



Bachelorarbeit

Entwicklung eines vollautomatisierten
Embedded-Linux-Systems zur Ansteuerung und
Auswertung eines Langzeittests

zur Erlangung des akademischen Grades

Bachelor of Engineering

von

Tim Nieter

05. Januar 2015 – 16. März 2015

- Nicht öffentlich -

Erstbetreuer: Prof. Dr. F. Bauernöppel

Zweitbetreuer: G. Schoel

Eingereicht am: 16. März 2015

Eidesstattliche Erklärung

Tim Nieter
Rudower Straße 95
12351 Berlin

Hiermit versichere ich, dass ich die von mir vorgelegte Arbeit selbstständig verfasst habe, dass ich die verwendeten Quellen und Hilfsmittel vollständig angegeben habe und dass ich die Stellen der Arbeit – einschließlich Tabellen und Abbildungen –, die anderen Werken oder dem Internet im Wortlaut oder dem Sinn nach entnommen sind, auf jeden Fall unter Angabe der Quelle als Entlehnung kenntlich gemacht habe.

Berlin, den 16. März 2015

Tim Nieter

(Unterschrift)

Sperrvermerk

Die nachfolgende Bachelorarbeit mit dem Titel „Entwicklung eines vollautomatisierten Embedded-Linux-Systems zur Ansteuerung und Auswertung eines Langzeittests“ enthält vertrauliche Daten der Pepperl+Fuchs GmbH. Veröffentlichungen oder Vervielfältigungen der Arbeit – auch nur auszugsweise – sind ohne ausdrückliche Genehmigung der Pepperl+Fuchs GmbH nicht gestattet. Die Arbeit ist lediglich den Korrektoren sowie den Mitgliedern der Prüfungskommission zugänglich zu machen.

Tim Nieter

Thema der Bachelorarbeit

Entwicklung eines vollautomatisierten Embedded-Linux-Systems zur Ansteuerung und Auswertung eines Langzeittests.

Stichworte

BeagleBone Black, Qt, MySQL

Kurzzusammenfassung

Im Rahmen dieser Arbeit wird eine Embedded-Linux-System unter Verwendung eines Einplatinencomputers zur Ansteuerung und Auswertung eines Langzeittests entwickelt. Des Weiteren wird zur Erfassung von Messdaten ein RS232 Protokoll und ein MySQL Datenbanksystem implementiert. Außerdem wird für die Auswertung und Verwaltung der Daten eine Ethernet Schnittstelle, sowie ein Webinterface gestaltet.

Inhaltsverzeichnis

Abbildungsverzeichnis	II
Tabellenverzeichnis	III
Quellcodeverzeichnis	IV
Abkürzungsverzeichnis	V
1 Einleitung	1
1.1 Motivation	1
1.2 Aufbau der Arbeit	1
2 Grundlagen	3
2.1 Degradation	3
2.2 Qt	4
2.2.1 Signale und Slots	4
2.2.2 Entwicklungsumgebung	5
2.3 Datenbank	6
2.4 Embedded Linux System	8
3 Anforderungsanalyse	9
3.1 Szenario	9
3.2 Analyse	10
3.2.1 Mess-Server	10
3.2.2 Mess-Client	11
3.2.3 PC-Client	13
3.3 Anforderungen	13
4 Design	16
4.1 Hardware	16
4.2 Software	18
4.2.1 Mess-Client Verwaltung	19
4.2.1.1 Mess-Client Anmeldung	19

4.2.1.2	Messdatenerfassung	19
4.2.2	Benutzeroberfläche	21
4.2.3	TCP/UDP Server	22
4.2.4	Web Server und WLAN Hotspot	24
4.2.5	Datenbank Server	25
4.2.5.1	Tabellen	26
4.3	RS232 Protokoll	30
4.3.1	Aufbau	31
4.3.2	Übertragung	34
4.3.3	Befehle und Unterbefehle	34
5	Implementierung	35
5.1	Hardware	35
5.2	Software	35
5.2.1	Systemkonfiguration	35
5.2.2	RS232 Kommunikation	37
5.2.3	Benutzeroberfläche	37
5.2.4	Datenbank	37
5.2.5	Anwendung zur Messdatenauswertung	38
6	Testen und Validieren	39
6.1	Speicherlecks	39
7	Fazit und Ausblick	40
Literaturverzeichnis		i

Abbildungsverzeichnis

2.1.1	Aufgezeichnete Degradation von verschiedenen LEDs. Zeigt die relative Abweichung der optischen Leistung über die Zeit.	4
2.2.1	QtCreator Version 2.0.1	6
2.4.1	Links:Kommunikation zwischen Applikation und Hardware. Rechts: Beispiel Kommunikation zwischen Applikation und UART über den Kernel.	8
3.1.1	Szenario	9
3.2.1	BeagleBone Black	10
3.2.2	Mess-Client Oberseite	11
3.2.3	Mess-Client Unterseite	11
3.2.4	Messintervalle	12
3.2.5	Pulsmuster	12
4.1.1	Übersicht Hardware	16
4.1.2	RS232 Cape	17
4.1.3	RTC Cape	17
4.1.4	LCD Cape	17
4.1.5	Gestapelte Capes	18
4.2.1	Übersicht Software	18
4.2.2	Ablaufplan	20
4.2.3	Mess-Server GUI: Status Tab	21
4.2.4	Mess-Server GUI: Events Tab	21
4.2.5	Mess-Server GUI: Boards Tab	22
4.2.6	Mess-Server GUI: Debug Tab	22
4.2.7	RS232 Tunnel	23
4.2.8	Webinterface	24
4.2.9	Entity Relationship Modell	25
4.3.1	RS232 Übertragung	34

Tabellenverzeichnis

3.3.1	Beispiel: Intervalle	13
3.3.2	Anforderungen	15
4.2.1	Parameter der Messintervalle	19
4.2.2	Ethernet Befehlsliste	23
4.2.3	Tabelle D_Board	26
4.2.4	Tabelle Setting	27
4.2.5	Tabelle DUT	27
4.2.6	Tabelle Pattern	28
4.2.7	Tabelle PulsePattern	28
4.2.8	Tabelle Measurement	29
4.3.1	Übertragungsrahmen	31
4.3.2	1. Byte: Adresse & Read/Write	31
4.3.3	Read/Write	31
4.3.4	2. Byte: Rahmenlänge	31
4.3.5	3. Byte: Befehl	32
4.3.6	4. Byte: Unterbefehl	32
4.3.7	5. Byte und folgend: Nutzdaten	32
4.3.8	Letztes Byte: Checksumme	33
4.3.9	RS232 Befehlsliste	34

Quellcodeverzeichnis

2.1	Qt <i>connect</i> -Statement	4
2.2	Qt <i>emit</i> -Statement	5
4.1	onBoardDelete Trigger	29
5.1	Systemd Service	36
5.2	Systemstart Script	36
5.3	Logrotate	37
5.4	MySQL Zugriffsrechte	37
5.5	MySQL Index	38

Abkürzungsverzeichnis

SQL	Structured Query Language	6
DB	Datenbank	6
DBMS	Datenbankmanagementsystem.....	6
DBS	Datenbanksystem	6
ERM	Entity-Relationship-Modell	25
DUT	Device Under Test	9
GUI	Graphical User Interface	4
IDE	Integrated Developement Environment	5
SDK	Software Developement Kit	5
LED	Light-Emitting Diode.....	3
ADC	Analog-Digital-Converter.....	20
UART	Universal Asynchronous Receiver Transmitter	17
RTC	Real Time Clock.....	17
CGI	Common Gateway Interface.....	24
GCC	GNU-C-Compiler.....	35
GPIO	General Purpose Input/Output.....	36
SSH	Secure Shell	35

1 Einleitung

In diesem ersten Kapitel wird auf die Motivationen und die Zielsetzung dieser Arbeit eingegangen.

1.1 Motivation

Wann immer Systeme in der realen Welt eingesetzt werden, sollen sie so zuverlässig, fehlerfrei und vorhersehbar wie möglich arbeiten. Gerade wenn diese Systeme an kritischen Punkten zum Einsatz kommen und über lange Zeiträume agieren, sind diese Eigenschaften besonders wichtig. Um diesen Anforderungen gerecht zu werden, müssen alle Bauelemente eines solchen Systems diese Vorgaben erfüllen, denn die Zuverlässigkeit ist immer abhängig vom schwächsten Glied. Bei der Entwicklung eines Systems ist es somit entscheidend, alle Bauelemente vorher anhand der gegebenen Umstände zu qualifizieren. Dafür müssen die Grenzen ausgelotet werden, in denen sie zuverlässig betrieben werden können.

Eine dieser Grenzen ist die altersbedingte Änderung der Betriebsparameter, die sogenannte Degradation. Um das Degradationsverhalten eines Bauelementes bestimmen zu können, muss es über lange Zeiträume unter erschwerten Bedingungen betrieben und ausgewertet. Nur wenn ein Baulement ein für die Anwendung akzeptables Degradationsverhalten aufweist, ist es für den Einsatz im Gesamtsystem geeignet.

Da ein hoher Einsatz von Ressourcen nötig ist, um jedes Bauelement individuell zu Prüfen, existieren automatisierte Teststände mit deren Hilfe der Aufwand minimiert werden soll.

1.2 Aufbau der Arbeit

Im Rahmen dieser Arbeit wird ein Embedded-Linux-System zur Ansteuerung und Auswertung eines Langzeittests zu entwickeln. Dazu wird zunächst in Kapitel 2 auf die Grundlagen der verwendeten Begrifflichkeiten und Systeme eingegangen. Anschließend werden in Kapitel 3 die Akteure des Systems analysiert und die Anforderungen definiert. In Kapitel 4 werden wird das Design der Hard- und Softwarekomponenten erläutert. Im Anschluss befasst sich Kapitel 5 mit der Implementierung des Designs in das System. Um die Ergebnisse zu validieren, wird in Kapitel 6 die Lösung

getestet. Zum Abschluss erfolgt in Kapitel 7 die Reflektion der Ergebnisse und ein Ausblick für die Zukunft.

2 Grundlagen

Bei der Entwicklung des Teststandes kommen verschiedene Systeme und Konzepte zum Einsatz. Dieses Kapitel befasst sich mit der C++ Klassenbibliothek Qt und der Frage, was ist die Degradation oder ein Embedded-Linux-System. Des Weiteren wird auf das Konzept einer Datenbank und der Evaluierung der beiden Datenbanksysteme MySQL und SQLite eingegangen.

2.1 Degradation

Der Hauptgrund für mechanisches Versagen im Lebenszyklus eines Systems oder Bauelementes, liegt an der langsamen Ansammlung von nicht reversiblen Schäden. Dieser Prozess ist bekannt als Degradation (vgl. [ZSG11]).

Die Schwierigkeit liegt in der Feststellung des mechanischen Versagen in messbaren Schritten. So ist die Bestimmung der Lebenszeit über die Zeit bis zum Ausfall zeitaufwändig. Einfacher ist es die Leistung des Bauelementes oder Systems zu erfassen, z.B. die optische Leistung einer LED. Auf diesem Weg kann ein Trend ausgemacht werden.

Um die Länge des Lebenszyklus eines Bauelementes bestimmen zu können, wird die Leistung dessen unter Last über einen langen Zeitraum hinweg aufgezeichnet. Anhand der daraus resultierenden Daten kann die zu erwartende Länge des Lebenszyklus ermittelt werden.

In Abbildung 2.1.1 ist ein Beispiel für erfasste Daten zu sehen. Sie zeigt die Veränderung der optischen Leistung über die Zeit von 7 verschiedenen Light-Emitting Diodes (LEDs).

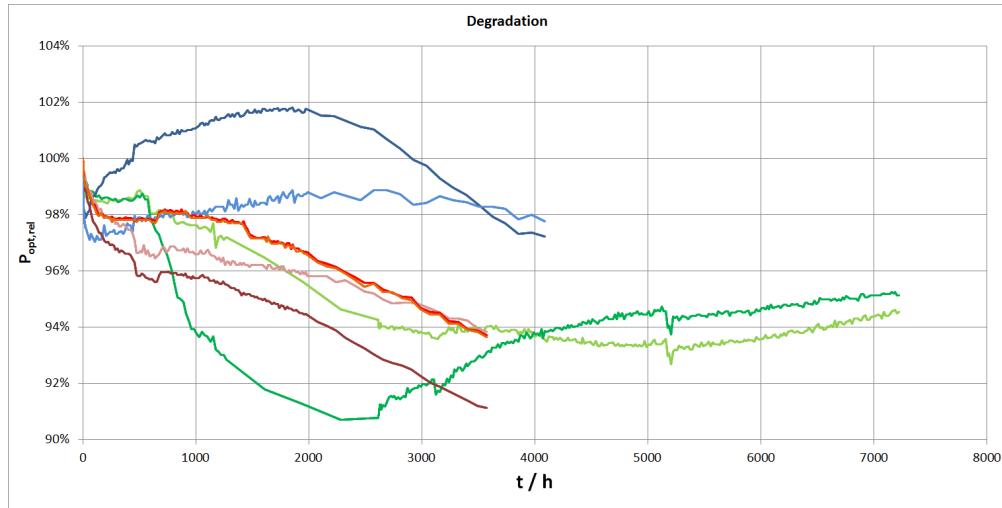


Abb. 2.1.1: Aufgezeichnete Degradation von verschiedenen LEDs. Zeigt die relative Abweichung der optischen Leistung über die Zeit.

2.2 Qt

Qt [?] ist eine umfangreiche C++-Klassenbibliothek zur Gestaltung und Entwicklung von Anwendungen. Vor allem bei Applikationen mit grafischen Benutzeroberflächen (englisch: Graphical User Interface (GUI)) ist Qt sehr beliebt.

Zusätzlich bringt Qt eine große Auswahl an Tools und Modulen mit sich, welche die Programmierung erheblich erleichtern (z.B. Netzwerkprogrammierung, Datenbankanbindung, OpenGL, etc.). Ein weiterer Vorteil ist die Plattformunabhängigkeit. So unterstützt Qt aktuell (Version 5.4, 10. Dezember 2014) einen Großteil der aktuellen Betriebssystem wie Windows, Linux, Android, iOS und einige mehr. Die hohe Kompatibilität wird dadurch gegeben, dass Qt die meisten Systemaufrufe abstrahiert.

2.2.1 Signale und Slots

Die Kommunikation unter den Objekten in Qt erfolgt über Signale und Slots. Dabei sendet ein Objekt ein Signal aus und ein anderes empfängt dieses. Dafür muss zunächst eine Verbindung zwischen den Objekten aufgebaut werden. Das erfolgt mit dem *connect*-Statement.

```
connect(Calculate, SIGNAL(clicked()), this, SLOT(addAB()));
```

Quellcode 2.1: Qt *connect*-Statement

Im Quellcode 2.1 wird ein Beispiel für die Verbindung von zwei Objekten mit dem *connect*-Statement gezeigt. Hier wird das Signal *clicked()* des Objektes *Calculate* mit dem Slot *addAB()* des Objektes *this*, was dem aktuellen Objekt entspricht, verbunden.

```
1 void Calculate :: my_function () {  
2     /*  
3      Do Something  
4     */  
5     emit clicked ();  
6 }
```

Quellcode 2.2: Qt *emit*-Statement

Im Quellcode 2.2 wird das Signal *clicked()* mittels *emit*-Statement ausgelöst und der Slot des verbundenen Objekts aktiviert. Somit ist es möglich beispielsweise die GUI und den Hauptprogrammablauf von einander zu trennen und lediglich über Signale und Slots kommunizieren zu lassen. Dadurch agieren beide Teile komplett unabhängig von einander.

2.2.2 Entwicklungsumgebung

Als Entwicklungsumgebung (englisch: Integrated Developement Environment (IDE)) dient der Qt Creator (siehe Abbildung 2.2.1), welcher Teil des Software Developement Kit (SDK) von Qt ist und sowohl auf Linux, Windows als auch Mac OS X zur Verfügung steht. Er kommt mit einem Debugger, einem integrierten grafischen GUI Designer und einem Texteditor mit Funktionen wie Syntax-Hervorhebung und automatischer Vervollständigung.

Dabei kommen gängigen Compiler wie MinGW unter Windows zum Einsatz und es besteht die Möglichkeit eigene Toolchains anzulegen.

Eine Toolchain dient zum Übersetzen von Quellcode auf einem Host-System für ein Ziel-System. Sie setzt sich meistens aus einer Kette von Werkzeugen zusammen, welche nacheinander für die Übersetzung des Quellcodes sorgen. Somit ist es möglich, einen Programmcode auf einem Windowsrechner zu schreiben und anschließend für ein Linux-System zu übersetzen.

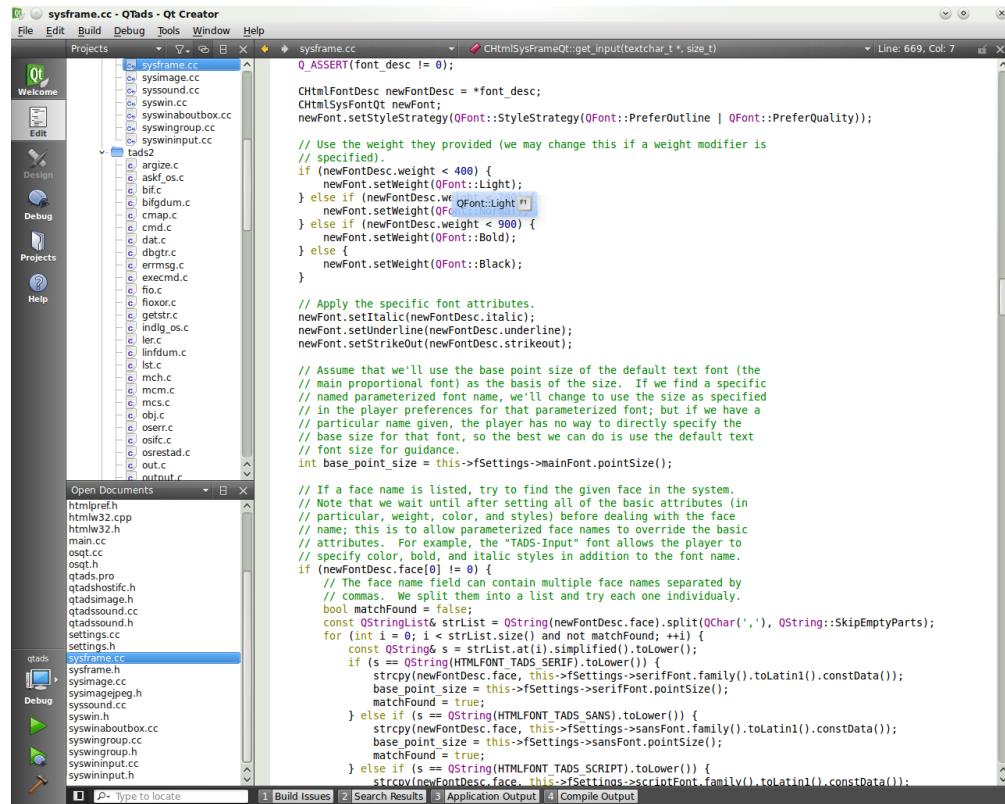


Abb. 2.2.1: QtCreator Version 2.0.1

2.3 Datenbank

Um große Mengen an Daten effizient verarbeiten zu können, ist der Einsatz eines Datenbankmanagementsystems (DBMS) unumgänglich (vgl. [SSH10]).

Für das Speichern der Messdaten und Betriebsparameter wird daher eine Structured Query Language (SQL) Datenbank (DB) benötigt. Bei der Wahl des DBMS, stehen mehrere Systeme zur Auswahl. Dabei kommen SQLite und MySQL aufgrund der kostenlosen Verfügbarkeit in die engere Auswahl. Beide System haben ihre Vor- und Nachteile.

SQLite ist ein SQL DBMS, welches ohne einen Server auskommt und operiert stattdessen in einer einzigen Datei. Alle Informationen wie Tabellenstruktur und Daten sind darin enthalten. Es wird vor allem im eingebetteten Bereich eingesetzt, da kaum Konfigurationen oder Verwaltung notwendig sind. Deshalb eignet es sich ausgezeichnet für sich schnell weiterentwickelnde Applikationen. Aufgrund dieser Eigenschaften existieren allerdings auch Nachteile. So unterstützt SQLite nur eingeschränkt mehrere Nutzer die gleichzeitig auf die Datenbank zugreifen. Da das gesamte Datenbanksystem (DBS) in einer einzigen Datei zusammengefasst ist, können mehrere zur selben Zeit durchgeführte Schreibzugriffe nicht unterstützt werden. Denn die einzige Zugriffskontrolle und Sicherstellung der Datenintegrität erfolgt durch das Dateisystem des Betriebssystems, was nicht immer fehlerfrei implementiert ist.

Des Weiteren ist SQLite aufgrund des Ein-Datei-Systems nur eingeschränkt skalierbar. Bei einer größeren Datenmenge oder erhöhten Anzahl an Zugriffen ist es nicht möglich diese Datei auf mehrere Systeme zu separieren, um somit die Last gleichmäßig zu verteilen.

MySQL ist ein weiteres SQL DBMS, welches allerdings auf einer Serverarchitektur beruht. Es ermöglicht die Verwaltung von Nutzern und Rechten. Dadurch ist es ausgezeichnet für den gleichzeitigen Zugriff mehrerer Nutzer geeignet.

Außerdem ist das System gut hinsichtlich Performance und Größe zu skalieren, da die Last auf mehrere Server verteilt ist. Zusätzlich bietet MySQL viele weitere Möglichkeiten für Performanceoptimierung, wie z.B. Query-Caching. Beim Query-Caching werden Ergebnisse von SQL-Abfragen (englisch: SQL-Query) zwischengespeichert, so dass sie bei erneuter Abfrage bereits vorliegen.

Jedoch gibt es auch hier Nachteile. So ist die Konfiguration wesentlich schwerer und komplexer. Während bei SQLite kaum Konfigurationen nötig sind, müssen bei MySQL viele Einstellungen an das Host-System angepasst werden. Darunter fallen beispielsweise verschiedene Zwischen speichergrößen und die Zugriffsrechte. Durch die Notwendigkeit eines Servers benötigt MySQL außerdem wesentlich mehr Ressourcen auf dem Host-System.

Für das gegebene Projekt eignet sich das relationale DBMS MySQL besser. Auch wenn SQLite einige Vorteile vor allem im eingebetteten Bereich besitzt, ist die fehlende Unterstützung von mehreren Nutzern gleichzeitig ein Ausschlusskriterium.

2.4 Embedded Linux System

Ein eingebettetes System (englisch: embedded system) ist laut [Ben05] ein Rechner, der in ein Gerät oder eine Maschine eingebettet ist und von außen nicht als solcher zu erkennen, sondern lediglich als Träger intelligenter Systemfunktionen sichtbar ist. Des Weiteren übernehme es dabei meist Überwachungs-, Steuerungs- oder Regelaufgaben.

Eingebettete Systeme sind oft spezifisch für die gegebene Aufgabe konzipiert. Dadurch ist es möglich die Hard- und Softwarekonfiguration des Systems zur Verminderung der Kosten und Maximierung der Leistung zu optimieren. Zu finden sind sie in den unterschiedlichsten Bereichen, beispielsweise in mobilen Geräten, industriellen Maschinen, Netzwerkhardware und Verbrauchergeräten.

Ein Embedded Linux (deutsch: eingebettetes Linux) ist ein Betriebssystem, das auf dem Linux-Kernel basiert und in einem eingebetteten System zum Einsatz kommt. [YMBYG08] sagt, dass Embedded Linux dabei typischerweise für ein Komplettsystem, bzw. ein Betriebssystem für ein spezifisches eingebettetes Gerät steht. Außerdem verwende man dabei den normalen Linux-Kernel, der sich lediglich in betriebsbedingten Eigenschaften des Zielsystems unterscheide.

Das Embedded Linux System setzt sich aus einem Linux-Kernel nutzenden Rechner, dem Embedded Linux Betriebssystem mit für den Zielrechner passender Software und Werkzeugen für die Entwicklung zusammen. Diese Werkzeuge sind eine Entwicklungsumgebung mit Debugger und Cross-Compiler.

Der Vorteil bei der Verwendung des Linux Kernel ist u.a. die Abstraktion der Hardware. Über die Schnittstelle des Kernels kann mit einfachen Systemaufrufen mit der Hardware kommuniziert werden ohne die genaue Hardware kennen (siehe Abbildung 2.4.1).

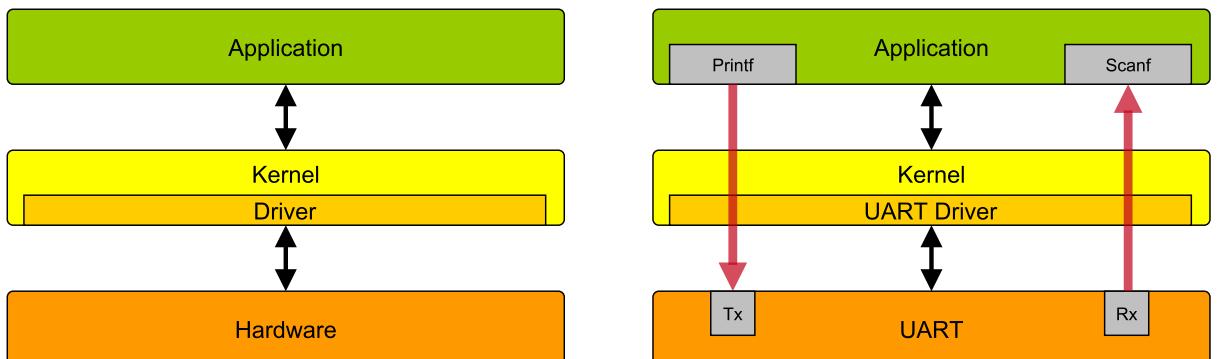


Abb. 2.4.1: Links: Kommunikation zwischen Applikation und Hardware.
Rechts: Beispiel Kommunikation zwischen Applikation und UART über den Kernel.

3 Anforderungsanalyse

Das Ziel dieser Arbeit ist es, einen Steuereinheit für einen Teststand zu entwickeln, der die Messung der Degradation von optoelektronischen Sendern ermöglicht. In diesem Kapitel wird zunächst das Szenario aus dem sich die Notwendigkeit des Systems ergibt näher beschrieben. Dann erfolgt eine Analyse der beteiligten Akteure und im Anschluss werden die Anforderungen definiert.

3.1 Szenario

Ein Unternehmen stellt verschiedene optoelektronischen Sensoren her. Zur Sicherstellung der Zuverlässigkeit der verwendeten LEDs sollen diese mittels eines automatisierten Teststandes bezüglich ihres Degradationsverhaltens qualifiziert werden.

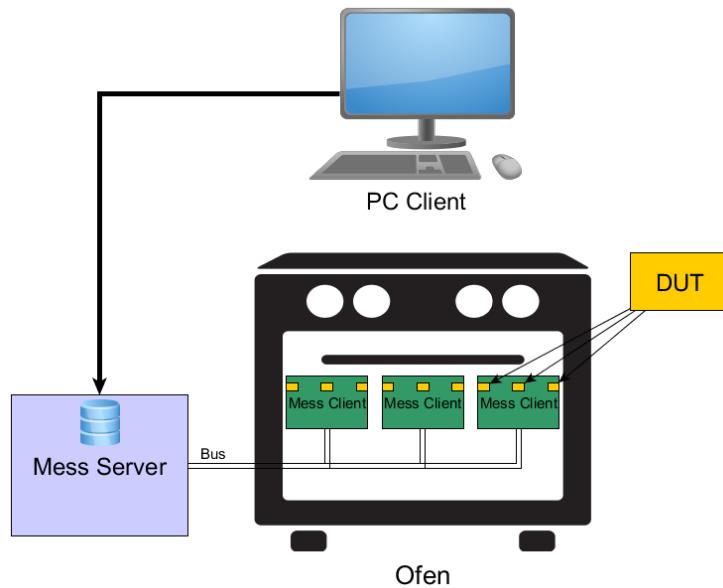


Abb. 3.1.1: Szenario

Der Teststand hat den in Abbildung 3.1.1 zu sehenden Aufbau. In einem Ofen befinden sich mehrere Mess-Clients. An diesen Mess-Clients sind jeweils 64 Devices Under Test (DUTs) fest angeschlossen, bei denen das Degradationsverhalten aufgezeichnet werden soll. Die Mess-Clients

sind über einen Bus mit einem außerhalb des Ofens befindlichen Mess-Server verbunden, welcher zyklisch Messdaten von den Mess-Clients abruft und alle anfallenden Daten in einer Datenbank speichert.

Von einem PC-Client kann auf den Mess-Server zugegriffen werden, um die Messdaten zu beziehen und grafisch auszuwerten.

3.2 Analyse

Die Akteure des Systems sind der Mess-Server, Mess-Client und PC-Client. Im Zuge dieser Arbeit soll der Mess-Server realisiert werden. Wobei die Interaktionsfähigkeit mit den anderen Akteuren sichergestellt werden muss.

3.2.1 Mess-Server

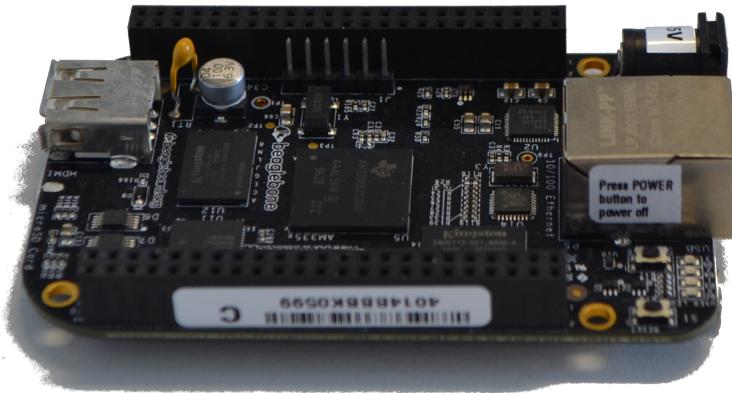


Abb. 3.2.1: BeagleBone Black

Als Mess-Server wird ein BeagleBone Black von Texas Instruments eingesetzt (siehe Abbildung 3.2.1). Dabei handelt es sich um einen kostengünstigen Einplatinencomputer mit offener Hardware. Damit ist es möglich, das BeagleBone Black auf individuelle Anforderungen anzupassen und selbst herzustellen. Auch gibt es eine große Community, die ständig die Entwicklung vorantreibt. Die aktuelle Revision C arbeitet mit einem AM335x 1GHz ARM® Cortex-A8 Prozessor, verfügt über 512MB DDR3 RAM und 4GB 8-bit eMMC internen Flash Speicher. Als Spannungsversorgung dient ein 5V 2A Netzteil. Trotz der Kompaktheit des BeagleBone Black, bietet er somit trotzdem ein ausreichendes Maß an Performance.

Auf ihm kommt ein eingebettetes Debian-GNU/Linux Betriebssystem (sieht Abschnitt 2.4) zum Einsatz. Wie auch [SGD09] sagt, ist es dadurch möglich die umfangreichen Linux-Funktionen wie

die Paketverwaltung zu nutzen. Es bietet auch den Vorteil, dass eine große Ähnlichkeit zu PC-Distributionen wie Ubuntu besteht und somit die Linux Mechanismen einfach nutzbar sind. So kann das RS232 Interface beispielsweise wie eine normale Datei beschrieben und gelesen werden (sieht Abschnitt 2.4).

Für die Kommunikation mit den anderen Akteuren im System, muss ein RS232 Bussystem und eine Ethernet Schnittstelle realisiert werden. Des Weiteren soll ein MySQL Datenbankserver auf dem Mess-Server die effiziente Verwaltung von Daten übernehmen. Zusätzlich soll eine Statusanzeige zur Überwachung des Mess-Servers entwickelt werden.

3.2.2 Mess-Client

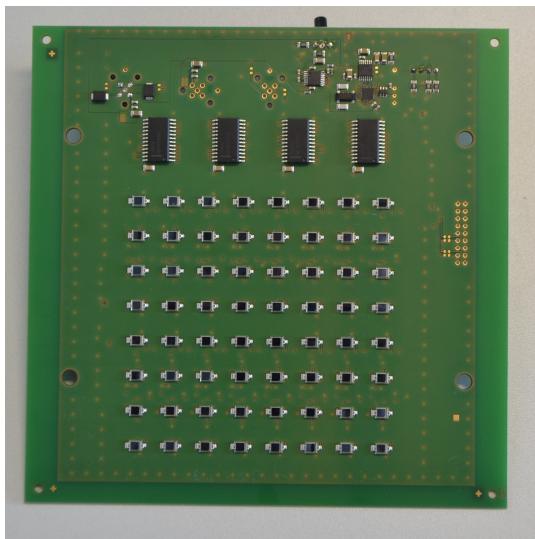


Abb. 3.2.2: Mess-Client Oberseite

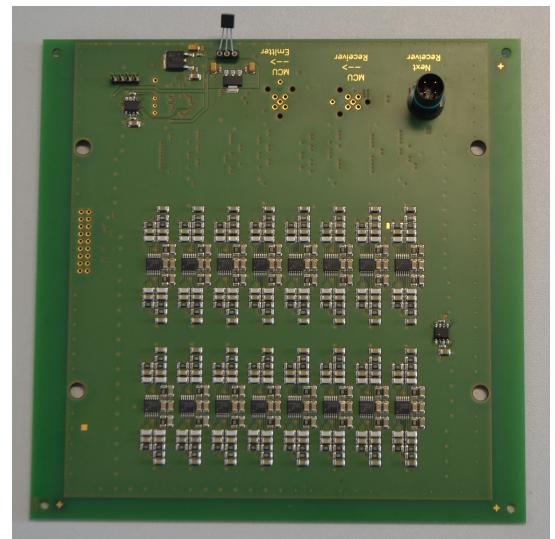


Abb. 3.2.3: Mess-Client Unterseite

Ein Mess-Client (auch: Degradations Board) ist eine Leiterplatte auf der sich 64 optische Sensoren zur Messung von optischen Signalen befinden (siehe Abbildung 3.2.3 und 3.2.2). Auf jedem Mess-Client können somit bis zu 64 Prüfobjekte befestigt werden. In zyklischen Abständen werden mittels eines Mikrocontrollers die Messdaten der Prüfobjekte aufgenommen und über eine RS232-Schnittstelle zur Verfügung gestellt.

Für die Konfiguration speichert der Mess-Client die Parameter in einem persistenten Speicher. Folgende Parameter stehen dabei zur Verfügung:

Name

Für die Identifikation hat jeder Mess-Client einen Namen der aus maximal 30 Zeichen bestehen kann. Er dient vor allem für die Unterscheidung der verschiedenen Mess-Clients.

RS232 Adresse

Um über die RS232 Schnittstelle ansprechbar zu sein, verfügt jeder Mess-Client über eine Adresse. Lediglich wenn eine Nachricht diese Adresse beinhaltet, reagiert der Mess-Client. Die Adresse ist mit 7 Bit aufgelöst und bildet einen Adressraum von 128 Adressen.

Messintervalle

Zur Regelung der Intervalle in denen Messwerte vom Mess-Server aufgezeichnet werden sollen, speichert der Mess-Client diese Informationen. Es ist möglich, Messintervalle für drei Zeiträume zu definieren.

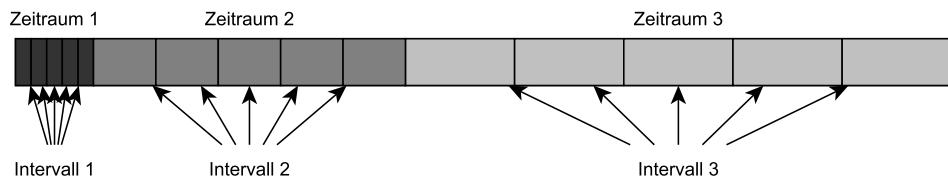


Abb. 3.2.4: Messintervalle

In Abbildung 3.2.4 ist die Unterteilung der Zeiträume und Messintervalle zu sehen. Dabei wird lediglich die Länge der Zeiträume angegeben.

Pulsmuster

Der Mess-Client steuert die Prüfobjekte mit einem Pulsmuster (englisch: pulse pattern) an. Dieses Muster ist konfigurierbar und wird an die unterschiedlichen Prüfobjekte angepasst. Ein Pulsmuster besteht aus bis zu 20 verschiedenen Impulsen, die periodisch wiederholt werden. In Abbildung 3.2.5 ist ein Pulsmuster zu sehen.

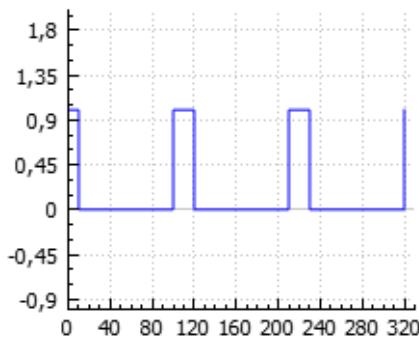


Abb. 3.2.5: Pulsmuster

3.2.3 PC-Client

Der PC-Client stellt eine Qt Desktop-Anwendung mit einer Benutzeroberfläche zur Auswertung der Messdaten dar, die nicht im Rahmen dieser Bachelorarbeit entwickelt wird. Über die Ethernet Schnittstelle ruft er die Messdaten von dem Mess-Server ab und bereitet sie zur genaueren Auswertung grafisch auf.

Außerdem werden über die Desktop-Anwendung die Mess-Clients parametriert. Dafür wird ein Mess-Client lokal über die RS232 Schnittstelle an den PC-Client angeschlossen. Dies ist notwendig da einige Parameter in Abhängigkeit von den Prüfobjekten kalibriert werden müssen.

Im laufenden Betrieb können die Mess-Clients von einem PC-Client aus per Fernzugriff verwaltet werden. Dies beinhaltet die Änderung der Parametrierung und das Auslesen der Messdaten. Dafür werden auf dem Mess-Client persistent Parameter gespeichert, welche über die RS232 Schnittstelle geschrieben und ausgelesen werden können.

3.3 Anforderungen

Folgende Hauptanforderungen werden an das System gestellt:

- Individuelle Parametrierung der Prüfobjekte
- Automatische Erfassung der Messdaten
- Fernzugriff auf den Mess-Server zum Abrufen der Messdaten

Individuelle Parametrierung der Prüfobjekte

Immer 64 Prüfobjekte befinden sich auf einem Mess-Client. Dabei sollen verschiedene Parameter für die Prüfobjekte berücksichtigt werden. Zum einen sollen die Intervalle in denen Messwerte aufgenommen werden konfigurierbar sein. Dies soll in mindestens 3 verschiedenen Intervallen möglich sein. In Tabelle 3.3.1 ist ein Beispiel für die Messintervalle zu sehen.

Zeitraum	Zeit zwischen Messungen
1. Woche	12 Stunden
2. bis 4. Woche	2 Tage
ab 5. Woche	7 Tage

Tab. 3.3.1: Beispiel: Intervalle

Des Weiteren soll für jeden Mess-Client ein Pulsepattern definierbar sein. Dieses Pulsepattern wird dann als Versorgungssignal für die DUTs verwendet.

Automatische Erfassung der Messdaten

Die Messdaten der DUTs sollen zyklisch erfasst werden. Es soll die derzeitige Temperatur im Ofen, der gemessene Wert des Sensors und ein Zeitstempel gespeichert werden. Dabei sollen, wie bereits erwähnt, die Intervalle zwischen den Messungen konfigurierbar sein.

Für den einfachen und effizienten Zugriff auf die Daten, sollen diese in einer SQL Datenbank abgelegt werden. Dafür ist eine Kommunikationsschnittstelle zwischen der Datenbank und den Mess-Clients erforderlich, welcher über den Mess-Server realisiert werden soll.

Fernzugriff auf den Mess-Server

Zur Auswertung der Messdaten, soll es möglich sein, von einem PC-Arbeitsplatz aus eine Verbindung zu dem Mess-Server aufzubauen. Die Messdaten sollen grafisch auf dem PC-Client zur Auswertung aufbereitet werden. Auch soll ein Tunnelmodus direkten Zugriff von einem PC-Client auf einem Mess-Client ermöglichen. Dabei sollen die Parameter des Mess-Clients verändert werden können.

Diese Basis-Anforderungen und einige zusätzliche Anforderungen können wie in Tabelle 3.3.2 in funktionale und nicht-funktionale Anforderungen unterteilt werden.

Art	Anforderung	Kommentar
Nicht-Funktional	Das System soll jederzeit verfügbar sein.	Bei Fehlern soll das System ohne große Ausfallzeit wieder Einsatzbereit sein. Zuverlässigkeit ist sehr wichtig.
Nicht-Funktional	Das Benutzerinterface soll zeitnah auf Anfragen reagieren.	Um Benutzerfreundlichkeit zu gewährleisten, soll auf Nutzeranfragen ohne lange Wartezeiten reagiert werden.
Funktional	Das System soll das Degradationsverhalten eines DUT aufnehmen	Hauptanforderung des Systems. Messdaten sollen zu einem DUT gesammelt werden, um den Grad der Degradation bestimmen zu können.
Funktional	Neue bereits parametrierte Mess-Clients sollen automatisch in das System integrierbar sein.	Ein parametrierter Mess-Client kann direkt an den Kommunikationsbus angeschlossen werden.
Funktional	Zyklische Erfassung von Messdaten.	Intervalle der Messdatenerfassung sind konfigurierbar.
Funktional	Messdaten sollen grafisch dargestellt werden.	Um die Daten auswerten zu können sollen sie grafisch aufbereitet werden.
Funktional	Die Messdaten sollen in einer Datenbank abgelegt werden.	Zum einfachen und effizienten Zugriff auf die Daten.
Funktional	Die Messdaten sollen via Fernzugriff erreichbar sein.	Von einem PC-Client aus, soll auf die Daten im lokalen Netzwerk zugegriffen werden können.
Funktional	Der Status des Systems soll ablesbar sein.	Über eine Anzeige soll das System lokal überwacht werden können.
Funktional	Nutzer Fehler sollen abgefangen werden.	Fehler bei der Bedienung durch den Nutzer sollen unterbunden werden.

Tab. 3.3.2: Anforderungen

4 Design

Im folgenden Kapitel wird auf das Design des Systems eingegangen. Zunächst wird auf den Aufbau der Hardware eingegangen. Anschließend wird sich näher mit dem Design und dem Aufbau der einzelnen Softwareelemente befasst. Zum Ende des Kapitels gibt es einen genaueren Einblick in die Gestaltung und den Aufbau des Protokoll für die RS232 Schnittstelle.

4.1 Hardware

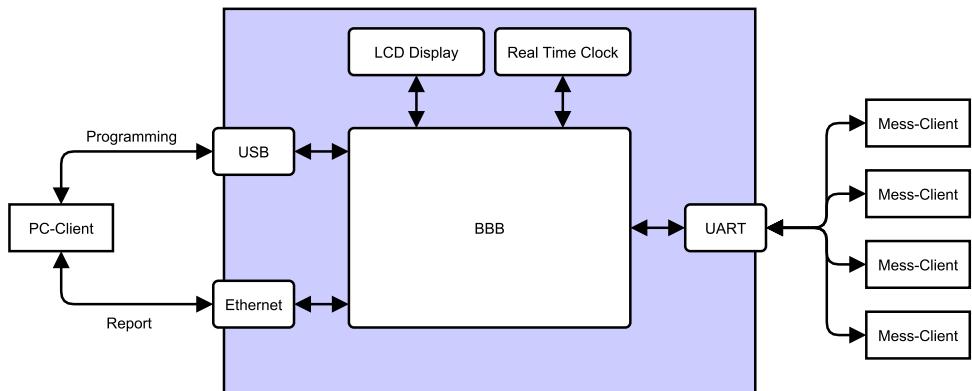
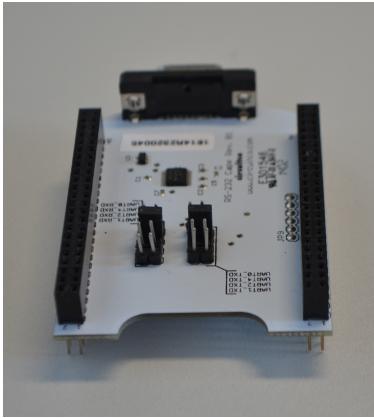
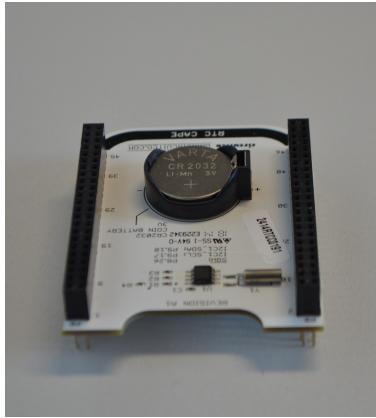


Abb. 4.1.1: Übersicht Hardware

Das BeagleBone selbst ist bereits sehr Leistungsstark. Um jedoch weiter Funktionen und Schnittstellen hinzuzufügen, existieren Capes. Ein Cape ist eine für das BeagleBone konzipierte Erweiterung, die direkt auf das BeagleBone aufgesteckt werden kann. Die Treiber vieler dieser Capes sind bereits in dem Betriebssystem des BeagleBones integriert oder werden vom Hersteller bereitgestellt. Somit ist die Inbetriebnahme sehr komfortable.

**Abb. 4.1.2:** RS232 Cape**Abb. 4.1.3:** RTC Cape**Abb. 4.1.4:** LCD Cape

Zur Kommunikation mit den Mess-Clients wird die Universal Asynchronous Receiver Transmitter (UART) Schnittstelle des BeagleBone Black verwendet. Dafür wird ein RS232 Cape eingesetzt (siehe Abbildung 4.1.2). Das Cape führt die seriellen Ports UART0, UART1, UART2 und UART4 auf einen 9-poligen seriellen Stecker. Es bietet die Möglichkeit zwischen den verschiedenen Ports mittels eines Jumper auf dem Cape zu wechseln. Angeschlossen wird nach dem 3-wire Prinzip. Dabei werden lediglich Rx, Tx und die Masse verbunden. Somit ist keine Hardware-Flusssteuerung möglich.

Da das BeagleBone Black kein eigenes Real Time Clock (RTC) Modul besitzt, wird auch dieses durch ein Cape hinzugefügt (siehe Abbildung 4.1.3). Es beinhaltet eine 3V Knopfbatterie um auch im Falle einer Stromunterbrechung die aktuelle Zeit nicht zu verlieren. Dies ist sehr wichtig, da es erforderlich ist, dass das BeagleBone die aktuelle Uhrzeit und das aktuelle Datum jederzeit kennt. Denn beim Erfassen der Messdaten wird ein Zeitstempel angelegt um die Daten später zeitlich zuordnen zu können. Sollte dieser Zeitstempel nicht korrekt sein, sind die Daten bei der Auswertung nicht gültig.

Um die Statusanzeige detailliert darstellen zu können, wird ein resistives LCD-Touchscreen Display eingesetzt. Es hat eine Größe von 4,3 Zoll bei einer Auflösung von 480x272 Pixeln. Dabei handelt es sich ebenso um ein Cape (siehe Abbildung 4.1.4) . Dadurch ist es möglich, das BeagleBone Black trotz den Erweiterungen kompakt zu halten. Denn die Capes sind untereinander stapelbar (siehe Abbildung 4.2.1).



Abb. 4.1.5: Gestapelte Capes

Die USB Schnittstelle, welche zur Programmierung des BeagleBones verwendet wird, ist bereits vollständig einsatzbereit. Ebenso ist die Ethernet Schnittstelle, welche für den Fernzugriff auf das BeagleBone genutzt wird standardmäßig vollständig integriert.

4.2 Software

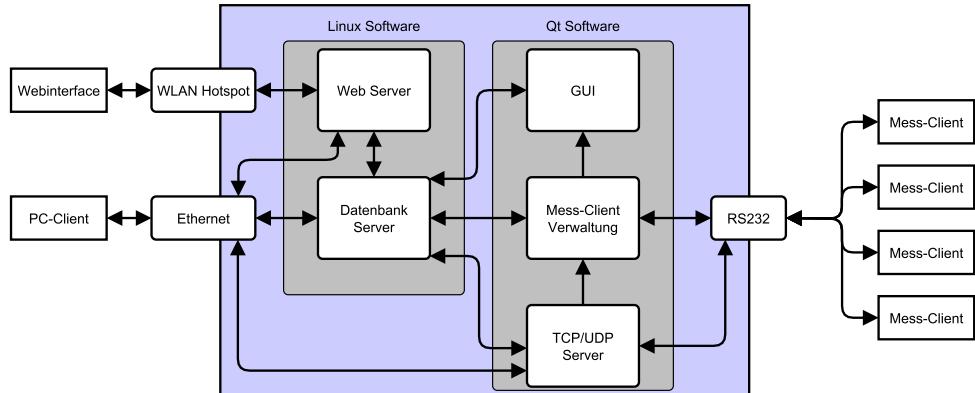


Abb. 4.2.1: Übersicht Software

Das Software System setzt sich aus zwei Teilen zusammen. Zum Einen die selbst zu programmierende Software, welche in C++ unter Verwendung der Klassenbibliothek Qt (siehe Abschnitt 2.2) programmiert ist und zum Anderen die verschiedenen Softwarepakete die für das Linux Betriebssystem zur Verfügung stehen.

Im folgenden Abschnitt wird auf beide Softwareteile eingegangen. Zunächst werden die Bestandteile Mess-Client Verwaltung, Benutzeroberfläche und TCP/UDP-Server der Qt Anwendung näher erläutert und anschließend wird auf Datenbankserver, den Webserver und WLAN Hotspot eingegangen.

4.2.1 Mess-Client Verwaltung

Die Verwaltung der Mess-Clients ist der Hauptprozess der Software. In diesem Programmteil wird die Kommunikation mit den Mess-Clients realisiert. Dabei sind die Grundaufgaben die Messdatenerfassung, das Erkennen von neuen Mess-Clients und die automatische Eingliederung dieser in das System.

4.2.1.1 Mess-Client Anmeldung

Um in das bestehende System eingegliedert zu werden, muss jeder Mess-Client sich bei dem Mess-Server anmelden. Dafür hat jeder neue Mess-Client die RS232 Adresse 0. Der Mess-Server überprüft in regelmäßigen Abständen, ob über die Adresse 0 ein Mess-Client erreichbar ist. Sobald dies der Fall ist, übermittelt der entsprechende Mess-Client seine Parametrierung an den Mess-Server. Anhand dieser Daten legt der Mess-Server automatisch neue Datenbankeinträge an.

4.2.1.2 Messdatenerfassung

Der Hauptzyklus der Software ruft kontinuierlich die Messdaten von den Mess-Clients ab. Dafür wird ständig geprüft ob Messungen erforderlich sind. Dies geschieht durch den Vergleich der vergangenen Zeit zur letzten Messung und den gegebenen Parametern für die Messintervalle. In der Tabelle 4.2.1 finden sich diese Parameter.

Parameter	Beschreibung
duration_int1	Dauer des 1. Zeitraums
duration_int2	Dauer des 2. Zeitraums
interval_1	Abstand zwischen den Messungen im 1. Zeitraum
interval_2	Abstand zwischen den Messungen im 2. Zeitraum
interval_3	Abstand zwischen den Messungen nach dem 2. Zeitraum

Tab. 4.2.1: Parameter der Messintervalle

Ob eine Messung erforderlich ist, lässt sich aus den gegebenen Parametern ableiten. So wird zuerst geprüft, welcher Zeitraum (*duration_int1-2*) derzeit zutrifft. Dazu wird die vergangene Zeit seit der ersten Messung mit dem Zeitraum abgeglichen. Sollten noch keine Ergebnisse vorhanden sein, ergibt dies die Erforderlichkeit einer Messung. Wenn der passende Zeitraum ausgemacht ist, wird das dazugehörige Intervall zwischen den einzelnen Messungen (*interval_1-3*) ausgemacht. Dann wird geprüft, ob die vergangene Zeit seit der letzten Messung größer ist als dieses Intervall.

Anschließend wird geprüft ob der Mess-Client verfügbar ist. Dazu wird eine Namensanfrage über die RS232 Schnittstelle verschickt. Bei einer positiven Antwort wird dann eine Messung durchgeführt. Dabei werden alle Analog-Digital-Converters (ADCs) der 64 möglichen DUTs mittels *ADC-Value*-Befehls (siehe Tabelle 4.3.9) ausgelesen. Sobald alle 64 Werte erfolgreich ermittelt sind, werden sie in der Datenbank abgelegt.

Sollte keine Antwort auf die Namensanfrage erfolgen, wird in den nächsten Zyklen erneut versucht eine Verbindung zu etablieren. Bei kontinuierlich erfolglosen Verbindungsversuchen, informiert das System den Nutzer nach einer festgelegten Zeit der Abwesenheit über die Unerreichbarkeit.

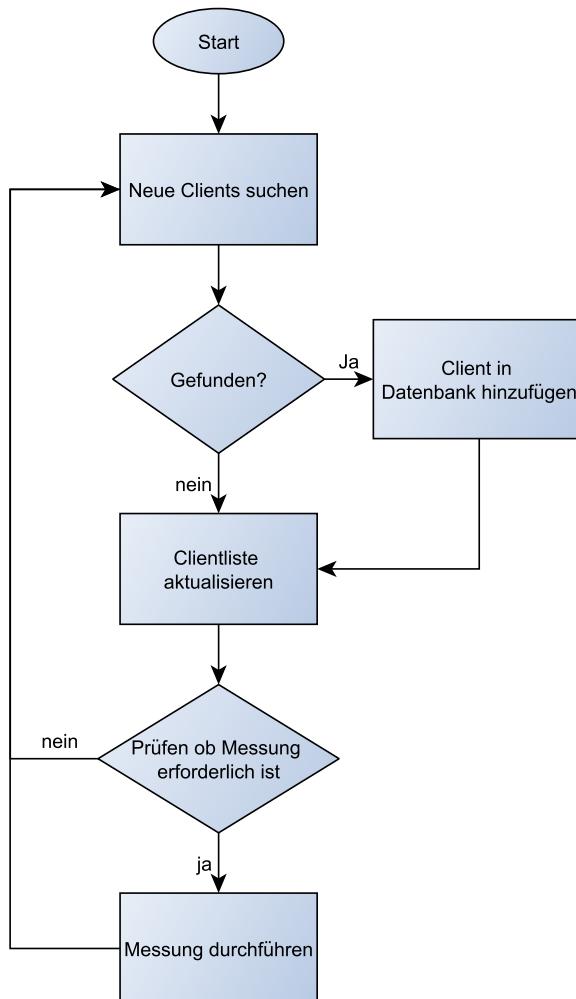


Abb. 4.2.2: Ablaufplan

4.2.2 Benutzeroberfläche

Um die Anforderung der Statusüberwachnung zu erfüllen, verfügt das BeagleBone über eine GUI. Sie bietet einen einfachen Überblick über die aktuellen Vorgänge und soll auf einen Blick den Status des Mess-Servers wiedergeben.

Am oberen Rand der GUI (siehe u.a. Abbildung 4.2.3) wird das aktuelle Datum und die aktuelle Uhrzeit angezeigt, sowie die derzeitige IP Adresse und der aktuelle Name. Am unteren Rand wird die derzeit ausführende Aktion in einer Statusnachricht ausgegeben. Die GUI ist dabei in vier Tabs unterteilt.

Status Tab

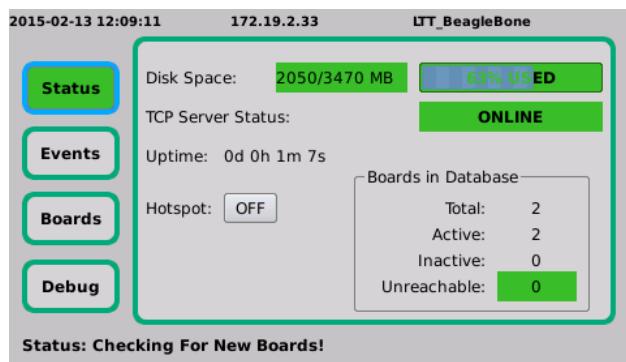


Abb. 4.2.3: Mess-Server GUI: Status Tab

Das Erste ist das Status-Tab (siehe Abbildung 4.2.3). Es zeigt die wichtigsten Statusdaten wie verfügbarer Speicher, die aktuelle Laufzeit und TCP Server Status an. Um auf einen Blick den Status des Systems zu erkennen wird mittels der Farben grün und rot ein positiver bzw. negativer Status signalisiert.

Events Tab

ID	Label	Description
0	LTT Client 1	New Board Created! 2015-02-13 12:08:45
1	LTT Client 2	New Board Created! 2015-02-13 12:09:03

At the bottom, a status message reads 'Status: Checking For New Boards!'.

Abb. 4.2.4: Mess-Server GUI: Events Tab

Im Events Tab werden wichtige Ereignisse dargestellt.

Boards Tab

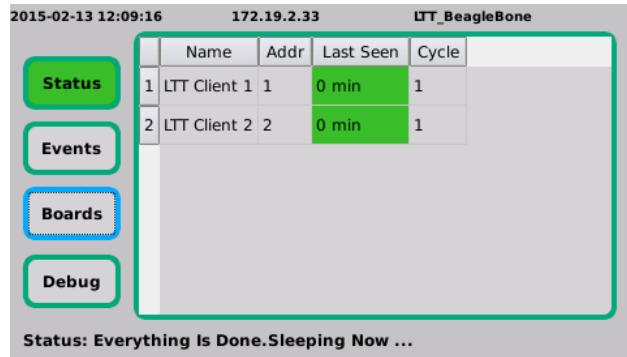


Abb. 4.2.5: Mess-Server GUI: Boards Tab

Das Boards Tab zeigt die derzeit aktiven Mess-Clients in einer Liste an. Als aktiv werden Mess-Clients bezeichnet, die mit einer gültigen Adresse in der Datenbank eingetragen sind. Angezeigt werden der Name, die Adresse, die vergangene Zeit seit dem es das letzten mal erfolgreich kontaktiert wurde und die Anzahl der erfolgreichen aufgenommenen Messzyklen.

Debug Tab



Abb. 4.2.6: Mess-Server GUI: Debug Tab

Der Zweck des Debug Tabs ist es die im Programmcode erzeugten Nachrichten anzuzeigen. Somit soll es möglich sein Fehler einfacher zu erkennen.

4.2.3 TCP/UDP Server

Um auf Netzwerkanfragen reagieren zu können, ist sowohl ein UDP-Server für Broadcast-Nachrichten als auch ein TCP-Server für die direkte Kommunikation realisiert.

Der UDP-Server dient dabei zur dynamischen Erkennung im Netzwerk. Dabei antwortet der Mess-Server auf Broadcast-Nachrichten mit seiner IP-Adresse und seinem Namen. Dies ermöglicht die einfache Eingliederung der Mess-Server in ein Netzwerk. Der TCP-Server nimmt RS232-

und SQL-Befehle an und leitet diese weiter. Dies ermöglicht den Fernzugriff auf die einzelnen Mess-Clients über ein Netzwerk.

Befehl	Typ	Daten	Kommentar
BeagleSendYourIP	UDP	-	Das BeagleBone antwortet dem Sender mit seiner IP Adresse und seinem Namen
BeagleUpdateConfig	UDP	-	Das BeagleBone aktualisiert seine Konfiguration aus der Config-Datei
RS232CMD:	TCP	Nachricht	Das BeagleBone sendet den empfangenen Rahmen über seine RS232 Schnittstelle

Tab. 4.2.2: Ethernet Befehlsliste

Der TCP/UDP-Server ist vor allem für die Kommunikation mit dem PC-Client zuständig. Um Mess-Server im Netzwerk zu finden, wird von ihm ein *BeagleSendYourIP* Befehl als Broadcast-Nachricht versendet. Sollte ein Mess-Server diese Nachricht empfangen, antwortet er an die Sendeadresse mit der eigenen IP Adresse und dem eigenen Namen.

Über den *RS232CMD:* Befehl kann von einem PC-Client aus direkt mit einem am RS232 Bus angeschlossenen Mess-Client kommuniziert werden. Der TCP-Server dient dabei als Tunnel für die Kommunikation (siehe Abbildung 4.2.7). Anfragen werden vom Mess-Server angenommen und weitergeleitet. Die Antworten nehmen den umgekehrten Weg zurück. Zur Sicherstellung der alleinigen Verwendung der RS232 Schnittstelle, pausiert der TCP-Server die anderen Prozesse, die auf die Schnittstelle zugreifen, für die Dauer der Kommunikation.

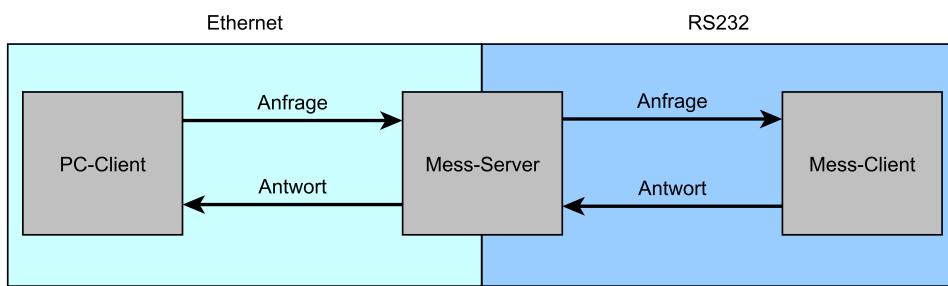


Abb. 4.2.7: RS232 Tunnel

4.2.4 Web Server und WLAN Hotspot

Mit Hilfe eines Web Servers ist es auch lokal möglich eine Übersicht über die gesammelten Daten auf einem Mess-Server zu erhalten. Als Schnittstelle steht ein WLAN Hotspot zur Verfügung.

Als Webserver dient Lighttpd (auch: Lighty). Lighttpd ist laut [Bog08] ein erweiterbarer, modularer, Single-Threaded, hoch hochperformanter Webserver, der selbst Apache oder Microsofts IIS in den meisten Einstellungen übertrifft. Besonders auf kleinen System mit begrenzten Ressourcen kommt er häufig zum Einsatz. Trotzdem vertrauen auch große Webanbieter wie YouTube oder Wikipedia auf seine Effizienz.

Zusätzlich sind das PHP und MySQL Common Gateway Interface (CGI) installiert um die Messergebnisse aus der Datenbank dynamisch darstellen zu können.

Der Webserver ist sowohl über die normale Ethernet Verbindung als auch einen WLAN Hotspot erreichbar. Für die Realisierung des WLAN Hotspots wird ein EDIMAX EW-7811Un WLAN Dongle über den Host-USB Port des BeagleBone Black betrieben.

Als Hotspot Software dient Hostapd. Hostapd ist ein IEEE 802.11 Accesspoint und IEEE 802.1X/WPA/WPA2/EAP/RADIUS Authentificator (vgl. [Wir]) und verwaltet die Zugriffe auf den Hotspot.

Zusätzlich müssen Geräten die sich über den Hotspot mit dem BeagleBone Black verbinden eine IP-Adresse zugewiesen werden. Dafür kommt der DNS- und DHCP-Server dnsmasq zum Einsatz.

In Abbildung 4.2.8 ist das Webinterface zu sehen. Es zeigt die Messdaten die für einen Mess-Client aufgenommen wurden. Die Daten stellen dabei keine echten Messergebnisse dar. Sie dienen lediglich zur Veranschaulichung.

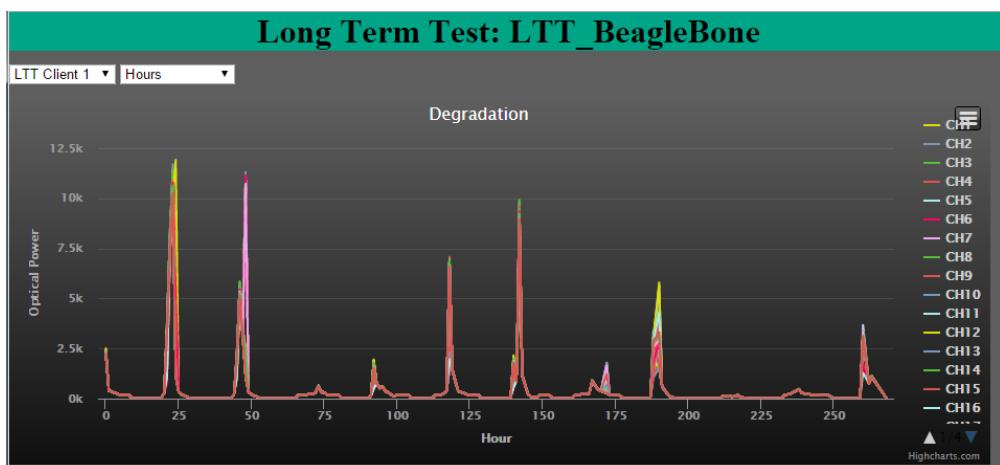


Abb. 4.2.8: Webinterface

4.2.5 Datenbank Server

Wie in vorangehenden Kapiteln bereits erwähnt, werden alle Messdaten und Betriebsparameter in einer MySQL-Datenbank abgelegt. Der Datenbankserver läuft auf dem BeagleBone Black und ist über das Netzwerk erreichbar.

Aus den Anforderungen ergibt sich folgendes Entity-Relationship-Modell (ERM) (siehe Abbildung 4.2.9).

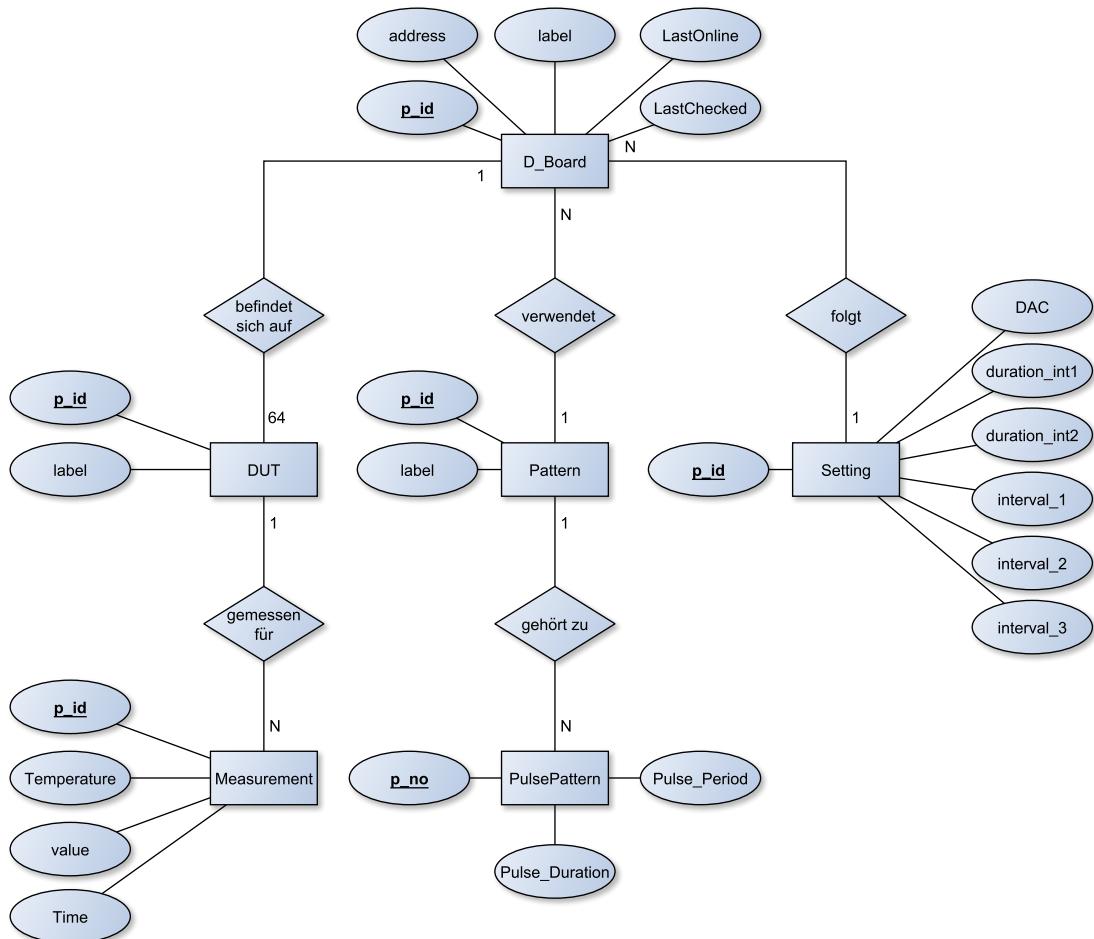


Abb. 4.2.9: Entity Relationship Modell

Im folgenden wird näher auf die einzelnen Tabellen und ihre Beziehungen untereinander eingegangen. Außerdem werden die Attribute näher erläutert.

4.2.5.1 Tabellen

Tabelle D_Board

Parameter	Datentyp
p_id	INTEGER PRIMARY KEY
address	INTEGER UNIQUE
label	VARCHAR(255) UNIQUE
LastOnline	TIMESTAMP
LastChecked	TIMESTAMP
f_settingid	INTEGER FOREIGN KEY
f_Patternid	INTEGER FOREIGN KEY

Tab. 4.2.3: Tabelle D_Board

Die Tabelle D_Board (steht für Degradations-Board) speichert alle im System registrierten Mess-Clients. Jeder Mess-Client hat eine einzigartige Identifikationsnummer (*p_id*), welche gleichzeitig den Primärschlüssel (englisch: primary key) repräsentiert. Um die Mess-Clients später leserlich auseinanderhalten zu können, verfügen sie zusätzlich über einen Namen (*label*), der einzigartig sein muss. Zur Kommunikation wird jedem Board eine einzigartige Adresse (*address*) zugeordnet. Boards die eine Adresse haben, werden als aktive Boards bezeichnet. Es kann davon ausgegangen werden, dass sie innerhalb des Systems erreichbar sind. Außerdem ist auch möglich, dass ein Board keine Adresse hat. In diesem Fall ist das Board als inaktiv anzusehen. Die Daten sind zwar noch in der Datenbank, jedoch ist es nicht mehr erreichbar und es werden keine neuen Messwerte aufgenommen. Diese Inaktivität entsteht, wenn ein Board für eine zu lange Zeit nicht Erreichbar ist. Denn in einem solchen Fall, wird die Adresse aufgrund des beschränkten Adressraumes freigegeben. Zusätzlich besitzt Degradationsboard einen Zeitstempel (*LastOnline*) für den Zeitpunkt der letzten erfolgreichen Kontaktaufnahme. Diese Information ist notwendig um die Dauer der Abwesenheit ermitteln und den Nutzer dahingehen in Kenntnis setzen zu können. Des Weiteren gibt es noch einen Zeitstempel (*LastChecked*) für den letzten Zeitpunkt des Versuches einer Kontaktaufnahme, welcher notwendig ist, um unnötig häufige Kontaktversuche zu vermeiden. So soll ein Degradationsboard nicht häufiger als alle 10 Minuten kontaktiert werden um die Performance zu erhöhen. Zusätzlich folgt jedes Board genau einer Einstellung (Tabelle Setting). Diese Relation wird durch einen Fremdschlüssel (englisch: foreign key) mit der Identifikationsnummer einer Einstellung (*f_Settingid*) referenziert. Außerdem hat jedes Board ein PulsePattern (Tabelle Pattern) zur Ansteuerung der Prüfobjekte. Dieses wird durch die Identifikationsnummer eines Patterns(*f_Patternid*) angegeben.

Tabelle Setting

Parameter	Datentyp
p_id	INTEGER PRIMARY KEY
DAC	INTEGER
duration_int1	INTEGER
duration_int2	INTEGER
interval_1	INTEGER
interval_2	INTEGER
interval_3	INTEGER

Tab. 4.2.4: Tabelle Setting

In der Tabelle Setting, werden die Einstellungen für die verschiedenen Degradationsboards abgelegt. Jede Einstellung kann dabei mehreren Boards zugeordnet sein, wobei jedes Board nur eine Einstellung besitzt.

Der Primärschlüssel der Tabelle ist die Identifikationsnummer (*p_id*) jeder Einstellung. Als Nächstes gibt es die Vorverstärkung (*DAC*) der Empfänger auf den Degradationsboards. Mithilfe der Vorverstärkung werden die gemessenen Signale der Prüfobjekte für die bessere Analyse durch den Analog-Digital-Konverter verstärkt. Darauf folgend kommen die Parameter zur Konfiguration der Messintervalle (siehe auch Tabelle 4.2.1). Sie bestimmen die Zeiträume (*duration_int1 + 2*) und die Abstände zwischen den Messungen (*interval_1-3*) innerhalb dieser Zeiträume.

Tabelle DUT

Parameter	Datentyp
p_id	INTEGER PRIMARY KEY
label	VARCHAR(255)
f_Boardid	INTEGER FOREIGN KEY

Tab. 4.2.5: Tabelle DUT

Die Tabelle DUT nimmt die einzelnen Prüfobjekte (DUTs) auf. Jedes Prüfobjekt gehört fest zu einem Degradationsboard. Dies wird durch den Fremdschlüssel mit der Identifikationsnummer des zu gehörenden Boardes (*f_Boardid*) referenziert. Außerdem hat jedes Prüfobjekt eine eindeutige Identifikationsnummer (*p_id*) als Primärschlüssel. Des Weiteren hat es über eine Bezeichnung (*label*), um sich von den anderen Prüfobjekten des selben Boardes zu unterscheiden.

Tabelle Pattern

Parameter	Datentyp
p_id	INTEGER PRIMARY KEY
label	VARCHAR(255)

Tab. 4.2.6: Tabelle Pattern

In der Pattern Tabelle sind die Muster für die Signale zur Ansteuerung der Prüfobjekte. Die Muster haben eine Identifikationsnummer (*p_id*) als Primärschlüssel und eine Bezeichnung (*label*) für die Leserlichkeit. Die Tabelle fasst die Signale aus der PulsePattern Tabelle zusammen um einfacher referenziert werden zu können.

Tabelle PulsePattern

Parameter	Datentyp
pf_Patternid	INTEGER PRIMARY KEY FOREIGN KEY
p_no	INTEGER NOT NULL
Pulse_Duration	INTEGER
Pulse_Period	INTEGER

Tab. 4.2.7: Tabelle PulsePattern

Die Tabelle PulsePattern enthält die Signale für die Muster in Tabelle Pattern. Die Identifikationsnummer des Musters(*pf_Patternid*) und die Position im Muster (*p_no*) dienen zusammen als ein Primärschlüssel. Die Identifikationsnummer des Musters(*pf_Patternid*) dient dabei gleichzeitig als Fremdschlüssel und referenziert ein Muster. Dadurch ist es möglich sowohl die Zugehörigkeit zu einem spezifischen Muster als auch die Position in ihm einzigartig zu bestimmen. Die Signaldauer (*Pulse_Duration*) beschreibt die Dauer des aktiven Pegels innerhalb des Signals, während die Signalperiode (*Pulse_Period*) die Periodendauer des Signals angibt. So ergibt sich ein High-Pegel für die Dauer von *Pulse_Duration* und ein Low-Pegel für die Dauer von *Pulse_Period – Pulse_Duration*.

Tabelle Measurement

Parameter	Datentyp
p_id	INTEGER PRIMARY KEY
Temperatur	INTEGER
value	INTEGER
Time	TIMESTAMP DEFAULT CURRENT_TIMESTAMP

Tab. 4.2.8: Tabelle Measurement

In der Measurement Tabelle werden die Messwerte der einzelnen Prüfobjekte gespeichert. Der Primärschlüssel ist auch hier die Identifikationsnummer (*p_id*). Zu jedem Messeintrag gehört die aktuelle Temperatur (*Temperatur*), der gelesene Messwert (*value*) und die aktuelle Zeit (*Time*).

Wenn ein Board gelöscht wird, werden alle dazugehörigen Datenbankeinträge aus den anderen Tabellen auch gelöscht. Das soll unnötigen Daten in der Datenbank vorbeugen. Dafür sind die Fremdschlüssel in allen Tabellen außerhalb der D_Board Tabelle mit dem Constraint *ON DELETE CASCADE* versehen. Die sorgt für eine Löschung des betroffenen Eintrages, falls das referenzierte Attribut gelöscht wird. Da die Tabellen Setting und Pattern keine eigenen Verweise zu der Tabelle D_Board haben, ist für diese Kaskadierung ein Trigger notwendig.

Ein Trigger ist ein an eine Reaktion auf ein Ereignis. Das Ereignis ist die Löschung eines Eintrags in der D_Board Tabelle. Daraufhin sollen die dazugehörigen Einträge in der Setting und der Pattern Tabelle gelöscht werden. Dafür wird ein Trigger erstellt (siehe Quellcode 4.1).

```

1 Create Trigger onBoardDelete before delete on D_Board
2 for each row
3 Begin
4 delete from Setting
5   where p_id = old.f_Settingid ;
6 delete from Pattern
7   where p_id = old.f_Patternid ;
8 end ;

```

Quellcode 4.1: onBoardDelete Trigger

4.3 RS232 Protokoll

Das Protokoll für die Kommunikation über die RS232 Schnittstelle dient zum Austausch von Informationen innerhalb des Systems zwischen den Akteuren.

Folgende Kriterien sollen dabei erfüllt werden:

- Adressierung individueller Kommunikationspartner
- Senden verschiedener Befehle
- Variable Größe der Daten
- Sicherstellung der Validität der Übertragung
- Erweiterbar

Um eine hohe Zuverlässigkeit gewährleisten zu können, wird eine geringe Baudrate von 2400 verwendet. Da nur geringe Datenmengen in großen Abständen auftreten, vermindert dass die Anfälligkeit der Übertragung gegenüber äußeren Einflüssen ohne dabei die Performance merkbar zu beeinflussen.

Des Weiteren wird ein Paritätsbit für eine Paritätsprüfung eingesetzt. Dieses Bit gibt an, ob die Anzahl der Einsen des Datenblocks gerade oder ungerade ist. Der Wert verwendeten Even-Paritätsbit ist 1, wenn die Summe der Einsen gerade ist und 0 wenn sie ungerade ist. Dadurch können grobe Fehler bei der Übertragung ausgemacht und korrigiert werden.

4.3.1 Aufbau

1. Byte	2. Byte	3. Byte	4. Byte	5. Byte und folgend	Letztes Byte
Adresse & R/W	Länge	Befehl	Unterbefehl	Nutzdaten	Checksumme

Tab. 4.3.1: Übertragungsrahmen

Ein Rahmen des Protokolls besteht aus 4 Steuerbytes, 1 Checksummenbyte und maximal 30 Datenbytes. Durch diesen Aufbau können die Anforderungen erfüllt werden. Im folgenden Abschnitt wird auf die Zusammensetzung und die Funktion der einzelnen Bytes eingegangen.

1. Byte: Adresse & Read/Write

7. Bit	6. Bit	5. Bit	4. Bit	3. Bit	2. Bit	1. Bit	0. Bit
R/W	Addr6	Addr5	Addr4	Addr3	Addr2	Addr1	Addr0

Tab. 4.3.2: 1. Byte: Adresse & Read/Write

Das erste Byte des Übertragungsrahmens setzt sich aus 7 Adressbits und einem Lese-/Schreibbit zusammen. Die ersten 7 Bits (Addr0 - Addr6) bilden die Adresse des anzusteuernden Empfänger. Daraus ergibt sich ein Adressraum von möglichen 128 Adressen, wobei Adresse 0 für neue Mess-Clients zur einmaligen Anmeldung im System reserviert ist (siehe Abschnitt ??).

Das höchste Bit ist das Lese-/Schreibbit. Der Mess-Client unterscheidet mithilfe dieses Bits, ob ein Befehl als Lese- oder Schreibzugriff interpretiert werden soll.

R/W Bit	Beschreibung
0	Die Steuereinheit möchte lesen
1	Die Steuereinheit möchte schreiben

Tab. 4.3.3: Read/Write

Ein Lesezugriff bedeutet immer, dass keine Daten übertragen werden.

2. Byte: Rahmenlänge

7. Bit	6. Bit	5. Bit	4. Bit	3. Bit	2. Bit	1. Bit	0. Bit
Len7	Len6	Len5	Len4	Len3	Len2	Len1	Len0

Tab. 4.3.4: 2. Byte: Rahmenlänge

Das zweite Byte gibt die Länge des gesamten Rahmens inklusive Steuerbytes, Nutzdaten und Checksumme an.

Die minimale Rahmenlänge beträgt 5 Byte. Dabei handelt es sich um eine Übertragung ohne Nutzdaten und es werden lediglich die 4 Steuerbytes und das Byte für die Checksumme übertragen. Dies geschieht beispielsweise bei einer Leseanfrage.

Die maximale Rahmenlänge beträgt 35 Byte. Hierbei werden zusätzlich zu den 4 Steuerbytes und dem Byte für die Checksumme auch die maximale Nutzlast von 30 Byte übertragen. Dieser Fall kann beispielsweise bei Schreibzugriffen auftreten.

Anhand der Länge kann eine erste Prüfung der Validität des Rahmens durchgeführt werden. Sollte die Zahl der empfangenen Bytes sich von der Rahmenlänge unterscheiden, kann von einem ungültigen Rahmen ausgegangen werden.

3. Byte: Befehl

7. Bit	6. Bit	5. Bit	4. Bit	3. Bit	2. Bit	1. Bit	0. Bit
Cmd7	Cmd6	Cmd5	Cmd4	Cmd3	Cmd2	Cmd1	Cmd0

Tab. 4.3.5: 3. Byte: Befehl

Das dritte Byte repräsentiert den Befehl. Dieser gibt an, welche Aktion ausgeführt oder welcher Parameter angesprochen wird. Da insgesamt ein Byte für den Befehl zur Verfügung steht, sind bis zu 256 unterschiedliche Befehle zulässig.

4. Byte: Unterbefehl

7. Bit	6. Bit	5. Bit	4. Bit	3. Bit	2. Bit	1. Bit	0. Bit
Scmd7	Scmd6	Scmd5	Scmd4	Scmd3	Scmd2	Scmd1	Scmd0

Tab. 4.3.6: 4. Byte: Unterbefehl

Das vierte Byte ist der Unterbefehl. Damit ist es möglich einen Befehl genauer zu spezifizieren. So kann beispielsweise der Befehl zum Auslesen eines ADC Wertes durch den Unterbefehl genau auf einen von 64 ADCs präzisiert werden.

5. Byte und folgend: Nutzdaten

7. Bit	6. Bit	5. Bit	4. Bit	3. Bit	2. Bit	1. Bit	0. Bit
Data7	Data6	Data5	Data4	Data3	Data2	Data1	Data0

Tab. 4.3.7: 5. Byte und folgend: Nutzdaten

Das fünfte Byte und die darauf folgenden, tragen die Nutzdaten des Rahmens. Die Größe der Nutzdaten ist variable und lässt sich auf der Rahmenlänge ableiten. Bei zwei Byte Daten wird immer das höhere Byte zuerst übertragen.

Letztes Byte: Checksumme

7. Bit	6. Bit	5. Bit	4. Bit	3. Bit	2. Bit	1. Bit	0. Bit
CKS7	CKS6	CKS5	CKS4	CKS3	CKS2	CKS1	CKS0

Tab. 4.3.8: Letztes Byte: Checksumme

Das letzte Byte ist immer die Checksumme um sicherzustellen, dass alle Daten komplett und fehlerfrei übertragen wurden.

Der Sender bildet dabei die Checksumme mittels einer XOR Verknüpfung aller Bytes eines Übertragungsrahmens. Beim Empfänger werden alle Bytes inklusive Checksumme erneut mit XOR Verknüpft, wobei ohne Fehler immer 0 das Ergebnis sein muss.

Beispiel

Sender:

Es wird angenommen das folgender Rahmen übertragen wird.

Adresse	Länge	Befehl	Unterbefehl
1	5	9	0

Aus dem Rahmen wird dann mittels XOR die Checksumme gebildet.

$$1 \oplus 4 \oplus 9 \oplus 0 = 13$$

Anschließend wird die Checksumme als letztes Byte an den Rahmen an gehangen.

Adresse	Länge	Befehl	Unterbefehl	Checksumme
1	5	9	0	13

Empfänger:

Sobald der Empfänger den Rahmen erhält, verknüpft er alle Bytes erneut mittels XOR um die Gültigkeit zu prüfen.

$$1 \oplus 4 \oplus 9 \oplus 0 \oplus 13 = 0$$

Das Ergebnis 0 repräsentiert einen gültigen Rahmen und die Checksummenprüfung war erfolgreich.

4.3.2 Übertragung

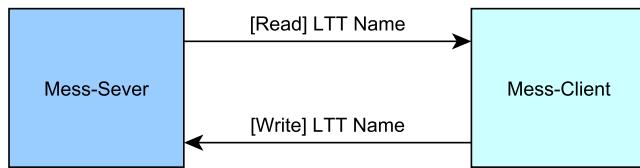


Abb. 4.3.1: RS232 Übertragung

4.3.3 Befehle und Unterbefehle

Für die Funktion des Systems sind verschiedene Befehle notwendig. Sie dienen zu Kommunikation zwischen den Akteuren. Eine Übersicht über die implementierten Befehle der RS232 Schnittstelle findet sich in Tabelle 4.3.9.

Befehl	Code	Unterbefehl	Datenbytes
ADC-Value	0x00	MUX-Kanal (0..63)	2
Number Of Pulses	0x04	-	1
Pulsewidth and -period	0x05	Pulsnummer (1..20)	4
Perform Pulseupdate	0x06	-	0
DAC-Value	0x07	-	2
Temperature	0x08	-	1
LTT Name	0x09	-	1..30
Rs232-Address	0x0A	-	1
Error	0x0B	MUX-Channel (0..63)	2
Measurement Intervall	0x0C	Intervallnummer (0..2)	4

Tab. 4.3.9: RS232 Befehlsliste

ADC-Value

Der Befehl liest oder schreibt den Messwert eines Sensors des Mess-Clients. Mit dem Unterbefehl muss einer der 64 Sensoren spezifiziert werden. Die Datenmenge beträgt 2 Byte.

5 Implementierung

5.1 Hardware

5.2 Software

Die Installation der Linux Software erfolgt mittels des Terminalemulator PuTTY [QtP]. Mit PuTTY wird eine Secure Shell (SSH) Verbindung zu dem BeagleBone Black aufgebaut, wodurch ein direkter Zugriff auf das Linux Terminal des BeagleBone Black möglich ist. Mit dem Linux Paketmanager kann bei aktiver Internetverbindung die benötigte Software installiert werden.

Bei der Implementierung der eigenen Software wird wie in Kapitel 4 erwähnt, die Qt C++ Klassenbibliothek in der Version 4.8.6 verwendet. Für die komfortable Programmierung eignet sich der Qt Creator als Entwicklungsumgebung sehr gut. Er bietet die Möglichkeit direkt in der Entwicklungsumgebung eine Toolchain einzurichten. Diese erlaubt eine Programmierung des Codes auf einem normalen Windows Rechner, wobei der Code anschließend automatisch übersetzt und auf dem Zielsystem über eine SSH Verbindung installiert wird. Verwendet wird dabei ein frei verfügbarer GNU-C-Compiler (GCC).

Das Steuerungssoftware teilt sich in einen sequentiellen Prozess für die Abfrage und Speicherung der Messwerte, sowie einen Event gesteuerten Prozess für die GUI und die externe Kommunikation für die Fernzugriffe. Die beiden Programmteile können unabhängig von einander agieren und kommunizieren ausschließlich über Signale und Slots (siehe Abschnitt 2.2.1). Durch diese Kapselung ist es möglich die beiden Programmteile durch andere Lösungen auszutauschen, welche lediglich die selben Signale und Slots unterstützen müssen.

5.2.1 Systemkonfiguration

Beim Hochfahren des Mess-Servers sorgt das Linux Hintergrundprogramm systemd für die Ausführung alle nötigen Prozesse. Um zusätzlich die Steuerungssoftware zu starten, wird ein neuer Service erstellt und dem systemd mitgeteilt.

```

[ Unit ]
2 Description=Boot Setup
[ Service ]
4 TimeoutStartSec=300
EnvironmentFile=/etc/Bootsetup.conf
6 ExecStart=/usr/bin/Bootsetup
Restart=always
8 RestartSec=30
[ Install ]
10 WantedBy=multi-user.target

```

Quellcode 5.1: Systemd Service

Im Quellcode 5.1 ist die Konfiguration des Services zu sehen. Er wird beim Systemstart automatisch gestartet und führt anschließend ein Script aus, dass das System konfiguriert und die Qt Anwendung startet. Des Weiteren wird der Service automatisch erneut ausgeführt, falls ein Fehler, der die Qt Anwendung beendet, auftritt. Dadurch soll sichergestellt werden, dass das System jederzeit verfügbar ist.

Das Systemstart Script initialisiert zunächst das RS232 Cape, das RTC Cape und die Systemuhr. Anschließend führt es die Qt Anwendung aus.

```

#!/bin/bash
2 echo BB-UART4 >/sys/devices/bone_capemgr.*slots
echo BBB-RTC-01:00A1 >/sys/devices/bone_capemgr.*slots
4 sleep 60
hwclock -s -f /dev/rtc1
6 sleep 60
cd /root/Progs
8 ./LTT_MeasMaster_GUI -qws

```

Quellcode 5.2: Systemstart Script

Im Quellcode 5.2 ist das Systemstart Script zu sehen. Für die Initialisierung des RTC und RS232 Capes erfolgt über den für das BeagleBone Black verfügbaren Cape Manager (capemgr). Der Capemgr [Cap] dient zum einfachen Einbinden von Capes in das System. Er lädt unter Anderem die benötigten Treiber und reserviert die nötigen General Purpose Input/Output (GPIO) Pins.

Da das BeagleBone Black über keine persistente Uhr verfügt, wird nachdem die beiden Capes initialisiert sind die Systemuhr mithilfe der Uhrzeit des RTC Capes gestellt. Die Uhrzeit muss zu jeder Zeit korrekt sein, damit das System fehlerfrei funktioniert.

Nach der Konfiguration wird die Qt Steuerungssoftware ausgeführt. Sie wird dabei weiterhin vom systemd überwacht und im Fehlerfall neu gestartet.

Alle Log-Nachrichten werden dabei in die Logdatei des systemd geschrieben. Die dadurch anfallenden Datenmengen überschreiten dabei schnell die Kapazitäten der Hardware des BeagleBone Black. Deshalb wird zur Organisation der Logdateien die im Linux Betriebssystem mitgelieferte Software logrotate [Log] eingesetzt. Logrotate übernimmt die automatische Rotation, Kompression und Löschung von Logdateien.

```

1 / var / log / daemon . log
2 {
3     size 100M
4     weekly
5     rotate 4
6     compress
7 }
```

Quellcode 5.3: Logrotate

Im Quellcode 5.3 ist die entsprechende Konfiguration zu sehen. Die maximale Größe der Logdateien ist dabei auf 100MB beschränkt um den internen Speicher von 4GB nicht zu sehr zu belasten. Wird diese Größe überschritten wird die Logdatei rotiert. Dabei wird ein Backup der aktuellen Logdatei erstellt und eine neue angelegt. Des Weiteren wird die Logdatei einmal pro Woche unabhängig von der Größe rotiert. Bei der Rotation werden die letzten 4 Logdateien gespeichert. Kommt eine Weitere dazu, wird die älteste gelöscht. Die maximale Größe von 100MB stellt dabei nur selten das Limit dar. So stehen die Logdateien für etwa 4 Wochen rückblickend zur Verfügung.

5.2.2 RS232 Kommunikation

5.2.3 Benutzeroberfläche

5.2.4 Datenbank

Die Datenbank muss aus dem Netzwerk erreichbar sein, damit die Messdaten von einem PC-Client abgerufen werden können. Bei einem MySQL Server ist dies jedoch nicht von Grund auf gegeben. Standardmäßig akzeptiert der MySQL Server nur Anfragen über die Localhost Adresse (IP-Adresse: 127.0.0.1). Deshalb müssen die Zugriffsrechte erst erteilt werden.

```

1 GRANT ALL ON *.* to root@ '%' IDENTIFIED BY 'toor' ;
```

Quellcode 5.4: MySQL Zugriffsrechte

Mit dem Befehl im Quellcode 5.4 erhalten alle Nutzer die sich mit dem Benutzernamen *root* und dem Passwort *toor* identifizieren, vollen Zugriff auf alle Datenbanken. Somit ist es möglich von überall aus eine Verbindung zum Datenbankserver aufzubauen und sämtlichen Daten abzurufen.

Über einen langen Betriebszeitraum können sich große Mengen an Daten in der Datenbank ansammeln. Das hat zur Folge, dass die SQL-Abfragen nach nach bestimmten Daten sehr lange dauern können. Um dem Vorzubeugen werden Indexe für häufig abgefragte Daten erstellt.

```
1 CREATE INDEX measurement_time_idx on Measurement(Time);
```

Quellcode 5.5: MySQL Index

Der Quellcode 5.5 zeigt die Erzeugung eines Indexes. Der Index mit dem Namen *measurement_time_idx* wird für die Spalte *Time* in der Tabelle *Measurement* angelegt. Vor Allem in der Tabelle *Measurement* können sehr schnell große Mengen an Daten anfallen.

Der Index für die Spalte *Time* ist besonders gut geeignet. Denn um herauszufinden wann die letzte Messungen durchgeführt wurde, muss aus der Tabelle *Measurement* das Messergebnis mit dem aktuellsten Zeitstempel ermittelt werden. Diese Abfrage kann bei 2 Millionen Einträgen ohne Index bis zu 2 Minuten dauern. Mit Index kann sie auf 4 Sekunden reduziert werden.

backup und restore ?

QT crosscompile?

tcp server event gestuert

rs232 timeouts messdatenerfassung

datenbank index zur performanceverbesserung

datenbank zugriff von außen direkt möglich

LCD display energiesparmodus, wecken durch geste

hw clock aktualisierung bei ntp verbindung

stromverbrauch display, wlan brauch netzteil

Captive Portal

5.2.5 Anwendung zur Messdatenauswertung

6 Testen und Validieren

Da das System in einem Langzeit-Teststand eingesetzt werden soll, ist die Zuverlässigkeit und die Betriebsfähigkeit über lange Zeiträume besonders wichtig. Es darf keine großen Performanceeinbußen bei langem Betrieb haben.

6.1 Speicherlecks

Ein häufiger Grund für Performanceeinbußen sind Speicherlecks (englisch: memory leak). Speicherlecks sind Fehler in der Programmierung der Speicherverwaltung, wodurch Speicher belegt, aber ungenutzt ist und nicht wieder freigegeben wird. Dabei kommt es zu einer immer größer werdenden Speichernutzung, bis der gesamte Speicher des Systems ausgelastet ist und es sich stark verlangsamt oder sogar Abstürzt.

Diese Speicherlecks aufzuspüren ist keine leichte Aufgabe. Jedoch gibt es Werkzeuge wie Valgrind [Val], die bei der Suche unterstützen.

7 Fazit und Ausblick

sicherheit mysql verbindung, webinterface maybe

Lokale ausgabe messdaten für bestimmtes board über micro sd card

Jedoch entstehen dadurch Sicherheitsrisiken, da lediglich die Benutzername und Passwort Kombination einen Schutz gegen unerlaubten Zugriff bietet. Außerdem existieren keine Restriktionen für die Anfragen die an den MySQL Server gestellt werden können, wodurch die Daten gefährdet sind.

Literaturverzeichnis

- [Ben05] BENDER, K.: *Embedded Systems: Qualitätsorientierte Entwicklung.* Springer, 2005 <https://books.google.de/books?id=JoMfBAAAQBAJ>. – ISBN 9783540273707
- [Bog08] BOGUS, A.: *Lighttpd.* Packt Publishing, Limited, 2008 (From Technologies to Solutions). <https://books.google.de/books?id=aId-yw-3gSoC>. – ISBN 9781847192110
- [Cap] CAPEMGR: *Capemgr.* <http://elinux.org/Capemgr>. – Zugriff am 02.03.2015
- [Log] LOGROTATE: *Logrotate.* <http://www.linux-praxis.de/lpic1/manpages/logrotate.html>. – Zugriff am 02.03.2015
- [QtP] QTPROJECT: *Qt.* <http://qt-project.org/>. – Zugriff am 02.03.2015
- [SGD09] SCHRÖDER, J. ; GOCKEL, T. ; DILLMANN, R.: *Embedded Linux::.* Springer, 2009 (X. systems. press Series). <https://books.google.de/books?id=vpgrxY4hcHIC>. – ISBN 9783540786191
- [SSH10] SAAKE, G. ; SATTLER, K.U. ; HEUER, A.: *Datenbanken: Konzepte und Sprachen.* mitp, 2010 (Biber-Buch). – ISBN 9783826690570
- [Val] VALGRIND.ORG: *Valgrind.* <http://valgrind.org/>. – Zugriff am 02.03.2015
- [Wir] WIRELESS, Linux: *hostapd Linux documentation page.* <https://wireless.wiki.kernel.org/en/users/documentation/hostapd>. – Zugriff am 25.02.2015
- [YMBYG08] YAGHMOUR, K. ; MASTERS, J. ; BEN-YOSSEF, G. ; GERUM, P.: *Building Embedded Linux Systems.* O'Reilly Media, 2008 <https://books.google.de/books?id=I-hVqkX6A9cc>. – ISBN 9780596555054

- [ZSG11] ZHOU, Rensheng R. ; SERBAN, Nicoleta ; GEBRAEEL, Nagi: Degradation modeling applied to residual lifetime prediction using functional data analysis. In: *Ann. Appl. Stat.* 5 (2011), 06, Nr. 2B, 1586–1610. <http://dx.doi.org/10.1214/10-AOAS448>. – DOI 10.1214/10-AOAS448

