Daten zum Master schicken und auf MOSI der Master Daten zum Slave. Um die Übertragung zu beenden, wird CS vom Master wieder auf Spannung gezogen. [mic]

2.3 Endgerätekommunikation

Damit die Daten von der MCU zum Endgerät kommen, wird ein weiteres Protokoll benötigt. Es wurde Bluetooth Low Energy (BLE) gewählt. Weiterhin wurde ermöglicht, dass zukünftig auf Bluetooth Mesh (BT Mesh) gewechselt werden kann. Die Entscheidung wird im Abschnitt 4.3 begründet.

Bluetooth Low Energy

BLE ist eine Abwandlung von Bluetooth, die für geringen Energieverbrauch optimiert ist. Geräte können dabei die Rolle von der Central oder Peripheral einnehmen, die einem Master-Slave Protokoll gleichkommen. Um eine Datenverbindung zu starten, kündigt sich die Peripheral auf den drei Advertising Frequenzen an, während die Central diese Frequenzen abhört. Die Parameter dafür, zum Beispiel die bis zu 31 Byte große Payload, werden im Generic Access Profile (GAP) eingestellt. Die Central kann auf das Advertise der Peripheral antworten und sich mit ihr verbinden. [Ada19]

Nach dem Verbindungsauftbau gibt die Central eine Geschwindigkeit vor. Die Geschwindigkeit besteht aus einem Connection Interval, einer Slave Latency und einem Supervision Timeout. Das Connection Interval beschreibt in welchen Zeitabständen die Datenbursts passieren. Die Slave Latency bestimmt, wie oft die Peripheral die Datenbursts pausieren kann, um Energie zu sparen, falls keine Daten gesendet werden müssen. Der Supervision Timeout besagt, nach welcher Zeit eine Verbindung als abgebrochen gilt, wenn eine Seite nicht mehr antwortet. Es gelten die Gleichungen 2.1 bis 2.4.

$$7.5ms \leq \text{ConnectionInterval} \leq 4s \quad (2.1)$$

$$0 \leq \text{SlaveLatency} \leq 499 \quad (2.2)$$

$$100ms \leq \text{SupervisionTimeout} \leq 32s \quad (2.3)$$

$$\text{SupervisionTimeout} > \text{ConnectionInterval} * (1 + \text{SlaveLatency}) \quad (2.4)$$

Später kann einerseits die Peripheral neue Geschwindigkeiten vorschlagen, die von der Central angenommen oder abgelehnt werden, oder andererseits die Central neue Geschwindigkeiten von sich aus bestimmen. [Tex16b]

Bei einer Verbindung stellt die Peripheral Services zur Verfügung, die aus Characteristics bestehen. Jeder Service und jede Characteristic ist im Generic Attribute Profile (GATT) definiert und hat eine eindeutige ID (UUID). Die UUID ist 16 Bit groß, wenn sie aus den vordefinierten Profilen besteht oder 128 Bit für eigene Definitionen. Eine Characteristic repräsentiert einen Wert und kann im Lese- und Schreibzugriff eingeschränkt werden. Die Central kann das notify- oder indicate-Bit setzen, wodurch die Peripheral Änderungen des Wertes mitteilt, wobei beim Indicate der Empfang der Updates von der Central bestätigt werden muss. [Nor16a]

BLE arbeitet nach einem Schichtenmodell ähnlich dem OSI-Schichtenmodell. Während GATT und GAP

auf der oberen Schicht liegen, liegt das Logical Link Control and Adaptation Layer Protocol (L2CAP) in der Mitte. Die Pakete der oberen Schicht werden im L2CAP in Päckchen aufgeteilt. Ein Päckchen besteht aus Header und Data und hat die Größe der Maximum Transmission Unit (MTU-Größe). Falls das Paket nicht komplett in Data passt, werden mehrere Päckchen erstellt. Der Header bei einem Notify-Paket ist 3 Byte groß. [Tex16c]

Bluetooth Mesh

BT Mesh erweitert BLE insoweit, als dass die Datenpakete über ein Mesh-Netzwerk geflutet werden. Der Vorteil davon ist, dass die Reichweite erhöht wird, da Pakete über Zwischenknoten gesendet werden können und, dass die Stabilität steigt, da einzelne Routen ausfallen können. Nachteilig ist, dass der Energieverbrauch der Geräte höher ist, da sie seltener in den Schlafmodus können, weil sie Daten von anderen Knoten übertragen müssen. Über Proxy-Knoten können BLE-Geräte eingebunden werden, die BT Mesh selber nicht unterstützen. [Pat19a]

2.4 Lithiumknopfzelle

Zur Spannungsversorgung wird eine Knopfzelle aus Lithium genutzt. Die Knopfzelle gibt es in verschiedenen Größen. Die gängigsten Größen CR2032, CR2430 und CR2450 eignen sich dafür gut. Die mittleren beiden Ziffern geben jeweils den Durchmesser und die hinteren beiden Ziffern die Dicke in Millimeter an. Da sich dementsprechend die Kapazität verändert, sind in der Tabelle 2.1 die Kapazitäten von stellvertretenden Modellen gelistet. Alle Modelle haben eine Nennspannung von 3 V und gelten unter 2 V als entladen. Durch ihre Selbstentladung von < 1 % pro Jahr, sind sie lange haltbar. [Var14c]

Tabelle 2.1: Typische Kapazität von Knopfzellen verschiedener Größen

Größe	Typische Kapazität
CR2032	230 mAh [Var14a]
CR2430	300 mAh [Var14b]
CR2450	620 mAh [Var14c]

3 Aktueller Stand der Technik

3.1 Bestehende Lösungen

Einige bestehende Hardwarelösungen eignen sich bereits für die Anwendungsfälle.

3.1.1 Texas Instruments CC2650STK

Darunter fällt beispielsweise das TI CC2650STK. Es besteht aus der CC2650 MCU sowie 10 Sensoren, darunter eine MPU-9250 IMU, die über I2C angeschlossen ist. Eine Auflistung der überflüssigen Komponenten, die nicht komplett abgeschaltet werden können, findet sich in Tabelle 3.1. Eine CR2032 Knopfzelle mit 230 mAh verliert dadurch $\frac{365d * 24h}{(230mAh/0.00351mA)} \approx 13.4\%$ der Kapazität pro Jahr. Die IMU verbraucht 3.4 mA, wenn Gyrosensor bei 1 kHz und Beschleunigungssensor bei 4 kHz laufen [Inv16]. Die MCU unterstützt zwar BLE, aber kein BT Mesh. Das System ist nicht mehr in Europa verfügbar. [Tex]

Tabelle 3.1: Stromaufnahme der ausgeschalteten zusätzlichen Komponenten am TI CC2650STK

Sensortyp	Stromaufnahme ausgeschaltet
Lastschalter	0.9 μ A [Tex15]
Feuchtigkeitssensor	0.11 μ A [Tex16a]
Drucksensor	0.1 μ A [Bos18b]
Infrarottemperatursensor	2 μ A [dig]
Lichtsensor	0.4 μ A [Tex17]]
Gesamt	3.51 μ A

3.1.2 aconno ACNSENSA

Das aconno ACNSENSA besteht aus einer nRF52832 MCU und 5 Sensoren, darunter eine LSM9DS1 IMU über I2C. Eine Auflistung der überflüssigen Komponenten, die nicht komplett abgeschaltet werden können, findet sich in Tabelle 3.2. Eine CR2450 Knopfzelle mit 620 mAh verliert dadurch nur $\frac{365d * 24h}{(620mAh/0.0014mA)} \approx 2\%$ der Kapazität pro Jahr. Der Gyrosensor der IMU verbraucht 4.0 mA bei 952 Hz. Weitere 600 μ A sind zusammen angegeben für den Beschleunigungssensor bei 952 Hz und Magnetometer bei 20 Hz, der sich aber ausschalten lässt [STM15]. Die MCU unterstützt BT Mesh. [aco17b] Das System ist in nur geringen Stückzahlen verfügbar. So sind bei bekannten Händler nur 5 Exemplare zu erwerben [mou]. Die Produktwebseite sowie die Datenblätter waren über den Zeitraum dieser Arbeit teilweise nicht zugreifbar und es existieren mehrere Versionen unter dem selben Namen (vgl. Datenblatt und Produktbild bei mouser.de).

Tabelle 3.2: Stromaufnahme der ausgeschalteten zusätzlichen Komponenten am aconno ACNSENSA

Sensortyp	Stromaufnahme ausgeschaltet
Drucksensor	1 μ A [aco17b]
Feuchtigkeitssensor	0.06 μ A [aco17b]
Lastschalter	0.34 μ A [Vis15]
Gesamt	1.4 μ A

3.1.3 Arduino Primo Core

Der Arduino Primo Core beinhaltet ein nRF52832 MCU und 3 Sensoren, inklusive einer LSM6DS3 IMU über I2C. Eine Auflistung der überflüssigen Komponenten, die nicht komplett abgeschaltet werden können, findet sich in Tabelle 3.3. Eine CR2032 Knopfzelle mit 230 mAh verliert dadurch $365d * 24h / (230mAh / 0.0015mA) \approx 5.7\%$ der Kapazität pro Jahr. Die IMU verbraucht bei 1.6 kHz nur 1.25 mA [STM17b]. Das System kann nicht mehr gekauft werden und ist auf der Produktseite als 'retired' gelistet.[ARD] [Ard16]

Tabelle 3.3: Stromaufnahme der ausgeschalteten zusätzlichen Komponenten am Arduino Primo Core

Sensortyp	Stromaufnahme ausgeschaltet
Magnetometer	1 μ A [STM17a]
Feuchtigkeitssensor	0.5 μ A [STM16]
Gesamt	1.5 μ A

3.2 Zusammenfassung und verwandte Arbeiten

Mit den existierenden Lösungen wäre es grundsätzlich möglich, das Wearable umzusetzen. Allerdings gibt es neben der problematischen Verfügbarkeit eine Limitierung auf die gegebene Hardware. So verschwenden alle Lösungen Strom und Platz durch Sensoren, die für den benötigten Anwendungsfall nicht nötig sind, auch wenn das im Falle des aconno ACNSENSA vernachlässigbar ist. Es ist zu beachten, dass zusätzlich zu dem Standbyverbrauch der Komponenten auch Leckströme durch Kondensatoren und Verluste durch Pull-Up Widerstände hinzuzufügen sind.

Alle genannten Lösungen nutzen für die Kommunikation zwischen MCU und IMU das I2C Protokoll, während in einer Arbeit [MT12] ermittelt wurde, dass I2C einen doppelt so hohen Energieverbrauch wie SPI hat. Auch zwischen den IMUs gibt es Unterschiede in der Stromaufnahme. So benötigt die IMU des Arduino Prime Core weniger als ein Drittel des Stroms der anderen Beiden und enthält als Einziges keinen Magnetometer.

Ein Magnetometer entspricht einem elektrischen Kompass und bestimmt die Rotation in Ausrichtung zu den Erdpolen. In der Arbeit [ABCO12] wurde ein Sensorfusionsalgorithmus entwickelt, der die Genauigkeit des Gyrosensors mit den Daten eines Magnetometers verbessert. Der Algorithmus kann in zukünftigen Versionen integriert werden, falls die Genauigkeit der verwendeten IMU nicht ausreichen sollte.

In dem Projekt [Cho] wird ein System zur Bewegungsaufnahme mit einer IMU entwickelt. Hierbei werden die Sensoren per Kabel miteinander verbunden. Es demonstriert, dass eine Bewegungserkennung mit IMUs möglich ist.

4 Design und Planung

Um das Vorhaben umzusetzen, müssen zuerst die Anforderungen bestimmt, einige Entscheidungen getroffen und erste Pläne entworfen werden.

4.1 Anforderungen

Als Komponenten werden hauptsächlich eine IMU und eine kompatible MCU, die Daten über BLE übertragen kann sowie für zukünftige Tests auch BT Mesh unterstützt, benötigt. Die Komponenten sollen ähnliche Anforderungen an die Spannungsversorgung besitzen wie eine Lithiumknopfzelle sie bereitstellen kann, damit kein zusätzlicher Spannungsregler benötigt wird. Ferner sollen die in der Abschnitt 1.2 festgelegten Ziele angestrebt werden.

4.2 Spannungsversorgung

Zu den typischen mobil verfügbaren Spannungsquellen gehören wiederaufladbare Akkus und Einwegbatterien, die elektrische Ladung chemisch speichern können. Die Gängigsten basieren auf Nickel oder Lithium, wobei die Lithiumbasierenden wegen der höheren Ladungsmenge bei gleichem Gewicht und Größe unter dem Gesichtspunkt der Mobilität präferiert werden. Lithiumakkus benötigen eine Ladeelektronik sowie einen Entladeschutz. Diese Komponenten nehmen Platz auf der Platine ein, verbrauchen Strom, wodurch die Effizienz sinkt, und verlieren ihre maximale Kapazität mit zunehmendem Alter. Durch ihre maximale Spannung von 4.2 Volt könnten sie nicht ohne Spannungswandler mit den meisten Komponenten betrieben werden, welcher wiederum Effizienz einbüßen würde. [Pat19c]

Deshalb wurden Lithiumknopfzellenbatterien als Spannungsversorgung gewählt. Durch ihre flache Bauform können sie platzsparend an Platinen befestigt werden. Während auf dem Prototyping-Board Platz für eine CR2032-Knopfzelle bereit steht, soll auf dem Evaluationsboard wegen der größeren Kapazität eine CR2450-Knopfzelle genutzt werden.

4.3 Datenübertragung zwischen Wearable und Endgerät

Um das am Besten geeignete Protokoll zu finden, welches die Sensordaten der IMU auf die Endgeräte übertragen kann, wurden verschiedene Protokolle verglichen und nach dem Ausschlussverfahren ausgewählt.

Eine drahtgebundene Datenübertragung ist schnell und sehr energiesparend. Es sind viele verbreitete Anschlüsse spezifiziert, aus denen gewählt werden könnte. Die Mobilität ist dabei aber sehr stark eingeschränkt, da Kabel insbesondere beim Sport sehr stören.

Während einige drahtlose Kommunikationsprotokolle wie NFC wegen der geringen Reichweite nicht geeignet sind, sind Mobilfunkprotokolle wie LTE wegen zu hoher Reichweite ineffizient [ZJM17]. Die bekannten Protokolle Wi-Fi und Bluetooth arbeiten unter anderem auf der 2.4-GHz Antenne, weswegen Peer-to-Peer(P2P) Protokolle auf dieser Frequenz in Tabelle 4.1 verglichen wurden.

Tabelle 4.1: P2P-Protokolle auf der 2.4-GHz Frequenz

Protokoll	Typische Anwendung	Kommentar
Wi-Fi Hotspot	Teilen der Internetverbindung in einem lokalem Netzwerk	Am Smartphone kann ein Hotspot erstellt werden, die Wearables könnten ihn suchen und sich verbinden, woraufhin z.B. über eine REST-API kommuniziert werden kann. Es kann auch die 5-GHz Frequenz genutzt werden.
Wi-Fi Direct	P2P-Kommunikation	Wie Wi-Fi Hotspot, aber die Wearables bekommen keinen Internetzugriff vom Smartphone.
Bluetooth (BT)	Datenübertragung, Audiostreaming	Nicht für niedrigen Energieverbrauch ausgelegt.
BT Low Energy (BLE)	P2P-Kommunikation mit geringem Energieverbrauch, z.B. Smartwatches	Während die maximale Geräteanzahl nicht vom Protokoll spezifiziert ist, ist sie in Android auf 7 Geräte beschränkt ^a . Weiterhin ist die Anzahl zum Beispiel durch die Auslastung der Geräte und des Funkkanals begrenzt.
BT Mesh	Mesh-Kommunikation mit geringem Energieverbrauch	Nachrichten werden hierbei über das gesamte Netzwerk geflutet, wodurch die Reichweite des Netzwerkes erhöht wird und die Auslastung auf das Netzwerk verteilt wird aber der Energieverbrauch aller Knoten steigt. BLE Geräte können mit Mesh-Netzwerken kompatibel gemacht werden, indem sie sich zu einem Knoten des Netzwerks verbinden.
Thread, ZigBee	Smarthome	Nicht ohne weitere Hardware unter Android
Ant, Ant+	Sensordatenübertragung mit geringem Energieverbrauch	Nicht von allen Smartphones ohne zusätzliche Hardware unterstützt

^a Beschränkung durch GATT_MAX_PHY_CHANNEL [Goo14]

Da Bluetooth nicht für einen geringen Energieverbrauch ausgelegt ist, werden die Alternativen BLE und BT Mesh bevorzugt. Die Smarthome Protokolle funktionieren ohne zusätzliche Hardware nicht am Smartphone. Ant und Ant+ sind zwar für die Sensordatenübertragung bei Smartphones ausgelegt, aber brauchen zusätzlich ein Dongle, wenn sie das Protokoll nicht unterstützen. Sowohl handelsübliche Laptops als auch das vorliegende Smartphone, ein Pocophone F1, unterstützt die Protokolle nicht.

"BLE ist etwa 30% energieeffizienter als Wi-Fi"¹ [PPLA17], weswegen die Wi-Fi Protokolle entfallen. BT Mesh löst zwar das Problem der Geräteanzahlbeschränkung unter Android, allerdings auf Kosten des Energieverbrauchs. Die erweiterte Reichweite durch das Mesh-Netzwerk wird bei einem Wearable in der Regel nicht benötigt.

Die Datenübertragung zwischen Wearable und Endgerät soll mit BLE stattfinden, da dieses Protokoll von fast jedem Smartphone und Laptop unterstützt wird und die Anforderungen erfüllen kann. Zusätzlich soll BT Mesh als Option offen gelassen werden, da es gegebenenfalls auftretende Probleme mit BLE lösen kann. Die zusätzliche Stromaufnahme durch das Mesh-Netzwerk müsste zunächst evaluiert werden.

¹ Übersetzung durch den Verfasser

4.4 Wahl der Hauptkomponenten

Die Arbeit hat sich zunächst danach gerichtet Komponenten zu wählen, die es auf fertige Platinen gelötet gibt, da sich QFN-Komponenten händisch nicht löten lassen.

Da sich die Stromaufnahme von MCUs anhand der Datenblätter schlecht vergleichen lässt, wurde betrachtet, welche Komponenten sich oft zusätzlich auf den Platinen befinden, aber viel Strom verbrauchen. In einem Blog [mad19] wurden verschiedene Komponenten von einem Arduino Pro Mini entfernt und deren Auswirkungen auf die Stromaufnahme ermittelt. Das Entfernen der LED, die dauerhaft leuchtet um den Betrieb anzuzeigen, hat eine Einsparung von mehr als 15 % bei aktiver Nutzung bewirkt und mehr als 90 % im Schlafmodus der Recheneinheit. Das Entfernen des Spannungsreglers hat mindestens weitere 9 % bei Nutzung und 75 % im Standby eingespart. Ein anderer Blog [ALE16] beschreibt, dass ein integrierter Programmierer zwar einen einfach zu verwendenden USB Anschluss bietet, aber gleichzeitig die Stromaufnahme verdreifachen kann. Während eine LED problemlos zu entfernen ist, wurde auf die anderen beiden Bauteile nach Möglichkeit verzichtet, da ein Entfernen auch die Funktion der Platine einschränken oder die Platine zerstören kann.

4.4.1 MCU

Die Bluetooth SIG, die das Bluetooth Protokoll spezifiziert, hat eine Liste mit geprüften Implementierungen von BT Mesh veröffentlicht [Blu]. Mit dieser Liste wurden die Herstellerseiten nach passenden verfügbaren MCUs durchsucht, bis die Wahl auf die nRF52832 MCU gefallen ist. Die MCU war schon in den zwei fertigen Produkten von Arduino und aconno enthalten, weswegen von einer hohen Verbreitung auszugehen ist.

Der nRF52832 hat eine Spannungsanforderung von 1.7 bis 3.6 V, wodurch er sich direkt an einer Knopfzelle betreiben lässt. Das EasyDMA-Modul enthält einen Buffer um SPI- und I2C-Kommunikation abzuhandeln, während die MCU im Schlafmodus ist. Das schwächere Modell nRF52810 unterstützt BT Mesh nicht. Das stärkere Modell nRF52840 hat mehr Speicherplatz und unterstützt weitere Protokolle aber verbraucht dementsprechend mehr Strom. [Nor]

Durch den Pinabstand von 2.54 mm, wie er sich auch auf Arduinos vorfindet, ist die Platine von Spark-Fun sehr einfach zu verwenden. Sie enthält eine Power-LED, die sich über JP6 trennen lässt. Es existiert ein Spannungsregler, der sich überbrücken lässt. Die Platine stellt eine Alternative dar, falls sich mit den kleineren Platinen wegen der Größe nicht mehr arbeiten lassen würde. Die Größe dieser Platine ist nicht direkt angegeben, aber wegen des Pinabstands mindestens 15 x 43 mm. [Spa16]

Der ACN52832 von aconno enthält weder Power-LED noch Spannungsregler sondern nur die nötigsten Komponenten. Er hat eine Größe von 20 x 24.8 mm. [aco17a]

Der BL651 von Laird ebenfalls nur die nötigsten Komponenten und hat eine Größe von 10 x 14 mm [Lai19]. Es existieren noch weitere Platinen vom nRF52832 sodass eine sehr gute Verfügbarkeit gegeben ist. Sollte eine Platine nicht mehr erhältlich sein, könnte sie durch eine andere ersetzt werden, da die Platinen nur die Pins vom nRF52832 besser zugänglich machen und die nötigen Taktgeber, Kondensatoren und Antennen bereitstellen sollen. Für den Prototypen wurde zunächst das nRF52 DK von Nordic verwendet, da es auch den externen Programmierer für die Platinen enthält und die Pins ohne zu Löten mit Jumperkabel verbunden werden können.

4.4.2 IMU

Auf der Suche nach einer passenden IMU haben sich der STMicroelectronics LSM6DSL und Bosch BMI260 als besonders stromsparend hervorgetan. Der LSM6DSL läuft mit 1.71 - 3.6 V, verbraucht 0.4 mA im normalen Modus und 0.65 mA im Performance-Modus [STM17c]. Die zugehörige Platine STEVAL-MKI178V2 enthält keine überflüssigen Komponenten.

Der BMI260 läuft mit 1.7 - 3.6 V und verbraucht 0.685 mA. Der Sensor war zu Beginn der Arbeit angekündigt. Da er pinkompatibel zum Vorgänger BMI160 ist, wurde mit dem BMI160 entwickelt. Zum Ende der Arbeit sollte er durch den BMI260 getauscht werden, aber leider war er zu dem Zeitpunkt nicht verfügbar. [Bos]

Der BMI160 läuft auch mit 1.7 - 3.6 V, aber verbraucht 0.925 mA [Bos18a]. Das BMI160 Shuttle Board enthält zusätzlich einen BMM150 Magnetometer. Der Magnetometer hat im Standby einen Verbrauch von $1 \mu\text{A}$, kann aber mechanisch entfernt werden [Bos19].

Beide IMUs haben einen FIFO-Buffer eingebaut. Die gemessenen Daten können in dem Buffer hinterlegt werden, sodass die MCU die Daten in Bursts lesen und länger im Schlafmodus bleiben kann, da ein Wechsel der Energiemodi wiederum Strom verbraucht.

Mit zwei Interrupt Pins können die IMUs die MCU über bestimmte Events informieren. Das DataReady-Event benachrichtigt, wenn der Sensor neue Daten gemessen hat. Das FIFO-Watermark- oder FIFO-Threshold-Event wird geworfen, wenn die FIFO über einen eingestellten Prozentsatz gefüllt ist. Das FIFO-Full-Event zeigt an, dass die FIFO komplett gefüllt ist. Für spezielle Anwendungen unterstützen beide IMUs weitere Events, wie das Significant-Motion-Event um ein Aufheben des Sensors durch einen Nutzer zu melden.

Da die Platinen der IMUs wegen ihrer Größe nicht optimal sind und zukünftige Anwendungen bessere Sensoren oder einen eingebauten Magnetometer benötigen können, soll der Code modular aufgebaut sein, sodass das Sensormodell einfach getauscht werden kann.

4.5 Zusammenwirken der Komponenten

Während SPI 4 Datenverbindungen braucht, braucht I2C 2 Datenverbindungen. Da die Pins in der Software der MCU zugewiesen werden, kann für SPI verkabelt und die selbe Verdrahtung auch für I2C genutzt werden. Abbildung 4.1 stellt die Verbindungen graphisch dar.

Wenn das Wearable nicht mit einem Endgerät verbunden ist, soll es in den Schlafmodus wechseln. Über einen Knopf soll es aufgeweckt werden und mit dem Advertise beginnen. Mit dem Knopf soll das Advertise auch wieder abgebrochen werden und das Wearable in den Schlafmodus versetzt werden können.

Wenn das Wearable mit einem Endgerät verbunden ist, soll es sich trennen lassen, indem der Knopf über einige Sekunden gedrückt gehalten wurde, damit es sich nicht versehentlich trennt.

Um dem Nutzer ein Feedback über den Status zu geben, soll eine LED verwendet werden. Die LED soll beim Advertise in regelmäßigen Abständen blinken, sodass sich die Stromaufnahme nicht wie bei einer immer angeschalteten Power-LED auswirkt. Wenn eine Verbindung hergestellt wurde, soll eine

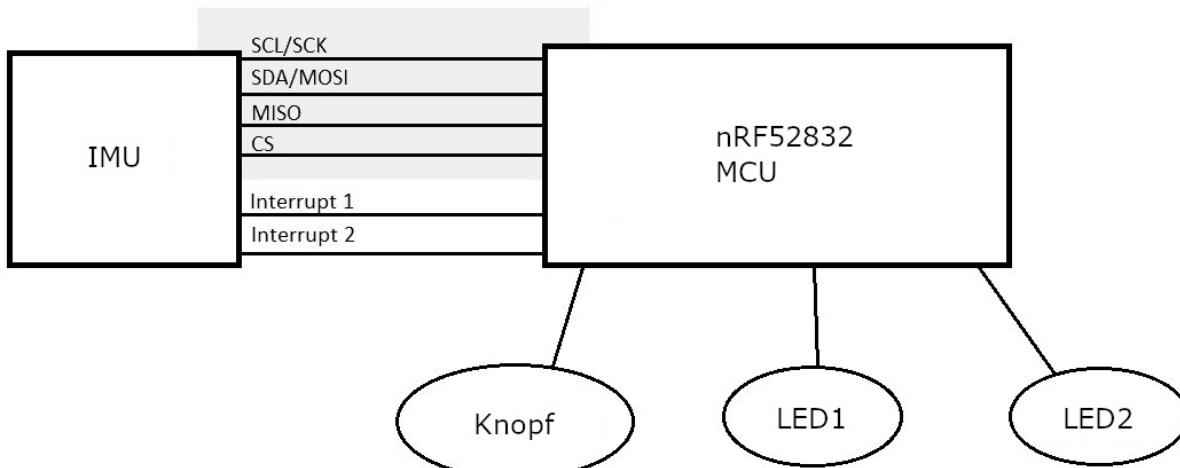


Abbildung 4.1: Veranschaulichung der Verbindungen der benötigten Komponenten

zweite LED zu Beginn der Verbindung aufblinken. Wenn während einer Verbindung kurz auf den Knopf gedrückt wird, soll die zweite LED kurz aufleuchten.

4.6 BLE Schnittstelle

In einer Characteristic sollen die 3 Achsen des Beschleunigungssensors, die 3 Achsen des Gyrosensors und der Zeitstempel hinterlegt werden. Damit soll sich der Bewegungsablauf des Sensors zeitlich korrekt rekonstruieren lassen, da BLE die Daten in Burst mit Zeitabständen vom Connection-Interval übergibt und die Daten in Burst von der FIFO abgerufen werden können. Um die MCU möglichst selten aus dem Schlafmodus zu holen, soll die FIFO der IMU in den Buffer der EasyDMA geleert werden, sobald sie komplett gefüllt ist. Zusätzlich soll umgefüllt werden, wenn die MCU durch andere Interrupts die z.B. durch den BLE-Stack aufgeweckt wird. Der Wert der Characteristic soll von der MCU nur gelesen werden können, aber es soll das Notify-Bit gesetzt werden können.

Mit einer zweiten Characteristic soll sich die Abfragerate der IMU einstellen lassen. Da die Sensorabfragerate damit von der Datenübertragungsrate unabhängig ist, lässt sich die Stromaufnahme getrennt evaluieren. Während eine niedrige Sensorabfragerate mit einer hohen Datenübertragungsrate sehr geringe Latenzen der Sensordaten ermöglicht, sind hohe Sensorabfrageraten mit niedrigen Datenübertragungsraten bei weniger zeitkritischen Anwendungen zur intensiven Auswertung interessant. Damit die Verbindung aufrecht erhalten werden aber die Datenerfassung pausiert werden kann, soll die IMU über die Characteristic auch kurzzeitig ausgeschaltet werden können. Die zweite Characteristic soll von der MCU gelesen und geschrieben werden können, sowie das Endgerät bei Änderungen benachrichtigt werden.

4.7 Applikation des Android Smartphones

Beim Start der App soll nach den Wearables gesucht und zu den Wearables verbunden werden. Bei einer Verbindung soll das Notify-Bit der Characteristics gesetzt werden, damit neue Daten beim Smartphone ankommen. Um einschätzen zu können, ob die empfangenen Daten korrekt erfasst werden und ankommen, sollen die Sensordaten und Statistiken zur Verbindung graphisch dargestellt werden. Da es im Android SDK keine einfache Möglichkeit dazu gibt, soll die Bibliothek Androidplot² genutzt werden. Der Wert der zweiten Characteristic soll gesetzt und die Verbindungsdatenrate geändert werden können.

² <http://androidplot.com/>, abgerufen am 10.07.2019



5 Implementierung

Die Implementierung setzt sich zusammen aus dem Programm auf dem Wearable, der Hardware des Wearables und der Android App. Im Folgendem werden die Teilaufgaben einzeln näher betrachtet.

5.1 Wearable Programm

5.1.1 Entwicklungsumgebung

Die nRF52832 MCU wird neben dem offiziellen SDK auch von der plattformübergreifenden Softwareumgebung mBed unterstützt. Eine plattformübergreifende Softwareumgebung zu nutzen kann es vereinfachen, den Code von der MCU auf ein anderes MCU-Modell zu portieren. Während die Einrichtung von Mbed sehr einfach ist, da der Code im Browser geschrieben wird, unterstützt Mbed bisher leider nicht BT Mesh, weswegen es sich nicht zur weiteren Evaluation eignet [Arm19].

Die Arbeit nutzt das nRF5 SDK v15.3.0. Damit das SDK vom Compiler bei Nutzung der IDE Segger Embedded Studio gefunden werden kann, muss es nach C:\nrf52\ sdk entpackt werden oder die Pfade in den .emProject-Dateien ersetzt werden. Hier würde es sich eignen, zukünftig eine Lösung mit systemweiten Pfadvariablen zu finden. Bevor eine nRF52832 MCU genutzt werden kann, muss zunächst der BLE-Stack installiert werden, indem die .hex-Datei aus dem Softdevice 132 v6.1.1 auf die MCU übertragen wird.

Statt die IDE Segger Embedded Studio zu nutzen, kann alternativ der GCC Compiler mit einer beliebigen IDE eingesetzt werden. Bei der komplizierten Einrichtung von GCC und den benötigten Tools ist dann zu beachten, dass bei der zum Zeitpunkt der Arbeit aktuellen Version 8-2018-q4-major der GNU Arm Embedded Toolchain¹ ein Out-of-Range-Fehler in einer Intel-Hex-File geworfen wird. Der Fehler kann behoben werden, indem die Datei bin\arm-none-eabi-objcopy.exe mit der aus Version 7-2018-q2-update ersetzt wird. Der Log kann über den Configuration Wizard in sdk_config.h auf das UART-Protokoll umgestellt werden und lässt sich über das externe Programm Putty² auslesen.

In der Arbeit wurde wegen der einsteigerfreundlicheren Einrichtung mit der IDE Segger Embedded Studio gearbeitet. Die IDE stürzt in der genutzten Version 4.12 leider regelmäßig ab. Wird die IDE dagegen aktualisiert, gibt das eingebaute Debug Terminal nur noch unsichtbare Zeichen aus (vgl. [Mau19]). Im Debug Terminal wird der Log, der vom RTT-Protokoll übertragen wird, angezeigt. Wenn der Log über RTT zu schnell ist, werden Zeilen verworfen. Um dem entgegenzuwirken, kann über Configuration Wizard in sdk_config.h das NRF_LOG_DEFERRED ausgestellt werden.

5.1.2 Programmaufbau

Das Programm main.c ist der Einstiegspunkt der MCU. Hier werden die vordefinierten und eigenen Module initialisiert und die Hauptschleife verwaltet. Unter den vordefinierten Modulen sind zum Beispiel Logging, Timer und Energiemanagement. Da das Template 700 Zeilen umfasst, wurden einige Initialisierungen in weitere Dateien ausgelagert. Der Code peer_advertise.c verwaltet die beiden Module, die zum Advertisen und zur optionalen Verbindungsverschlüsselung nötig sind. Hier kann unter anderem eingestellt werden, wie lange das Advertisen stattfindet, bevor das Wearable automatisch in den Schlafmodus wechselt und in welchen Abständen die Pakete beim Advertisen verschickt werden. Die Datei

¹ <https://developer.arm.com/tools-and-software/open-source-software/developer-tools/gnu-toolchain/gnu-rm>, abgerufen am 13.07.2019

² <https://www.putty.org/>, abgerufen am 11.07.2019

`board_manager.c` steuert die LEDs und den Knopf. Die Definition `custom_board.h` beschreibt, wie viele LEDs und Knöpfe angeschlossen sind und an welchen Pins sie liegen.

Im Package `ServiceCharacteristicSensor` befindet sich der Code für die BLE-Service und den Sensor.

5.1.3 BLE-Service

Um den BLE Service und die Characteristics zu erstellen, wird nach dem Tutorial³ eines Mitarbeiters von Nordic Semiconductor gearbeitet. Beim Initialisieren des Services `my_service.c` werden die beiden Characteristics `chara_conf.c` und `chara_data.c` erstellt und der Sensor vorbereitet. Wenn sich ein Endgerät verbindet, startet der Sensor das Sammeln der Daten und beim Trennen wird er angehalten und zurückgesetzt.

Erfasst der Sensor einen neuen Datensatz, wird der Datensatz im Wert der Characteristic `chara_data.c` veröffentlicht. Da die Werte erst zum nächsten Connection Interval verschickt werden, müssen sie vom BLE-Stack zwischengespeichert werden. Ist der Buffer allerdings voll, wird beim Einfügen ein `NRF_ERROR_RESOURCES`-Fehler von der Funktion `sd_ble_gatts_hvx` geworfen. Die Minimalgröße des TX-Buffers kann vor dem Initialisieren des BLE-Stacks mit der Konstanten `TX_QUEUE_SIZE` manuell gesetzt werden und ist standardmäßig 0. Es ist möglich, die tatsächliche Größe abzuschätzen, da bei einer Teilentleerung des Buffers ein `TX_COMPLETE`-Event geworfen wird. Wird beim Einfügen in den TX-Buffer ein Counter hoch- und bei einem `TX_COMPLETE`-Event runtergezählt, kann die Kapazität bei einem `NRF_ERROR_RESOURCES`-Fehler erhalten werden. Nach diesem Verfahren wurde bei dem Programm dieser Arbeit ermittelt, dass die tatsächliche Kapazität etwa 3 Einheiten mehr als die Minimalgröße beträgt. Wenn betrachtet wird, dass die verwendeten IMUs die Daten mit bis zu 1600 Hz erfassen können, ist die benötigte Buffergröße $1600\text{Hz} * 4\text{s} = 6400$ wegen des maximalen Connection Intervals von 4 Sekunden. Den Buffer auf diese Größe zu setzen muss aber nicht sinnvoll sein, da nicht sicher gestellt ist, dass in einem Connection Interval der komplette Buffer geleert wird. Das ist von der Übertragungsgeschwindigkeit abhängig, die sich auch aus der Empfangsqualität und der Paketverlustrate ergibt. Ist der Buffer größer als die Übertragungsgeschwindigkeit erlaubt, wird der Buffer volllaufen, Sensordaten werden letztendlich verworfen und die eingereichten Sensordaten kommen erst in einem späteren Connection Interval an, sodass eine Verzögerung entsteht. Wird der Buffer kleiner gewählt, passen nicht alle Sensordaten hinein und müssen verworfen werden.

Im Optimalfall sollte die Übertragungsgeschwindigkeit maximiert werden und der Buffer dazu passend mit etwas Spielraum nach unten gewählt werden. Die maximale MTU-Größe kann mit dem Configuration Wizard in `sdk_config.h` mit der Konstanten `NRF_SDH_BLE_GATT_MAX_MTU_SIZE` geändert werden. Sowohl eine größere MTU-Größe als auch ein größerer TX-Buffer benötigt zusätzlichen Platz in der BLE-Stack-Section vom RAM. Der reservierte Platz im RAM kann eingestellt werden mit der Konstanten `RAM_START` unter den `linker_section_placement_macros` in der SES-Projekt-Datei, zu finden mit der Endung `.emProject`. Wird zu wenig Platz reserviert, startet das Programm nicht.

Der Wert, der hinter der Characteristic `chara_data.c` steht, besteht aus den Komponenten in Abbildung 5.1. Aus dem Inhalt ergibt sich eine Größe von 16 Byte. Das MSb des Zeitstempels wird nicht genutzt, da auf Endgeräten genutzte Hochsprachen oft keine vorzeichenlosen Werte interpretieren können. Die LSM6DSL IMU speichert den Zeitstempel im 6.4 ms Format. Es ist sinnvoll, dieses Zeitformat auf das schnellste Datenerfassungsintervall von $\frac{1\text{s}}{1600\text{Hz}} = 0.625\text{ms}$ zu normalisieren, sodass beide Sensoren dieselbe Zeiteinheit liefern können. Allerdings ist die Zeiteinheit der LSM6DSL IMU kein Vielfaches, sodass Rundungsfehler entstehen würden. Beim BMI160 wird die Einheit der Zeitstempel mit 0.625 ms übertragen. Hier wird der Zeitstempel aber von der MCU berechnet, sodass er nicht mehr korrekt wäre,

³ https://github.com/bjornspockeli/custom_ble_service_example, aufgerufen am 11.07.2019

wenn die FIFO der IMU überläuft. Deswegen wird die FIFO des BMI160 nur zu 75 % gefüllt. Der LSM6DSL arbeitet zudem mit leicht verschiedenen Frequenzen als der BMI160. Die Unterschiede können in Tabelle 5.1 betrachtet werden. [STM17c] [Bos18a]

Tabelle 5.1: IMU Frequenzen (in Hz)

BMI160	25	50	100	200	400	800	1600
LSM6DSL	26	52	104	208	416	833	1666

In Zukunft sollte eine einheitliche Lösung gefunden werden. Zur Berechnung der Statistiken soll vorerst mit unverarbeiteten Daten gearbeitet werden und am Smartphone umgerechnet werden.

```

1 typedef struct {
2     int16_t accel_x;
3     int16_t accel_y;
4     int16_t accel_z;
5     int16_t gyro_x;
6     int16_t gyro_y;
7     int16_t gyro_z;
8     uint32_t time;
9 } imu_data_t;
```

Abbildung 5.1: Inhalt von Characteristic chara_data.c

Schickt das Endgerät dem Wearable mit der Characteristic chara_conf.c eine neue Konfiguration, wird versucht, die Konfiguration anzuwenden. Ändert sich die Konfiguration, wird sie dem Endgerät mit einem Notify mitgeteilt.

5.1.4 IMU Integration

Damit die IMU, aber auch die verwendeten Protokolle, leicht austauschbar sind, wurde der Code für die IMU aufgeteilt. Die Definitionen in imu.h soll dabei jede IMU implementieren und ist die Schnittstelle zum BLE-Service. Der Header *_protocol.h deklariert das Protokoll, mit dem die IMU mit MCU kommuniziert, das heißt SPI oder I2C. Mit der Konstanten PROTOCOL_SPEED lässt sich die Geschwindigkeit des Protokolls ändern. Der Header *_get_data.h deklariert die Art, wie Daten gesammelt werden. Die Implementierungen können unterschiedliche Interrupts nutzen wie FIFO-Full oder Data-Ready. Um die Implementierung auszutauschen muss eine andere .c-Datei gelinkt werden, indem die entsprechende Zeile im .emProject-Projekt geändert wird.

Die IMU soll mithilfe der Callback-Funktion `bool (*send_data)(imu_data_t)` die gemessenen Werte an die MCU zurück liefern.

Beim Testen mit dem Prototypen ist das Problem, das in Abbildung 5.2 veranschaulicht wird, aufgekommen. Wenn die Sensordatenrate zu schnell für den TX-Buffer oder dem Connection Interval ist, empfängt das Endgerät die Sensordaten mit wechselnder Verzögerung. Wurde der TX-Buffer gerade durch ein Connection Interval geleert, werden alle nächsten Sensordaten in den Buffer eingetragen, bis der Buffer voll ist. Danach werden alle Sensordaten bis zum nächsten Connection Interval verworfen. Prinzipiell kann das Problem gelöst werden, indem der Connection Interval verkleinert, der TX-Buffer vergrößert oder die Datenmenge verkleinert wird. Da die Größe vom TX-Buffer nach der Initialisierung nicht geändert werden kann und von der veränderlichen Durchsatzrate beschränkt ist, reicht es nicht unbedingt alleine aus, diesen Parameter zu variieren. Der Connection Interval wird vom Endgerät bestimmt. Das Wearable kann eine neue Geschwindigkeit vorschlagen. Können sich Wearable und Endgerät nicht einigen, wird die Verbindung getrennt. Das würde das Nutzungserlebnis stark negativ beeinflussen.

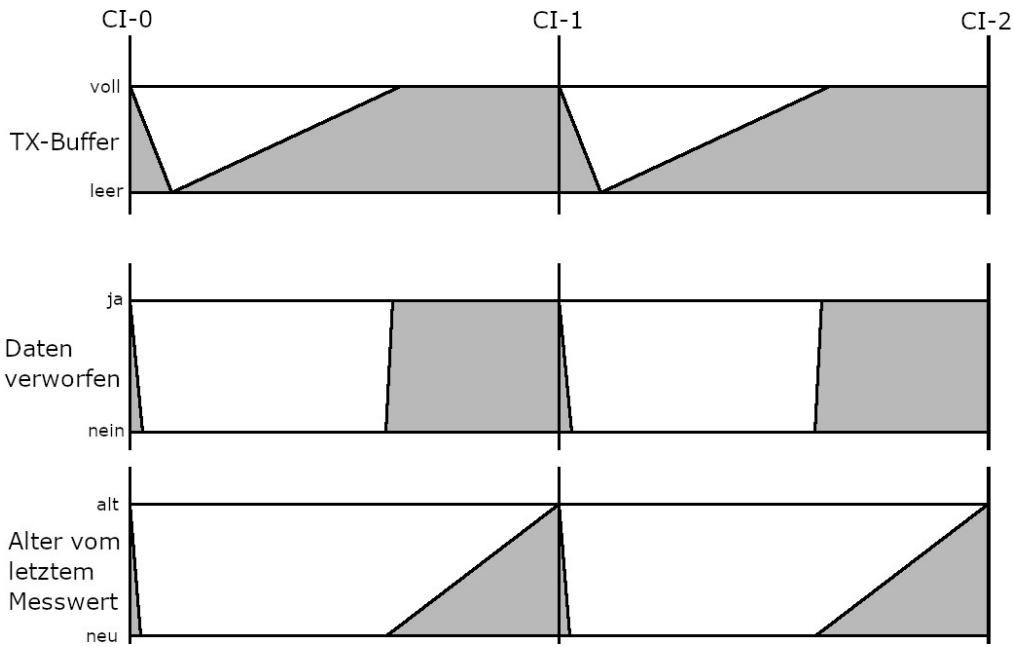


Abbildung 5.2: Darstellung des Datenstaus. CI = Connection Interval

Um die Datenmenge zu reduzieren, kann der Sensor langsamer gestellt oder absichtlich Daten verworfen werden. Während das Zweite eine feinere Einstellung ermöglicht, ist das Erste stromsparender. Deswegen wird ein Algorithmus eingesetzt, der die Geschwindigkeit vom Sensor herabsetzt, wenn ein neues Connection Interval vorliegt oder der Nutzer eine neue Geschwindigkeit setzen möchte. Das Ergebnis soll dem in Abbildung 5.3 veranschaulichte Verhalten nachkommen. Der Rückgabewert der

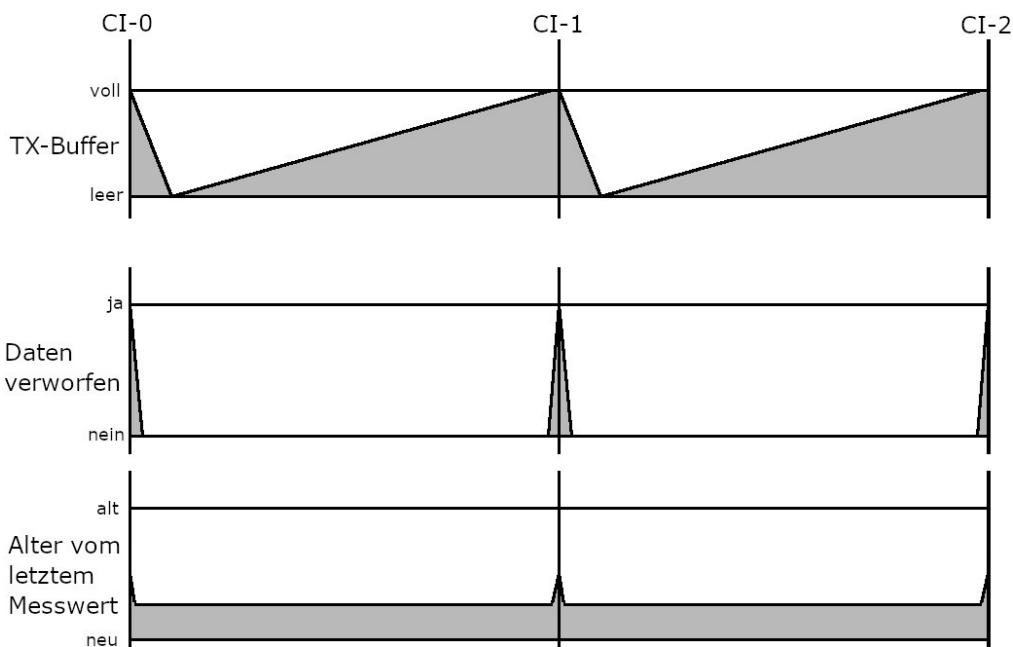


Abbildung 5.3: Lösung des Datenstaus

Callback-Funktion `bool (*send_data)(imu_data_t)` gibt an, ob die Daten in den TX-Buffer eingefügt werden konnten oder der Buffer schon voll ist. Der Parameter `uint16_t buffer_size` der Funktion `imu_init` entspricht der eingestellten Größe des TX-Buffers. Die Funktion `void imu_on_new_interval(uint16_t buffer_clear_interval)` wird aufgerufen, wenn die Geschwindigkeit der BLE-Verbindung sich geändert hat. Der Parameter `buffer_clear_interval` ist dabei das Connection Interval. Die Ge-

```

1 // ein Paket besteht aus 3 DATAs: Beschleunigungssensor, Gyrosensor, Zeitstempel
2 #define DATAS_PER_PACKET 3u
3 // jede DATA hat 3 Achsen mit je 2 Byte
4 #define BYTES_PER_DATA 6u
5 // die FIFO ist 4096 Byte groß. Bei 18 Byte pro Packet können 4086 Byte genutzt
   werden
6 #define FIFO_MAX_FILL_BYTES (4096u - ((4096u % (BYTES_PER_DATA *
   DATAS_PER_PACKET))))
7 // Das sind 227 Pakete in der FIFO
8 #define FIFO_MAX_FILL_PACKETS (FIFO_MAX_FILL_BYTES / BYTES_PER_DATA /
   DATAS_PER_PACKET)
9 // Per SPI können 254 Byte pro Durchgang ausgelesen werden, also 14 Pakete
10 #define MAX_PACKETS_PER_TRANSACTION ((0xFFu - 1u) / (BYTES_PER_DATA *
   DATAS_PER_PACKET))
11
12 // so viele Pakete werden bei jedem Durchlauf später ausgelesen. Ein Output von
   lsm_get_data_speed_set()
13 static uint16_t packets_per_transaction = MAX_PACKETS_PER_TRANSACTION;
14 // die Größe des TX-Buffers wird beim Initialisieren gesetzt
15 static uint16_t buffer_size;

```

Abbildung 5.4: Vorbereitung des Algorithmus

schwindigkeit wird gespeichert und in den weiteren Aufrufen von der Funktion `void imu_speed_set(imu_speed_t speed)` verwendet.

Der Algorithmus wird am Beispiel der LSM6DSL IMU mit FIFO-Threshold Interrupt beschrieben (`lsm_get_data_fifo.c`). Zunächst werden in Abbildung 5.4 die Konstanten für den Sensor berechnet. Die Geschwindigkeit wird in Abbildung 5.5 berechnet. Dabei wird mit jeder Iteration berechnet,

```

1 // Pakete die in einem Connection Interval generiert werden
2 #define packets_generated_per_connection_interval(speed_param)
  ((uint16_t)(connection_interval_ms / (1000.0f / ((float)(25 * (0b1 <<
    speed_param))))))
3
4 bool didGoLowerOnceAndNowOk = false;
5 while (packets_generated_per_connection_interval(speed) > buffer_size) {
6   if (speed > 0) {
7     didGoLowerOnceAndNowOk = true;
8     speed--;
9   } else {
10     didGoLowerOnceAndNowOk = false;
11     break;
12   }
13 }
14 if (didGoLowerOnceAndNowOk) speed++;

```

Abbildung 5.5: Berechnung der Geschwindigkeit

ob der Sensor in einem Connection Interval mehr Daten erfasst, als in den Buffer passen. Falls es zu viele sind, wird die Geschwindigkeit herunter gesetzt, wenn sie nicht auf dem kleinsten möglichen Wert ist. Zum Schluss wird die Geschwindigkeit wieder um einen Schritt erhöht. Da ein Schritt eine Halbierung oder Verdopplung der Datenrate bedeutet und damit die Lösung nicht den perfekten Punkt für die

Datenrate treffen kann, wird dem Programm des Endgeräts freigestellt, ob es die Datenrate nochmals halbiert wird. Durch die Variable `bool didGoLowerOnceAndNowOk` wird sichergestellt, dass die Datenrate nicht höher als vom Endgerät eingestellt wird und, dass der Algorithmus am Ende nicht von der langsamsten Geschwindigkeit erhöht, falls die langsamste Einstellung immer noch zu schnell ist. Falls die Sensordatenrate sehr langsam im Vergleich zum Connection Interval ist, soll nicht gewartet werden, bis die FIFO mit 227 Paketen voll ist. Dann würden in einigen Connection Intervals gar keine und anschließend 227 Pakete in einem geschickt werden. Deswegen wird der FIFO-Threshold wie in Abbildung 5.6 eingestellt. Damit soll die FIFO mindestens ein Mal pro Connection Interval ausgelesen werden.

```

1 // Es sollen mindestens 1 und maximal 227 Pakete aus der FIFO geholt werden
2 uint16_t packets_till_fifo_full_or_buffer_cleared = MAX(1u,
    MIN(FIFO_MAX_FILL_PACKETS, packets_generated_per_connection_interval(speed)));
3 uint16_t bytes_till_fifo_full_or_buffer_cleared = BYTES_PER_DATA *
    DATAS_PER_PACKET * packets_till_fifo_full_or_buffer_cleared;
4
5 // Setze Threshold. >> 1 wegen verschiedener Einheiten
6 LSM_ERROR_CHECK(lsm6dsl_fifo_watermark_set(dev_ctx,
    bytes_till_fifo_full_or_buffer_cleared >> 1));
7 // Pro Durchgang können maximal 14 Pakete geholt werden
8 packets_per_transaction = MIN(packets_till_fifo_full_or_buffer_cleared,
    MAX_PACKETS_PER_TRANSACTION);
9 // Setze Geschwindigkeit. + 2 wegen verschiedener Einheiten
10 LSM_ERROR_CHECK(lsm6dsl_fifo_data_rate_set(dev_ctx, speed + 2));

```

Abbildung 5.6: Berechnung des Thresholds

Bei der Implementierung des Algorithmus mussten weitere Probleme gelöst werden.

Der Treiber der LSM6DSL IMU stellt die Funktion `lsm6dsl_fifo_raw_data_get` zum Auslesen der FIFO bereit. Da die FIFO eine Größe von 4096 Byte hat, lässt sie sich mit der Funktion wegen dem Parameter `uint8_t len` nicht komplett auslesen. Das ergibt wenig Sinn und auch das Datenblatt begründet die Einschränkung nicht. Schaut man in die Implementierung in Abbildung 5.7, stellt man fest, dass sie nur eine weitere Funktion aufruft. Der vierte Parameter der Funktion `lsm6dsl_read_reg` ist vom Typ `uint16_t`. Somit lässt sich die allgemeinere Funktion stattdessen nutzen, um die komplette FIFO auszulesen. Es ist davon auszugehen, dass es sich um einen Fehler im Treiber handelt.

```

1 int32_t lsm6dsl_fifo_raw_data_get(lsm6dsl_ctx_t *ctx, uint8_t *buffer, uint8_t
    len) {
2     int32_t ret;
3     ret = lsm6dsl_read_reg(ctx, LSM6DSL_FIFO_DATA_OUT_L, buffer, len);
4     return ret;
5 }

```

Abbildung 5.7: Auslesen der FIFO

Unabhängig vom vorherigen Problem, gibt es ein Ähnliches bei der Nutzung von EasyDMA (siehe Abschnitt 4.4.1). Für eine einfache Transaktion von SPI oder I2C ist der Buffer durch die Größe vom 8 Bit Register `MAXCNT` begrenzt (siehe Abschnitt 10, 31 und 33 in [Nor17]). Da ein Byte für die Adresse reserviert ist, können 254 Datenpakete pro Transaktion verschickt werden. Diese Einschränkung wurde in Abbildung 5.4 in Zeile 9ff und Abbildung 5.6 in Zeile 7f beachtet. Beim Auslesen der FIFO werden dafür mehrere Transaktionen durchgeführt, bis die FIFO leer ist. Alternativ hätte man die List-Funktion der EasyDMA oder die nRF52840 MCU, die 16 Bit für den Buffer bereitstellt [Nor19], nutzen können.

5.2 Wearable Hardwareumsetzung

Zur Entwicklung der Software und des Hardwareprototypen wurde das nRF52 DK mit der IMU auf den Evaluationsplatinen mit Jumperkabeln verbunden. Zur Evaluation sollen die Platinen durch kleinere Alternativen ersetzt werden. Da kurzzeitig ein Reflowofen verfügbar war, konnten selbst kleinste QFN-Bauteile verlötet werden. Die LSM6DSL IMU wurde als QFN-Chip und die MCU in Form der Laird BL651 verbaut. Die Platine von Laird bietet den Vorteil gegenüber der MCU als Chip, dass kein Vorwissen über Antennen nötig ist. Dieser Abschnitt entnimmt seine Informationen den Datenblättern der Bauteile.

An die MCU kann optional ein 32.768 kHz Taktgeber angeschlossen werden. Ohne den Taktgeber wird das Taktsignal von anderen Taktgebern synthetisiert. Der Taktgeber muss innerhalb der von der MCU vorgegebenen Spezifikation liegen und benötigt zwei Kondensatoren zum Schwingen. Die Kapazität der Kondensatoren C lässt sich mit den Formeln und Werten 5.1 bis 5.5 auf 6 pF bestimmen. [Nor17]

$$CL = \frac{C'^2}{2 * C'} \quad (5.1)$$

$$C' = C + C_{pcb} + C_{pin} \quad (5.2)$$

mit den Werten

$$CL = 7\text{pF}: \text{Lastkapazität des ausgewählten Taktgebers} \quad (5.3)$$

$$C_{pcb} \simeq 4\text{pF}: \text{Kapazitäten durch die Leiterbahnen und Platine} \quad (5.4)$$

$$C_{pin} = 4\text{pF}: \text{Kapazität des Pins der MCU} \quad (5.5)$$

Die Pins P0.22 bis P0.31 der MCU dürfen nicht hochfrequent betrieben werden, da es die BLE-Kommunikation negativ beeinflussen kann [Nor17]. Im Design der Platine wurde deswegen auf diese Pins verzichtet. Der Interrupt2 Pin der IMU konnte dadurch leider platzbedingt nicht verbunden werden. In zukünftigen Versionen der Platine sollte er wenn möglich angeschlossen werden, um der Softwareentwicklung mehr Möglichkeiten offen zu lassen.

An den zwei Spannungspins der IMU und dem Spannungspins der MCU sind 100 μF Kondensatoren angebracht. Sie dienen zur Abkopplung der Komponenten bei Lastschwankungen und sind auch in den Referenzimplementierungen vorhanden [Nor17] [STM17c]. Die ausgewählten LEDs haben eine Vorwärtsspannung von 1.8 V und einen Nennstrom von 2 mA. Um diese Vorgaben bei einem Batterielevel von 2 V bis 3 V einzuhalten, sind jeweils 191 Ohm Widerstände vorgeschaltet. Als Farben der LEDs wurden rot und gelb gewählt, da die Farben eine hohe Wellenlänge haben und dadurch energieärmer sind. Wird die rote LED der Gelben in der Nutzung präferiert, steigert sich aus dem selben Grund die Effizienz des Wearables minimal. Zur Programmierung des Chips wurde ein Cortex-M-Debug⁴ Anschluss angebracht. Damit lässt er sich vom nRF52 DK mit dem passenden Kabel programmieren. Um die Stromaufnahme zu evaluieren, ist die Spannungsversorgung der Platine über zwei Pins, die 2.54 mm voneinander entfernt sind, offen zugänglich. Soweit verfügbar wurden alle Komponenten in der Größe 0603 gewählt, damit sie mit einem Lötkolben eingelötet oder ausgetauscht werden können. Eine vollständige Liste der Komponenten ist in Tabelle 5.2 zu finden.

⁴ http://infocenter.arm.com/help/topic/com.arm.doc.faqs/attached/13634/cortex_debug_connectors.pdf, aufgerufen am 18.07.2019

Tabelle 5.2: Bill of Materials (BOM)

Komponente	Typ	Anzahl	Name im Schaltplan
Laird BL652-SA-01	nRF52832 MCU	1	IC1
STMicroelectronics LSM6DSL	LSM6DSL IMU	1	U1
ECS Inc ECS-.327-7-34R	32.768 kHz Taktgeber mit 7 pF Ladekapazität und 50 kOhm ESR	1	Y1
Yageo CC0603CRNPO9BN6R0	6 pF Kondensator für Taktgeber	2	C2, C3
Yageo CC0603JRX7R9BB104	0.1 μ F Kondensator zur Abkopplung	3	C1, C4, C5
Vishay TLMY1000-GS08	Gelbe LED	1	LED1
Vishay TLMS1000-GS08	Rote LED	1	LED2
Vishay CRCW0603191RFKEA	191 Ohm Widerstand für LEDs	2	R1, R2
Keystone Electronics 3008	CR2450 Knopfzellenhalter	1	CR2450
Panasonic EVQ-Q2B03W	Taster	1	S1
CNC-Tech 3220-10-0300-00	Cortex-M-Debug Buchse	1	J2

Bei der Erstellung des Schaltplans, in Abbildung 5.8 zu sehen, musste bereits beachtet werden, wo sich die Pins physisch an den Komponenten befinden, damit sich die Verbindungen nicht überschneiden. Die Komponenten lassen sich mit der letzten Spalte von Tabelle 5.2 zuordnen. Die Komponente VCC.GND beinhaltet die besagten Pins zur externen Spannungsversorgung.

Die Platine wurde nach dem Entwurf in Abbildung 5.9 bei JLCPCB⁵ angefertigt. Die roten und blauen Stellen sind Kupferverbindungen. Die größeren Felder sind die Masseflächen. Die grauen Vias verbinden die Unterseite mit der Oberseite. Während sich auf der Unterseite nur die Batterie befindet, sind die restlichen Komponenten auf der Oberseite. Das freie Rechteck in der linken unteren Ecke enthält kein Metall, da sich hier die Antenne befindet und sonst negativ beeinflusst werden würde. An der Rückseite erkennt man, dass die Größe der Platine durch die Batterie und der Antenne vorgegeben sind. Die Verbindungen zur Spannungsversorgung sind dicker ausgeführt, damit sie weniger Widerstand bieten. Normalerweise wird die Unterseite der Platine genutzt, wenn Verbindungen sich überschneiden. Die Unterseite ist fast komplett durch die Batterie belegt. Über den Kupferleitungen ist eine isolierende Lackschicht, die vor Kurzschlüssen durch die Batterie schützen würde. Da die Knopfzelle allerdings beim Einlegen und Entfernen über die Oberfläche reibt, ist zu erwarten, dass die Lackschicht sich abträgt und dann nicht mehr schützt. Deswegen mussten Überschneidungen komplett vermieden werden.

Die fertige Platine ist in Abbildung 5.10 zu finden. Zum Größenvergleich sind CR2032 und CR2450 Knopfzellen und das nRF52 DK mit abgebildet.

5.3 Android App

Die App wurde mit dem Android SDK geschrieben, das speziell für Android Smartphones entwickelt wurde. Obwohl Java weiter verbreitet und auch vom SDK unterstützt wird, ist die App in der Sprache Kotlin geschrieben, da sie sinnvolle Erweiterungen zu Java bietet wie Datenklassen und funktionelle Programmierung und der Code gleichzeitig mit Java-Code substituierbar ist.

Die App wurde für Android 9.0 kompiliert und getestet und ist bis Android 5.0 abwärtskompatibel. Ältere Versionen werden nicht unterstützt, da die Methode `no.nordicsemi.android.ble.BleManager#requestConnectionPriority` Android 5.0 erfordert und gebraucht wird, um den Connection Interval des BLE-Stacks zu setzen.

⁵ <https://jlcpcb.com/>, aufgerufen am 18.07.2019

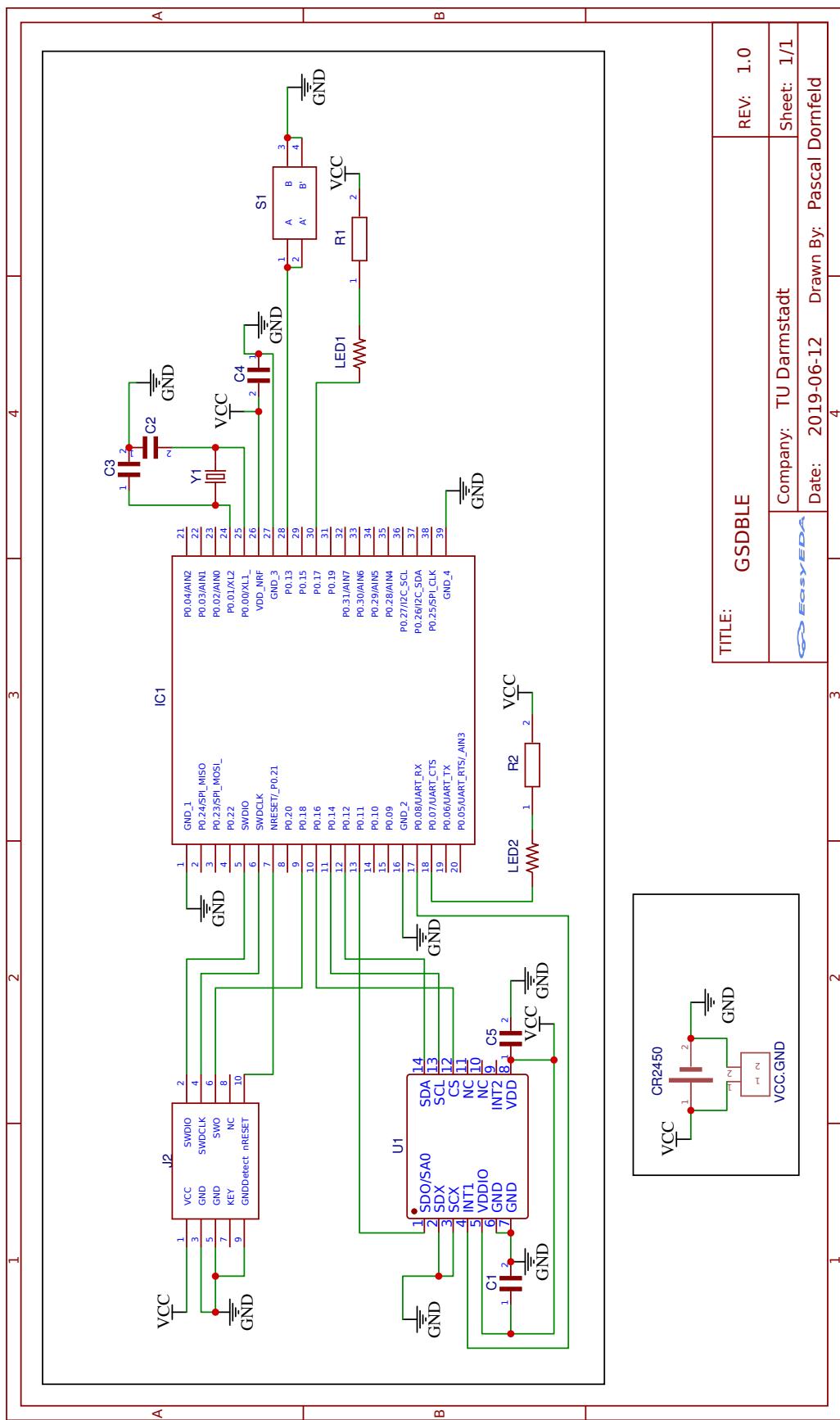
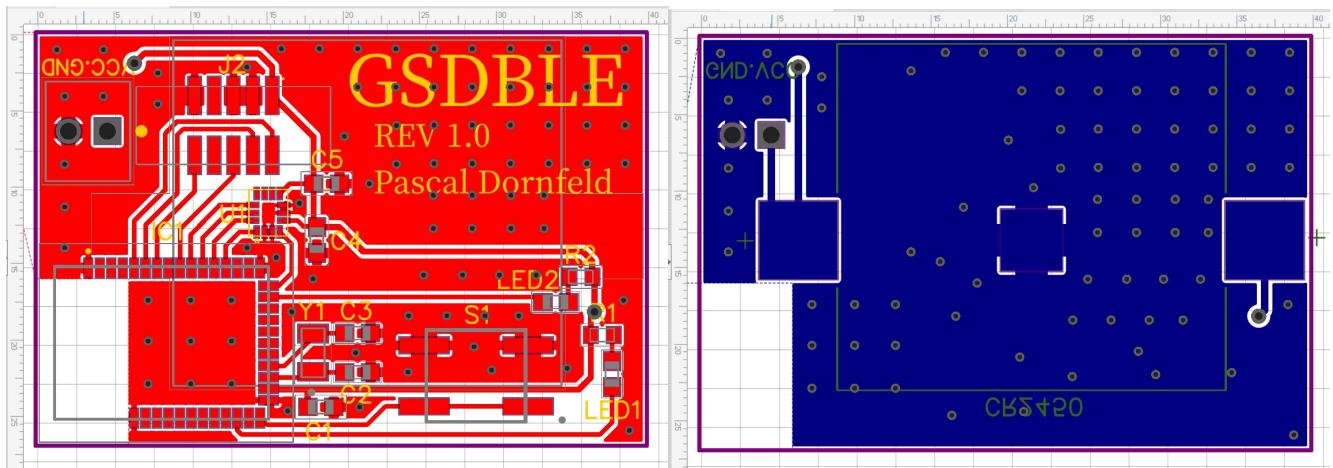


Abbildung 5.8: Schaltplan der Platine



(a) Vorderseite

(b) Rückseite

Abbildung 5.9: Platinenlayout

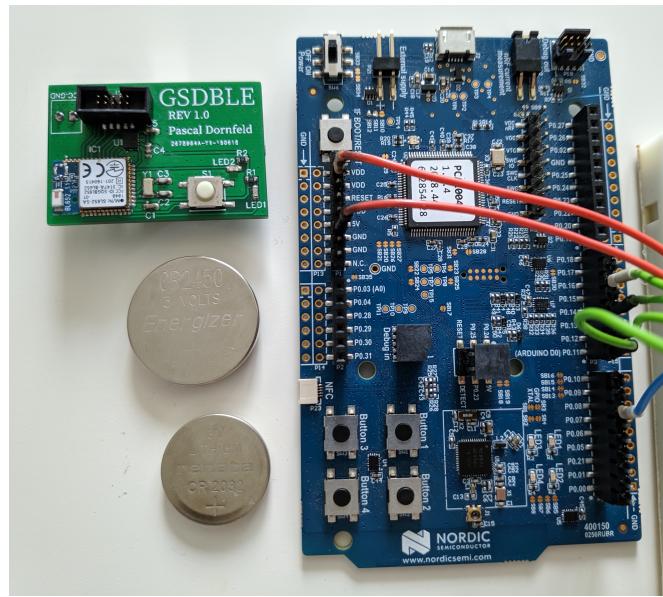


Abbildung 5.10: Fertig bestückte Platine im Größenvergleich

Beim Start der App wird die `ConnectActivity` gestartet. Sie enthält nur einen Knopf. Drückt der Nutzer auf den Knopf, sucht das Smartphone nach Geräten, die mit dem Namen 'GSDBLE' advertisen. Der Knopf ist ausgegraut, wenn das Smartphone kein BLE unterstützt oder der Nutzer der App keine Rechte für die Nutzung von Bluetooth gegeben hat. Wenn ein Wearable gefunden wurde, wechselt die App auf die `ConnectionOverviewActivity`. Dabei wird das gefundene Wearable im Intent `EXTRA_DEVICE` übergeben.

Die Activity `ConnectionOverviewActivity` verbindet sich mit dem Wearable, sucht nach den Services und Characteristics und setzt das Notify-Bit bei den Characteristics. Das Android SDK bietet Klassen zur Verbindung mit BLE. Hier hat sich herausgestellt, dass alle Befehle asynchron laufen. Dabei ist problematisch, dass die Befehle nicht in einer Schlange verwaltet werden, sondern ein Befehl ignoriert wird, wenn der Vorherige noch nicht abgeschlossen ist. Deswegen wurde auf die Bibliothek von Nordic⁶ zugegriffen, die die Klassen des SDK besser zugänglich macht.

Die Klasse `Manager` verwaltet die Verbindung. Die Activity `ConnectionOverviewActivity` dagegen verwaltet die graphische Oberfläche. In der Activity werden verschiedene Statistiken graphisch angezeigt. Darunter sind die Sensordaten, aber auch z.B. die empfangenen Daten pro Sekunde. Über Slider lassen sich Parameter einstellen. Die Parameter sind die MTU, das Connection Interval und die Sensordatenrate. Da die IMUs verschiedene Zeiteinheiten und unterschiedliche Datenraten besitzen, lässt sich der Sensor mit einem Slider einstellen, damit die Statistiken korrekt berechnet werden. Das Connection Interval lässt sich in den Schritten Low, Balance und High ändern. Das entspricht den Werten 100 - 125 ms, 30 - 50 ms und 11.25 - 15 ms. Diese Vorgabe besteht durch die Konstanten der Klasse `android.bluetooth.BluetoothGatt` im Android SDK. Jedes Teil ist davon ein eigenes Fragment aus den Dateien `ConfigFragment` oder `Graphfragment`. Die abstrakte Klasse `Graphfragment` empfängt Daten und fügt sie in die Liste `internalData` ein. Wenn die Liste zu voll ist, werden die ältesten Daten entfernt. Die Daten sollen dann von der Graphenbibliothek angezeigt werden. Da sie in einem anderen Thread arbeitet und es sonst zu Race Conditions kommt, wird von der Liste `internalData` ein Snapshot in `data` für die Graphenbibliothek erstellt.

Die Werte der Characteristics sind in den Modelklassen `ImuConfig` und `ImuData` realisiert. Sie bieten die Möglichkeit die Werte in ein `ByteArray` umzuwandeln und wieder zurück.

5.4 Zusammenfassung

Die Einrichtung der Entwicklungsumgebung der MCU ist leider kompliziert und bedarf vieler Umwege. Die Installation von Android Studio dagegen läuft problemlos. Von den Entwickler der MCU und Drittanbietern sollte hier nachgebessert werden.

Um den Datenstau zu umgehen, der durch die drei Buffer in MCU und IMU entsteht, berechnet ein Algorithmus die Parameter zur korrekten Umfüllung. Der Hardwareentwurf ist erfolgreich verlaufen, so dass ein Wearable zur Evaluation bereit steht. In der Android App werden dafür Daten gesammelt, die statistisch ausgewertet werden können.

⁶ <https://github.com/NordicSemiiconductor/Android-BLE-Library>, aufgerufen am 18.07.2019



6 Evaluation

6.1 Ziele

Mit dem Wearable werden einige Tests mit Blick auf die in der Einleitung 1.2 aufgestellten Ziele durchgeführt. Die Austauschbarkeit der Protokolle und Komponenten wird durch die Implementierung erreicht. Insbesondere die Trennung des Codes von Endgerät, MCU, IMU und dem Protokoll zwischen MCU und IMU tragen dazu bei. Ob die Größe und das Gewicht ausreichend gering sind, ist vom Anwendungsfall abhängig. Bei dem Wearable sind sie stark von der Knopfzelle geprägt. Es wurde die etwa 2.36 cm^3 große CR2450 statt der etwa 1.01 cm^3 großen CR2032 gewählt um die 2.7-fache Kapazität zu erhalten. Um die Entscheidung zu ändern, muss nur das Platinenlayout überarbeitet werden, während das Schaltbild und der Code übernommen werden können. Ob die Kapazität der Knopfzellen überhaupt anwendungstauglich ist, soll in den Tests zur Stromaufnahme ermittelt werden. Dafür sollen verschiedene Parameter geändert, der Einfluss auf die Stromaufnahme gemessen und die Auswirkungen auf die Datenübertragung evaluiert werden. Bei der Datenübertragung wird geprüft, inwieweit die empfangene Datenrate von der eingestellten Sensordatenrate abweicht.

Es wird die Stromaufnahme verglichen in den Szenarien Prototyp mit LSM6DSL IMU vs Wearable und LSM6DSL IMU vs BMI160 IMU auf dem Prototypen. Der Prototyp besteht aus dem nRF52 DK und dem STEVAL-MKI178V2 bzw. BMI160 Shuttle Board. Die Auswirkungen auf die Stromaufnahme und der Datenübertragung werden auf dem Wearable bei einer Änderung der Größe des TX-Buffers, der MTU-Größe, des Connection Intervals, der SPI-Frequenz und der Sensordatenrate erfasst. Um den Einfluss des Algorithmus zu erfassen, werden die Test mit der variablen Größe des TX-Buffers auch ohne aktiven Algorithmus getestet. Dafür wird dem Algorithmus eine Größe des TX-Buffers von 0xFFFF in `main.c` in der Zeile `err_code = my_service_init(&m_myservice, TX_QUEUE_SIZE);` übergeben.

6.2 Methoden

Zur Messung der Datenrate wird auf dem Smartphone angezeigt, wie viele Datenpakete in einer Sekunde ankommen. Um die Abweichung zur Einstellung zu vergleichen wird die Datenrate pro Sekunde über einen Zeitraum aufgenommen und die Formel 6.1 für die Standardabweichung mit dem unverzerrten Schätzer angewandt.

$$s = \sqrt{\frac{1}{n-1} \sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2}, \text{ mit } n = \text{Anzahl der Werte und } \bar{x} = \text{eingestellte Sensordatenrate} \quad (6.1)$$

Die Standardabweichung wird wiederum auf einem Graphen auf dem Smartphone aufgezeichnet, sobald Daten von mindestens 30 Sekunden vorliegen.

Um die Stromaufnahme zu messen, wird das ohmsche Gesetz $I = \frac{U}{R}$ benötigt. Wird ein Widerstand in Reihe mit der Spannungsversorgung des Wearables geschaltet, ist ein Spannungsabfall über dem Widerstand zu messen. Da man den Wert des Widerstandes kennt und den Spannungsabfall mit einem Oszilloskop messen kann, lässt sich mit der Formel der Strom berechnen. In dem Handbuch des nRF52 DK wird vorgeschlagen, einen 10 Ohm Widerstand zu nehmen. [Nor18]

Bei dem Versuch, damit den Strom während des Schlafmodus zu messen, wird ein Spannungsabfall im Bereich von wenigen nV gemessen. Durch Störeinflüsse der Umwelt kann der Stromverbrauch so nicht genau bestimmt werden. Um den Spannungsabfall zu erhöhen, werden größere Widerstände genutzt,

denn je größer der Widerstand, desto mehr Spannung fällt ab. Ist die Spannung zu klein, lässt sie sich nicht genau messen. Ist die Spannung zu groß, bleibt nicht genug Spannung für das Wearable übrig. Um den Strom in verschiedenen Messbereichen berechnen zu können, werden die passenden Widerstände benötigt. Um den Widerstand anpassen zu können, wurde eine Lochrasterplatine, die in Abbildung 6.1 zu sehen ist, mit Widerständen bestückt, die mit Steckbrücken in den Stromkreis integriert werden können. Die Widerstände haben eine Toleranz von 0.1 % und Werte von 0, 10, 47, 100, 470, 1000, 4700

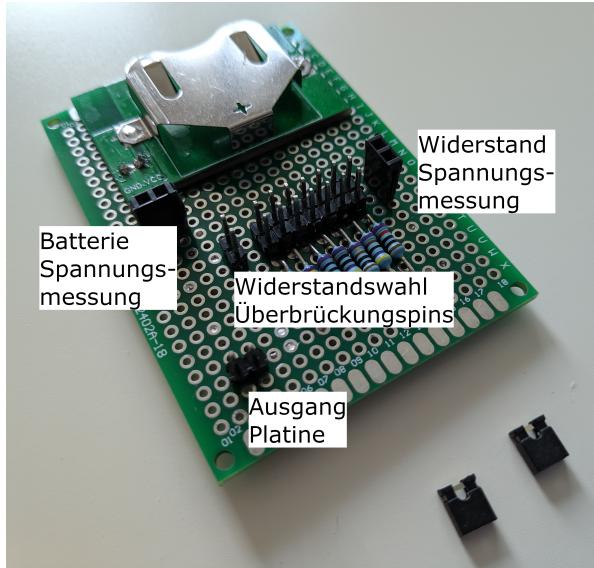


Abbildung 6.1: Messplatine

und 10000 Ohm.

Das Oszilloskop ist ein Picoscope 5444B. Der Spannungsabfall wird mit einer Frequenz von 2 GHz gemessen. Technisch bedingt kann der Mittelwert nur über 5 Sekunden automatisch gebildet werden. Deshalb wird jeder Test 6 Mal abgeschlossen, um Daten von 30 Sekunden zu erhalten. Das Offset wird vor dem Test kalibriert. Als Spannungsquelle wird eine neue CR2450 Knopfzelle und ein Voltcraft Model 2256 Netzgerät genutzt. Da das Netzteil bei zu geringer Last keine stabile Spannung erzeugen kann, wird dem Testaufbau ein Widerstand von 58.75 Ohm +/- 5 % parallel geschaltet. Durch den Widerstand fließt dauerhaft etwa 51 mA, sodass das Netzteil mindestens eine Last von 3.4 % hat. Da das immer noch wenig ist, toleriert das Netzteil bei den Messungen einen geringeren Spannungsabfall bei den Messwiderständen als die Batterie. Das Netzteil wird so eingestellt, dass am Testobjekt eine Spannung zwischen 2.95 und 3 V anliegt. Es wird das Netzteil bei den Tests genutzt, bei denen der Prototyp involviert ist, da er sich zum Testzeitpunkt aus unbekannten Gründen nicht mit der Batterie starten lässt. Zu einem späteren Zeitpunkt ist es hingegen wieder möglich. Vor jeder Testreihe wird die Spannung am Netzteil nachjustiert oder die Spannung der Batterie notiert.

Beim Prototypen wird die Diode zum Verpolungsschutz mit SB12 überbrückt, wie in der Anleitung zum nRF52 DK angegeben [Nor18]. Der Spannungsabfall wird direkt an der Spannungsquelle gemessen und nicht an den Pins 'nRF current measurement'. Nach dem Schaltbild von Figur 8 in [Nor18] lässt sich sonst nur der Strom, der von der MCU aufgenommen wird, messen und der Verbrauch der IMU würde nicht mit eingehen. Der Hinweis über Figur 8 besagt, dass die MCU bei der verwendeten Methode wegen der Reset-Funktion 20 μ A mehr Strom verbraucht. Da der Reset-Knopf erst eine Funktion zeigt, wenn auch SB10 überbrückt wird, kann keine Aussage getroffen werden, ob sich der Prototyp dahingehend vom Wearable unterscheidet. Der Magnetometer wird beim BMI160 Shuttle Board wegen äußerer Umstände nicht entfernt oder konfiguriert.

6.3 Ergebnisse

Der erste Teil der Tabellen listet die Rahmenbedingungen für die Tests auf. Die Zeilen der Daten beginnen mit der Beschreibung des Testfalls. Die Zeile 'AVG' ist der Durchschnitt der sechs Einzeltests. Sie besteht aus gemessenem Spannungsabfall und der berechneten Stromaufnahme. Die Zeile ' P_{AVG} ' ist die Leistungsaufnahme nach $P_{AVG} = (\text{Versorgungsspannung} - \text{gemesseneSpannung}) * \text{resultierenderStrom}$. Die Versorgungsspannung wird beim Netzteil auf 2.975 V gemittelt. Einzelne Tests haben zusätzlich die Standardabweichung 'ABW' oder listen die höchste gemessene Spitze im Spannungsabfall auf.

6.4 Auswertung

Zunächst ist zu beachten, dass der Ausschlag der Spannungen in den Abbildungen 6.2 bis 6.9 teilweise negativ ist. Es hat keinerlei Auswirkungen auf die Daten und ist durch die Messweise bedingt. Ein Abschnitt auf der X-Achse sind 0.5 Sekunden, sodass eine komplette Abbildung 5 Sekunden darstellt. Eine Frequenz von 0 Hz bedeutet, dass die IMU keine Daten erfasst.

6.4.1 Strommessung mithilfe eines Widerstandes

Vergleicht man Abbildung 6.3 und Abbildung 6.4, stellt man fest, dass sich die Verlaufskurven bei Batterie- und Netzspannung nicht unterscheiden. Es sind regelmäßige Spitzen zu erkennen in denen das Wearable am Advertise ist. Die zusätzliche Stromaufnahme durch die blinkende LED ist beobachtbar.

Vergleicht man den Strom in 'Wearable LSM6DSL 200 Hz' (Tabelle 6.1) mit dem von '200Hz' (Tabelle 6.6), stellt man einen Anstieg der Stromaufnahme von 8.51 % bei Batteriebetrieb fest. Werden die Werte 'Wearable LSM6DSL 0 Hz' (Tabelle 6.1) und 'High 0Hz' (Tabelle 6.5) verglichen, sind die Unterschiede noch höher. Beim Batteriebetrieb hier ist die Stromaufnahme 120 % höher. Es war nicht zu erwarten, dass eine Änderung der Spannungsquelle derartigen Unterschied verursacht. Es handelt sich nicht wie zunächst angenommen um eine falsche Einstellung des Wearables. Abbildung 6.5 zeigt die zugehörige Aufnahme, die dem Muster von Abbildung 6.8 entspricht.

In Tabelle 6.1 wurde mit einem 10 Ohm Widerstand gemessen, wohingegen in Tabelle 6.6 mit 47 Ohm gemessen wurde. Während die Spannungsquellen beide etwa 3 Volt liefern, fällt eine unterschiedliche Spannung an den Widerständen ab. In den Datenblättern der Komponenten ist die Stromaufnahme bei einer bestimmten Spannung spezifiziert [STM17c] [Nor17]. Bei der eingesetzten Messmethode ist die Spannung am Testobjekt abhängig von dem Spannungsabfall über die Widerstände, der von der Stromaufnahme des Wearables bestimmt wird.

Unter der Annahme, dass das Wearable die geringere Spannung mit einem höheren Strom ausgleicht, wurde die Berechnung der Leistungsaufnahme zu den Daten hinzugefügt. Auch hier lässt bei den vorherigen Szenarien ein Anstieg der Leistungsaufnahme bei Batteriebetrieb von 5.4 % bzw. 118 % verzeichnen.

Eine weitere Fehleranalyse hat ergeben, dass die Abweichung der Messwerte durch die Erhöhung des Widerstandes zustande kommen muss. So bedeutet ein höherer Messwiderstand auch einen höheren Leistungsverlust durch den Widerstand. Statt den Widerstand zu erhöhen, wird normalerweise der geringe Spannungsabfall mit einem analogen Frontend (AFE) erhöht. [Ste18]

Der Messwiderstandswert von 10 Ohm ist für die MCU alleine empfohlen. Von der Testreihe sind damit nur die Messwerte 'Prototyp BMI160 0 Hz', 'Prototyp LSM6DSL 0 Hz' und 'Wearable LSM6DSL 0 Hz' von Tabelle 6.1 korrekt, da die IMU in den Testfällen ausgeschaltet war und mit einem 10 Ohm Widerstand gemessen wurde. Die anderen Messungen können bei einem Vergleich untereinander einen Einblick gewähren, welche Szenarien eine höhere Stromaufnahme verursachen, solange die Widerstände identisch sind. Eine höhere Stromaufnahme bedeutet dabei einen höheren Leistungsverlust am Messwiderstand. Die genauen Werte sind dabei nicht aussagekräftig.

Widerstand	10 Ohm
SPI-Frequenz	4 MHz
MTU-Größe	23 Byte
TX-Buffer	10 Einträge
Spannungsquelle	Netzteil
MCU	Wearable und Prototyp
IMU	LSM6DSL und BMI160
Sensordatenrate	200 Hz und 0 Hz
Connection Interval	High
Wearable LSM6DSL 200 Hz	
AVG	24.555 mV 2.456 mA
P _{Avg}	7.246 mW
Wearable LSM6DSL 0 Hz	
AVG	3.55 mV 355 µA
P _{Avg}	1.055 mW
Prototyp LSM6DSL 200 Hz	
AVG	29.455 mV 2.946 mA
P _{Avg}	8.678 mW
Prototyp LSM6DSL 0 Hz	
AVG	10.153 mV 1.015 mA
P _{Avg}	3.009 mW
Prototyp BMI160 200 Hz	
AVG	34.958 mV 3.496 mA
P _{Avg}	10.278 mW
Prototyp BMI160 0 Hz	
AVG	10.031 mV 1.003 mA
P _{Avg}	2.974 mW

Tabelle 6.1: Prototyp vs Wearable und BMI160 vs LSM6DSL

Widerstand	47 Ohm
SPI-Frequenz	1 MHz
MTU-Größe	23, 50 und 517 Byte
TX-Buffer	1, 50 und 300 Einträge
Algorithmus	An und Aus
Spannungsquelle	Batterie 3.044 V
MCU	Wearable
IMU	LSM6DSL
Sensordatenrate	200 Hz
Connection Interval	High
MTU23 TX1 Algo=An	
AVG	125.267 mV 2.665 mA
P _{Avg}	7.778 mW
ABW	10.4 - 10.8 Hz
MTU23 TX50 Algo=An	
AVG	126.2 mV 2.685 mA
P _{Avg}	7.834 mW
ABW	10.2 - 11.5 Hz
MTU23 TX300 Algo=An	
AVG	126.217 mV 2.685 mA
P _{Avg}	7.836 mW
ABW	8.2 - 8.8 Hz
MTU23 TX1 Algo=Aus	
AVG	125.317 mV 2.666 mA
P _{Avg}	7.781 mW
ABW	11.9 - 12.4 Hz
MTU23 TX50 Algo=Aus	
AVG	125.883 mV 2.678 mA
P _{Avg}	7.815 mW
ABW	12 - 12.7 Hz
MTU23 TX300 Algo=Aus	
AVG	125.9 mV 2.679 mA
P _{Avg}	7.818 mW
ABW	12 - 13.2 Hz

Tabelle 6.2: Größenänderung von TX-Buffer und MTU

MTU150 TX10 Algo=An		
AVG	125.8 mV	2.677 mA
P _{Avg}		7.812 mW
ABW		8.9 - 10.1 Hz
MTU517 TX10 Algo=An		
AVG	126.1 mV	2.683 mA
P _{Avg}		7.829 mW
ABW		8.4 - 9.4 Hz
MTU150 TX50 Algo=An		
AVG	125.783 mV	2.676 mA
P _{Avg}		7.809 mW
ABW		10.3 - 11.2 Hz

Tabelle 6.3: Fortsetzung von Tabelle 6.2

Widerstand	47 Ohm
SPI-Frequenz	125 kHz, 1 MHz, 8 MHz
MTU-Größe	35 Byte
TX-Buffer	10 Einträge
Spannungsquelle	Batterie 3.044 V
MCU	Wearable
IMU	LSM6DSL
Sensordatenrate	400 Hz
Connection Interval	High
125kHz	
AVG	294.95 mV 6.276 mA
P _{Avg}	17.253 mW
ABW	21.4 - 23 Hz
1MHz	
AVG	187.817 mV 3.996 mA
P _{Avg}	11.413 mW
ABW	15.7 - 17.8 Hz
8MHz	
AVG	173.233 mV 3.686 mA
P _{Avg}	10.582 mW
ABW	15.1 - 17.1 Hz

Tabelle 6.4: Frequenzänderung von SPI

Widerstand	47 Ohm
SPI-Frequenz	4 MHz
MTU-Größe	35 Byte
TX-Buffer	10 Einträge
Spannungsquelle	Batterie 2.991 V
MCU	Wearable
IMU	LSM6DSL
Sensordatenrate	0 und 100 Hz
Connection Interval	Low, Balance, High
Low 0Hz	
AVG	22.715 mV 483.298 μ A
P _{Avg}	1.434 mW
Balance 0Hz	
AVG	27.27 mV 580.213 μ A
P _{Avg}	1.719 mW
High 0Hz	
AVG	36.652 mV 779.83 μ A
P _{Avg}	2.304 mW
Low 100Hz	
AVG	83.443 mV 1.775 mA
P _{Avg}	5.161 mW
ABW	7.3 - 8.2 Hz
Balance 100Hz	
AVG	86.188 mV 1.834 mA
P _{Avg}	5.327 mW
ABW	5.5 - 6.3 Hz
High 100Hz	
AVG	94.575 mV 2.012 mA
P _{Avg}	5.828 mW
ABW	4.7 - 5.1 Hz

Tabelle 6.5: Änderung des Connection Intervals

Widerstand	47 Ohm	
SPI-Frequenz	4 MHz	
MTU-Größe	35 Byte	
TX-Buffer	10 Einträge	
Spannungsquelle	Batterie 2.991 V	
MCU	Wearable	
IMU	LSM6DSL	
Sensordatenrate	25 bis 800 Hz	
Connection Interval	High	
25Hz		
AVG	78.043 mV	1.66 mA
P _{Avg}	4.836 mW	
50Hz		
AVG	83.378 mV	1.774 mA
P _{Avg}	5.158 mW	
100Hz		
AVG	98.362 mV	2.093 mA
P _{Avg}	6.054 mW	
200Hz		
AVG	125.233 mV	2.665 mA
P _{Avg}	7.637 mW	
400Hz		
AVG	180.817 mV	3.847 mA
P _{Avg}	10.811 mW	
800Hz		
AVG	286.167 mV	6.089 mA
P _{Avg}	16.47 mW	

Tabelle 6.6: Änderung der Sensordatenrate

Widerstand	47 und 10000 Ohm	
SPI-Frequenz	8 MHz	
MTU-Größe	23 Byte	
TX-Buffer	17 Einträge	
Spannungsquelle	Batterie 2.875 und 2.916 V	
MCU	Wearable	
IMU	LSM6DSL	
PowerOff 10000Ohm 2.875V		
Spitze	61 mV	6.1 μ A
AVG	15.373 mV	1.537 μ A
P _{Avg}	0.006 mW	
Advertising 47Ohm 2.916V		
Spitze	646 mV	13.745 mA
AVG	35.787 mV	761.426 μ A
P _{Avg}	2.192 mW	

Tabelle 6.7: Advertising und Schlafmodus

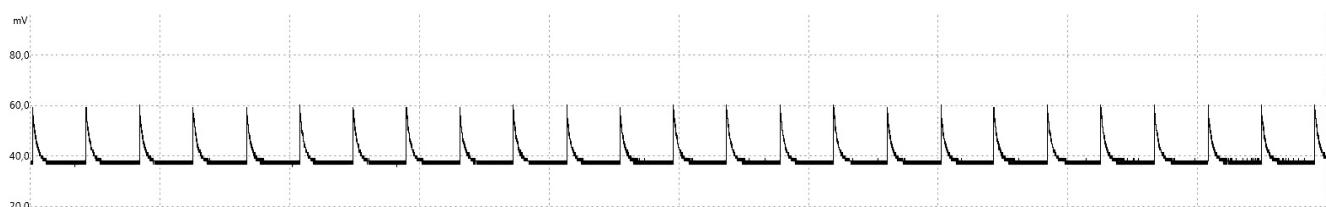


Abbildung 6.2: Wearable im Schlafmodus bei Batteriespannung

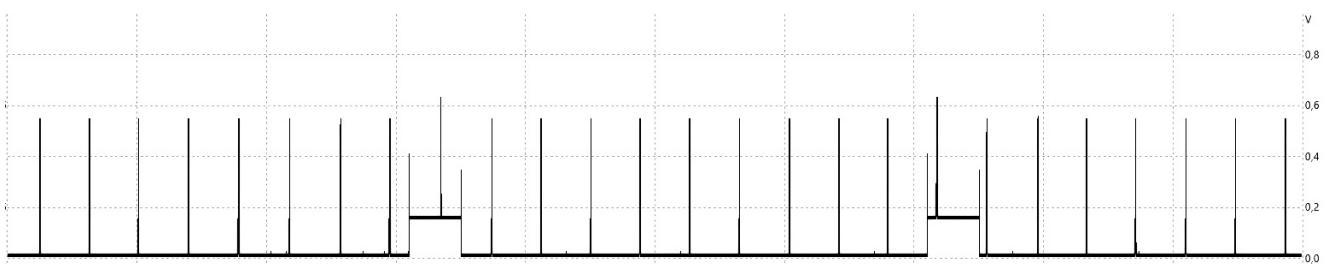


Abbildung 6.3: Advertising vom Wearable bei Netzteilspannung

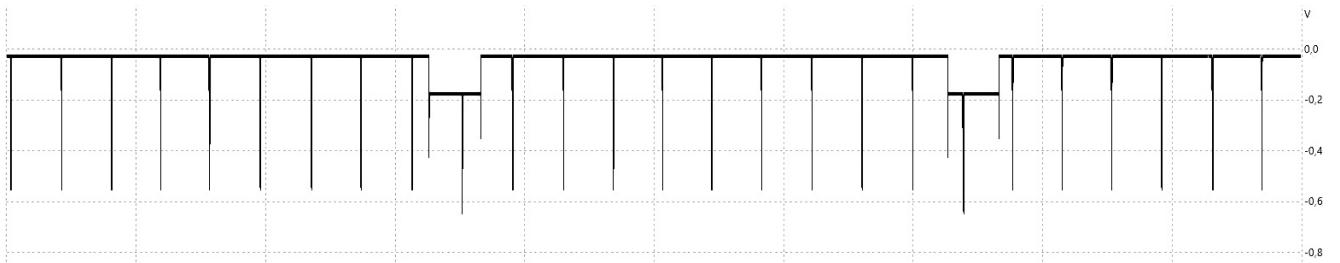


Abbildung 6.4: Advertising vom Wearable bei Batteriespannung

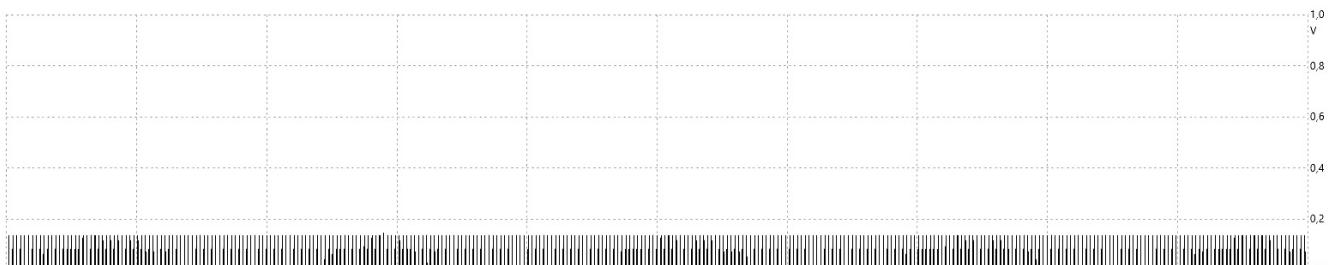


Abbildung 6.5: Verbunden mit High CI und 0 Hz bei Netzteilspannung

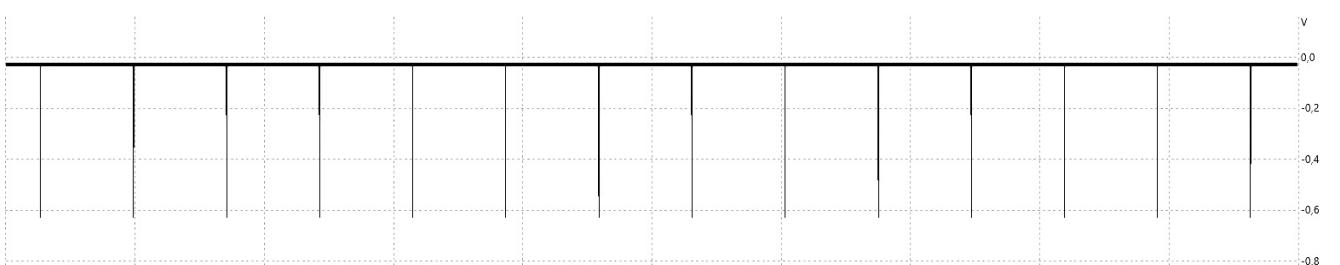


Abbildung 6.6: Verbunden mit Low CI und 0 Hz bei Batteriespannung

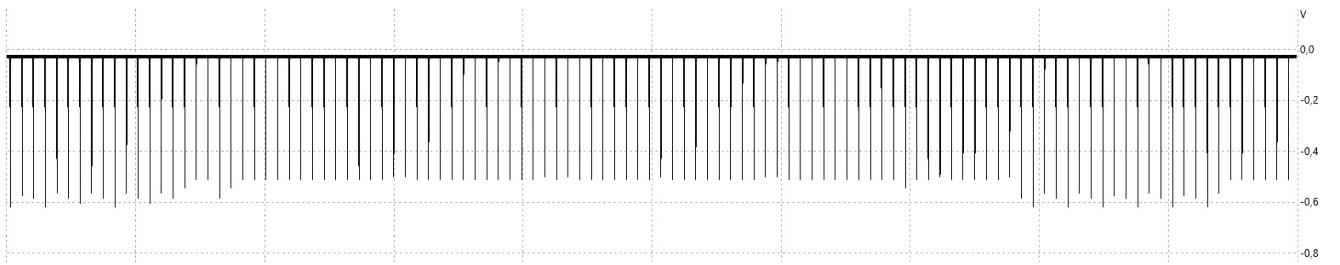


Abbildung 6.7: Verbunden mit Balance CI und 0 Hz bei Batteriespannung

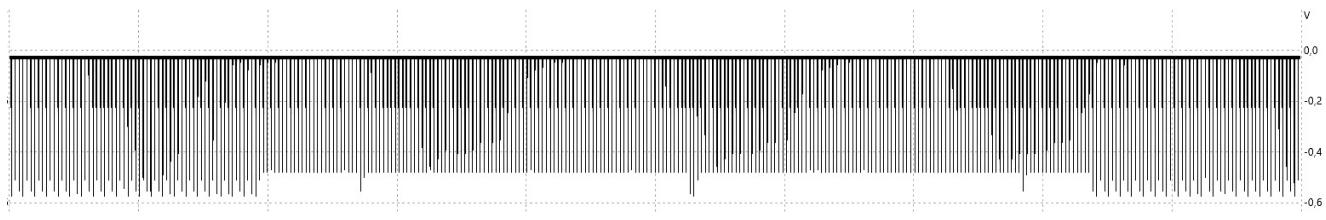


Abbildung 6.8: Verbunden mit High CI und 0 Hz bei Batteriespannung

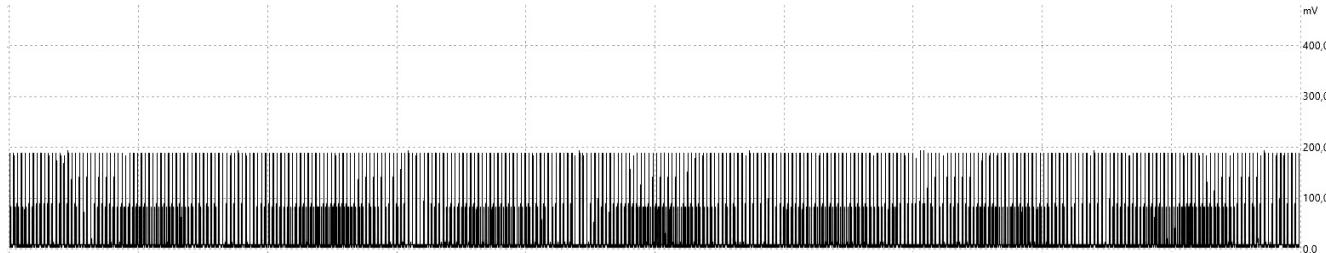


Abbildung 6.9: Verbunden mit High CI und 200 Hz bei Netzteilspannung

6.4.2 Stromeinfluss der Parameter

Den wertkorrekten Testfällen kann man entnehmen, dass der Stromverbrauch des Prototypen das 2.86-fache des Stromverbrauchs des Wearables beträgt. Der BMI160 hat einen um $12 \mu\text{A}$ geringeren Stromverbrauch als der LSM6DSL, obwohl die Platine des BMI160 zusätzlich den Magnetometer beinhaltete.

Werden die IMUs bei 200 Hz betrieben, hat der BMI160 einen höheren Messwert als der LSM6DSL verzeichnet. Bei 200 Hz verbraucht das Wearable weniger Strom als der Prototyp.

Betrachtet man Tabelle 6.2, so stellt man fest, dass die Größe des TX-Buffers und die Größe der MTU in der Stromaufnahme keinen einen Unterschied ausmachen, da sich hier alle Werte um maximal 0.78 % voneinander unterscheiden.

Tabelle 6.4 zeigt, dass die kleinstmögliche SPI-Frequenz mehr Leistung als die Höchstmögliche verbraucht. Die mittlere Frequenz befindet sich dazwischen. Das ist damit zu begründen, dass die Chipkommunikation schneller abgearbeitet und damit länger im Schlafmodus verblieben werden kann.

Tabelle 6.5 sagt aus, dass eine Erhöhung des Connection Intervals die Stromaufnahme steigert. Das ist zu erwarten, da die MCU öfter Daten ans Smartphone überträgt. In den Abbildungen 6.6 bis 6.8 sieht man die Erhöhung der Anzahl der Spitzen proportional zum Connection Interval.

Tabelle 6.6 zeigt, dass eine höhere Sensordatenrate auch eine höhere Stromaufnahme bedeutet. Zum Einen wird die IMU stärker beansprucht und die FIFO muss öfter geleert werden. Zum Anderen werden mehr Daten ans Smartphone verschickt. Die Sensordatenrate von 800 Hz mit 4 MHz SPI-Frequenz hat dabei weniger Strom verbraucht als eine Sensordatenrate von 400 mit 125 kHz SPI-Frequenz.

Abbildung 6.2 zeigt die Stromaufnahme während des Schlafmodus der MCU. Es sind regelmäßig Stromspitzen zu sehen. Sie kommen daher, dass die MCU einen internen Spannungswandler besitzt. Wenn der benötigte Strom gering ist, wird der Spannungswandler in Intervallen betrieben und lädt dabei einen Kondensator auf, von dem die MCU ihre Leistung beziehen kann [Nor16b].

Anhand der Daten ist davon auszugehen, dass die Stromaufnahme in der tatsächlichen Nutzung über 1 mA beträgt. Das entspricht 2 - 3 kOhm bei 2 - 3 V. Während die CR2450 bei 3 kOhm weniger als 90 % der Kapazität besitzt und für 2 kOhm nicht mehr spezifiziert ist [Var14c], behält die CR2032 bei dem Widerstand noch etwa die gesamte Kapazität [Var14a]. Bei 550 mAh soll sich die CR2450 bei 1 mA und 3 kOhm etwa 23 Tage betreiben lassen.

Um höhere Stromaufnahmen zu unterstützen, wurde nach einem anderen Batteriemodell gesucht, das

sich für hohe Ströme eignet. Die Murata CR2450R werden explizit als “High Drain lithium coin batteries” [Murb] vermarktet. Sie haben nur eine Kapazität von 500 mAh aber die Kapazität ist bis 10 mA angegeben und der Spitzenstrom darf 50 mA betragen. Es wird empfohlen sie unter 3 mA zu betreiben, wo sie noch etwa 450 mAh bereitstellen kann. Das ergibt eine Laufzeit von mehr als 6 Tagen bei 3 mA. [Murb]

Wird die Hochstrom-CR2450 mit der CR2032 der selben Modellreihe verglichen, hat die CR2450 bei 3 mA die 2.5-fache Kapazität [Mura]. Dagegen hat der vorherige Vergleich in Abschnitt 6.1 die 2.7-fache Kapazität ergeben. Das Volumen beträgt weiterhin das 2.34-fache bei der CR2450.

6.4.3 Standardabweichung der ankommenden Datenrate

Bei allen Einstellungen ist die in der IMU eingestellte Datenrate beim Smartphone angekommen. Die Standardabweichung hat sich allerdings bei den Einstellungen unterschieden. Für die Standardabweichung ist ein Intervall angegeben, da die ausgegebenen Werte um etwa 0.5 Hz schwanken. Dementsprechend muss eine hohe Ungenauigkeit berücksichtigt werden.

In Tabelle 6.2 ist die Standardabweichung um mindestens 1 Hz höher wenn der Algorithmus nicht genutzt wird. Damit kann ein positiver Effekt des Algorithmus auf die Abweichung der Datenrate beobachtet werden.

Die größte Einstellung des TX-Buffers bei aktiviertem Algorithmus hat eine etwa 2 Hz geringe Standardabweichung. Die mittlere Einstellung des TX-Buffers hat in den Tests ’MTU23 TX50 Algo=An’, ’MTU23 TX50 Algo=Aus’ und ’MTU150 TX50 Algo=An’ jeweils schlechtere Abweichungen als die zugehörige kleinste Einstellung ergeben. Eine Vergrößerung der MTU hat die Standardabweichung verbessert. Das war nicht zu erwarten gewesen, da das übertragene Paket, die Struktur `imu_data_t`, eine Größe von 16 Byte besitzt und damit eine größere MTU nicht nötig schien.

Tabelle 6.4 zeigt eine 4 Hz höhere Standardabweichung bei 125 kHz SPI-Frequenz, gegenüber höheren Frequenzen. Das kann daher resultieren, dass die Übertragung der Daten von der FIFO so langsam abläuft, dass sie erst zum nächsten Connection Interval abgeschlossen wird.

Tabelle 6.5 zeigt, dass sich die Standardabweichung mit zunehmendem Connection Interval um bis zu 3 Hz verbessert. Wenn die Sensordaten in wenigen großen Burst übertragen werden, ist es wahrscheinlicher, dass ein Datum erst in der nächsten Sekunde ankommt. Dadurch erhöht sich die Abweichung von der Sensordatenrate am Smartphone.



7 Fazit

7.1 Zusammenfassung

Es wurde ein System entworfen, das zur Aufnahme von IMU-Daten genutzt werden kann und sie über ein drahtloses Protokoll an ein Endgerät schickt. Dafür wurden verschiedene Protokolle und Komponenten miteinander verglichen. Die gewählten Komponenten wurden in einem Prototypen verbaut und eine modulare Software geschrieben. Für das Endgerät, ein Android Smartphone, wurde eine App entwickelt, die sich mit dem System verbindet und Statistiken zur Evaluation graphisch darstellt. Die Komponenten wurden in einem kleinerem Format auf eine Platine gelötet und zusätzlich nötige Komponenten hinzugefügt. In der Evaluation wurde die Stromaufnahme und die Abweichung der Datenrate auf dem Smartphone getestet. Dabei wurden Software und Hardwareparameter geändert und ihr Einfluss auf die Faktoren ausgewertet.

Durch einen Fehler in der Messmethode konnten die Messwerte zur Stromaufnahme nur zum relativen Vergleich untereinander genutzt werden. Das Wearable hat eine geringere Stromaufnahme als der Prototyp gezeigt. Während der BMI160 weniger Strom als der LSM6DSL im Schlafmodus benötigt hat, hatte der BMI160 bei 200 Hz den größeren Verbrauch. Eine Änderung der TX-Buffer und MTU-Größe bewirkte in der Stromaufnahme keine Änderung, allerdings zeigte sich eine geringe Verbesserung der Standardabweichung bei der höchsten Einstellung des TX-Buffers mit eingeschaltetem Algorithmus. Schaltete man den Algorithmus aus, der dazu bestimmt war, unregelmäßiges Umfüllen der Buffer von IMU und zu BLE-Stack zu verhindern, erhöhte sich die Standardabweichung, sodass ein positiver Effekt des Algorithmus beobachtbar war. Wider Erwarten hat eine größere MTU die Abweichung verbessert. Eine Erhöhung der SPI-Frequenz verringerte den Verbrauch und verbesserte gleichzeitig die Abweichung. Eine Erhöhung des Connection Intervals erhöhte den Verbrauch aber verringerte die Abweichung. Eine größere Sensordatenrate hatte einen negativen Einfluss auf den Verbrauch. Es wurde festgestellt, dass der anfangs betrachtete Vorteil von Größe zu Kapazität der größeren Batterie kleiner ausfällt als angenommen.

Die Standardabweichung wurde auf einem Datensatz in Zeitraum von 30 Sekunden berechnet, bei denen die Daten je 1 Sekunde voneinander entfernt waren. Wenn der Zeitraum größer gewählt worden wäre, sollte die Standardabweichung genauere Werte liefern.

7.2 Zukünftige Arbeiten

Während die Entwicklung des Wearables erfolgreich war, sollte die Evaluation wiederholt werden, um genaue Angaben zur Batterielaufzeit zu ermöglichen.

Als weitere Metriken können der Energieverbrauch des Smartphones und die Latenz zwischen Datenerfassung an der IMU und Datenempfang beim Smartphone gemessen werden.

Der Einfluss von mehreren Wearables an einem Smartphone wurde bisher nicht betrachtet. Die zusätzliche Auslastung der BLE-Frequenz kann den Stromverbrauch und die Abweichung der Datenrate bei der einzelnen Wearables erhöhen. Um die Anzahl der Wearables zu erhöhen, kann der zusätzliche Verbrauch von BT Mesh evaluiert werden. Die Android-nRF-Mesh¹ Bibliothek von Nordic Semiconductor kann genutzt werden, um Smartphones BT Mesh kompatibel zu machen.

Die Software kann weiter verbessert werden, indem das List-Feature der EasyDMA zur SPI-Übertragung [Nor17] genutzt wird oder der Algorithmus zusätzlich Daten absichtlich verwirft, um die Bufferumfüllung zu optimieren. Zur besseren Modularität der MCU können Bibliotheken betrachtet werden, die eine Abstraktionsstufe der SDKs der MCU bieten, sodass bei Bedarf einfacher die MCU gewechselt werden

¹ <https://github.com/NordicSemi/Android-nRF-Mesh-Library>, aufgerufen am 22.07.2019

kann.

Um den Nutzer darauf hinzuweisen, dass das Wearable verbunden ist, ohne, dass ein Knopf gedrückt werden muss oder eine LED dauerhaft leuchtet, können weitere Techniken wie eInk² betrachtet werden.

² <https://eink.com/color-technology.html>, aufgerufen am 22.07.2019

Literaturverzeichnis

- [ABCO12] Fatemeh Abyarjoo, Armando Barreto, Jonathan Cofino, and Francisco Ortega. Implementing a sensor fusion algorithm for 3d orientation detection with inertial/magnetic sensors. In *Innovations and advances in computing, informatics, systems sciences, networking and engineering*, Januar 2012.
- [aco17a] aconno. *Datenblatt ACN52832*, August 2017. Online erhältlich unter https://1897079276.rsc.cdn77.org/wp-content/uploads/2018/08/ACN52832_data_sheet_v1.3.pdf; abgerufen am 09. Juli 2019.
- [aco17b] aconno. *Datenblatt ACNSENSA*, November 2017. Online erhältlich unter https://1897079276.rsc.cdn77.org/wp-content/uploads/2018/08/ACNSENSA_datasheet.pdf; abgerufen am 07. Juli 2019.
- [Ada19] Adafruit Industries. Introduction to Bluetooth Low Energy, März 2019. Online erhältlich unter <https://cdn-learn.adafruit.com/downloads/pdf/introduction-to-bluetooth-low-energy.pdf?timestamp=1562415841>; abgerufen am 06. Juli 2019.
- [ALE16] ALEX THE GIANT auf learn.sparkfun.com. Reducing Arduino Power Consumption, November 2016. Online erhältlich unter <https://learn.sparkfun.com/tutorials/reducing-arduino-power-consumption/all>; abgerufen am 09. Juli 2019.
- [ARD] ARDUINO. ARDUINO PRIMO CORE. Online erhältlich unter <https://store.arduino.cc/arduino-primo-core>; abgerufen am 09. Juli 2019.
- [Ard16] Arduino. *Datenblatt Primo Core*, September 2016. Online erhältlich unter https://www.arduino.cc/en/uploads/Main/ARDUINO_PRIMO_CORE_V02_SCH.pdf; abgerufen am 09. Juli 2019.
- [Arm19] Arm Limited. Network connectivity in Mbed OS, 2019. Online erhältlich unter <https://os.mbed.com/docs/mbed-os/v5.13/reference/networking.html>; abgerufen am 11. Juli 2019.
- [Ben19] Bendel, Prof. Dr. Oliver. Wearables, Januar 2019. Online erhältlich unter <https://wirtschaftslexikon.gabler.de/definition/wearables-54088/version-368816>; abgerufen am 21. April 2019.
- [Blu] Bluetooth SIG. Qualified Mesh Products. Online erhältlich unter <https://www.bluetooth.com/bluetooth-technology/topology-options/le-mesh/mesh-qualified/>; abgerufen am 01. März 2019.
- [Bos] Bosch. Produktseite BMI260. Online erhältlich unter https://www.bosch-sensortec.com/bst/products/all_products/bmi260; abgerufen am 09. Juli 2019.
- [Bos18a] Bosch. *Datenblatt BMI160*, Oktober 2018. Online erhältlich unter https://ae-bst.resource.bosch.com/media/_tech/media/datasheets/BST-BMI160-DS000.pdf; abgerufen am 09. Juli 2019.
- [Bos18b] Bosch. *Datenblatt BMP280*, Januar 2018. Online erhältlich unter https://ae-bst.resource.bosch.com/media/_tech/media/datasheets/BST-BMP280-DS001.pdf; abgerufen am 09. Juli 2019.

- [Bos19] Bosch. *Datenblatt BMM150*, April 2019. Online erhältlich unter https://ae-bst.resource.bosch.com/media/_tech/media/datasheets/BST-BMM150-DS001.pdf; abgerufen am 09. Juli 2019.
- [Cho] Chordata. Motion Capture system that you can build yourself. Online erhältlich unter <https://hackaday.io/project/27519-motion-capture-system-that-you-can-build-yourself>; abgerufen am 09. Juli 2019.
- [dig] digikey.com. TMP007 Infrared Thermopile Sensor. Online erhältlich unter <https://www.digikey.com/en/product-highlight/t/texas-instruments/tmp007-infrared-thermopile-sensor>; abgerufen am 09. Juli 2019.
- [Goo14] Google. Android-Quellcode bt_target.h, Dezember 2014. Online erhältlich unter https://android.googlesource.com/platform/external/bluetooth/bluedroid/+/master/include/bt_target.h#1428; abgerufen am 13. Juli 2019.
- [Int19] International Data Corporation. Absatz von Wearables weltweit in den Jahren 2014 bis 2018 (in Millionen Stück), März 2019. Online erhältlich unter <https://de.statista.com/statistik/daten/studie/515723/umfrage/absatz-von-wearables-weltweit>; abgerufen am 21. April 2019.
- [Inv16] InvenSense. *Datenblatt MPU-9250*, Juni 2016. Online erhältlich unter <https://www.invensense.com/wp-content/uploads/2015/02/PS-MPU-9250A-01-v1.1.pdf>; abgerufen am 09. Juli 2019.
- [Lai19] Laird. *Datenblatt BL651*, Februar 2019. Online erhältlich unter https://connectivity-staging.s3.us-east-2.amazonaws.com/2019-02/CS-DS-BL651%20v1_1.pdf; abgerufen am 09. Juli 2019.
- [mad19] madcoffee auf home-automation-community.com. ARDUINO LOW POWER - HOW TO RUN ATMEGA328P FOR A YEAR ON COIN CELL BATTERY, Februar 2019. Online erhältlich unter <http://www.home-automation-community.com/arduino-low-power-how-to-run-atmega328p-for-a-year-on-coin-cell-battery/>; abgerufen am 09. Juli 2019.
- [Mau19] Mauricio Farina auf devzone.nordicsemi.com. NRF_LOG not working on Segger Embedded Studio, April 2019. Online erhältlich unter https://devzone.nordicsemi.com/f/nordic-q-a/45985/nrf_log-not-working-on-segger-embedded-studio; abgerufen am 11. Juli 2019.
- [mic] microcontroller.net. Serial Peripheral Interface. Online erhältlich unter https://www.mikrocontroller.net/articles/Serial_Peripheral_Interface; abgerufen am 07. Juli 2019.
- [mou] mouser.com. acnSENSA. Online erhältlich unter <https://www.mouser.de/ProductDetail/aconno/acnSENSA?qs=sGAEpiMZZMve4%2FbfQkoj%252BGMseiRPTSje0SSloCsufA0%3D>; abgerufen am 08. Juli 2019.
- [MT12] K. Mikhaylov and J. Tervonen. Evaluation of power efficiency for digital serial interfaces of microcontrollers. In *2012 5th International Conference on New Technologies, Mobility and Security (NTMS)*, pages 1–5, Mai 2012.
- [Mura] Murata. *Produktseite CR2032R*. Online erhältlich unter <https://www.murata.com/products/productdetail?partno=CR2032R>; abgerufen am 22. Juli 2019.

- [Murb] Murata. *Produktseite CR2450R*. Online erhältlich unter <https://www.murata.com/products/productdetail?partno=CR2450R>; abgerufen am 22. Juli 2019.
- [Nor] Nordic Semiconductor. *Explore the nRF52 Series*. Online erhältlich unter <https://www.nordicsemi.com/Products/Low-power-short-range-wireless>; abgerufen am 09. Juli 2019.
- [Nor16a] Nordic Semiconductor. *Bluetooth low energy Characteristics, a beginner's tutorial*, März 2016. Online erhältlich unter <https://devzone.nordicsemi.com/nordic/short-range-guides/b/bluetooth-low-energy/posts/ble-characteristics-a-beginners-tutorial>; abgerufen am 06. Juli 2019.
- [Nor16b] Nordic Semiconductor. *Current spikes when DCDC is on*, Juni 2016. Online erhältlich unter <https://devzone.nordicsemi.com/f/nordic-q-a/14210/current-spikes-when-dcdc-is-on/54282#54282>; abgerufen am 21. Juli 2019.
- [Nor17] Nordic Semiconductor. *nRF52832 Product Specification v1.4*, Oktober 2017. Online erhältlich unter https://infocenter.nordicsemi.com/pdf/nRF52832_PS_v1.4.pdf; abgerufen am 14. Juli 2019.
- [Nor18] Nordic Semiconductor. *nRF52 Development Kit User Guide*, Dezember 2018. Online erhältlich unter https://infocenter.nordicsemi.com/pdf/nRF52_DK_User_Guide_v1.3.pdf; abgerufen am 20. Juli 2019.
- [Nor19] Nordic Semiconductor. *nRF52840 Product Specification v1.1*, Februar 2019. Online erhältlich unter https://infocenter.nordicsemi.com/pdf/nRF52840_PS_v1.1.pdf; abgerufen am 14. Juli 2019.
- [NXP14] NXP Semiconductors. *I2C-bus specification and user manual*, April 2014. Online erhältlich unter <https://www.nxp.com/docs/en/user-guide/UM10204.pdf>; abgerufen am 07. Juli 2019.
- [Pat19a] Patrick Schnabel. *Bluetooth Mesh*, Juni 2019. Online erhältlich unter <https://www.elektronik-kompendium.de/sites/kom/2210201.htm>; abgerufen am 13. Juli 2019.
- [Pat19b] Patrick Schnabel. *DMS - Dehnungsmessstreifen*, Juni 2019. Online erhältlich unter <https://www.elektronik-kompendium.de/sites/bau/1404151.htm>; abgerufen am 30. Juni 2019.
- [Pat19c] Patrick Schnabel. *Lithium-Ionen-Akkus*, Juni 2019. Online erhältlich unter <https://www.elektronik-kompendium.de/sites/bau/0810281.htm>; abgerufen am 07. Juli 2019.
- [Pat19d] Patrick Schnabel. *MEMS - Micro-Electro-Mechanical Systems*, Juni 2019. Online erhältlich unter <https://www.elektronik-kompendium.de/sites/bau/1503041.htm>; abgerufen am 30. Juni 2019.
- [PPLA17] G. D. Putra, A. R. Pratama, A. Lazovik, and M. Aiello. Comparison of energy consumption in wi-fi and bluetooth communication in a smart building. In *2017 IEEE 7th Annual Computing and Communication Workshop and Conference (CCWC)*, pages 1–6, Januar 2017.
- [sen18] sensoren.info. *MEMS - Micro-Electro-Mechanical Systems*, Januar 2018. Online erhältlich unter <https://www.sensoren.info/mikromechBeschl.png>; abgerufen am 30. Juni 2019.
- [Spa16] SparkFun. *Datenblatt nRF52832 Breakout*, August 2016. Online erhältlich unter https://cdn.sparkfun.com/assets/learn_tutorials/5/4/9/sparkfun-nrf52832-breakout-schematic-v10.pdf; abgerufen am 09. Juli 2019.

- [Ste18] Steve Leibson. *Grundlagen der Strommessung: Teil 1 – Strommesswiderstände*, Oktober 2018. Online erhältlich unter <https://www.digikey.de/de/articles/techzone/2018/oct/fundamentals-of-current-measurement-part-1-current-sense-resistors>; abgerufen am 22. Juli 2019.
- [STM15] STMicroelectronics. *Datenblatt LSM9DS1*, März 2015. Online erhältlich unter <https://www.st.com/resource/en/datasheet/lsm9ds1.pdf>; abgerufen am 09. Juli 2019.
- [STM16] STMicroelectronics. *Datenblatt HTS221*, August 2016. Online erhältlich unter <https://www.st.com/resource/en/datasheet/hts221.pdf>; abgerufen am 09. Juli 2019.
- [STM17a] STMicroelectronics. *Datenblatt LIS3MDL*, Mai 2017. Online erhältlich unter <https://www.st.com/resource/en/datasheet/lis3mdl.pdf>; abgerufen am 09. Juli 2019.
- [STM17b] STMicroelectronics. *Datenblatt LSM6DS3*, August 2017. Online erhältlich unter <https://www.st.com/resource/en/datasheet/lsm6ds3.pdf>; abgerufen am 07. Juli 2019.
- [STM17c] STMicroelectronics. *Datenblatt LSM6DSL*, September 2017. Online erhältlich unter <https://www.st.com/resource/en/datasheet/lsm6ds1.pdf>; abgerufen am 09. Juli 2019.
- [Tex] Texas Instruments. CC2650STK. Online erhältlich unter <https://www.ti.com/tool/CC2650STK>; abgerufen am 07. Juli 2019.
- [Tex15] Texas Instruments. *Datenblatt TPS2291xx*, November 2015. Online erhältlich unter <https://www.ti.com/lit/ds/symlink/tps22913.pdf>; abgerufen am 09. Juli 2019.
- [Tex16a] Texas Instruments. *Datenblatt HDC1000*, Januar 2016. Online erhältlich unter <https://www.ti.com/lit/ds/symlink/hdc1000.pdf>; abgerufen am 09. Juli 2019.
- [Tex16b] Texas Instruments. Generic Access Profile (GAP), 2016. Online erhältlich unter http://dev.ti.com/tirex/content/simplelink_cc2640r2_sdk_1_40_00_45/docs/blestack/ble_user_guide/html/ble-stack-3.x/gap.html#; abgerufen am 06. Juli 2019.
- [Tex16c] Texas Instruments. Logical Link Control and Adaptation Layer Protocol (L2CAP), 2016. Online erhältlich unter http://dev.ti.com/tirex/content/simplelink_cc2640r2_sdk_1_35_00_33/docs/ble5stack/ble_user_guide/html/ble-stack/l2cap.html#sec-l2cap; abgerufen am 13. Juli 2019.
- [Tex17] Texas Instruments. *Datenblatt OPT3001*, November 2017. Online erhältlich unter <https://www.ti.com/lit/ds/symlink/opt3001.pdf>; abgerufen am 09. Juli 2019.
- [Var14a] Varta. *Datenblatt DS6032*, September 2014. Online erhältlich unter https://products.varta-microbattery.com/applications/mb_data/documents/data_sheets/DS6032.pdf; abgerufen am 13. Juli 2019.
- [Var14b] Varta. *Datenblatt DS6430*, September 2014. Online erhältlich unter https://products.varta-microbattery.com/applications/mb_data/documents/data_sheets/DS6430.pdf; abgerufen am 13. Juli 2019.
- [Var14c] Varta. *Datenblatt DS6450*, September 2014. Online erhältlich unter https://products.varta-microbattery.com/applications/MB_DATA/DOCUMENTS/DATA_SHEETS/DS6450.pdf; abgerufen am 13. Juli 2019.
- [VGC19] VGChartz. Verkaufszahlen der weltweit meistverkauften Spielkonsolen bis Dezember 2018 (in Millionen Stück), März 2019. Online erhältlich unter <https://de.statista.com/statistik/daten/studie/160549/umfrage/>

anzahl-der-weltweit-verkauften-spielkonsolen-nach-konsolentypen/; abgerufen am 21. April 2019. Bearbeitet.

[Vis15] Vishay. *Datenblatt sip32401a*, Juni 2015. Online erhältlich unter <https://www.vishay.com/docs/63705/sip32401a.pdf>; abgerufen am 07. Juli 2019.

[VPdN⁺10] Benedetto Vigna, Fabio Pasolini, Roberto de Nuccio, Macro Capovilla, Luciano Prandi, and Fabio Biganzoli. Low cost silicon coriolis' gyroscope paves the way to consumer imu. In Evgeni Gusev, Eric Garfunkel, and Arthur Dideikin, editors, *Advanced Materials and Technologies for Micro/Nano-Devices, Sensors and Actuators*, pages 67–74, Dordrecht, 2010. Springer Netherlands.

[ZJM17] Longhao Zou, Ali Javed, and Gabriel-Miro Muntean. Smart mobile device power consumption measurement for video streaming in wireless environments: Wifi vs. lte. In *2017 IEEE International Symposium on Broadband Multimedia Systems and Broadcasting (BMSB)*, pages 1–6, Juni 2017.