



Hochschule für angewandte Wissenschaften München
Fakultät für Informatik und Mathematik

Bachelorarbeit zum Thema:

Implementierung eines Drahtlosen Fußschalters

Zur Erlangung des akademischen Grades Bachelor of Science

Vorgelegt von: Wolfram Barth

Matrikelnummer: 03708119

Studiengang: Informatik

Betreuer: Prof. Dr. Stefan Wallentowitz

Abgabedatum: 18. Juli 2023

Abstract

Inhaltsverzeichnis

Abbildungsverzeichnis	5
Tabellenverzeichnis	6
Quellcodeverzeichnis	7
Abkürzungsverzeichnis	8
1 Einleitung	9
1.1 HCT-Plattform	9
1.2 HCT-Protokoll	10
1.3 Motivation	10
2 Ausgangszustand	11
2.1 Aufbau	11
2.2 Erweiterungen für Fußschalter	12
3 Überarbeitung der Dongle-App	14
3.1 Trennung der Projekte	14
3.2 Verbesserung Verbindungsaufbau	15
3.3 Optimierung Abfrage Messeinheit	16
4 Einbindung Messuhren	19
4.1 Unterscheidung Geräte	19
4.2 Anpassung der Datenverarbeitung	19
4.3 Gruppenfunktion	20
5 Einbindung Hardware	22
5.1 Energie Management	22
5.2 Fußschalter Funktionalität	22
5.3 Inbetriebnahme LED	23
6 Messmodi	24
6.1 USB-HID	25
6.2 BLE-HID	25
6.3 BLE-Windows-App	26
7 Überarbeitung des MSC	28
7.1 Evaluierung der Möglichkeiten zur Detektion	28
7.2 Manuelles Einlesen des Änderungszeitpunkts	28
7.3 Finale Lösung	29
8 Schlusswort	31
8.1 Stand Produktentwicklung	31

8.2	Fazit	31
-----	-----------------	----

Abbildungsverzeichnis

1	Aufbau USB-Dongle App	12
2	Zustandsdiagramm des Verbindungsaufbaus	16
3	Messablauf	18
4	Neue Abstraktionsschicht	24

Tabellenverzeichnis

1 LED-Zustände 23

Quellcodeverzeichnis

Abkürzungsverzeichnis

HCT Hoffmann connected tools

BLE Bluetooth low energy

HID Human interface device

MSC Mass storage class

CSV Comma seperated values

CAQ Computer-aided quality assurance

FIFO First in first out

FAT File allocation Table

1 Einleitung

In diesem Kapitel wird zunächst vorgestellt, mit welchen Geräten der Fußschalter interagiert und die zusammen die HCT-Plattform bilden. Es wird gezeigt, wie sich der Fußschalter in diese Plattform einfügt, sowie Motivation der Implementierung erklärt.

1.1 HCT-Plattform

Die Digitalisierung von Werkzeug in der Industrie ist in vollem Gange. Der Hauptgrund dafür ist, neben der einfacheren und genaueren Bedienung, die Möglichkeit durchgeführte Arbeitsschritte auf einem Computer automatisiert zu protokollieren. Wurden früher Messergebnisse per Hand vom Werkzeug auf Papier übertragen, werden sie nun zuverlässig und fehlerfrei mit Bluetooth an einen Computer übertragen. Das ermöglicht eine Automatisierung der Qualitätskontrolle, sowie einen Nachweis, dass Standards in der Fertigung eingehalten wurden, was in Branchen wie der Automobilindustrie oder der Luftfahrt von großer Bedeutung ist.

Um die Digitalisierung der Messergebnisse dem Anwender so einfach wie möglich zu gestalten, setzt die Hoffmann Group mit der HCT-Plattform darauf, die Digitalisierung der durchgeführten Arbeitsschritte als einen festen Bestandteil in ihr Werkzeug zu integrieren. Diese sind zum Stand dieser Arbeit:

- Drehmomentschlüssel
- Messschieber bzw. Messuhren
- Drehmomentprüfgerät

Sie stellen dem Anwender die Daten der Messungen in verschiedener Weise zu Verfügung. Zum Einen können die Geräte über BLE-HID mit dem Computer verbunden werden. Sie simulieren dann eine über Bluetooth verbundene Tastatur über die, die Messergebnisse als Tastendrücke serialisiert werden. Das Messergebnis kann dann in einem Texteditor oder Excel aufgefangen werden. Des weiteren erzeugen die Drehmomentschlüssel und das Drehmomentprüfgerät eine CSV-Datei, in der alle durchgeführten Messungen mit einer großen Anzahl an zusätzlichen Daten gespeichert werden. Wird das Gerät über USB mit dem Computer verbunden, zeigt es sich als MSC-Device und die Datei kann per Drag-and-drop auf den Computer kopiert werden. Die letzte Möglichkeit die durchgeführten Messungen zu digitalisieren, ist mithilfe der HCT-Windows-App. Diese erfordert zusätzlich zur frei verfügbaren Software einen speziellen Dongle der zum Verbinden der Geräte benötigt wird. Sie werden über BLE verbunden und sprechen über BLE das firmeneigene HCT-Protokoll. Die Windows-App bietet zahlreiche Möglichkeiten die Messdaten zu digitalisieren und den Produktionsprozess zu optimieren. Es können Schraubfälle in der App angelegt werden und mit Bildern hinterlegt werden. Die Seriennummer von Werkstücken kann automatisch mit dem dazugehörigen Messwert verlinkt werden und CAQ-Software kann über einen virtuelle COM-Port angebunden werden. Die HCT-Windows-App unterstützt derzeit lediglich die Drehmomentschlüssel, jedoch ist die Einbindung der restlichen HCT-Geräte in Entwicklung.

1.2 HCT-Protokoll

Der HCT-Plattform liegt das firmeneigene HCT-Protokoll zugrunde. Es ist ein binäres Protokoll, das entwickelt wurde, um über BLE gesprochen zu werden und stellt ein virtuelles Speichermodell der Geräte da. Dabei besitzen Werkzeuge unterschiedlicher Produktreihen und Hersteller jeweils verschiedene Speichermodelle. Über “read” und “write” Befehle auf die Speicheradressen kann dann der interne Zustand des Werkzeug abgefragt und verändert werden. So können auch komplexe Operationen effizient über BLE durchgeführt werden. Zudem stehen automatisierte Tools zur Verfügung mit deren Hilfe die Frameworks, die das Sprechen des HCT-Protokoll abstrahieren, um die Speichermodelle neu eingeführter Werkzeuge erweitert werden kann.

1.3 Motivation

Es hat sich gezeigt, dass die Einführung der HCT-Windows-App immer wieder auf großen Widerstand von IT-Abteilungen trifft. Diese haben Sicherheitsbedenken, da die App direkt in der Fertigung eingesetzt wird und es müssen daher langwierige interne Prozesse für die Einführung angestoßen werden. Der Fußschalter soll ohne einer Installation die Funktion der Windows-App, die Serialisierung von Messergebnissen über einen virtuelle COM-Port im MUX50 bzw. DMX16-Protokoll, zur Verfügung stellen.

Des Weiteren muss zum Senden eines Messwerts an den Computer bei Messschiebern und Messuhren eine Taste gedrückt werden. Bei der Durchführung von hochpräzisen Messungen, die auf den hundertstel Millimeter genau sein müssen, verfälscht dieses Betätigen einer Taste auf dem Gerät jedoch bereits die Messung. Auch bei der Durchführung von möglichst zeitgleichen Messungen mit mehreren Messgeräten stellt das Drücken einer Taste zum Senden des Messwerts den Nutzer vor Probleme. Daher werden in der Industrie Fußschalter eingesetzt, die kabelgebunden sowohl an das Werkzeug als auch an den Computer, dieses Senden der Messung auslösen können. Durch die kabelgebundene Natur dieser Fußschalter ist jedoch deren Einsatzbereich reduziert, da es nicht gegeben ist, dass in den Fertigungshallen und Werkstätten, in denen die Fußschalter eingesetzt werden, sich ein Computer in nächster Nähe befindet. Durch die Entwicklung eines Fußschalters, der sich über Bluetooth mit dem Messwerkzeug verbindet, wird der Einsatzbereich deutlich vergrößert und der Einsatz dem Anwender erleichtert.

2 Ausgangszustand

Zum Beginn dieser Arbeit wurde bereits in meiner vorangegangenen Tätigkeit bei der Hoffmann Group auf Basis des NRF52840-Dongle prototypisch eine Anwendung implementiert, die auf das Bluetooth Modul der Hoffmann Group aufbaut und in der Lage ist, sich selbstständig mit mehreren Drehmomentschlüsseln zu verbinden. Sie stellt die Messergebnisse bereits über einen virtuellen COM-Port im MUX50 bzw. DMX16 Protokoll zur Verfügung und die zu verbindenden Geräte sind über eine CSV-Datei, die über MSC dem Nutzer zur Verfügung gestellt wird, konfigurierbar.

2.1 Aufbau

Die Anwendung nutzt das Bluetooth Modul der Hoffmann Group. Es stellt dabei die Anwendungsschicht des BLE-Stack da und abstrahiert somit die BLE spezifischen Aufrufe zum Softdevice. Es wird in allen HCT-Werkzeugen eingesetzt, wo es eine Vermittlerfunktion zwischen dem eigentlichen Gerätechip und dem Softdevice übernimmt, dabei kann es sowohl in peripheral und central Rolle agieren. Es führt den Verbindungsprozess zu Computern und HCT-Geräten durch. Als Softdevice wird das S140 von Nordic Semiconductor in der Version 7.2.0 verwendet.

Auf diesem Basisprojekt aufbauend befindet sich die USB-Dongle App. Im Gegensatz zu den HCT-Werkzeugen sitzt die gesamte Anwendung ebenfalls auf dem Chip des Softdevice und muss sich die Chipressourcen mit ihm teilen. Die Funktionalität, die in dem File `usb_dongle_app.c` gekapselt ist, ist dafür zuständig das Konfigurationsfile einzulesen und die zugehörigen Daten während der Laufzeit zu halten. Dabei handelt sich es um die zu verbindenden HCT-Gerät, welche in einer gleichnamigen Struktur mit Name, Seriennummer und einer Kanalzuweisung gespeichert werden. Die Kanalzuweisung wird für das MUX50 bzw. DMX16 Protokoll benötigt. Werden die Geräte dann verbunden, muss weiterhin der Verbindungszustand, sowie das Connection-Handle gespeichert werden. Des weiteren sammelt es die Messdaten auf, die vom Central Device von den HCT-Geräten im Interrupt-Kontext empfangen werden und reiht die Daten, die von Interesse sind, in eine FIFO Nachrichtenqueue ein. Diese werden später aus dem Kontext der Main-Loop heraus, in das MUX50 bzw. DMX16 Protokoll umgewandelt und über den virtuellen COM-Port verschickt. Ebenfalls in der Funktionalität des `usb_dongle_app.c` Files und aus dem Kontext des Main-Loop heraus, werden die Befehle des MUX50 Protokolls, welche über dem virtuellen COM-Port empfangen wurden, verarbeitet.

In dem File `usbd_msc_cdc_composite.c` werden USB spezifischen Aufrufe gekapselt. Hier wird das MSC und der virtuelle COM-Port (CDC) initialisiert und konfiguriert. Der Code wurde nur mit kleinen Änderungen aus den Beispielen des NRF_SDKs übernommen, weswegen nicht weiter auf die Implementierung eingegangen wird.

Da es keine Unterstützung seitens der NRF Bibliothek für den internen Flash als Speichermedium für das MSC gibt, musste der Treiber `block_device_ram.c` angepasst werden. Er wurde als `block_dev_fStorage.c` in das Projekt gezogen und ruft die Funktionen des Files `fStorage.c` auf, welches die Schreibbefehle im Interrupt-Kontext ebenfalls in eine FIFO Nachrichtenqueue einreicht. Das ist nötig, da für die korrekte Ausführung auf Interrupts

des Flash Memory gewartet werden muss, welche nur im Kontext der Main-Loop korrekt empfangen werden. Zudem wird dort Flash Memory spezifische Logik abstrahiert. So muss eine Flash Page erst "erased" werden, bevor sie geschrieben werden kann und die Block Logik des MSC wird auf die Flash Page Logik des Speichers übertragen.

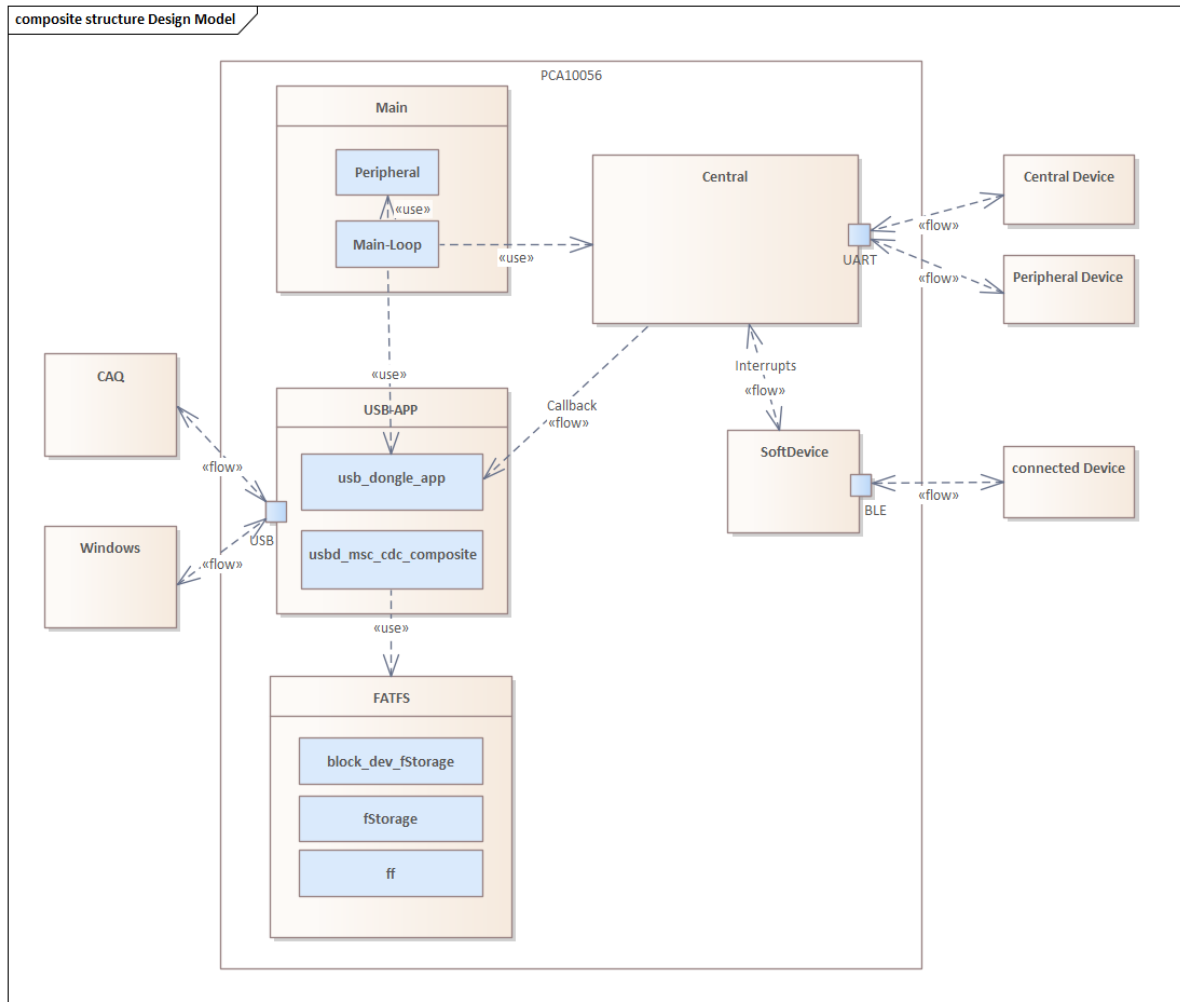


Abbildung 1: Aufbau USB-Dongle App

2.2 Erweiterungen für Fußschalter

Für den Fußschalter muss die bestehende Software wie folgt erweitert werden. Die Peripherie des Fußschalter muss eingebunden werden. Diese umfasst den Schalter der durch den Anwender betätigt werden kann, eine LED-Leuchte und den Akku des Fußschalters. In Hinblick auf den Akku muss eine Energiemanagement geschaffen werden, um dessen Kapazität zu schonen. Zudem sollen die Messmodi USB-HID, USB-HID-Single-Character, BLE-HID und BLE-Windows-App geschaffen werden. Diese sollen sich neben den HID-spezifischen

Konfigurationen in einer eigenen Datei befinden. Des Weiteren müssen die Schreibbefehle des MSC optimiert werden, da sie nur sehr langsam und fehlerbehaftet abgearbeitet werden. Die Änderungen an der Konfiguration der Anwendung wird außerdem erst übernommen, wenn der Dongle abgezogen und wieder angesteckt wird, also die Anwendung neugestartet wird. Beim Fußschalter sollen Änderungen an den Konfigurationsfiles detektiert werden und die Anwendung programmatisch neugestartet werden, auch weil durch den Akku die Anwendung durch den Nutzer nicht direkt neugestartet werden kann. Es müssen außerdem die Messuhren bzw. Messschieber eingebunden werden. Zusätzlich soll die Anwendung weiterhin auch als Dongle erhältlich gemacht werden und die Implementierung muss in Hinblick auf diese Hardwarunterschiede durchgeführt werden.

3 Überarbeitung der Dongle-App

Die Dongle-App dient neben dem nrf_Base Projekt als Basis für die Anwendung des Fußschalters. Sie diente als Proof-of-Concept und ermöglichte als solche die Bereitschaft des Projektmanagements die Ressourcen für die Implementierung des Fußschalters zu bewilligen. Im ersten Schritt der Implementierung wird sie um Grundfunktionalitäten erweitert und die Datenverarbeitung fehlertoleranter gestaltet.

3.1 Trennung der Projekte

Das Framework der Hoffmann Group zur Abstraktion der BLE-Schnittstelle nrf_Base wird in allen HCT-fähigen Produkten eingesetzt und stetig weiterentwickelt. Um die fehlerfreie Kommunikation des Fußschalters zu den HCT-Werkzeugen auch in Zukunft sicherzustellen, müssen Updates des nrf_Base auch in das Projekt des Fußschalters übernommen werden. Während in der Proof-of-Concept Anwendung des Dongles darauf noch keine Rücksicht genommen wurden, soll in der Entwicklung des Fußschalters von Anfang an diese Abhängigkeit berücksichtigt werden und die Dongle-App entsprechend angepasst werden. Des weiteren soll auch der Umfang der Anwendung, die auf dem Dongle läuft, minimiert werden und der Code für die Peripherie des Fußschalters abgetrennt werden. Natürlich darf in anderen Produkten als dem Dongle und dem Fußschalter, deren Code nicht zu finden sein.

Folgende Peripherie darf dabei nur in den jeweiligen Projekten initialisiert werden:

- nrf_Base: UART
- HCT-FootSwitch: Fußschalter, Akku Power Management, Drei-Farben LED, USB
- Dongle: Ein-Farben LED, USB

Um diese Anforderungen zu erfüllen kann einerseits für alle drei Projekte eine eigene Codebasis geschaffen werden, die sich jeweils stark überschneiden und gesondert gepflegt werden müssen oder die selbe Codebasis für alle Projekte benutzt werden. Die erste Möglichkeit hat den Vorteil, dass sich die Entwicklung einfacher gestaltet, da auf diese Abhängigkeiten keine Rücksicht genommen werden muss. Zudem kann der Code stärker auf den Anwendungsfall optimiert werden, jedoch macht der enorme Arbeitsaufwand die gesonderten Codebasen zu unterhalten und auf dem neuesten Stand zu halten, diese Möglichkeit unpraktikabel. Des weiteren wurde aus Software architektonischen Gründen die Anwendung bereits gekapselt, wodurch die Programmatische Abtrennung der Teile keinen außerordentlichen Entwicklungsaufwand erfordert.

Stattdessen muss aus der Main-Routine nur zwei Funktionsaufrufe mit Compilerschaltern abgetrennt werden, um den Code des Fußschalter bzw. Dongles vom nrf_Base Projekt zu trennen. Zum einen der Initialisierungsaufruf und ein App-process Aufruf, da der Main-Loop als Dispatcher für die gesamte Anwendung fungiert. Im Central müssen die Datencallbacks, sowie im Connection State Callback die Aufrufe an die Dongle-App abgetrennt werden. Die Funktionalität der UART stellte sich als wenig gekapselt heraus und musste an zahlreiche Stellen kleinteilig aus dem Fußschalterprojekt abgetrennt werden.

Das ambitioniertes Ziel war dabei, dass nach der Einführung der Compilerschalter das Binärfile des nrf_Base Projekts identisch zu der vorangegangenen Version ohne Fußschalter sein sollte. Aus noch nicht geklärten Umständen ist das jedoch nicht der Fall.

3.2 Verbesserung Verbindungsaufbau

Im ersten Prototyp der Dongle-App wird nach dem Einlesen der Konfigurationsdatei, überprüft ob die jeweiligen Geräte bereits verbunden sind. Falls ein Gerät unverbunden ist, wird das Scanning gestartet und periodisch die vom Central gefundenen Geräte auf das zu verbindende Gerät hin überprüft. Ist es schließlich gefunden, wird der Verbindungsaufbau angestoßen und sobald die Service discovery vollzogen wurde, wird sich auf die HCT-Charakteristik subscribed und das Connection Handle des Geräts aus dem Central Device übernommen.

Dabei werden jedoch zwei Zustände nicht abgebildet. Zum einen wird zwischen der Verbindungsaufnahme und der Subscription auf die HCT-Charakteristik, der Zustand “Connected” eingenommen. Hier wird bereits das Connection Handle zugeordnet und muss gespeichert werden, da ab der Einnahme dieses Zustands ein Verbindungsabbruch auftreten und nur über das Connection Handle nachvollzogen werden kann. Zum anderen wird nach der erfolgreichen Subscription ein Acknowledgement übermittelt und im Central der Zustand “Subscription” eingenommen. Hier wurde in der Dongle-App bereits das Connection Handle dem Gerät zugeordnet, weswegen ein Disconnect nachvollzogen werden kann, jedoch wird die initiale Kommunikation mit der Abfrage der Messeinheit fortgesetzt. Dabei wurde bisher nicht gewartet, dass die Subscription erfolgreich abgeschlossen wurde, was jedoch die Zuverlässigkeit des Verbindungsaufbaus und der Abfrage der Messeinheit erhöht.

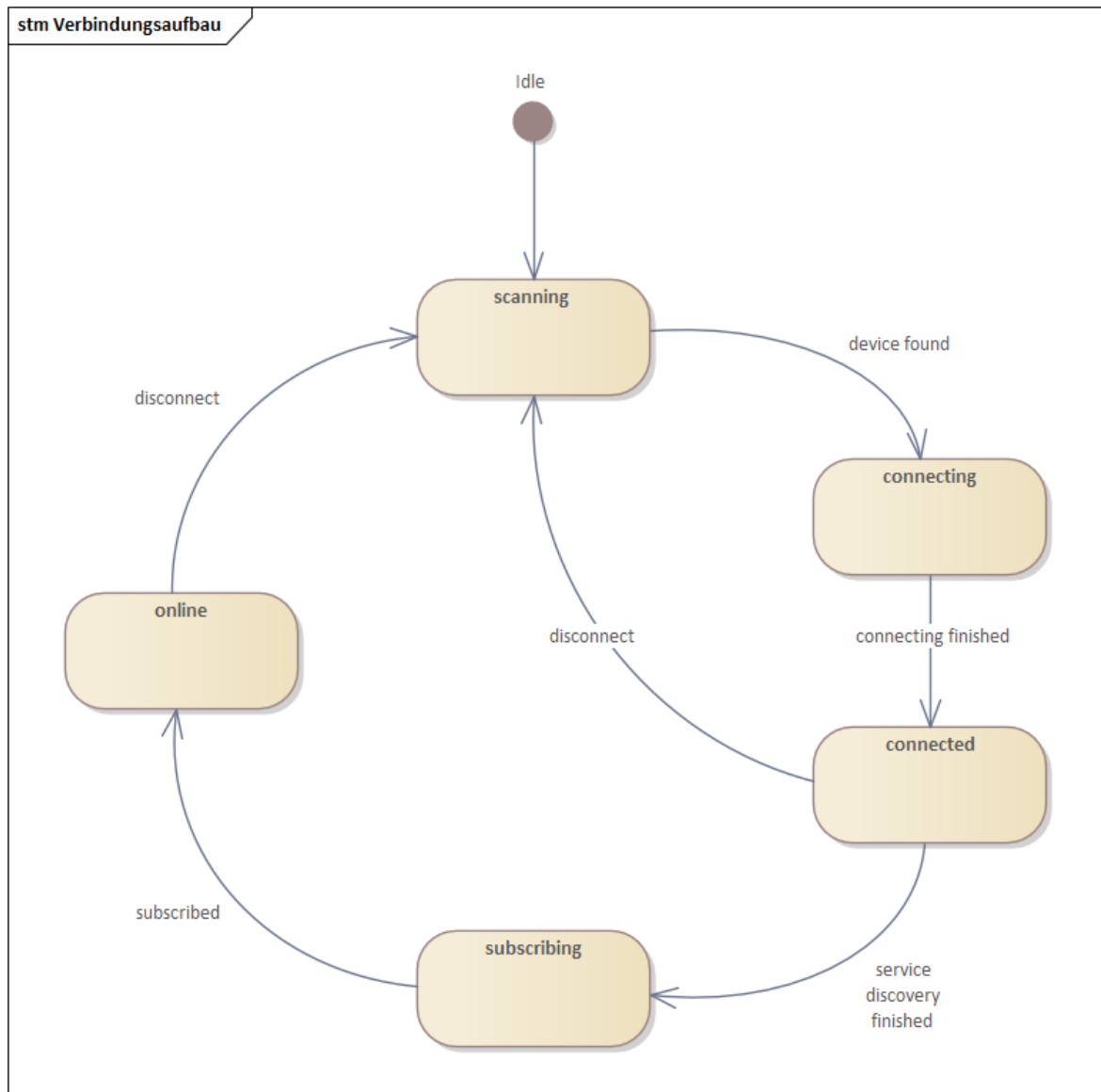
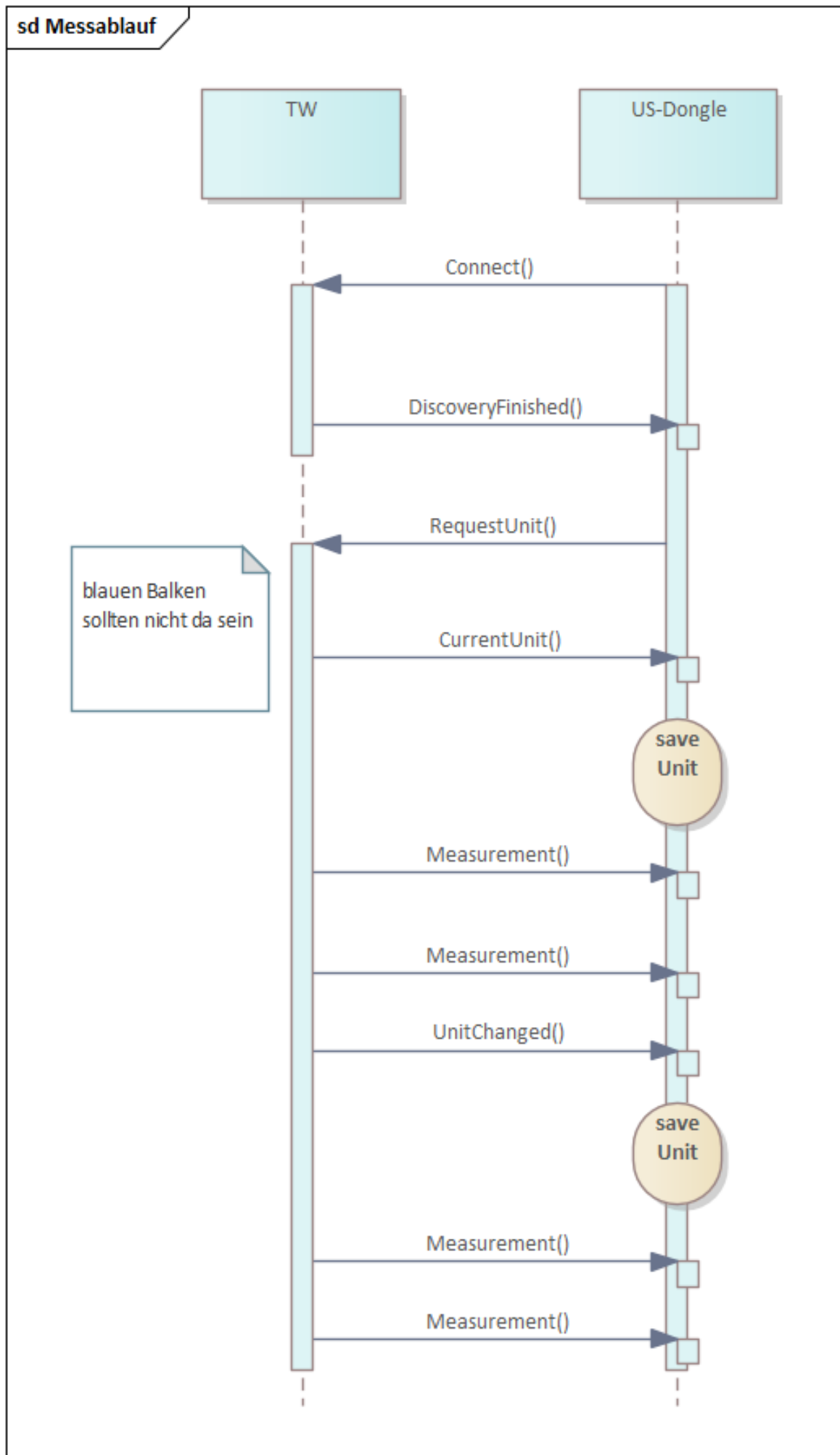


Abbildung 2: Zustandsdiagramm des Verbindungsaufbaus

3.3 Optimierung Abfrage Messeinheit

Im Ausgangszustand der USB-Dongle App muss die Anwendung bei Werkzeug der Marke Hoxel jedes Mal, wenn sie ein Messergebnis erhält, die Einheit der Messung abfragen. Bei Drehmomentschlüsseln der Marke Garant wird ein Datenblock mit der Messeinheit kurz nach Erhalten des Messergebnisses empfangen. Diese Nachricht bezieht sich jedoch auf die derzeitig eingestellte Messeinheit, welche im Fall eines Arbeitsablaufs mit sich ändernden Einheiten, die Einheit für die nächste Messung ist. In diesem Fall gibt die USB-Dongle App die falsche Einheit über USB-CDC aus.

In beiden Fällen sendet das Werkzeug automatisch bei einer Änderung der Messkonfiguration einen Datenblock mit der Messeinheit an die Subscriber der HCT-Charakteristik. Die Kontrolle der Messeinheit kann daher verbessert werden, indem die derzeitig eingestellte Messeinheit nach dem Verbindungsaufbau einmal abgefragt wird und für jedes verbundene Gerät gespeichert wird. Bei einer Änderung der Messeinheit wird die Dongle-App notifiziert und die gespeicherte Einheit aktualisiert. Dadurch wird eine fehlerhafte Einheit in der Ausgabe vermieden und die Anzahl an Nachrichten der Dongle-App an das Messgerät verringert.



4 Einbindung Messuhren

In Vorbereitung auf die Implementierung der fußschalterspezifischen Features wird die Dongle-App um die Unterstützung der Messuhren bzw. Messschieber erweitert, da sich die meiste Funktionalität des Fußschalters spezielle auf die Messuhren bezieht. Messuhren und Messschieber sind in diesem Kontext dabei gleich bedeutend, weil das HCT-Interface für beide Geräte identisch ist. Es wird sich nachfolgend jedoch stets auf Messuhren bezogen, da sie für die Anwendungsfälle des Fußschalters und Dongles bedeutender sind. Bisher ist die Dongle-App daraufhin ausgelegt, dass mit einem Drehmomentschlüssel kommuniziert wird und die erhaltenen Binärdaten werden entsprechen interpretiert. Für die Einbindung der Messuhren muss nun die Unterscheidung eingeführt werden mit welcher Art von Werkzeug kommuniziert wird und entsprechend die Datenverarbeitung angepasst werden.

4.1 Unterscheidung Geräte

Die Unterscheidung mit welcher Art von Gerät kommuniziert wird, kann auf zwei verschiedenen Weisen erfolgen.

Einerseits kann anhand des Namens das Gerät entweder der Klasse Drehmomentschlüssel oder Messuhr zugeordnet werden. Das ist jedoch unter Umständen fehleranfällig, da das Sortiment an HCT-Werkzeug stetig wächst und es nicht auszuschließen ist, dass in der Zukunft Geräte auf den Markt kommen, mit deren Namen es zu falschen Zuordnung kommt. Zudem gibt es alte Messschieber, die zwar unter einem korrekten Name advertisen aber nicht das HCT-Protokoll sprechen, wobei diese Geräte aufgrund der Inkompatibilität der Protokolle letztendlich nicht verbunden werden sollten.

Eine andere Methode ist, die “Device Information” abzufragen und anhand der Klassenidentifikationsnummer das Gerät einem Typ zuzuordnen. Das ist die präferierte Lösung, da neben der genaueren und sicheren Zuordnung, in der Device Information andere Informationen, wie die Protokoll Version mitgeliefert werden, die bei späteren Features unter Umständen benötigt werden. Zudem bleibt die Datenverarbeitung leichter erweiterbar um neue Geräte. Jedoch muss diese Abfrage in den asynchronen und mehrteiligen Ablauf des Verbindungsaufbaus eingefügt werden, wodurch ein höherer Entwicklungsaufwand entsteht. Auch benutzt das Werkzeug der Firma Garant eine andere Klassifikation der Geräte als das Werkzeug der Firma Horex, welche innerhalb der Dongle-App vereinheitlicht werden muss.

Da die Erweiterbarkeit und Flexibilität jedoch dem höheren Entwicklungsaufwands überwiegen, wurde sich zugunsten dieser Lösung entschieden. Dabei wird nach dem Verbindungszustand-Callback, der vom Central Device nach einer erfolgreichen Subscription der Anwendung auf die BLE-Charakteristik des Werkzeugs aufgerufen wird, eine Nachricht zu Abfrage der Device Information gesandt. Die erhaltenen Daten werden dann in der zum Gerät gehörenden Struktur gespeichert und anschließend die Abfrage der Messeinheit durchgeführt.

4.2 Anpassung der Datenverarbeitung

Auch die Datenverarbeitung, also die Interpretation der erhalten Daten über BLE muss angepasst werden, da das Messergebnis zwar innerhalb des gleichen Datenblocks wie bei

dem Horex Drehmomentschlüssel liegt, mit dem sie sich den gleichen Daten-Callback teilt, jedoch innerhalb des Datenblocks an einer anderen Stelle. Diese Offsets sind als Konstanten im Headerfile der Dongle-App definiert und müssen um die entsprechenden Einträge für die Messuhren erweitert werden. Zudem handelt es sich bei dem Messergebnis, das von Interesse ist, beim Drehmomentschlüssel um den “Peak Torque”, der als Gleitkommazahl codiert ist, während bei der Messuhr das Ergebnis die “Measurement Distance” als Ganzzahl codiert ist. Dabei handelt es sich abhängig von der Messeinheit um Mikrometer oder Mikroinch. Es muss auf Millimeter beziehungsweise Inch umgerechnet werden, da die Ausgabe über CDC oder HID der Anzeige auf dem Gerätedisplay gleichen soll. Das binäre Messergebnis wird daher zunächst mit einem Umrechnungsfaktor von 1000 in Millimeter beziehungsweise Milliinch als Gleitkommazahl umgerechnet. Anschließend muss überprüft werden, ob es sich bei der derzeitige Einheit des Geräts um inch handelt, da dann der Wert erneut durch 1000 dividiert werden muss, um von Milliinch auf die gewünschte Einheit Inch zu gelangen. Es wird also letztendlich eine Gleitkommazahl erhalten, wodurch sie ohne Anpassungen in der Nachrichten Struktur der Dongle-App gespeichert werden kann.

Die Einheitenkodierung der Messuhr ist komplementär zur Kodierung der Drehmomentschlüssel und daher kann die if-Cascade, welche die Zuordnung vornimmt, um die Einheiten der Messuhr erweitert werden. Jedoch befindet sich die Information welche Einheit verwendet wird, wie das Messergebnis, ebenfalls an einer anderen Stelle innerhalb des Datenblocks und muss entsprechend angepasst werden.

4.3 Gruppenfunktion

Durch das Betätigen des Fußtasters des Fußschalters soll bei allen verbundenen Messuhren das derzeitige Messergebnis abgefragt werden. Während im Modus 2 (CDC) ein Messergebnis, anhand der Kanalnummer einem Werkzeug zugeordnet werden kann, ist dies in den HID-Modi nicht der Fall. Es muss daher die korrekte Reihenfolge der Ausgabe der Messergebnisse sichergestellt werden. Es wurde sich entschieden, das `devices.csv` Konfigurationsfile um eine Spalte mit einer Gruppennummer zu erweitern, da somit der Anwender sowohl die Reihenfolge als auch welche Messuhren in der Gruppe sind, konfigurieren kann. Da durch das Abschieken der Nachrichten zur Abfrage der Messungen in der korrekten Reihenfolgen, das tatsächliche Erhalten in der gleichen Reihenfolge nicht sichergestellt ist, muss davon ausgegangen werden, dass die Nachrichten in einer zufälligen Reihenfolgen erhalten werden. Stattdessen muss bei der Ausgabe die Nachrichten umsortiert werden. Dazu bedarf es eines Zählers, der durch Betätigung des Fußschalters, von 0 auf 1 gesetzt wird, wodurch der Start der Gruppenfunktion später beim Erhalten der Messergebnisse erkennbar ist. Bei der Abarbeitung der erhaltenen Nachrichten, wird dann über die Zuordnung zum Device, die Nachricht ausgewählt und weitergegeben, die zum Counter korrespondiert. Die Gruppenids, die keinem der konfigurierten Geräte zugeordnet werden können, sowie die Gruppenids die zu unverbundenen Geräten gehören, werden dabei übersprungen. Zusätzlich soll ein Feature der Messeruhren genutzt werden, um die Gruppennummer auch auf der Messuhr anzuzeigen. Dazu werden den Messuhren ihre Gruppennummer nach dem Verbindungsaufbau via dem HCT-Protokoll übermittelt.

Durch spätere Anregungen von Messtechnikern ergab sich jedoch, dass wenn ein Gerät der

Gruppe zwar konfiguriert, jedoch nicht verbunden ist, die präferierte Lösung ist die gesamte Gruppe nicht zu triggern. Das ergibt sich einerseits dadurch, dass die Messuhren sich aufgrund ihrer relativ kleinen Batterien bei Inaktivität schnell ausschalten und die Verbindung zu ihrem Central trennen. Andererseits soll möglichst jede durchgeführte Messung korrekt sein, da sie durch die CAQ-Software verarbeitet und gespeichert wird. Das Ziel der Sicherstellung einer korrekten Messung überwiegt hier also dem Gedanken der Benutzerfreundlichkeit, dass eine Messung auch dann gemacht werden kann, wenn einer der Geräte unverbunden ist. Der Fußschalter blinkt dann zwei Mal kurz rot auf, um diesen Fehler zu signalisieren.

Des Weiteren könnte es passieren, dass eine Messung zwar angefragt, aber nicht erhalten wurde. Die Anwendung würde dann blockieren, da auf die Nachricht gewartet wird und müsste neugestartet werden. Es wurde sich entschieden, einen Timer zu starten, falls eine Nachricht nicht erhalten wurde und bei seinem Ablauf statt dem Messergebnis eine Fehlermeldung auszugeben. Die restlichen Messergebnisse können dann korrekt ausgegeben werden.

Ebenfalls aus dem Feedback der Messtechniker heraus, wurde ein sequentielles Triggern der Gruppe implementiert. Dazu muss der entsprechende Eintrag in der Konfigurationsdatei mit einer Eins auf aktiv gesetzt werden. Es wird bei den Geräten der Gruppe nacheinander, jeweils bei Betätigen des Fußtaster, die Abfrage des Messergebnis ausgelöst.

5 Einbindung Hardware

Die Prototypen des Fußschalters der Firma Brecht wurden bereits vor Beginn dieser Arbeit erhalten und somit konnte direkt mit der Inbetriebnahme der neuen Hardware begonnen werden. Der Chipsatz des Fußschalters ist ebenfalls der PCA10056 von Nordic semiconductor, somit muss an der Software des USB-Dongles keine Änderungen vorgenommen werden.

5.1 Energie Management

Wenn der Fußschalter nicht über USB mit einer Stromquelle verbunden ist, bekommt er den benötigten Strom von dem fest eingebauten Akku. Um diesen nicht unnötig zu belasten, soll der Fußschalter nach einer Zeit der Inaktivität so weit wie möglich heruntergefahren werden. Um diese Anforderung zu erfüllen, sah eine erste Idee vor das im nrf_Base Projekt vorhandene Energiemanagement zu benutzen. Dieses fährt aus dem Main-Loop heraus getriggert den Chip bei Inaktivität des Softdevice weitestgehend herunter, wodurch der Stromverbrauch stark sinkt. Ist der USB-Port also nicht verbunden und es wurde keine Aktivität in der Fußschalter Anwendung, wie das Erhalten einer Nachricht oder dem Verbinden eines Geräts, registriert, wird ein Timer gestartet. Läuft dieser Timer ab, werden alle Central und Peripheren Verbindungen getrennt und falls notwendig Scanning und Advertising gestoppt. Wird während dem Laufen des Timers Aktivität registriert, wird er neugestartet, während er vollständig gestoppt wird, falls USB wieder verbunden ist. Dieser Implementierung lag die Vermutung zugrunde, dass wenn Chip vollständig heruntergefahren wurde, er auch nicht durch Betätigung des Fußtasters wieder neugestartet werden kann.

Zunächst zeigte sich jedoch das Problem, dass bei der Hardware des Fußschalters, der Akku auf der Datenleitung des USBs liegt. Dadurch wird in der Anwendung nicht wie bei dem EvalBoard die Events für USB connected und USB disconnect erhalten. Daher musste am Fußschalter geringfügige Hardwareänderungen durchgeführt werden. Dabei wurde die Eingangsspannung bereits vorher abgegriffen und auf den PIN des Fußtasters gelegt. Der Fußtaster erhält einen unbelegten PIN. Mit einem ADC wird dann überprüft, ob eine Spannung auf diesem PIN anliegt.

Es zeigte sich bei der Einbindung des Fußtasters, dass die Anwendung durch Betätigung des Fußtasters selbst aus einem Shutdown heraus wieder aufgeweckt wird. Daher wird nach Ablauf des Inaktivitätstimers die Anwendung vollständig heruntergefahren, was noch energieeffizienter ist.

5.2 Fußschalter Funktionalität

Nach Überarbeitung der Codebasis und Einbindung der Messuhren, stehen alle Funktionalitäten bereit um den eigentlichen Fußtaster einzubinden. Während bei der initialen Einbindung des Fußtasters, eine Betätigung das Abfragen der Messergebnisse bei allen verbundenen Messuhren triggerte, wuchs die Funktionalität stetig.

Zum Ende dieser Arbeit wird durch ein kurzes Betätigen oder einem “einfachen Klick” die bereits beschriebene Gruppenfunktion ausgeführt. Im Modus 0 (USB-HID-singleKey) und 4 (BLE-HID-singleKey) wird draufhin ein Timer gestartet, welcher derzeit auf 500ms gesetzt

ist. Wird während seines Laufen eine zweite Betätigung getätigt, wird ein “Doppelklick” registriert und das dafür in der Konfigurationsdatei hinterlegte Zeichen ausgegeben. Dadurch kann der User in diesem Modus schnell Dialogoptionen in der HCT-Windows-App auswählen oder in einem Textfile die Seiten wechseln. In einem anderen Modus führt das Warten auf die zweite Betätigung, jedoch zu einer Verzögerung der Ausgabe um die Dauer des Timers, weshalb dort die Doppelklick Funktionalität zugunsten dem Ansprechverhalten des Tasters gestrichen wurde.

Wird der Taster hingegen für 3 Sekunden durchgängig gehalten, wird das Gerät heruntergefahren. Diese Funktionalität wurde ursprünglich eingeführt, da der Fußschalter auf einer Messe vorgestellt wurde, aber der automatische Reset des Geräts bei Änderung der Konfigurationsfiles noch nicht zuverlässig funktionierte. Sie wurde beibehalten, da sie als sehr benutzerfreundlich empfunden wurde.

5.3 Inbetriebnahme LED

Auf dem Board des Fußschalters befindet sich eine LED die durch einen Lichtkanal nach außen hin durch das Gehäuse sichtbar gemacht wird und die dazu benutzt werden soll den internen Zustand des Geräts darzustellen. Folgende Zustände sollen abgebildet werden:

Zustand	LED-Farbe
Gerät im Sleep Modus	Aus
Alle zu verbindenden Geräte verbunden	Blau
Min. ein Gerät verbunden, es wird nach den fehlenden Geräten gescannt	Blau blinkend
Kein Gerät verbunden, Scanning inaktiv	Grün
Kein Gerät verbunden, Scanning aktiv	Grün blinkend
MSC-Schreibvorgang detektiert	Gelb
Min. ein Konfigurationsfile nicht gefunden	Rot
Fehler in den Konfigurationsfiles	Rot blinkend

Tabelle 1: LED-Zustände

6 Messmodi

Sowohl der Fußschalter als auch der USB-Dongle sollen in mehreren verschiedenen Operationsmodi laufen können. Dieser wird in einer zusätzlichen globalen Konfigurationsdatei spezifiziert. Zum Zeitpunkt der Implementierung der USB-App war die App die oberste Abstraktionsschicht aller USB-Funktionalität. Das ist mit Einführung der Fußschalter Funktionalitäten nicht mehr der Fall. Daher bedarf es einer neuen Abstraktionsschicht, die über der Dongle- und Fußschalterapp steht und die Funktionalitäten beider dirigiert. Dadurch können die Operationsmodi programmatisch getrennt werden, sodass bestimmte Schritte der Initialisierung, wie das Einlesen der Konfigurationsdatei der zu verbindenden Geräte, in einem Modus wie HID einzelnes Zeichen nicht ausgeführt werden. Zum Ende dieser Arbeit sind folgende Modi konfigurierbar:

- 0: USB-HID-singleKey
- 1: USB-HID
- 2: CDC (COM-Port)
- 3: BLE-HID
- 4: BLE-HID-singleKey

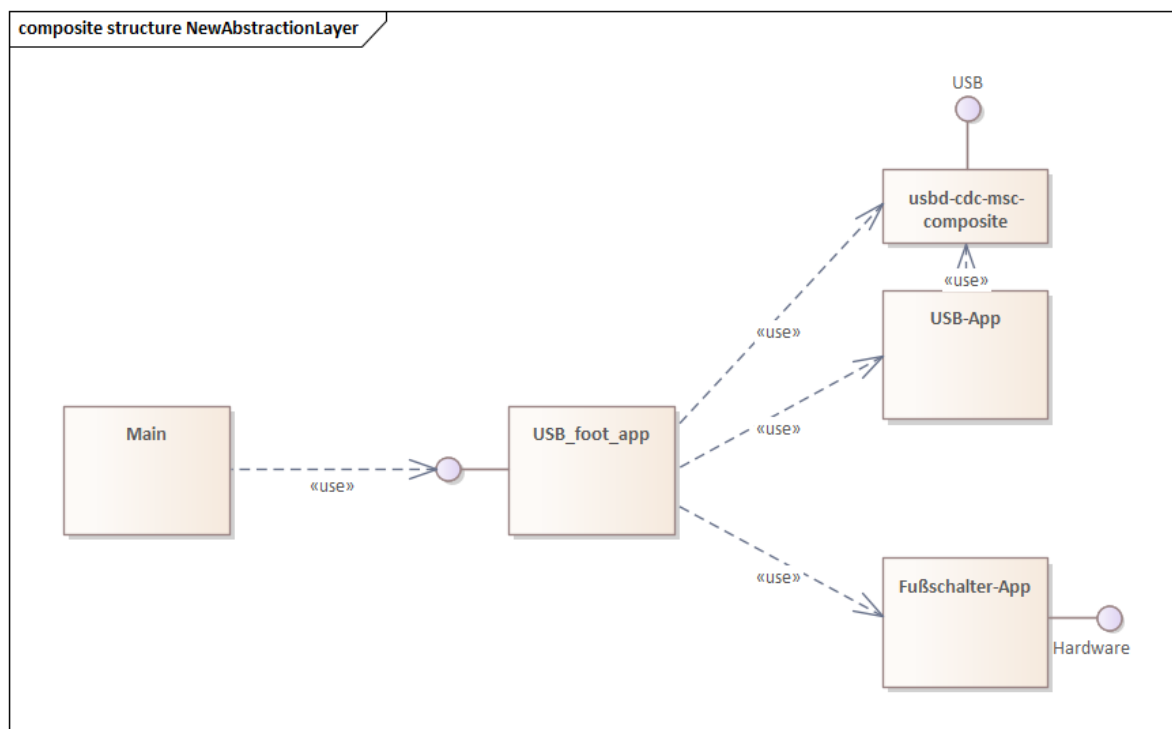


Abbildung 4: Neue Abstraktionsschicht

6.1 USB-HID

Ein Feature, das sowohl für den Dongle als auch für den Fußschalter implementiert werden soll, ist das Human Interface Device (HID) über USB. In diesem Modus gibt die Anwendung die Messergebnisse nicht mehr über den virtuellen COM-Port aus, sondern ist über USB als Tastatur mit dem Computer verbunden. Über sie werden die Zeichen des Ergebnis als Tastendrücke, gefolgt von einem konfigurierbaren Terminierungszeichen, ausgegeben. Dadurch können Messungen einfach in Excel oder einem Texteditor aufgefangen werden.

Für die Implementierung werden die Funktionen des NRF-Library Files `app_usb_hid_kbd.h` verwendet. Es abstrahiert die Low-Level USB-Aufrufe und stellt Funktionen zur Verfügung, die bei Aufruf eine Taste drücken oder loslassen. Es fehlt jedoch eine Funktion die ganze Strings serialisiert, weshalb diese implementiert werden muss. Die Scancodes, die Nummern der Tastertasten, sowie der Modifier, eine Taste die Tastendrücke modifiziert, wie die Shift-Taste, werden dabei von einer Funktion erhalten, die im `nrf_Base` Projekt enthalten ist. Sie wurde für die HID Implementierung über BLE geschrieben und gibt den Scancode und zugehörigen Modifier für einen ASCII Character zurück.

Zwischen den Tastendrücken muss eine gewisse Zeit gewartet werden, da der Computer Tastendrücke zwischen denen zu wenig Zeit verstreicht nicht registriert. Dieser Delay wurde auf 1 Millisekunden festgelegt, da bei einem längeren Delay die Anzahl an fehlerhaften Tastendrücken zunahm. Diese Art darauf zu warten, dass die Tastendrücke vom Computer registriert wurde, stellte sich jedoch als sehr fehleranfällig heraus. Nicht nur wurde doppelte Zeichen nicht korrekt erkannt, sondern nach ungefähr 10 Ausgaben schien der USB-Bus überlastet zu sein. Daher musste die Implementierung geändert werden. Statt die Tastendrücken ohne Rücksicht auf die zugehörigen Events dem USB zu übergeben, muss nach jedem Zeichen auf ein Event der USB-HID Library gewartet werden, das die erfolgreiche Übertragung signalisiert. Dazu muss der zu serialisierende String in einem Buffer hinterlegt und bei Empfangen des Events das nächste Zeichen übertragen werden.

Eine Abwandlung dieses Modus, ist der Modus USB-HID-singleKey. In diesem Modus gibt der Fußschalter bei Betätigung des Tasters nur ein einzelnes konfigurierbares Zeichen aus, beziehungsweise bei einem Doppelklick ein Zweites, wie in Abschnitt 5.2 beschrieben ist.

6.2 BLE-HID

Ein weiterer Modus, in dem der Fußschalter arbeiten soll, ist HID über BLE. Dabei simuliert der Fußschalter oder Dongle eine über BLE verbindbare Tastatur und serialisiert nach dem Verbinden wie bei HID über USB die Messergebnisse als Tastendrücken. Dazu muss das Gerät nun zusätzlich zur Central Rolle in der Peripheral Rolle agieren. Dazu muss einerseits das Advertising korrekt konfiguriert werden und in den bestehenden Code des Peripheren Verbindungsaufbaus, die Fußschalter Applikation eingebunden werden. Für das eigentliche Schreiben des Messergebnisses über BLE, gibt es bereits eine bestehenden Funktionen des `nrf_Base` Projekts die einen String vollständig serialisiert und diese muss nur in der Fußschalter Applikation aufgerufen werden.

Erste Tests zeigen, dass die Geschwindigkeit der Übertragung, einerseits die Dauer bis angefangen wird das Messergebnis zu schreiben und andererseits wie schnell die einzelnen

Tastendrucke erfolgen, zu hoch ist. Die Untersuchung wo genau zuviel Zeit verwendet wird, fand mithilfe eines Oszilloskop und dem togglen eines freien Pins, der zu diesen Debugzweck belegt wurde, statt. Es konnte dadurch bereits ein Bug im nrf_Base Projekt gefunden werden. Dabei wird in der Funktion, zwischen den einzelnen Zeichen eine Pause gemacht, um ähnlich im Modus USB-HID dem Betriebssystem Zeit zu geben die Tastendrucke zu verarbeiten. Dieser Delay ist abhängig von Connection Interval, welches bei einer aktiven Verbindung korrekt gesetzt ist. Jedoch wurde im Zuge des Proof-of-Concept des Dongle das nrf_Base Projekt erweitert, um auch mehrere Verbindungen zu erhalten. Dabei kann nun dieses Connection Interval von einer einzigen Messuhr, die in den Sleep Mode geht und ihr Connection Interval hochsetzt, auf einen fehlerhaften Wert gesetzt werden.

Auch von diesem Modus, gibt es die Abwandlung BLE-HID-singleKey, die wie im Modus USB-HID-singleKey, ein einzelnes Zeichen bei Betätigung des Tasters ausgibt.

6.3 BLE-Windows-App

Der letzte Modus, in dem der Fußschalter agieren soll, ist als ein an die HCT-Windows-App angebundenes Gerät. Dabei soll das Signal der Betätigung des Tasters als eine HCT-Nachricht an die Windows-App gesendet werden, welchen dann ein Messergebnis bei den mit ihr verbundenen Messgeräten triggert. Dazu muss ein HCT-Model für den Fußschalter geschaffen werden. Das Model stellt folgende Werte bereit:

- Device Class
- Protocol type, version
- Version of Hardware, Software, BLE
- Battery level, status
- Reset

Werte des Config.ini Konfigurationsfiles:

- Operating Mode
- CDC protocol
- HID Keyboard Language ID
- HID data set seperator
- HID number seperator
- HID single key

Für die Übertragung des eigentlichen Signals, dass der Fußschalter betätigt wurde, muss eine HCT-Charakteristik angelegt werden, auf welche die HCT-Windows-App sich subscriben kann. Über diese Charakteristik wird sie dann über die Betätigung des Tasters notifiziert. Im Advertising muss sich der Fußschalter dann nicht als Tastatur, sondern als HCT-Fußschalter erkenntlich zeigen.

Es wurde jedoch beschlossen, diesen Modus erst in einer späteren Version des Fußschalters zu implementieren, wie im Abschnitt 8.2 genauer erklärt wird.

7 Überarbeitung des MSC

Zum Beginn dieser Arbeit muss der Dongle jedes Mal, wenn die Konfigurationsfiles geändert wurden, ab- und wieder eingesteckt werden, damit die Anwendung neugestartet und die Dateien erneut eingelesen werden. Beim Fußschalter ergibt sich nun das Problem, dass das Gerät einen Akku besitzt, weswegen ein harter Reset durch den Anwender nicht ohne weiteres möglich ist.

7.1 Evaluierung der Möglichkeiten zur Detektion

Der erste Versuch der unternommen wurde um dem Anwendungsfall gerecht zu werden, ist über die File Information des Fat Filesystems den Änderungszeitpunkt auslesen und falls er sich im Vergleich zum Zeitpunkt, der beim erstmaligen Einlesen festgestellt wurde, geändert hat, ein Systemreset durchzuführen. Dabei hat sich jedoch gezeigt, dass eine Änderung am File keine Veränderung am Änderungszeitpunkt hervorruft. Erst nach einem manuellen Reset zeigt sich das korrekte Änderungsdatum in der File Information.

Ein weiterer Versuch war es, direkt zu überprüfen ob neue Daten über das Blockdevice geschrieben wurden. Dies führte jedoch dazu, dass der System Reset durchgeführt wurde, bevor alle Daten vollständig geschrieben wurden. Zudem hat diese Implementierung weitere Probleme, wie zum Beispiel, dass ein Formatieren des Datenträgers, wie er bei der ersten Inbetriebnahme durchgeführt werden muss, nicht mehr möglich war.

Ein periodisches Neueinlesen der Daten war hingegen nicht möglich, weil bei dem Read Befehl die Anwendung in einer Warteschleife festhing. Es zeigte sich, dass sowohl MSC als auch das Fat Filesystem auf die gleiche Instanz des Blockdevice versucht haben zuzugreifen, was grundsätzlich nicht möglich ist. Ein Anlegen einer weiteren Instanz des Blockdevice für das Filesystem behob dieses.

In einer zwischenzeitlichen Lösung des Problems werden die Konfigurationsfiles periodisch neugelesen und über die Daten ein Hashwert gebildet. Anhand dieses Wertes wird dann eine Änderung festgestellt. Hat sich das globale Konfigurationsfile geändert wird ein Systemreset durchgeführt, während bei einer Änderung des Files der zu verbindenden Geräte, die Verbindung zu allen Geräten getrennt wird und das File anschließend neueingelesen, wodurch der Verbindungsaufbauprozess neu gestartet wird. Jedoch zeigte sich, dass Änderungen, die am Ende der Datei stattgefunden haben, nicht detektiert werden.

7.2 Manuelles Einlesen des Änderungszeitpunkts

Es hat sich gezeigt, dass die Länge der Datei nicht erneut eingelesen wird, wenn die Datei aus Windows heraus geändert wird und nicht aus dem Filesystem auf dem Chip. Daher können Änderungen an den Dateien, die ausschließlich hinten an dem bestehenden Text angefügt werden, nicht detektiert werden, da die Datei mit der alten Länge eingelesen wird. Jedoch konnte festgestellt werden, dass die Information korrekt im Speicher vorhanden ist, aber nicht ins interne Filesystem übernommen wird. Es besteht also die Möglichkeit die Informationen selbstständig einzulesen. Dazu muss als Erstes das "Directory Entry" gefunden werden. Es

steht nach den “File Allocation Tables” (FAT). Daher müssen folgende Informationen aus der Boot Section ausgelesen werden und folgende Berechnung durchgeführt werden:

- Sa: Startadresse Filesystem
- Sg: Sektorengroße
- nrS: Anzahl reservierter Sektoren
- nF: Anzahl FAT
- nSF: Anzahl Sektoren pro FAT

$$Sa + Sg \cdot nrS + Sg \cdot nF \cdot nSF = Sa + Sg \cdot (nrS + nF \cdot nSF)$$

Diese Informationen stehen jedoch immer an der gleichen Stelle im Bootsektor und ändern sich während des Betriebs des Fußschalters nicht.

Im Directory Entry wird jeweils für die Informationen einer Datei 32 Bytes verwendet und innerhalb dieser 32 Bytes befinden sich die Informationen immer an der gleichen Stelle, weshalb mit festen Offsets gearbeitet werden kann. Jedoch wird ein Eintrag nicht sofort gelöscht, wenn die Datei gelöscht wird, sondern die Filenamen durch Ersetzen des ersten Buchstaben durch 0x5a invalidiert. Daher muss der valide Eintrag immer wieder neu gesucht werden. Auch hat es sich gezeigt, dass daher das Directory Entry größer als ein Sektor werden kann, auch wenn er nur zwei Dateinamen beinhaltet. Es wird daher nacheinander die Sektoren, die für das Directory Entry allokiert sind, eingelesen und auf die korrekten Dateinamen hin untersucht. Ist der korrekte Eintrag gefunden, wird der Änderungszeitpunkt eingelesen und nach der bereits beschriebenen Methode überprüft. Es wurde hier wieder der Änderungszeitpunkt zur Detektion einer Änderung verwendet, da die Länge der Datei nur dazu benutzt werden könnte, die Datei “händisch” einzulesen, also direkt über Flash Zugriffe und nicht über die Fat Filesystem Library. Was kurzzeitig in Angesicht der weiterhin bestehenden Probleme in Erwägung gezogen wurde, aber schon aufgrund des hohen Entwicklungsaufwands, versucht wurde zu vermeiden. Dabei kann aus dem Directory Entry auch der Startsektor der Datei ausgelesen werden und ähnlich der Adresse des Directory Entry, die Adresse des Sektors berechnet werden. Auf den ersten Blick erscheint das nicht übermäßig kompliziert, jedoch wird die Datei, falls sie größer als ein Sektor wird, auf nicht zwangsläufig aufeinanderfolgende Sektoren verteilt, was nur anhand der FAT nachvollzogen werden kann.

7.3 Finale Lösung

Das Hauptproblem des MSC ist, dass es immer wieder dazu kommt, dass Schreibbefehle fehlschlagen und die Daten unvollständig in den Speicher übertragen werden. Nachforschungen ergeben, dass die Zugriffe auf den Flash vom Softdevice abgearbeitet werden müssen. Bestehen also mehrere aktive Verbindungen steigt die Wahrscheinlichkeit von Fehlerhaften Schreibzugriffen stark an. Getätigte Änderungen an den Konfigurationsfiles werden dann nicht übernommen und sind selbst nach langen Wartezeiten, nach dem Reset verloren.

Deshalb werden, falls Schreibzugriffe gequeueet sind, alle Aktivitäten des Softdevice gestoppt, um die Gefahr von Fehlern beim Schreiben und die benötigte Zeit zu minimieren. Das umfasst das Trennen aller Verbindungen, sowie das Stoppen von Advertising und Scanning. Da durch einen gestarteten Timer der Fußschalter ohnehin neugestartet werden soll, damit die Konfigurationsfile neueingelesen werden können, ist die Beeinträchtigung der User Experience vernachlässigbar.

8 Schlusswort

8.1 Stand Produktentwicklung

Der Fußschalter und der Dongle sollen als eigenständige Produkte in das Sortiment übernommen werden. Sie werden jeweils als Projekte von dem Produktmanagement übernommen. Dabei werden die Hardwareänderungen wie in Kapitel 5.1 beschrieben, in das Layout der Platine übernommen. Zusätzlich soll der Pin, der den Chip in den Bootloader Mode versetzt, von außen erreichbar gemacht werden. Außerdem sollen auch die SWE-Pads, die das Debugging auf dem Chip ermöglichen erreichbar gemacht werden. Derzeitig sind sie auf der Seite mit der der Dongle auf die Platine gelötet wurde, weswegen sie nur sehr schwer abgreifbar sind. Die Prototypen dieser neuen Hardwareversion wurden Anfang August erhalten.

Der Modus BLE-Windows-App wurde auf eine spätere Version verschoben, da die Integration der Messuhren in die Windows App andauert und eine Integration des Fußschalters daher noch nicht absehbar ist. Dieser Modus wurde zugunsten anderer Features bis auf Weiteres verschoben.

8.2 Fazit

Der Implementierungsumfang für diese Arbeit war von Anfang an ambitioniert. Dennoch wurde alle geplanten Features außer der Modus BLE-Windows-App implementiert und sogar noch zahlreiche zusätzliche Features, wie die Gruppenfunktion, umgesetzt. Eine weiterführende Optimierung des Modus BLE-HID steht noch aus, aber steht einer Produkteinführung nicht im Weg.

Selbstständigkeitserklärung

Hiermit erkläre ich, dass ich die vorliegende Arbeit selbstständig und ohne fremde Hilfe verfasst und keine anderen Hilfsmittel als die angegebenen verwendet habe.

München, den 18. Juli 2023