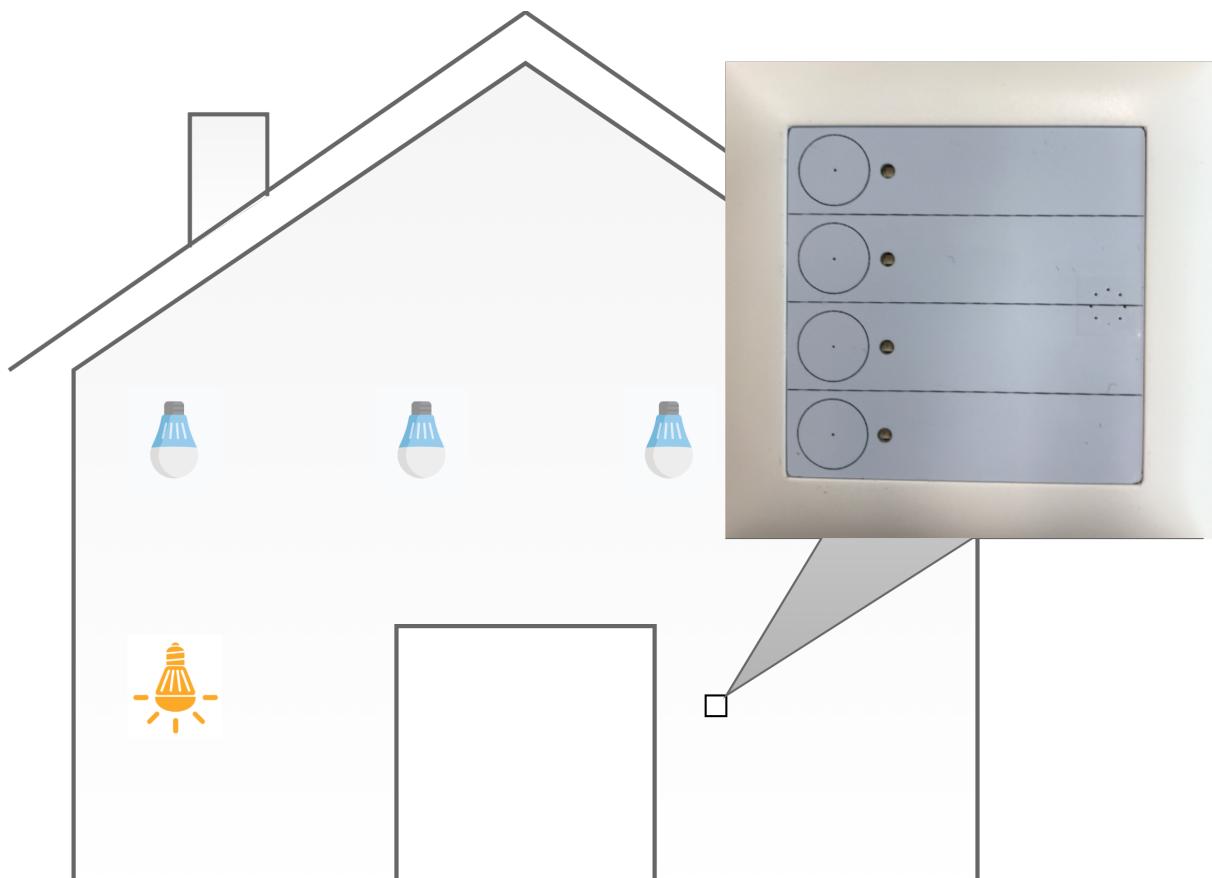


Fachbericht

Integrierte IOT-Raumautomation mit MQTT-Protokoll

Windisch, 14.08.2020



Hochschule

Hochschule für Technik - FHNW

Studiengang

Elektro- und Informationstechnik

Autoren

Lukas Meienberger und Gabriel Nussbaumer

Betreuer

Albert Zihlmann

Auftraggeber

Albert Zihlmann

Version

1.0

Zusammenfassung

Der Softwareteil befasst sich mit verschiedenen Komponenten, so wird ein Framework für den Sensor/Aktorbaustein wie auch das Framework für den Inhouse Server und das MQTT Konzept beschrieben. Das Hardwarekonzept des Sensorbausteins besteht im wesentlichen aus einem WiFi fähigen Mikrocontroller, einem Temperatursensor, Buttons und LEDs. Dabei besteht der Sensorbaustein aus drei physisch getrennten Teilen: der Spannungsversorgung, dem Hauptprint und der Frontprint. Der Frontprint beinhaltet Touchsensoren und LEDs, welche einen individualisierten Einschaltzustand, z.B Lüftung ist an, signalisieren. Das wichtigste im Aktorbaustein ist ebenso ein Mikrocontroller mit WiFi, dazu kommen noch Relais, 10 V Ein-/Ausgänge und LEDs, um den Schaltzustand der Relais zu signalisieren.

Inhaltsverzeichnis

1 Einleitung	1
2 Gesamtübersicht	2
3 Theorie	3
3.1 Wireless Local Area Network (WLAN)	3
3.1.1 Beschreibung	3
3.1.2 Datenrate	3
3.1.3 Sicherheit	4
3.1.4 Funktion WPA2	4
3.1.5 WPA2 im Vergleich zu WPA3	4
3.2 Message Queuing Telemetry Transport (MQTT)	5
3.2.1 Beschreibung	5
3.2.2 Geschichte	5
3.2.3 Überischt	5
3.2.4 MQTT-Server (Broker)	5
3.2.5 Client	5
3.2.6 Eigenschaften MQTT Broker	6
3.3 Mqtt Paket Struktur	6
4 OpenHab	8
4.1 Archidektur	8
4.1.1 OSGI	8
4.1.2 JAR	10
4.1.3 Übersicht Kommunikation Verbindungen	10
5 Software	11
5.1 Mikrocontroller	11
5.1.1 ADC	11
5.2 Recherche	12
5.2.1 ESP32	12
5.2.2 CC3235	14
5.3 Wahl des MCU	15
5.4 Framework	15

5.4.1	Entwicklerumgebung	15
5.4.2	Framework Arduino	17
5.4.3	Wahl Framework	17
5.4.4	Smart-Home Plattform	17
5.5	Kommunikation	18
5.5.1	WLAN Konfiguration	19
5.6	Programmcode Sensorbord	23
5.6.1	Übersicht	23
5.6.2	setup()	24
5.6.3	loop()	24
5.6.4	touch()	26
5.6.5	shine()	26
5.6.6	tread()	26
5.6.7	tempf()	26
5.7	Programmcode Aktorbord	30
5.7.1	Übersicht	30
5.7.2	setup()	31
5.7.3	loop()	31
5.7.4	client.loop()	33
5.7.5	callback()	33
5.7.6	publishADC()	33
5.8	Programmcode Openhab	34
5.8.1	Bindings	34
5.8.2	Things	35
5.8.3	Channel	35
5.8.4	Item	35
5.8.5	Rules	35
5.8.6	Sitemaps	35
5.8.7	Lizenzen	35
5.9	Server und Broker	35
6	Hardware	38
6.1	Sensorbaustein	38
6.1.1	Übersicht Frontplatte	38

6.1.2	Übersicht Hauptplatine	39
6.1.3	Übersicht Spannungsversorgung	40
6.1.4	Schutzbeschaltung	40
6.1.5	Mikrocontroller	40
6.1.6	Temperatursensor	41
6.1.7	Programmieranschluss	42
6.1.8	Spannungsversorgung	42
6.1.9	Platzstudie	43
6.2	Aktorbaustein	44
6.2.1	Mikrocontroller	44
6.2.2	Relais	46
6.2.3	Eingänge/Ausgänge 0..10 V	47
6.2.4	Spannungsversorgung	49
6.2.5	Interface	50
7	Validierung	51
7.1	Sensorbaustein	51
7.1.1	ESD Test	51
7.1.2	Energieverbrauch des Sensorbausteins	52
7.1.3	Temperaturmessung	54
8	Schluss	56
8.1	Reflektion	56
8.2	Ausblick	56
9	Ehrlichkeitserklärung	57
Literatur		58

1 Einleitung

Für eine integrale Raumautomation müssen alle beteiligten Gewerke geregelt werden, dazu gehören: Beschattung, Licht, Heizung, Lüftung und Klima. Der Auftraggeber möchte eine möglichst preisgünstige Sensor/Aktor-Plattform um jene integrale Raumautomation zu ermöglichen. Bis-her wurde die Idee, verschiedene Sensoren und Aktoren über IOT miteinander auszulesen bzw. zu steuern, in der Raumautomations-Branche verwirklicht, jedoch hat es sich als schwierig erwiesen solch eine anwendungsfreundliche Plattform, wie sich der Auftraggeber gewünscht hat, käuflich zu erwerben. Um die Situation zu verbessern soll eine Plattform auf Basis eines Single-Chip-uC, welcher Ein- und Ausgänge sowie ein Sensor-Baustein beinhalten realisiert werden. Zusätzlich möchte man mithilfe eines MQTT-Brokers die IOT-Geräte verbinden. Die Erstinbetriebnahme der Plattform soll mit Hilfe eines Web-Interface ablaufen, wofür das Gerät erstmal als WiFi Access-Point auf startet. Die folgende Tabelle 1.1 fasst die Anforderungen an die Plattform zusammen.

Text neu
verfassen
und neues
Bild

Aktor Baustein	<ul style="list-style-type: none"> • 4 Relais Schaltspannung 230 V • 2 Ausgänge 0-10 V • 2 Eingänge 0-10 V • Netzwerkschnittstelle • 24 VDC Versorgungsspannung
Sensor Baustein	<ul style="list-style-type: none"> • 4 Taster • Netzwerkschnittstelle • Geometrie: Standard Lichtschalter • 5 VDC Versorgungsspannung
Kommunikation	<ul style="list-style-type: none"> • MQTT Broker • WEB Interface

Tabelle 1.1: Ausgangslage

2 Gesamtübersicht

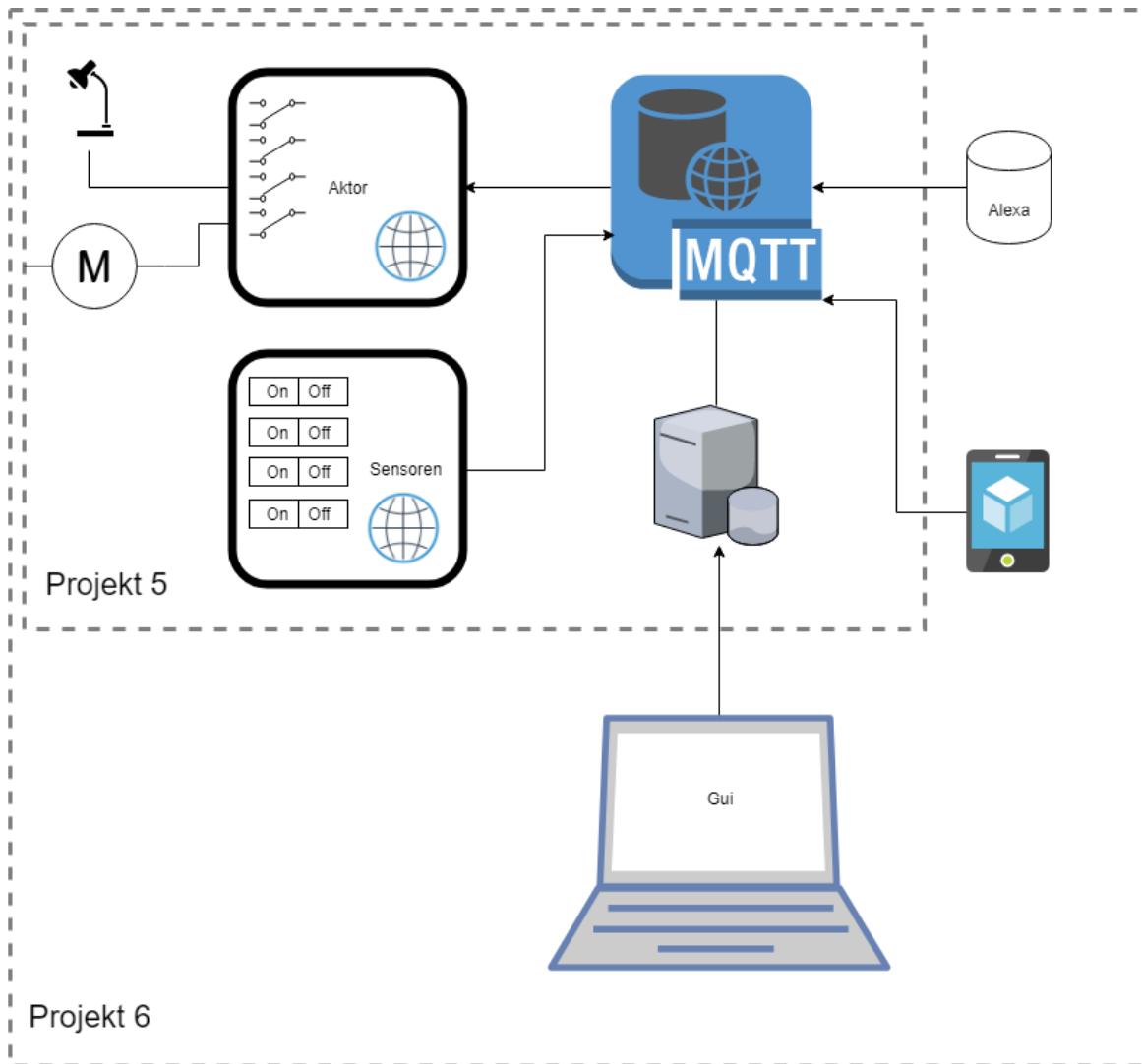


Abbildung 2.1: Gesamtübersicht Projekt 5 und Projekt 6

In der Abbildung 2.1 sind im inneren Quadrat die Komponenten, für welche im Projekt 5 die Evaluationen ausgeführt werden. Dabei ist ein Aktor- wie auch ein Sensor-Print, die Kommunikation mit dem MQTT-Protokoll sowie der Inhouse Server für die Datenerfassung und Systemkonfigurationen enthalten. Im Projekt 6 werden die geplanten Komponenten ausgeführt und erweitert. Im Bereich welcher erweitert werden soll, ist eine Bedieneroberfläche (GUI) wie auch eine Steuerung mittels Smartphone und als Wunschziel Sprachsteuerung inbegriffen.

3 Theorie

3.1 Wireless Local Area Network (WLAN)

überarbeiten

3.1.1 Beschreibung

Als lokales Funknetz ist WLAN weit verbreitet. WLAN ist eine Abkürzung für Wireless-Local-Area-Netzwerk, in deutsch ein Drahtloses-Lokales-Areal-Netzwerk. Die Idee der Lokalen Funkkommunikation war, dass in Büros mit mobilen Geräten wie Laptops eine Verbindung zum Internet hergestellt werden kann. Damit die Anbindung an das standardisierte LAN nicht in jedem Büro unterschiedliche Eigenschaften benötigt, wurde vom IEEE-Komitee entschieden ein Standard einzuführen, das Komitee entwickelte somit den 802.11 Standard für die drahtlosen Verbindungen. IEEE-802.11 Systeme nutzen unlizenzierte Frequenzbänder Bänder wie z.B. 902-928 MHz oder 2.4 - 2.5 GHz. Sämtliche Geräte dürfen dieses Spektrum nutzen, vorausgesetzt sie begrenzen ihre Sendeleistung, damit mehrere Geräte nebeneinander betrieben werden können. IEEE-802.11 Netze bestehen aus Clients wie Laptops und Smartphones sowie einer Infrastruktur, Zugangspunkt AP (Access Point), welcher im Gebäude installiert ist. Der AP ist die Schnittstelle zum verkabelten Netz und ist im Privaten Haushalt auch oft direkt im Modem nebst dem Router integriert siehe Abbildung 3.1.

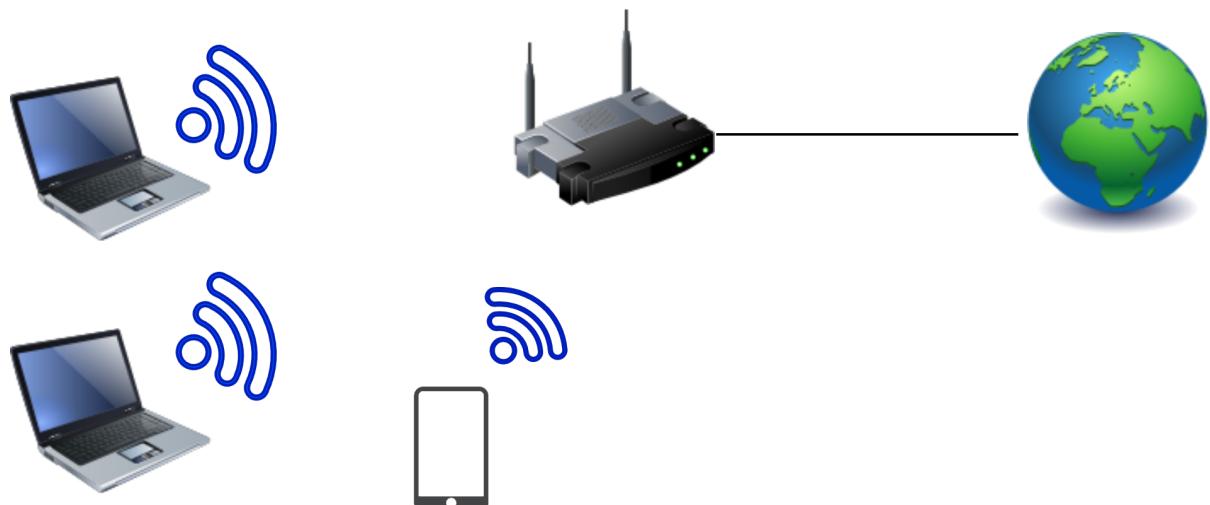


Abbildung 3.1: Übersicht IEEE 802.11

3.1.2 Datenrate

Der IEEE 802.11 Standard definierte 1997 ein drahtloses LAN, das entweder 1 Mbit/s oder 2 Mbit/s sendete und entweder Frequenzen wechselte oder das Signal über das erlaubte Spektrum verstreute. Die Funkverbindung wurde weiterentwickelt, so dass die Geschwindigkeit zunahm, in der nachfolgenden Tabelle ist eine Übersicht.

Standard	Übertragungsleistung	Modulation
IEEE-802.11b	11Mbit/s	Frequenzspezierung
IEEE-802.11a/g	54Mbit/s	OFDM
IEEE-802.11n	450Mbit/s	Mehrere Frequenzbänder

Tabelle 3.1: IEEE 802.11 Standards [1]

Das OFDM-Schema, Orthogonal Frequency Division Multiplexing, verwendet mehrere Trägerfrequenzen. Mehrere eng beieinanderliegende orthogonale Hilfsträgersignale mit überlappenden Spektren übertragen Daten parallel.

3.1.3 Sicherheit

Die kabellosen Übertragungen sind Broadcast-Verbindungen, daher besteht das Problem, dass Informationspakete abgefangen werden können. Um dies zu verhindern ist im IEEE 802.11 Standard das Verschlüsselungsschema, WEP (Wired Equivalent Privacy) enthalten. Das WEP wurde durch WPA (WiFi Protected Access) ersetzt, und schliesslich wurde WPA durch WPA2 ersetzt. Im Juni 2018 wurde von Wi-Fi Alliance WPA3 vorgestellt, die nächste Generation der WiFi Sicherheit.

3.1.4 Funktion WPA2

Die WPA2 Verschlüsselung wird in zwei verschiedenen Szenarien verwendet.

Ein Unternehmen hat ein Authentifizierungsserver mit Benutzernamen und Kennwortdatenbank eingerichtet, mit dem festgelegt wird, ob ein drahtloser Client auf das Netz zugreifen darf. In diesem Fall verwenden Clients Standardprotokolle, um sich zu authentifizieren. Im zweiten Szenario haben alle Clients ein gemeinsames Passwort, die Verbindung wird ohne Authentifizierungsserver aufgebaut. Diese Methode wird oft in privaten Netzwerken angewendet. Der Hauptunterschied ist, dass beim Authentifizierungsserver jeder Client ein Schlüssel zur Datenverschlüsselung bekommt, beim gemeinsamen Passwort wird der Schlüssel bei jedem Client aus dem Passwort abgeleitet und ist daher weniger sicher. Nachdem sich der Client mit dem Passwort ausgewiesen hat, geschieht ein 4-Pakete-Handshake, und somit werden weitere Schlüssel erstellt.

3.1.5 WPA2 im Vergleich zu WPA3

Bei WPA3 gibt es wieder die 2 verschiedenen Betriebsarten.

WPA3-Personal bietet eine stabilere kennwortbasierte Authentifizierung, selbst wenn Benutzer Kennwörter ändern, SAE (Simultaneous Authentication of Equals), schützt den Benutzer stärker gegen Dritte, welche versuchen das Passwort zu erraten.

WPA3 Enterprise bietet kryptografischen Schutz mit der Stärke von 192 Bit, somit geeignet für sensible Daten von einem Finanzinstitut [2].

3.2 Message Queuing Telemetry Transport (MQTT)

3.2.1 Beschreibung

MQTT ist ein Nachrichtentransport Protokoll, mittels Client werden Nachrichten veröffentlicht und abonniert und mit dem MQTT-Server verwaltet. Anwendung findet MQTT im Bereich in eingeschränkten Umgebungen, wie Kommunikation von Maschine zu Maschine (M2M) und Internet der Dinge (IoT). Das Protokoll läuft über TCP/IP oder über andere Netzwerkprotokolle die verlustfreie bidirektionale Verbindungen bieten [3].

3.2.2 Geschichte

MQTT wurde 1999 von dr. Andy Stanford-Clark von IBM und Arlen Nipper von Arcom erfunden. Seit 2013 ist MQTT über die nicht gewinnorientierte Organisation OASIS als Protokoll des Internet der Dinge standardisiert [3].

3.2.3 Übersicht

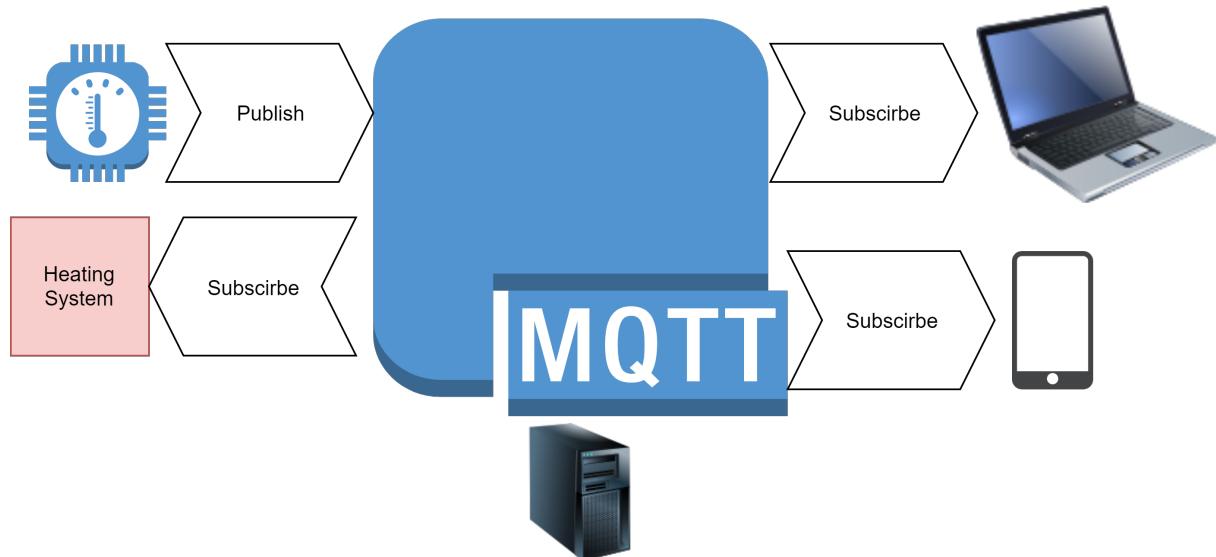


Abbildung 3.2: Übersicht MQTT

In der Abbildung 3.2 werden Daten von einem Thermostat veröffentlicht. Ein Heizsystem, ein Notebook und ein Smartphone haben die Daten abonniert und der MQTT Broker verwaltet die Nachrichten.

3.2.4 MQTT-Server (Broker)

Der MQTT-Server ist ein Programm oder Gerät, welches als Vermittler zwischen Clients dient und wird auch als MQTT-Broker bezeichnet. Der Broker nimmt Netzwerkverbindungen von Clients an, empfängt so die Nachrichten von Clients und gibt diese Nachrichten an jene Clients weiter, welche ein Abonnement abgeschlossen haben.

3.2.5 Client

Ein Client ist ein Programm oder Gerät, welches MQTT verwendet. Ein Client baut eine Verbindung zum Broker auf. Der Client veröffentlicht Nachrichten mit einem Topic und einem Inhalt.

Ist ein Client an bestimmten Daten interessiert abonniert er diesen Topic und empfängt somit den Inhalt.

3.2.6 Eigenschaften MQTT Broker

Veröffentlichen, abonnieren oder Publish/Subscribe kann in Form von One-to-many Nachrichten verwendet werden.

MQTT benötigt wenig Zusatzinformationen beim Transport und minimiert so die Protokollaustausche, somit wird die Belastung des Netzwerkverkehrs minimiert.

Es gibt ein Mechanismus zur Benachrichtigung interessierter Parteien, wenn eine Unterbrechung einer Verbindung auftritt.

Für die Nachrichten Zustellung gibt es drei Service Qualitäten [3]:

- Einmal übertragen, in diesem Fall wird die Nachricht, mit den besten Bemühungen der Betriebsumgebung, übermittelt.
- Mindestens einmal übertragen, wobei sichergestellt wird, dass die Nachricht ankommt, aber Duplikate auftreten können.
- Exakt einmal übermitteln, in diesem Fall wird sichergestellt, dass die Nachricht genau einmal ankommt.

3.3 Mqtt Paket Struktur

MQTT ist ein binärbasiertes Protokoll, bei dem die Steuerelemente Binäre Bytes sind, jedem Befehl ist eine Bestätigung zugeordnet.

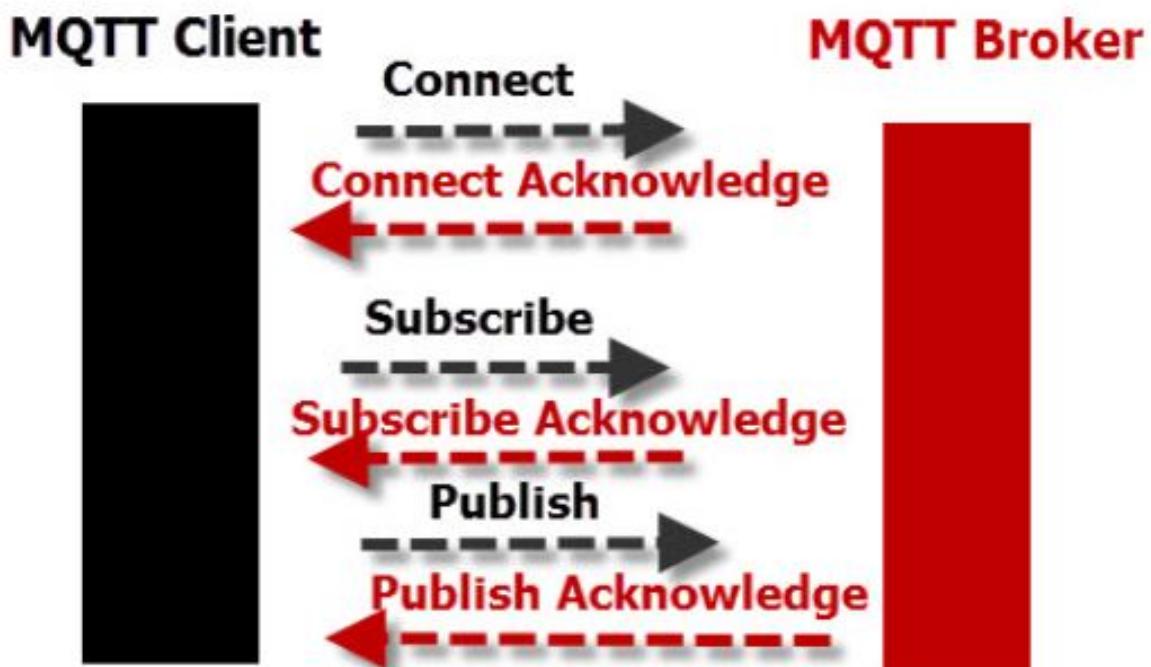


Abbildung 3.3: Protokoll Verbindung Client zu Broker

Topic Namen, Client-ID und Benutzernamen werden als UTF-8-strings kodiert. Die Payload sind binäre Daten, und der Inhalt wie das Format sind anwendungsspezifisch. Das MQTT-Packet besteht aus einem festen 2 Byte-Header und der Payload bei bedarf kann noch ein variablen Header hinzugefügt werden.

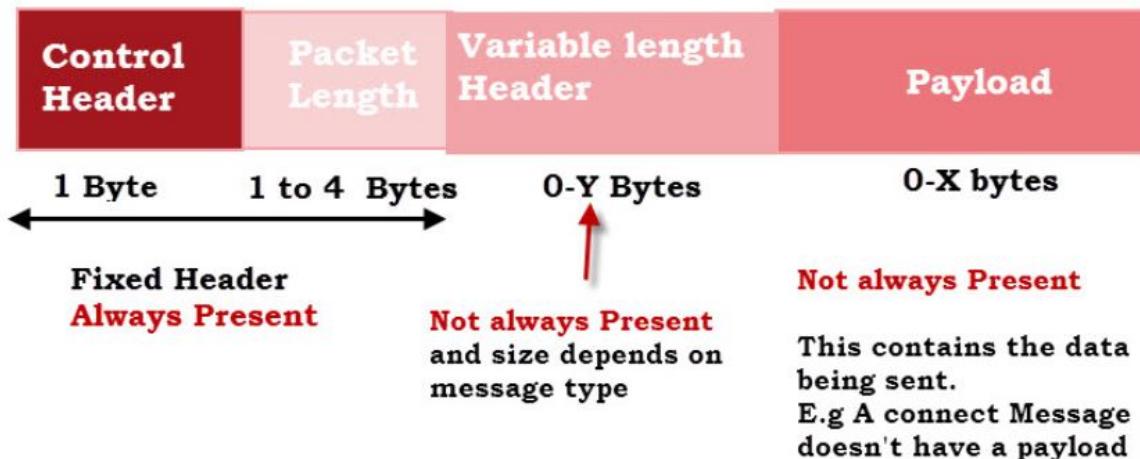


Abbildung 3.4: Standard MQTT Paket Struktur

Es gibt 3 Grundlegende Paket Formate

- Fester Header (Steuerfeld und Länge)
- Fester Header (Steuerfeld und Länge) und variable Payload
- Fester Header (Steuerfeld und Länge) variabler Header und variable Payload

Die Mindestgrösse des Paketlänge Felds beträgt 1 Bit was für Nachrichten die ohne Header kleiner als 127 Byte sind.

Die maximale Paket grösse beträgt 256 MB

Das Steuerfeld ist das erste Byte des Headers es ist in zwei 4-Bit Felder unterteilt und enthält Protokollbefehle und antworten.

4 OpenHab

In dieser Arbeit wird als Server ein RaspberryPi verwendet. Als Software befindet sich Openhab auf dem Linux Betriebssystem vom RaspberryPi. Openhab ist eine Gebäudeautomation Software und bietet Kontabilität zwischen verschiedenen Smarthome Komponenten wie KNX, Sonos, oder Philips Hue. Der für das Projekt benötigte MQTT Broker kann als Binding in Openhab eingebunden werden. Nach den Installationen kann der funktionserhalt mit den Geräten im selben lokalen Netzwerk gewährleistet werden, auch ohne Verbindung mit dem öffentlichen Internet.

4.1 Archidektur

OpenHab basiert auf der modularen OSGI Architektur.

4.1.1 OSGI

Die OSGI Technologie bietet eine Vielzahl von dynamischen Spezifikationen für Java Systemkomponenten. Dies ermöglicht ein Entwicklungsmodell, bei dem eine Anwendung aus mehreren Komponenten entsteht die als Pakete gebündelt sind. Die Komponenten sind Bausteine und sind wiederverwendbar, sie kommunizieren lokal untereinander. Die OSGI Architektur ermöglicht es den Komponenten die Implementierung vor andern Komponenten zu verbergen, während Dienste kommunizieren über Objekte gerade wenn sie von anderen Komponenten gemeinsam genutzt werden. Dies reduziert die Gesamtkomplexität und ermöglicht eine hohe Zuverlässigkeit, da während laufendem System Wartung und Entwicklungsarbeiten Durchführt werden können.

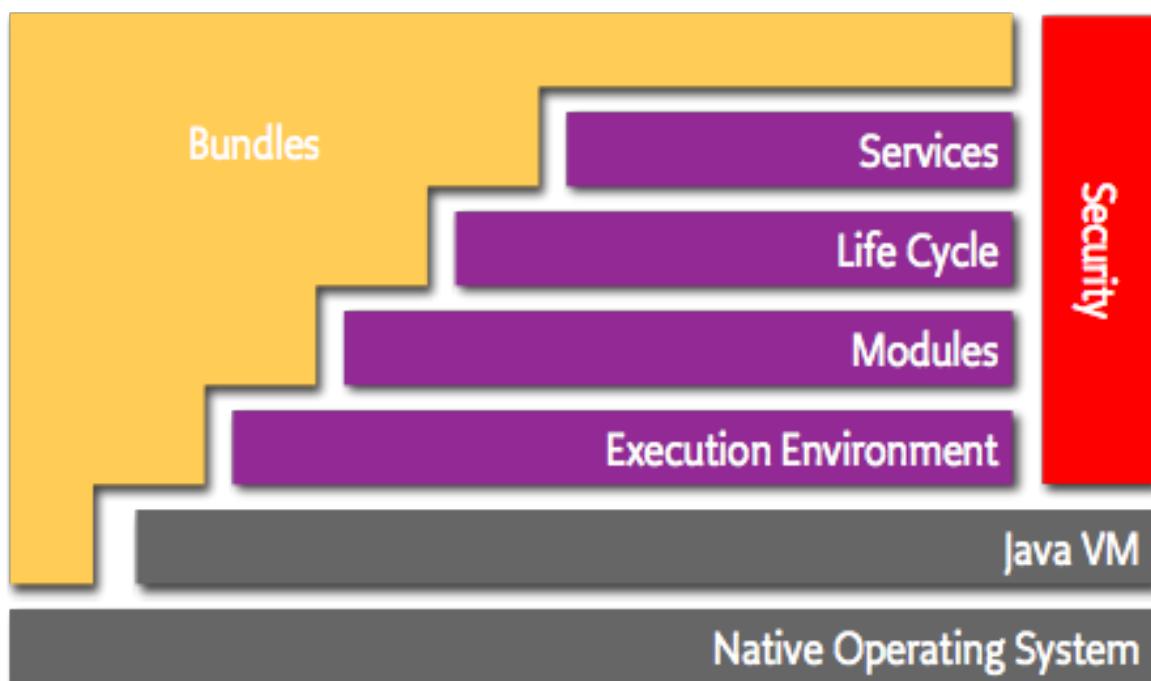


Abbildung 4.1: OSGI Layers <https://www.osgi.org/wp-content/uploads/layering-osgi.png>

Bundles sind Module sie sind die kleinste Einheit der Modularisierung. Ein Bundle ist eine JAR-Datei mit zusätzlichen Meta-Informationen.

In den Meta-Informationen sind Bundlesabhängigkeiten Informationen. Ein Bundle kann von einem andern Bundel oder von einem Paket abhängig sein.

Die OSGi-Runtime verwendet die Informationen über die Abhängigkeiten, um die Bundles zu verdrahten und versteckt alles in dieser JAR, sofern es nicht explizit exportiert wird. Die Abhängigkeiten zu den Java-Standardbibliotheken werden durch den Bundle-Header verwaltet, so dass es nicht notwendig ist, die Java-Kernpakete zu importieren.

Bundles werden oft zur Registrierung und zum Konsum von Dienstleistungen verwendet.

Die Bundles können in Laufzeit installiert, deinstalliert und geändert werden. Die Spezifikationen der OSGi Architektur also Abhängigkeiten und der Mechanismus wird mit Hilfe des Lebenszykluskonzepts erreicht. Der Rahmen führt verschiedene Zustände ein und regelt wie sich die vom Bundle exportierten Pakete und Dienste auswirken.

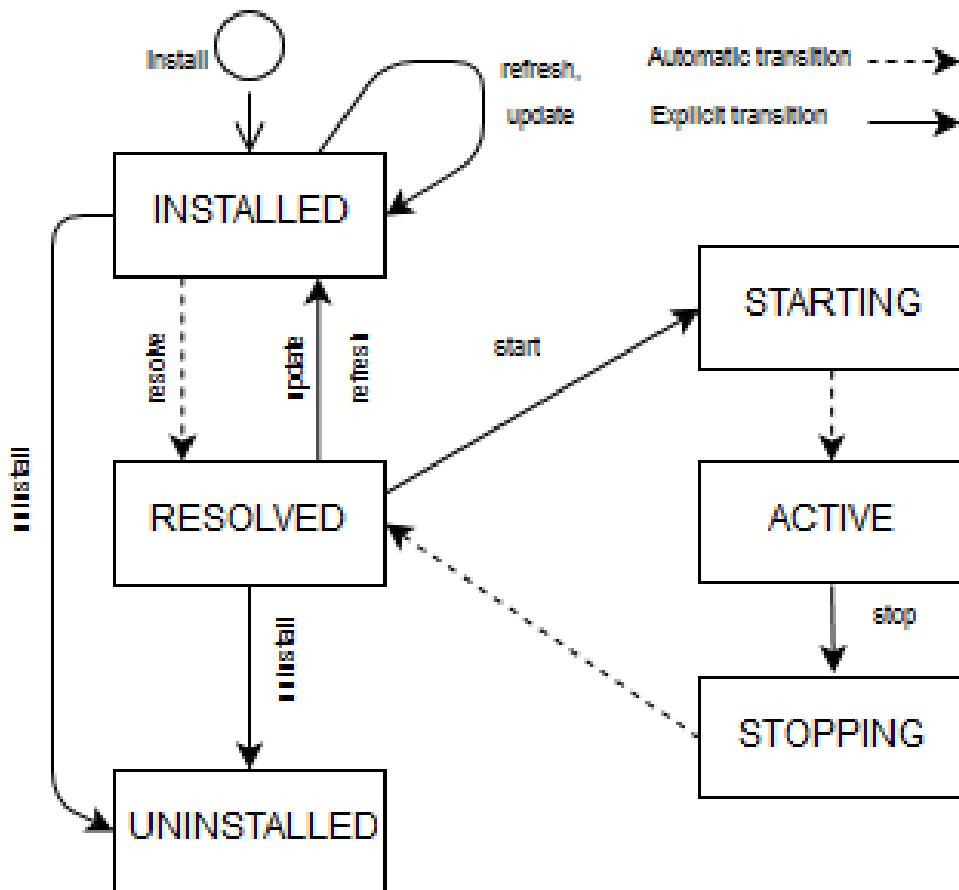


Abbildung 4.2: Bundle State Diagramm

In diesem Diagramm ist ersichtlich, dass Bundles während des Ausführens nicht geändert werden können, sonnst aber jederzeit.

4.1.2 JAR

4.1.3 Übersicht Kommunikation Verbindungen

Die Kommunikation zwischen den Komponenten geschieht mittels Event Bus. Alle nicht statusbezogenen Bundles informieren darüber andere Bundles über den Status von Events. Über diesen Bus kommunizieren alle Binding mit einem physischen Link zur realen Hardware. Mit dem Events werden auf asynchrone Weise in diesem Bus veröffentlicht, durch den EventSubscriber definierte Callback-Schnittstellen werden diese zur entsprechender Funktion vorgesehenen Events wiederum empfangen. Der EventSubscriber ist als OSGI Dienst registriert [4].

<https://www.openhab.org/docs/developer/utils/events.html>

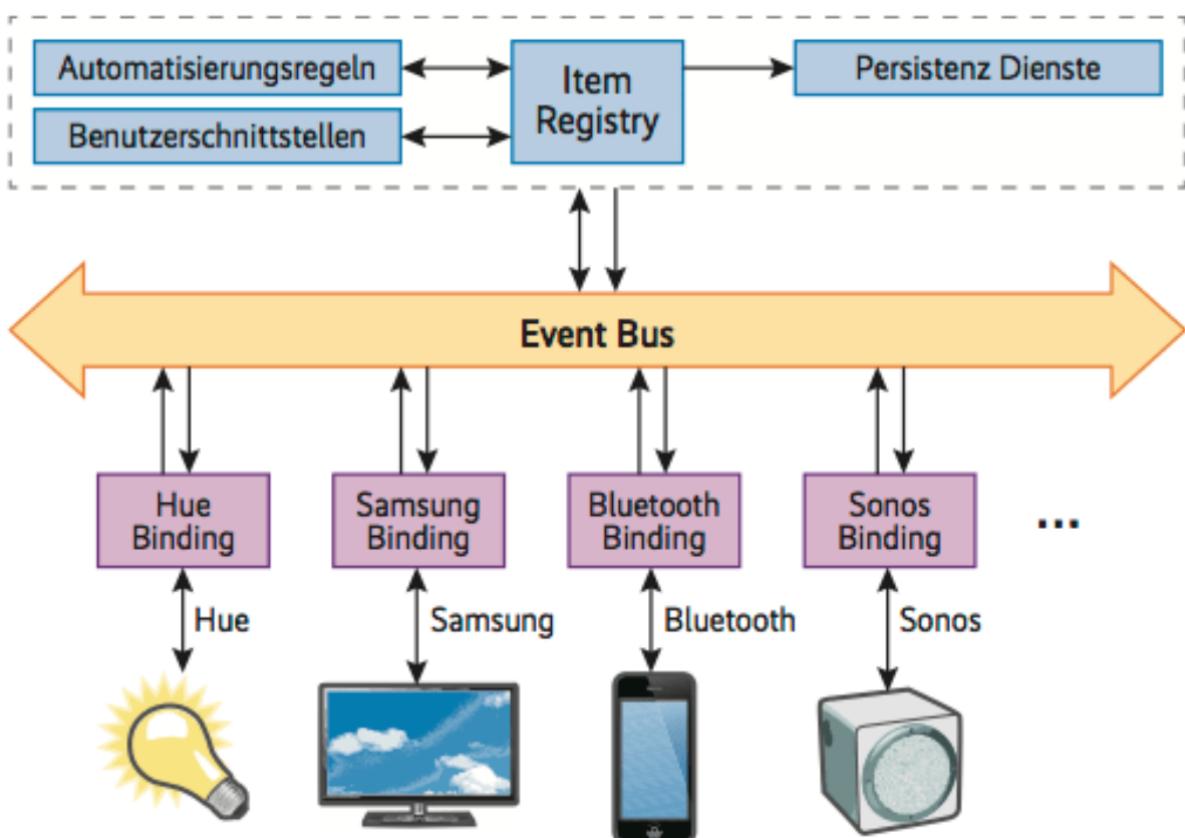


Abbildung 4.3: Eventbus Openhab <https://www.innoq.com/de/articles/2014/11/durchbruch/>

In der Abbildung 4.3 ist der Eventbus dargestellt. Verschiedene Bindings mit Hardwarekomponenten von verschiedenen SmartHome-Lösungen empfangen die für sie vorgesehene Events.

5 Software

In diesem Kapitel wird der Softwarebereich beschrieben. Es wird beschrieben wie das Framework für der Mikrocontroller, für den Sensor und Aktorbaustein, evaluiert wurden. Das Framework für den inhouse Server und wie die Kommunikation mit dem MQTT Protokoll realisiert werden.

5.1 Mikrocontroller

Für die Auswahl des Mikrocontrollers, welcher auf dem Sensor wie auch auf dem Aktor-Layout eingebaut wird, werden die nachfolgenden Kriterien in Betracht bezogen. Das erste Kriterium ist die Rechenleistung des Controllers, welche die Aufgaben wie Kommunikation, ADC Wandlungen und einer kleinen State Maschine übernehmen muss. Ein weiteres Kriterium ist die Sicherheit, der Mikrocontroller soll den Benutzer schützen, darf somit keinen ungewollten Fremdzugriff auf vorhandene Daten wie auch auf Handlungen oder Schaltvorgänge zulassen. Ein weiteres Kriterium sind die Schnittstellen, welche die Funkverbindung zur Übertragung der Daten während des Betriebes gewährleisten, wie auch die Schnittstelle, bei welcher zu Beginn das Framework geladen wird. Das Pinout des jeweiligen Mikrocontrollers wird in den Unterkapiteln 6.1.5 und 6.2.1 besprochen. Bei der Auswahl wird als letztes Kriterium darauf geachtet, dass die Kosten für den Mikrocontroller nicht wahnsinnig hoch anfallen, sodass sich die Gesamtkosten des Systems in einem Rahmen befindet für eine mögliche Massenproduktion. Die fertig entwickelten Komponenten sollen sich zu einem Konkurrenzfähigem Preis verkaufen lassen.

5.1.1 ADC

Der ADC des ESP32 verhält sich nicht linear, was zu Problemen führen kann. In der Grafik 5.1 ist zu erkennen, dass der ADC nur bei größer als $U = 0.17\text{ V}$ und kleiner als 3 V überhaupt brauchbar ist, dazu kommt, dass ab 2.5 V der ADC nichtlinear ansteigt. Die Lösung, welche hier verwendet wurde, war eine Linearisierung im Bereich von 0.2 V bis 2.5 V was zu folgender Geradengleichung geführt hat: $\text{Wert}_{\text{ADC}} = 1253.1 \cdot U - 218.54$. Die Daten stammen aus dem Internet. Diese ist somit mit Vorsicht zu bewerten, es wurden für den Sensor- und Aktorbaustein besser passende Geradengleichungen verwendet, eine für die Temperaturmessung und eine für die analogen Eingänge.

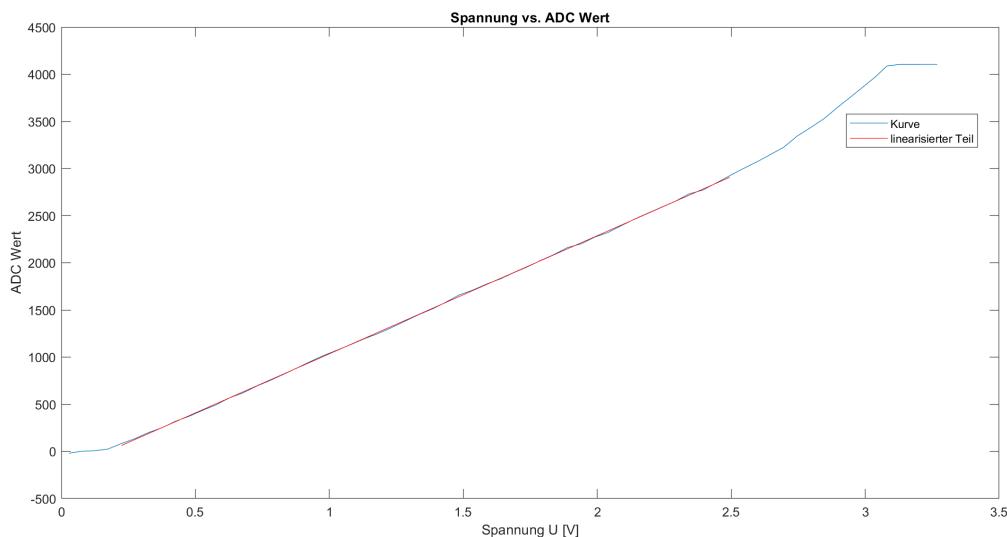


Abbildung 5.1: ESP32 Kurve, Daten aus Grafik von [5]

5.2 Recherche

Es wurden zwei geeignete Mikrocontroller miteinander verglichen, ihre Eigenschaften beschrieben und ausgewertet.

5.2.1 ESP32

Der Mikrocontroller von der chinesischen Firma Espressif Systems ist ein Robuster Chip, welcher für industrielle Umgebungen geeignet ist und in Betriebstemperaturen von -40 °C bis +125 °C zuverlässig arbeitet. Der Stromverbrauch kann zwischen verschiedenen Leistungsmodi gewählt werden, so kann während dem Betrieb eine dynamische Leistungsskalierung bewerkstelligt werden. ESP32 Module sind mit integrierten Antennen, Leistungsverstärkern und rauscharmen Empfangsverstärkern hochintegriert. Schnittstellen wie SPI, I2C, UART, WiFi und Bluetooth sind vorhanden

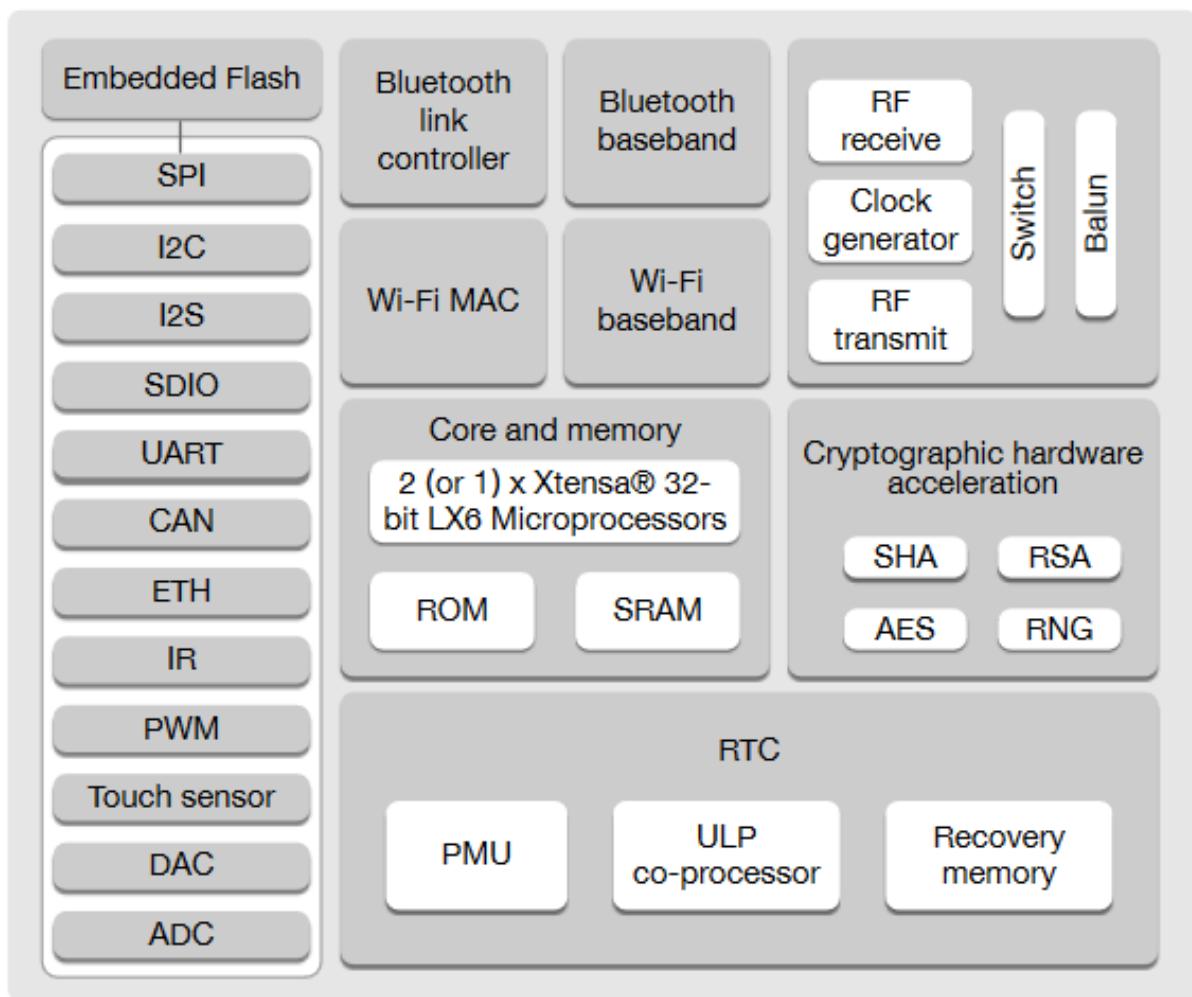


Abbildung 5.2: Blockdiagramm ESP32 [6]

WiFi: Arbeitet mit dem Standard 802.11b/g/n und 802.11 2,4 GHz bis zu 150 Mbit/s. 4 Virtuelle WiFi interfaces und Soft AP

Bluetooth: Kompatibel mit Bluetooth v4.2 BR/EDR und BLE-Spezifikationen. Sender Klasse 1, Klasse 2 und Klasse 3 ohne externen Leistungsverstärker. Hochgeschwindigkeits-UART

rauskicken
aber be-
gründen
wiso esp
genommen
wurde

HCI, bis zu 4 Mbits/s.

CPU und Memory: Modell abhängig, wobei das Modell ESP-WROOM-32E, mit der Chip Bezeichnung D0WD -V3 betrachtet wird. Dual-Core 32-bit, Flash 4-16 MB, 448 KB ROM, 520 KB SRAM, 16 KB SRAM in RTC.

Prozessor: Tensilica Xtensa LX6 240 MHz

Clocks und Timers: Interner 8 MHz-Oszillator mit Kalibrierung. Externer Quarzoszillator 2 MHz bis 40 MHz. Zwei Timer Gruppen 2x 64-bit Timer mit je einem Haupt Watchdog.

Erweiterte Peripherieschnittstellen: 12-bit SAR ADC bis zu 18 Kanäle, 2x b-bit D/A Wandler, 10x touch Sensoren, Temperatursensor, 4x SPI, 2x I2S, 2x I2C 3x UART.

Sicherheit: Alle unterstützten Sicherheitsfunktionen des IEEE 802.11-Standards, einschließlich WFA, WPA/WPA2 und WAPI

Unterstützung bei der Entwicklung: SDK Firmware für schnelle on-line Programmierung und open Source toolchains basiert auf GCC.

Kosten bei Mouser: 356-ESP32WROOM-32D 3,71 CHF/Stück

5.2.2 CC3235

Der CC3235 Controller ist eine Singel Chip Lösung von der Firma Texas Instruments. Dieser Chip ist mit einem Arm Cortex M4 MCU ausgestattet. Der CC3235 arbeitet un einer Industrieller Umgebung von -40 °C bis 85 °C zuverlässig. Schnittstellen wie UART, I2S, I2C, SPI und I/O Pins sind inbegriffen.

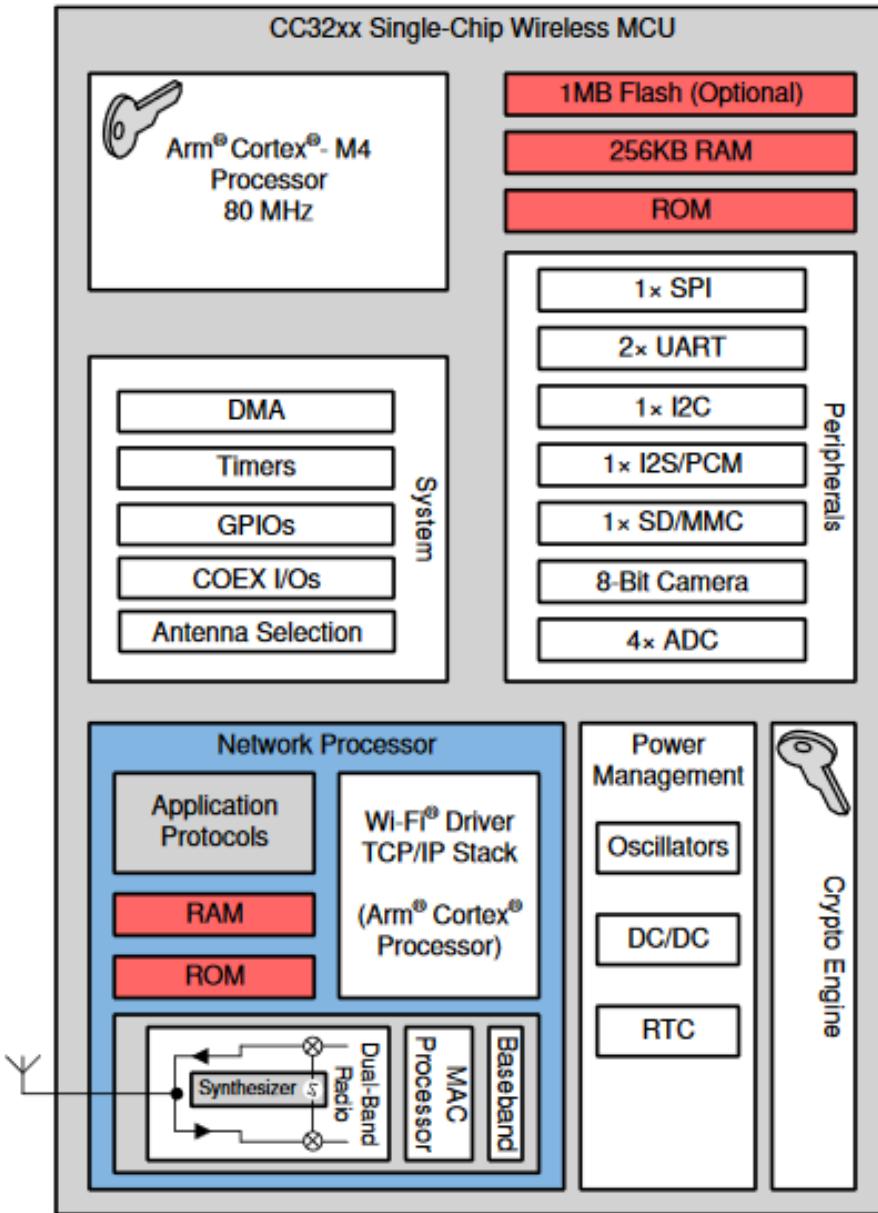


Abbildung 5.3: Blockdiagramm CC3235 [7]

WiFi: Arbeitet mit dem Standart 802.11 a/b/g/n 2.4 GHz und 5 GHz. Mit dem Netzwerkprozessor ist ein AP, Station(STA) sowie WiFi Direct Client inbegriffen.

Bluetooth: Der CC3235x ist für die Unterstützung von BLE/2,4 Funkkoexistenz ausgelegt

CPU und Memory: Modell abhängig bei Betrachtung des Model CC3235SF, 1 MB Flash, 256

KB RAM. Ein 32-bit Arm Cortex-M4 Prozessor

Prozessor: Arm Cortex-M4

Clocks und Timer: Interner 40 MHz Kristal Oszillator, 32,768 kHz Das Generalpurposetimer-module (GPTM) enthält 16- oder 32-Bit-GPTM-Blöcke. Jeder 16- oder 32-Bit Block stellt zwei 16-bit Timer oder Zähler bereit.

Erweiterte Peripherieschnittstellen: 1x SPI, 2x UART, 1x I2C, 1x i2s, 1x SD, 8-Bit Camera, 4x 12-bit ADC und 27 I/O Pins.

Sicherheit: Netzwerk-Passwörter und Zertifikate sind verschlüsselt und signiert. WEP, WPA /WPA2 PSK, WPA2 Enterprise, WPA3 Personal.

Unterstützung bei der Entwicklung: CCS Uniflash ist das Standartwerkzeug zur Programmierung von Texas Instruments MCU.

Kosten bei Mouser: CC3235SF12RGKR 12.91 CHF/Stück

5.3 Wahl des MCU

Im Kapitel 5.2 sind zwei geeignete MCU für diese Projekt gefunden worden. Im Vergleich zwischen dem CC3235 und dem ESP32 hat sich herausgestellt, dass der ESP32 preislich im Vorteil liegt und je nach Modul mit integrierter Antenne und oder SMA Anschluss angeboten wird. Somit fällt die Wahl auf den ESP32 der Firma Espressif Systems.

5.4 Framework

5.4.1 Entwicklerumgebung

rauskicken

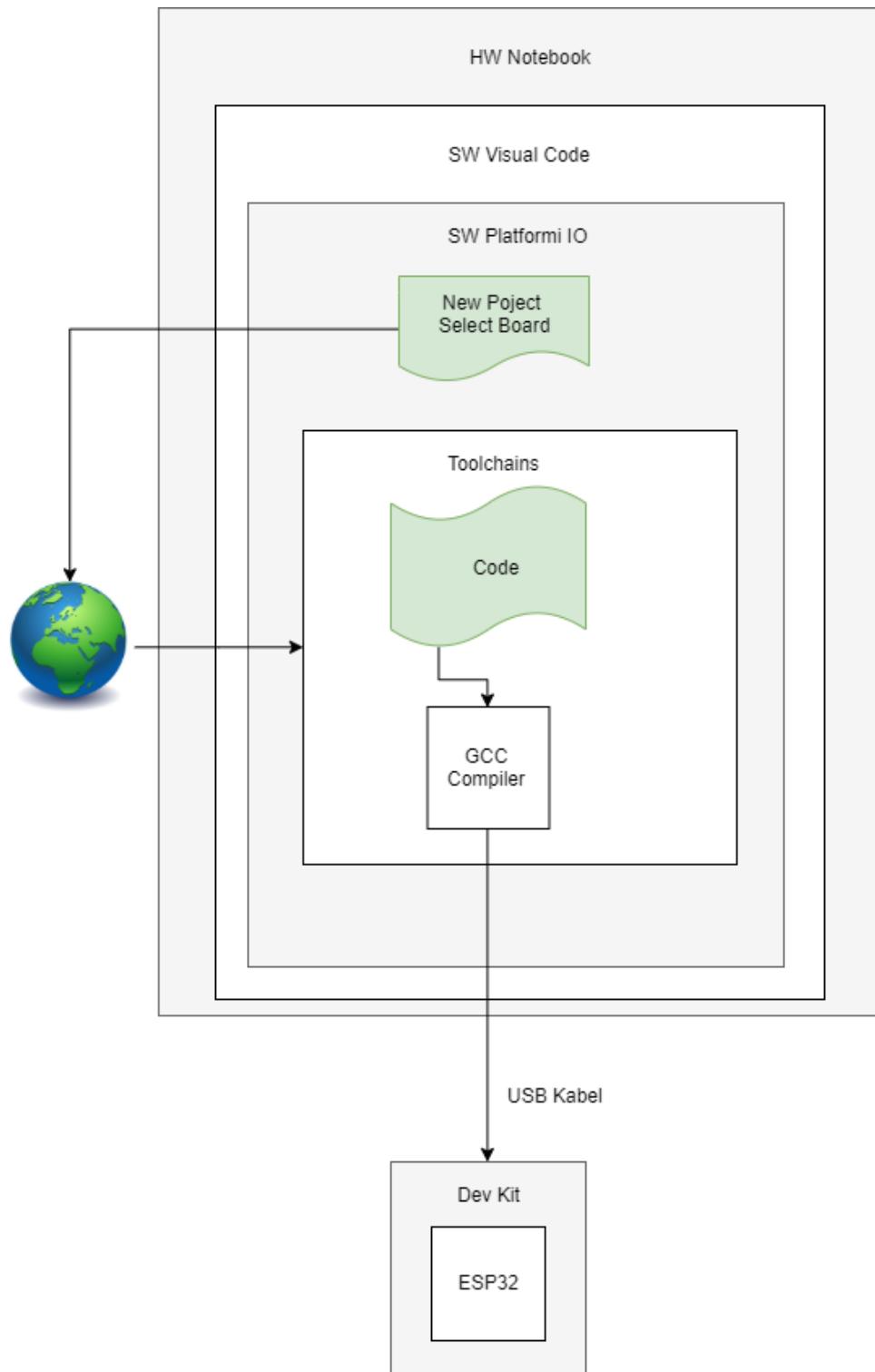


Abbildung 5.4: Entwicklungs Umgebung

In diesem Projekt wurde eine Evaluation mit dem ESP-WROOM-32 Development-Board durchgeführt. Als Entwicklungsumgebung wird Visual Code von der Firma Microsoft verwendet, dies ist ein freier Quelltext-Editor, mit dem unter anderem Debugging möglich ist [8]. In Visual Code können Extensions eingebunden werden, somit wird PlatformIO IDE [9] kurz PIO installiert. PIO ist ein plattformübergreifender Code Builder und Bibliotheksmanger. Wird ein neues Projekt eröffnet, muss vom Benutzer zuerst das Entwickler Board gewählt werden, anschließend

kümmert sich PIO um die erforderlichen Toolchains, ladet diese vom Internet herunter und installiert sie. Nun kann das Developmend-Board via USB Kabel angesprochen werden. Programmcode kann kompiliert und auf den ESP32 geladen werden, sowie die Serial Port ausgaben können direkt im PIO angezeigt werden. In Abbildung 5.4 ist ein Blockdiagramm auf dem die Verbindungen zwischen Software und Hardware dargestellt sind.

5.4.2 Framework Arduino

In dem Arduino Framework erfolgt die Programmierung in C und in C++. Das Arduino Framework steht unter der LGPL/GPL Lizenz und ist somit eine freie Software. Ein grosser Vorteil des Arduino Frameworks ist, dass zahlreiche Bibliotheken und sowie Programmcode auf Github erhältlich sind [10].

5.4.3 Wahl Framework

Ein geeignetes Framework für den Mikrocontroller, ist im Umfang des MCU Herstellers und mit einem Prototypen evaluiert worden. Als erste Wahl wurde das Arduino Framework genommen und ein Versuchsaufbau realisiert. Die Wahl des Arduino Framework ist auf Grund der Programmiersprache, Verfügbarkeit und bisherigen Erfahrungen erfolgt. Ein Funktionsmuster mit Hotspot, für Grundkonfigurationen und erste MQTT-Nachrichten, konnten Erfolgreich mit dem Arduino Framework realisiert werden.

5.4.4 Smart-Home Plattform

Eine Smart-Home Plattform wird benötigt, damit der Benutzer mit dem IOT-Systems interagieren kann. Doch welche Plattform ist für dieses Projekt am besten geeignet? Angedacht ist, dass mithilfe der ausgesuchten Smart-Home-Plattform folgende Bedingungen erfüllt werden: die Plattform...

1. bietet Schnittstellen mit anderen Smart-Home Technologien wie KNX.
2. ist etabliert (grosse Community).
3. ist für Anfänger geeignet.
4. kann als Client auf vielen verschiedenen Geräten laufen.
5. verfügt über ein übersichtliches GUI.
6. hat Keine Darstellungsfehler auf verschiedenen Geräten.
7. Hat gewisse Vorteile gegenüber anderen Plattformen.

Jetzt kommt eine Analyse der Smart-Home-Plattformen. Vorgängig zu vermerken ist, dass es sich als positiv herausgestellt hat, dass alle Plattformen auf einem RasPi installiert werden können.

openHAB / Eclipse Smart-Home:

1. openHab bietet sehr viele Schnittstellen, da durch den modularen Aufbau der Architektur die flexible Anbindung neuer Technologien einfach ist. Die für dieses Projekt wichtige Bindings von Alexa und KNX sind somit vorhanden. Was ebenso interessant ist, sind konfigurierbare Features wie Dropbox Support, Google Kalender, Text to speech-Implementierung (TTS) und HABDroid. HABDroid kann wie Alexa per Sprachsteuerung Aktionen ausführen. [11]
2. openHaB hat eine sehr grosse Community, wobei die ersten Smart-Home Produkte für den Massenmarkt auf Eclipse Smart-Home basierten. [11]
3. Wie sich herausgestellt hat, ist die Plattform für Anfänger sehr gut zu verstehen.
4. openHAB kann auf jedem Endgerät installiert werden, welches Java Code ausführen kann und genügend Ressourcen hat. [11]
5. Das Gui wird gestaltet durch den Anwender und so kann man sich auch ein Kachelsystem aufbauen, wenn man zu viele Kacheln hat kann es schnell Mal unübersichtlich werden.

6. Auf der Android App von openHab gibt unter dem Menü HABPanel Darstellungsfehler der Kacheln, so dass sie sich überlappen, was unschön ist. Jedoch müssen nicht die Kacheln im HABPanel benutzt werden, sondern es kann eine gute Menüführung mit eigens erstellten Untermenüs direkt auf dem Main Menu verwendet werden.

7. Die MQTT-Anbindung auf einem RasPi gestaltet sich mithilfe von openHab als besonders einfach, denn es kann nach der Installation von openHab direkt einen Broker unter openHab angelegt werden. Hierfür wird als erstes das MQTT Binding unter Add-ons installiert. Danach wird unter Inbox ein neues Gerät (MQTT Thing Binding) hinzugefügt. Das System sucht nun einen Broker, wenn er nichts gefunden hat, kann dann über manuelles Hinzufügen (add manually) einen neuen MQTT Broker hinzugefügt werden. Unter dem Konfigurationsmenü des MQTT Brokers kann unter anderem einen Namen, eine Thing ID, einen Broker Hostname, einen Username, ein Passwort sowie einen Broker Port vergeben werden. Nach der Bestätigung der Konfiguration hat man dann den Broker angelegt. In dem Menu Things kann danach ein neues Gerät hinzugefügt werden. Für das Hinzufügen kann hier MQTT Thing Binding → manuelles hinzufügen ausgewählt werden. Nun wählt man Generic MQTT THing aus vergibt dort einen Namen und Thing ID, als Bridge wird nun der zuvor angelegte MQTT Broker ausgewählt. Nach der Bestätigung des neuen Gerätes (Thing) kann ein neuer Channel hinzugefügt werden. So kann z.B. ein Gerät welches nur ein oder aus sein muss als Channel Type On/Off Switch hinzugefügt werden. Den Channel ID und das Label können frei gewählt werden. Hier wird ebenso der MQTT state topic (für das lesen) sowie MQTT command topic (für die Befehle) eingegeben werden. Um eine Interaktion zu gewährleisten wird der Kanal mithilfe des Link Channel mit einem Item verknüpft. Unter dem Menü Control sieht man dann eine grafische Darstellung des Items hier z.B der oben genannte On/Off Switch [11].

iobroker:

1. Es sind Schnittstellen vorhanden jedoch weniger als bei openHAB

2. Ist mittlerweile ebenso etabliert, Community ist aber noch ein wenig kleiner als openHAB

3. iobroker bietet, wie openHAB die Möglichkeit auch ohne Programmierkenntnisse bedient zu werden, jedoch kann auch Javascript angewendet werden, wodurch alle möglichen Wünsche abgedeckt werden können[12]. iobroker benötigt auf den ersten Blick sicherlich mehr Einarbeitungszeit im Gegensatz zu openHAB.

4. Dies ist möglich, jedoch gestaltet sich die CLient Benutzung auf dem Smartphone aufwändiger als bei openHAB

5. Das GUI ist sehr Individualisiert und es können mittels iobroker.vis viele eigene grafische Darstellungen erstellt werden. Jedoch sieht die Oberfläche von iobroker auf den ersten Blick ältmodischäus.

6. Es gibt soweit keine Darstellungsfehler in iobroker.

7. iobroker bietet mit iobroker.vis eine ein Visualisierungswerkzeug bereit, welche die Möglichkeit bietet eigene Bedienoberflächen anzulegen. Dabei können die Visualisierung alle Möglichen Komplexitätsgrade annehmen und dazu mit JavaScript verknüpft werden. Beispielsweise kann man ebenso mithilfe von JavaScript eine Schaltfläche in der Vis-Visualisierung ausführen lassen und sich eine Nachricht über Telegram verschicken [13].

Das Fazit der Analyse ist, dass openHAB einfacher zu bedienen ist und eine bessere Anbindung per Smartphone hat als iobroker. Jedoch bietet ioBroker mit iobroker.vis mächtige Werkzeuge, die Frage ist nur, ob das für dieses Projekt benötigt wird.

5.5 Kommunikation

5.5.1 WLAN Konfiguration

Die Funkkommunikation zwischen Sensor, Aktor und MQTT-Broker wird mittels Wireless Local Area Network (WLAN) auf dem OSI layer 1 stattfinden. Um die einzelnen Target also Sensoren und Aktoren in das Lokale Netzwerk zu verbinden, wird beim Starten des ESP32 ein Accespoint eröffnet. Für diesen WiFi-Manager Prozess wird eine Bibliothek eingebunden. Die benötigte Bibliothek steht auf Github zur Verfügung [14].

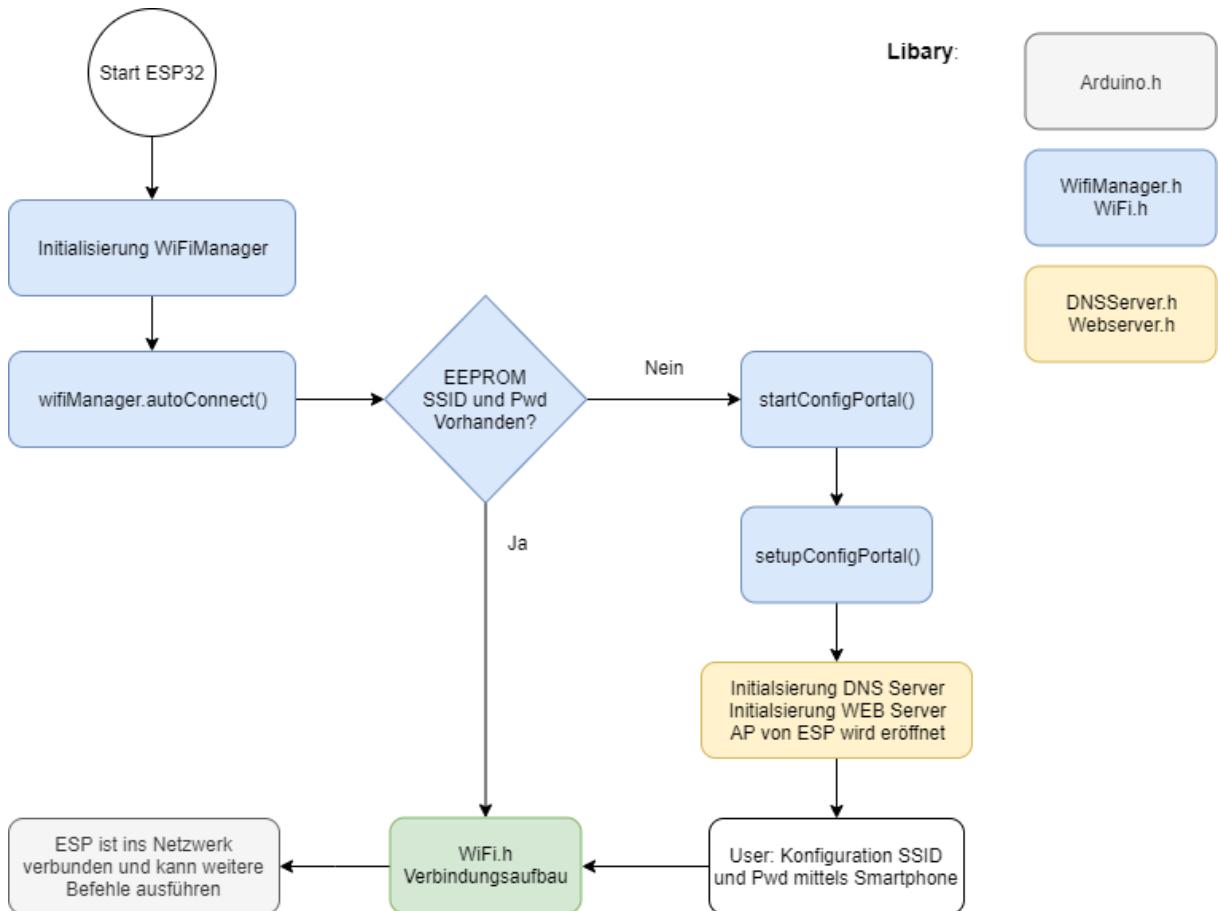


Abbildung 5.5: Statediagramm Verbindungsauftbau ESP ins Netzwerk mit einem AP

Wird die Bibliothek WiFiManager.h eingebunden und initialisiert stehen verschiedene Funktionen zur Verfügung. Die Funktion `autoConnect()` eröffnet nach dem Start des ESP einen Access Point wenn keine Konfigurationsdaten im nichtflüchtigen Speicher vorhanden sind. Falls Konfigurationsdaten vorhanden sind werden sie aus dem EEPROM gelesen und es wird kein Access Point eröffnet. Sollen aber die Konfigurationen bei jedem Start durchgeführt werden, kann die Funktion `startConfigPortal()` aufgerufen werden.

Der Acces Point kann bei bedarf auch passwortgeschützt verwendet werden. In diesem Versuch wird er ohne Passwort genutzt und ist somit mit einem Smartphone oder Notebook ersichtlich, siehe Abbildung 5.6. Wird kein Name zugewiesen, generiert der ESP selber ein Name mit ESP und Chip-ID.

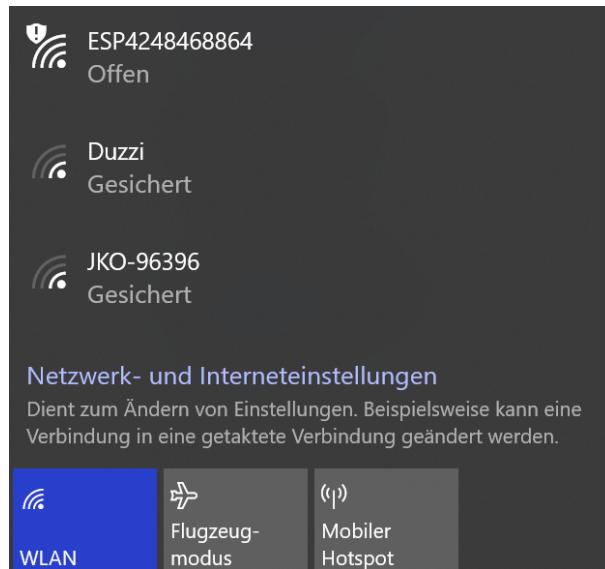


Abbildung 5.6: Esp Acces Point

Sobald "verbinden" mit diesem Netzwerk gewählt wird, startet der Browser eine Konfigurationsseite mit der IP Adresse des Targets. Nun ist ein Menü ersichtlich mit folgenden Wahlmöglichkeiten, siehe Abbildung 5.6:

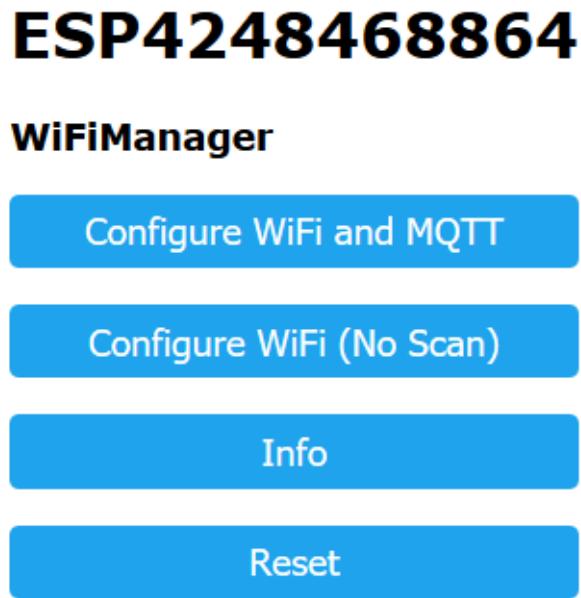


Abbildung 5.7: Esp Konfiguration Home Menu

Wird 'Configure WiFi and MQTT' angewählt erscheint folgende Ansicht in Abbildung 5.8.

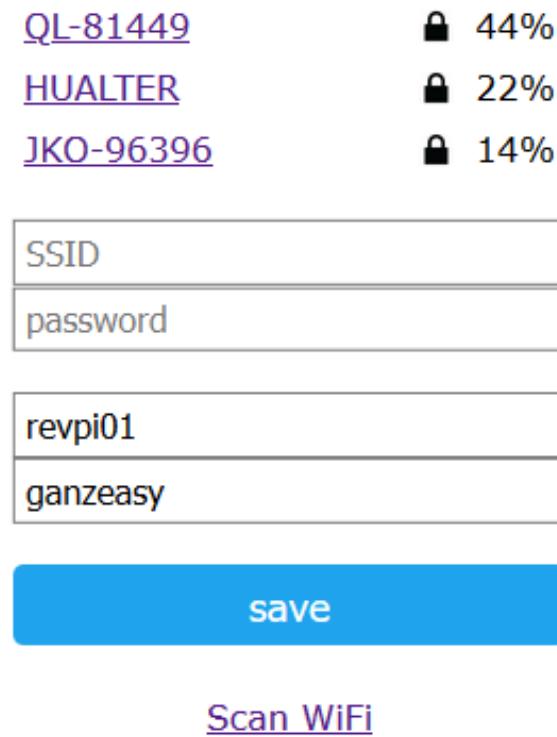


Abbildung 5.8: Esp Konfiguration WiFi und MQTT

Netzwerke, welche in der Umgebung gefunden wurden, werden angezeigt, die Parameter die zur WiFi Verbindung notwendig sind, können nun eingegeben werden. Im unteren Teil wird eine Voreinstellung der MQTT-Broker-Adresse angezeigt und dessen Passwort, diese können beliebig geändert werden. Im WiFiManager Hauptmenü können die gleichen Konfigurationen ohne, dass nach vorhandenen Netzen gesucht wird, mit dem 'Configure WiFi(No Scan)' Button, gemacht werden. Mit dem Info Button werden Folgende Informationen angezeigt ChipID, Soft AP IP und Soft AP MAC wie auch Station AP MAC Adresse.

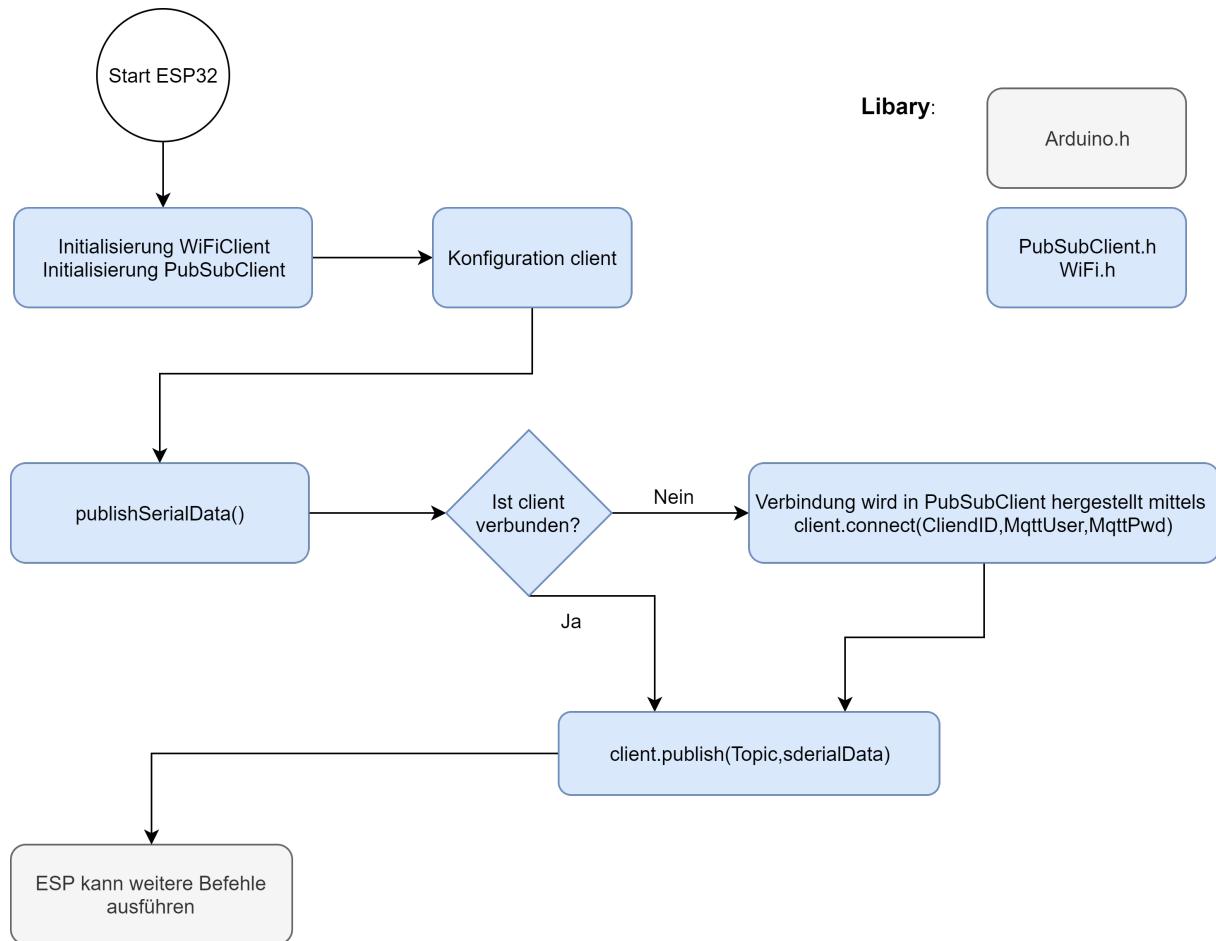


Abbildung 5.9: Esp Info

Die für die MQTT-Kommunikation wird die Libary PubSubClient.h eingebunden. Als erstes wird der WiFiClient initialisiert.

Danach wird der PubSubClinet als Client instantiiert, für diesen Vorgang werden folgende Parameter benötigt:

- server: Adresse von MQTT-Server
- port: der Port von dem MQTT-Server
- client: eine Instanz vom Ethernet-Client.

Die Funktion publishSerialData() ermöglicht, eine Nachricht zu veröffentlichen, bei diesem Vorgang wird den Topic und die seriellen Daten veröffentlicht. Beim Aufruf dieser Funktion, wird jedes mal überprüft ob die Verbindung zum MQTT-Borcker in Ordnung ist.

Ist die Verbindung nicht in Ordnung, wird sie mit der Funktion connect(), hergestellt. Um diesen Prozess erfolgreich durch zu führen werden, ClienID, MQTT-Benutzername und Passwort benötigt.

Ist die Verbindung in Ordnung werden die Daten mit dem Befehl publish() veröffentlicht [15].

5.6 Programmcode Sensorbord

Die Aufgabe welcher der Mikrocontroller vom Sensorboard übernehmen besteht darin, dass er Betätigungen der Touchtasten auf dem Frontprint erkennt. Jeder Touchtaster besitzt ein LED mit dem das Betätigen bestätigt wird. Diese Funktion wurde so initialisiert, damit der User eine sofortige Kenntnis über die ausgelöste Aktion bekommt. Mit dem Sensorboard wird auf dem Frontprint die Umgebungstemperatur gemessen.

5.6.1 Übersicht

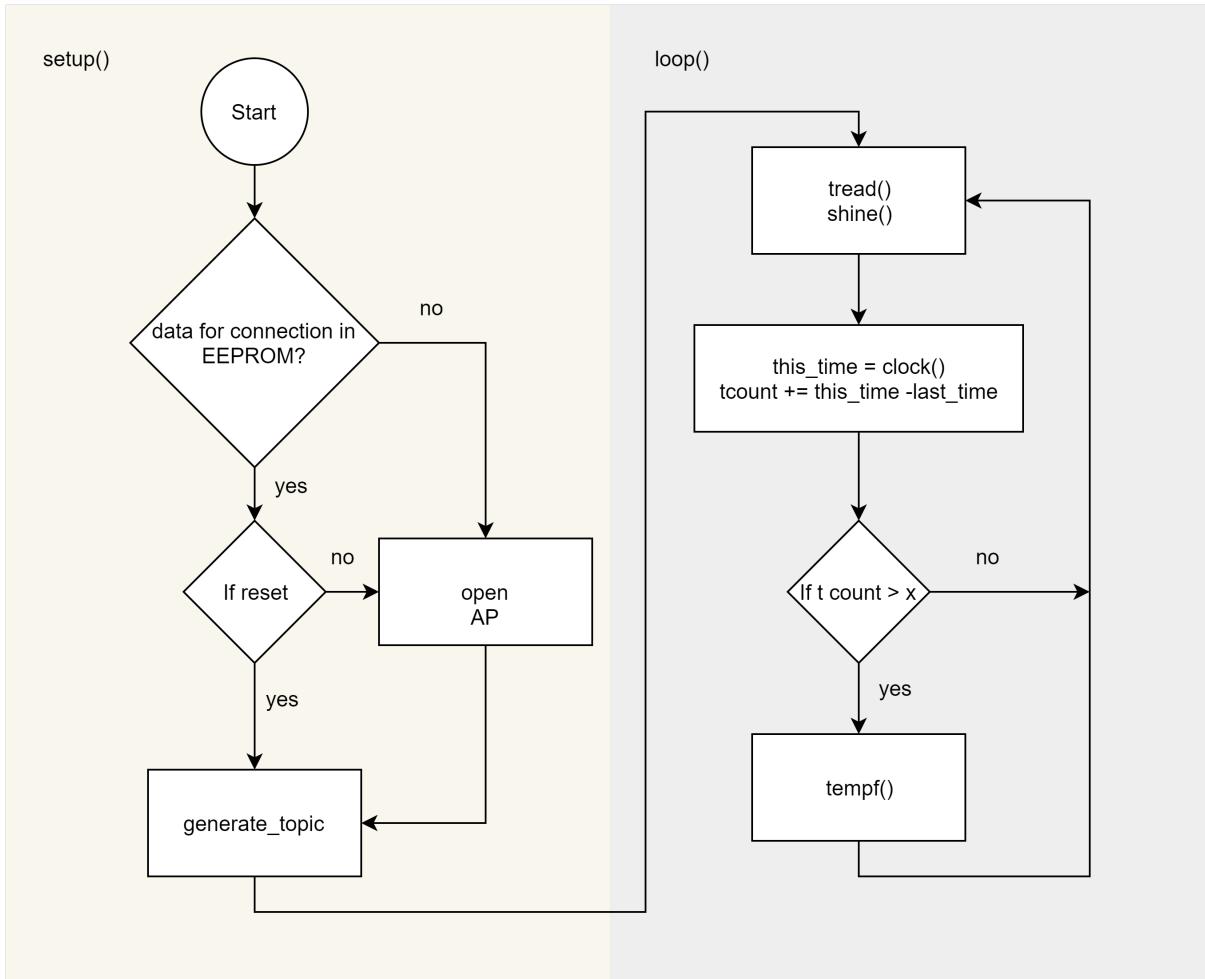


Abbildung 5.10: In dieser Abbildung ist das Statediagramm vom Sensorboard abgebildet

5.6.2 setup()

Wird der Mikrocontroller gestartet so werden als erstes Configurations-Daten im EEPROM gesucht. Werden keine Daten gefunden oder wird die Reset-taste betätigt wird ein Accespoint eröffnet und Configurations Parameter können mittels Browser eingegeben werden. Dieser Vorgang wird im Kapitel Kommunikation genauer beschrieben. Als nächster Schritt werden für die MQTT-Messages die Topics anhand der Bordbezeichnung und der Anwendung generiert. Die Bordbezeichnung wird im Configportal eingegeben und im EEPROM abgespeichert, sie dient dazu, wenn mehrere Boards installiert werden um die empfangenen Nachrichten zu unterscheiden. Eine mögliche Topic für eine MQTT Nachricht wenn beispielsweise der erste Taster betätigt wird kann folgendermassen aussehen: "data/sesnorboard/wohnzimmer/S1" in diesem Fall wurde die Bordbezeichnung Wohnzimmer gewählt.

5.6.3 loop()

Im loop() wird als erstes die Funktion tread(), dann shine() aufgerufen, danach wird die Momentane Zeit mit der Funktion clock() geholt. In der Variabel count wird die Zeitdifferenz zwischen den wiederholenden Durchgängen von touch() addiert. Dies passiert solange bis der Wert x erreicht ist, in diesem Fall alle 10 Sekunden. Wenn der Wert x erreicht ist wird die Funktion tempf() aufgerufen, mit dieser wird mittels NTC die Temperatur gemessen. Im gleichen Zyklus wie die Temperaturmessungen Durchgeführt werden, wird die Status LED geschaltet, so kann überprüft werden, ob sich das Bord im normalen Betrieb befindet, sprich der loop() wird gewiss komplett Durchlaufen. Die Funktionen sind in der nachfolgenden Abbildung abgebildet und werden anschliessend erläutert.

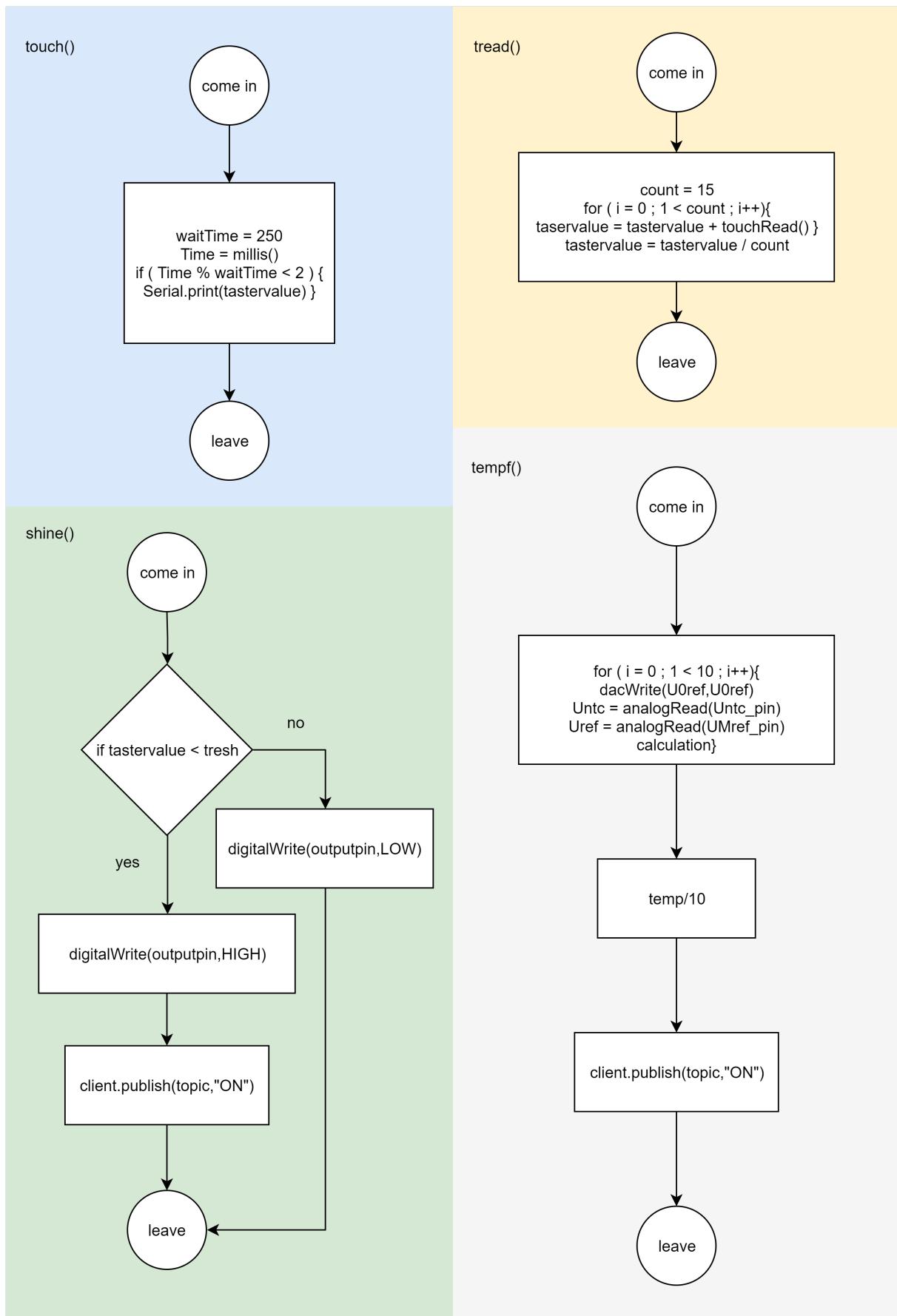


Abbildung 5.11: In dieser Abbildung sind die Funktionen vom Sensorboard abgebildet

5.6.4 touch()

Wie in der Abbildung 5.10 zu erkennen ist, wird die Funktion touch() nicht aufgerufen. Sie dient alleine zum debuggen also um den optimalen thresh Wert zu finden. Dieser Wert definiert ab wann die Touchsensoren als gedrückt erkannt werden. In der Funktion wird die Variablen waitTime initialisiert mit dem Wert 250 weiter wird der Wert millis() in die Variable Time gesetzt. In einer for-wihle werden so lange Time modulo waitTime kleiner als 2 sind, sprich die ersten 2 Millisekunden von 250 Millisekunden, mit Serial.println() der aktuell eingelesene Touchwert ausgegeben. Dieser Wert befindet sich im Ruhezustand um 50-80, wenn eine entsprechende Touch-Taste betätigt wird sinkt dieser Wert auf 10-30.

5.6.5 shine()

In der Funktion shine() wird in einer for-while der Eingelesene Wert das sogenannte taservalue der jeweiligen Touchtasten mit dem Thresholdwert, thresh verglichen. Ist das tastervalue kleiner als thresh, wird eine MQTT-Message mit der entsprechenden Topic und der Payload "ON" published. Ebenso wird die Led der entsprechenden Taste HIGH gesetzt. Trifft der andere Fall zu, wenn das tastervalue grösser als thresh ist wird die entsprechende Led LOW gesetzt.

5.6.6 tread()

In der Funktion tread() werden in einer for-while die aktuellen Werte der vier Touch-Tasten eingelesen und in den int-array tastervalue gesetzt, um Ausreisser zu eliminieren, wird ein Mittelwert erstellt. Es werden jeweils 15 Messungen addiert und anschliessend durch die Anzahl Messungen dividiert.

5.6.7 tempf()

In dieser Funktion wird die Temperatur mit dem NTC ermittelt. So wird als erstes U_{ref} und U_{ntc} als ADC-Wert eingelesen und über 10 Werte gemittelt. Danach wird eine Geradengleichung (Gl.: 5.1) verwendet, um die ADC-Werte in eine Spannung zu konvertieren. Wie im Kapitel 6.1.6 beschrieben und in der Abbildung 6.8 ersichtlich, bildet ein Vorwiderstand von $100\text{ k}\Omega$ und der NTC einen Spannungsteiler an dem U_{ref} angelegt wird und am NTC die Spannung U_{ntc} gemessen wird. Aufgrund dessen wird der Widerstand des NTCs R_T mit 5.2 berechnet. Für U_{ref} wird maximal eine Spannung von 2.5 V verwendet, da der ADC danach nicht mehr linear ansteigt, diese Spannung wird mithilfe eines DACs im Setup() ausgegeben. Die Temperatur in Kelvin ergibt sich dann aus der Gleichung 5.3, von dieser Zahl wird danach 273.15 abgezogen, um den Wert in °C zu kriegen. Die angesprochene Gerade (Gl.: 5.1) ist so ausgelegt, dass sie in dem Spannungsbereich der Temperaturmessung funktioniert. Um sie auszulegen und gleichzeitig die Temperatur zu verifizieren wurde folgendes Verfahren angewendet. Als erstes wurde der Temperaturbereich festgelegt, welcher von -5 °C bis +45 °C reicht. Dann wurde mittels eines Klimaschrances 5.13 die Temperaturen in $5\text{ }^{\circ}\text{C} \pm 1\text{ }^{\circ}\text{C}$ Schritten festgelegt. Um die Temperatur genauer zu messen wurde ein NiCr-Ni Temperaturfühlers (Messgerät Therm 2250-1) verwendet. Der Sensorbaustein und der Temperaturfühler werden nun verschiedenen Temperaturen ausgesetzt und der Sensorbaustein gibt seine ADC-Werte weiter (Tabelle: 5.1). Es wurde festgestellt, dass U_{ref} annäherungsweise über die Temperatur konstant bleibt, hier war der ADC Wert 2768 ± 1 . U_{ref} wurde ebenso mittels eines Multimeters gemessen und es ergab sich eine Spannung von $U_{ref} = 2.39\text{ V}$. Die mit dem NiCr-Ni Temperaturfühler gemessenen Temperaturen wurden mithilfe von Gleichung 5.4 und 5.5 in Spannungen verrechnet, welche theoretisch an dem NTC anliegen müssten. Diese theoretischen Spannungen wurden genommen, entgegnen den ADC-Werten gesetzt und einen linearen Fit mit QtiPlot erstellt. Die Gerade (Gl.: 5.1) kam

dabei heraus und sie wurde auf die ADC-Werte der Tabelle 5.1 angewendet, um dann mithilfe von den Gleichungen 5.2 und 5.3 die Temperaturen zu berechnen, die der Sensorbaustein schlussendlich anzeigt. Diese berechneten Temperaturen des Sensorbausteins wurden dann den gemessenen Temperaturen des Temperaturfühlers in der Tabelle 5.1 verglichen, die grösste Abweichung war 0.23 K bei 39.2 °C, bei welchen der Sensorbaustein 39.43 °C anzeigen würde. Der Grund dieses Verfahrens ist, dass U_{ref} leicht unterschiedliche Werte annehmen kann, da der DAC nicht genau ist, vereinfacht gesagt wurde im Bereich von $U_{ref} = 2.39$ linearisiert. U_{ref} wird wie U_{ntc} gemessen, was bedeutet dass es keine Rolle spielt ob, $U_{ref} = 2.30$ V oder 2.4 V ist.

Berechnungen zur Temperaturmessung:

$$U = ADC \cdot m_{sensor} + b_{sensor} \quad (5.1)$$

$$\frac{R_T}{R_V} = \frac{U_{ntc}}{U_{ref} - U_{ntc}} \quad (5.2)$$

$$T = \frac{1}{\frac{1}{T_N} + \frac{1}{B} \cdot \ln(\frac{R_T}{R_0})} \hat{=} \frac{1}{\frac{1}{T_N} + \frac{1}{B} \cdot \ln(\frac{R_T}{R_V})} \quad (5.3)$$

$$R_T = R_0 e^{B \left(\frac{1}{T} - \frac{1}{T_0} \right)} \quad (5.4)$$

$$U_{ntc} = \frac{R_T}{(R_V + R_T)} \cdot U_{ref} \quad (5.5)$$

Konstanten zur Temperaturmessung:

$$m_{sensor} = 0.0008155002 \text{ V}$$

$$b_{sensor} = 0.1369856 \text{ V}$$

$$R_V = 100 \text{ k}\Omega \text{ (Vorwiderstand)}$$

$$R_0 = 100 \text{ k}\Omega \text{ (Widerstand des NTCs bei } 25 \text{ }^\circ\text{C})$$

$$B = 4250 \text{ K (B-Konstante des NTCs)}$$

Variablen zur Temperaturmessung:

U_{ntc} (Spannung über NTC)

U_{ref} (Spannung über Vorwiderstand und NTC)

U (Spannung allgemein)

ADC (ADC-Wert allgemein)

T (momentante Temperatur in Kelvin)

Temperatur in °C (Therm 2250-1)	ADC Wert von U_{ntc}	Temperatur in °C (Sensorbaustein)	Abweichungen in °C
-4.6	2254	-4.42	0.18
0.6	2119	0.65	0.05
5.6	1966	5.73	0.13
10.2	1826	9.99	-0.21
14	1687	14.02	0.02
20.2	1474	20.02	-0.18
25.1	1300	24.93	-0.17
29.7	1138	29.64	-0.06
34.3	980	34.50	0.20
39.2	832	39.43	0.23
44	709	43.93	-0.07

Tabelle 5.1: Mit dem Therm 2250-1 aufgenommene Temperaturwerte und die ADC Werte von U_{ntc} , welche zu den Temperaturen des Sensorbausteins berechnet wurden, dazu die Abweichungen der Temperaturen voneinander.

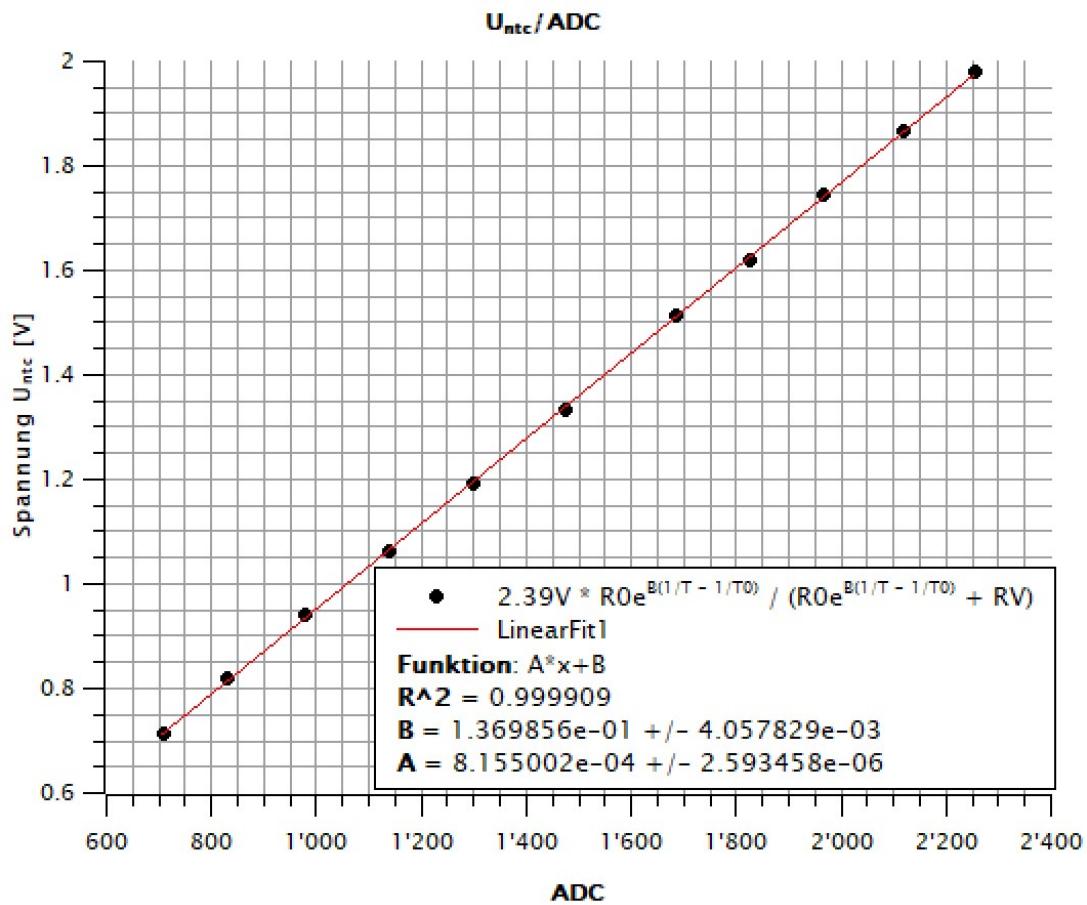


Abbildung 5.12: $U_{ntc,berechnet}/ADC$

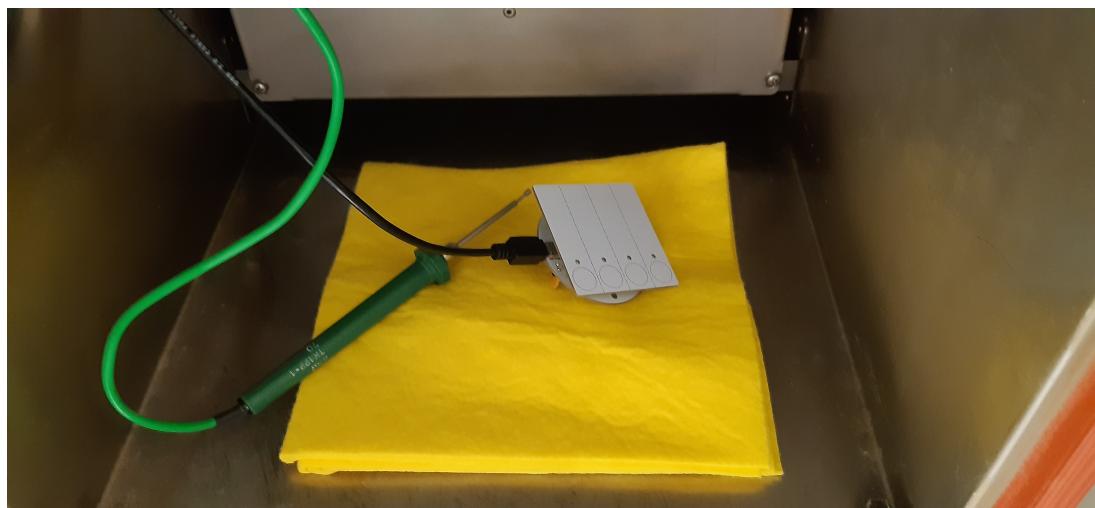


Abbildung 5.13: Temperaturmessung im Klimaschrank

5.7 Programmcode Aktorbord

Die Aufgabe des Aktorbord besteht darin, dass Befehle empfangen, verarbeitet und ausgeführt werden. Es befinden sich vier Relais auf dem Bord, welche 230 Volt schalten können, diese werden mit Digitalen IO Pins angesteuert. Eine weitere Aufgabe ist die Ausgabe von zwei DC-Spannungen 0-10 Volt. Die jeweilige Spannung entsteht durch ein PWM Signal. Eine letzte Aufgabe ist, 0-10 Volt einlesen. Das Eingangssignal gelangt über einen Spannungsteiler an den AD-Wandler. Der Mikrocontroller wertet das Signal aus und generiert eine MQTT-MESSAGE welche in einem Periodischen Zyklus published wird.

5.7.1 Übersicht

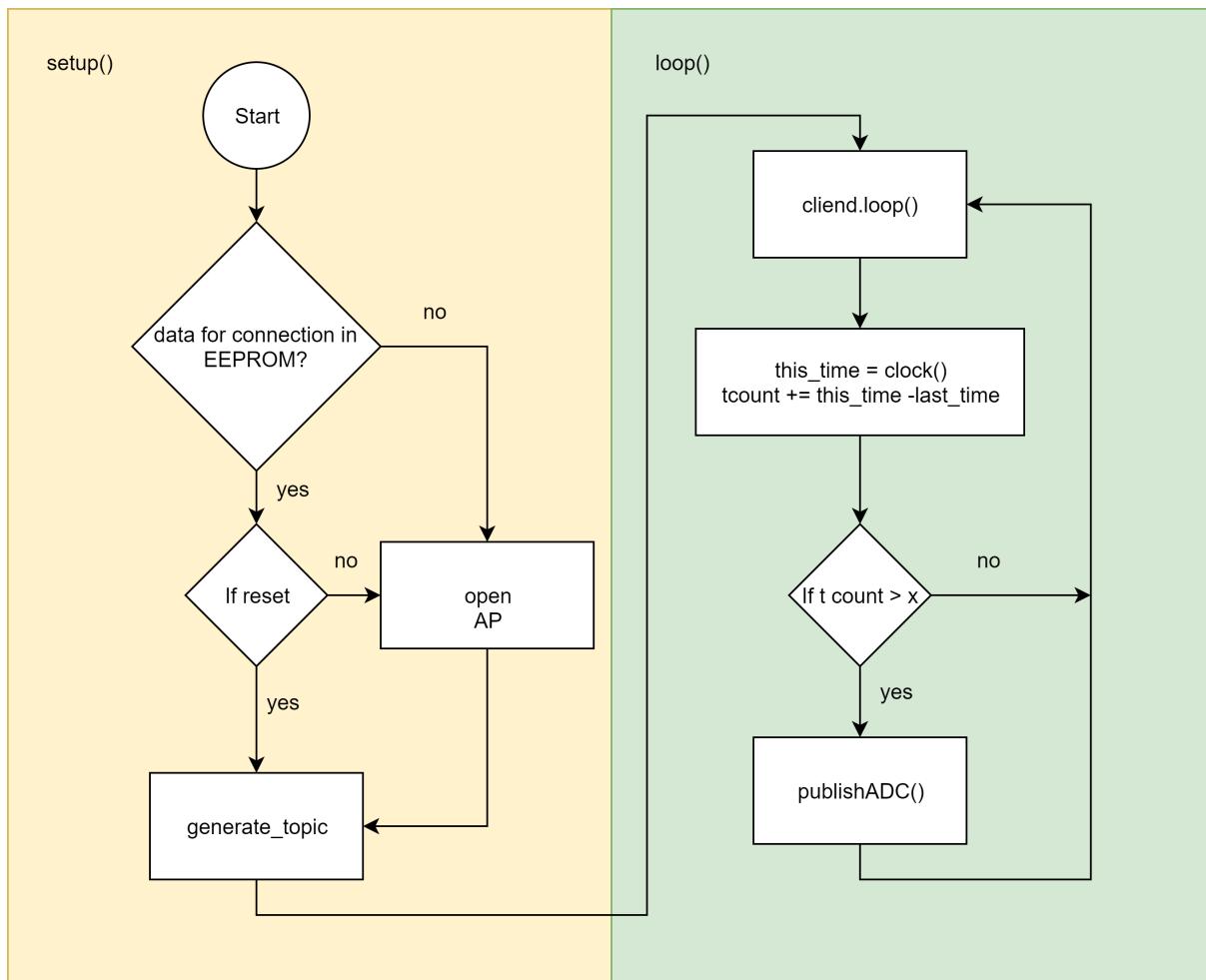


Abbildung 5.14: In dieser Abbildung ist das Statediagramm vom Aktorbord abgebildet

5.7.2 **setup()**

In der Abbildung ist zu erkennen, dass genau der gleiche Ablauf wie beim Sensorprint 5.6.2 statt findet. Wird aber der Programm Code selber betrachtet werden andere Bezeichnungen wie andere Definitionen von pinMode() usw. im Bezug zum Sensorbord festgestellt werden.

5.7.3 **loop()**

Im loop() wird als erstes die Funktion clien.loop() aufgerufen. Diese Funktion ist im wesentlichen zuständig, dass MQTT Befehle empfangen und verarbeitet werden. Sie wird anschliessend ausführlich erläutert. In einem weiteren Schritt wird wie im loop() vom Sensorbord beschrieben 5.6.3, Periodischer Zyklus erstellt welche nur alle 10 Sekunden ausgeführt wird. In diesem Zyklus befindet sich die Funktion publishADC, welche die gemessenen Werte von den 0-10 Volt Eingängen als MQTT-Message published.

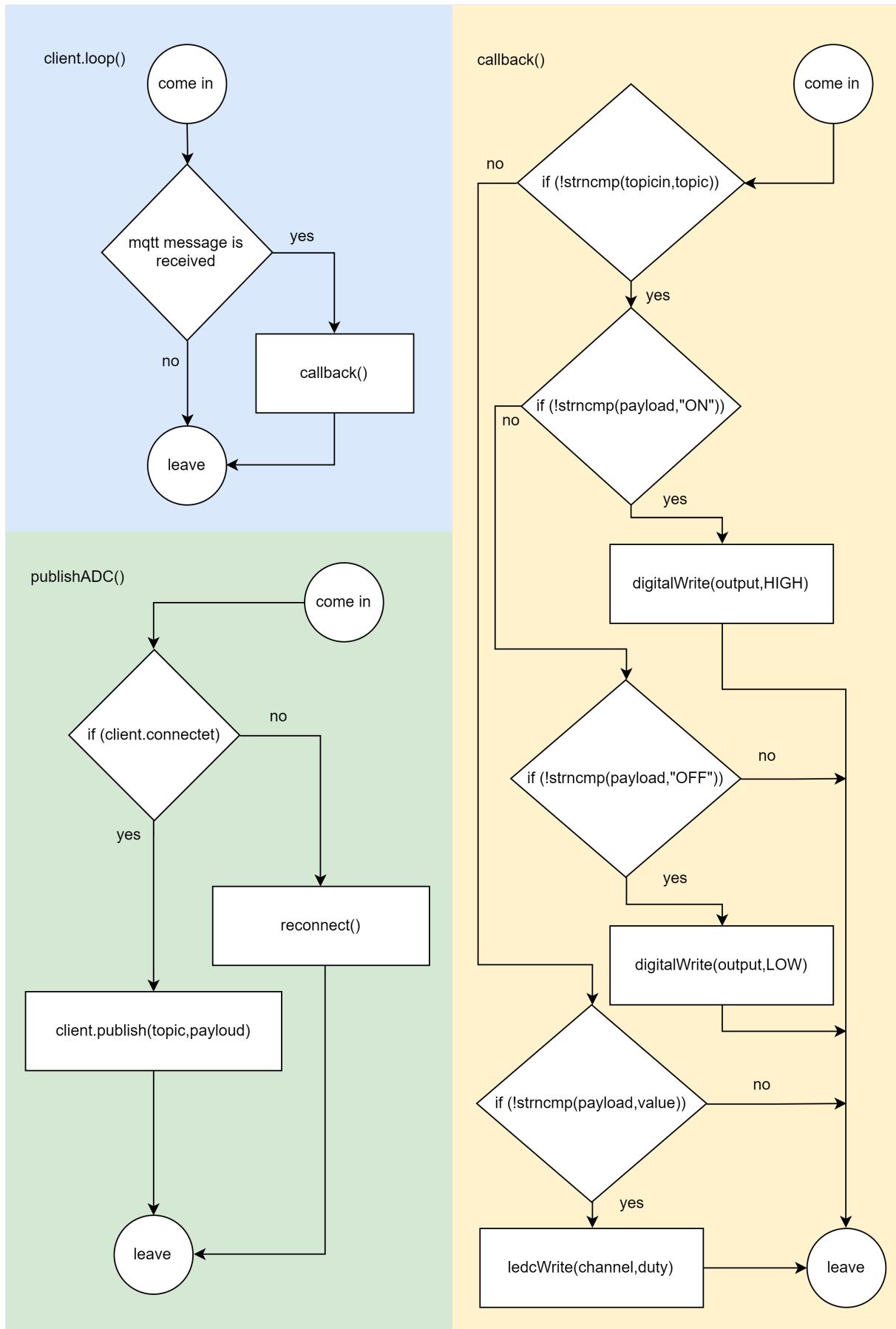


Abbildung 5.15: In dieser Abbildung sind die Funktionen vom Sensorboard abgebildet

5.7.4 client.loop()

Das Objekt *client* wurde aus dem PubSubClient gebaut, wo der `loop()` implementiert wurde. Als erstes wird die Verbindung zum MQTT-Broker überprüft, dann bei Bedarf die MQTT-Nachricht empfangen und vorbereitet, dass sie in der Funktion `callback()` genutzt werden kann. `callback()` wird aufgerufen.

5.7.5 callback()

In dieser Funktion wird als erstes der Inhalt von der Empfangenen Topic überprüft, fällt der Vergleich positiv aus wird der Inhalt der Payload überprüft. Die vier Verschiedenen Relais und die zwei Analogausgänge unterscheiden sich an Hand der Topic. Bei den Relais ist die Payload ON oder OFF und das Relais wie auch das Led des entsprechenden Relais wird in den geforderten Zustand gesetzt. Trifft die Topic auf ein Analog Ausgang wird nach Umwandlung der Payload von einem String in ein Float, das PWM-Signal für den entsprechenden Ausgang gesetzt. Den Duty cycle für das PWM Signal wird berechnet indem die gewünschte Spannung voltage folgender Massen verrechnet wird : $(voltage/3.2 \cdot 4095)/3.25$. 3.2 sind es, weil die Verstärkung 3.2 beträgt und 3.25, weil das die Amplitude des PWM Signales ist. Leider kann die Amplitude abweichen und ist nicht sehr genau. Mehr zur Genauigkeit in der Validierung.

5.7.6 publishADC()

Mit dieser Funktion werden die 0-10 Volt Eingänge ausgewertet und Resultate als MQTT-Nachricht versendet. Der jeweiligen Messreihe am ADC wird der Mittelwert berechnet, welcher dann von einem float in ein char-Array umgewandelt wird. Als nächstes wird der char-Array und die entsprechende Topic vom PupsubClient veröffentlicht.

5.8 Programmcode Openhab

Der Aufbau des Systems besteht aus verschiedenen Komponenten welche in nachfolgender Tabelle aufgelistet sind

Bezeichnung	Beschreibung
Bindings	Schnittstellen verknüpft verschiedene Dienste miteinander
Things	Definition von Gerät, Verbraucher, Teilnehmer des Systems
Channel	Verbindung zwischen Thing und Item
Item	Repräsentiert Informationen des Gerätes, Schalter, Label usw.
Rules	Festgelegte Regeln für automatische Abläufe
Sitemaps	Benutzeroberfläche, präsentiert Informationen

Tabelle 5.2: Komponenten Openhab Software [16]

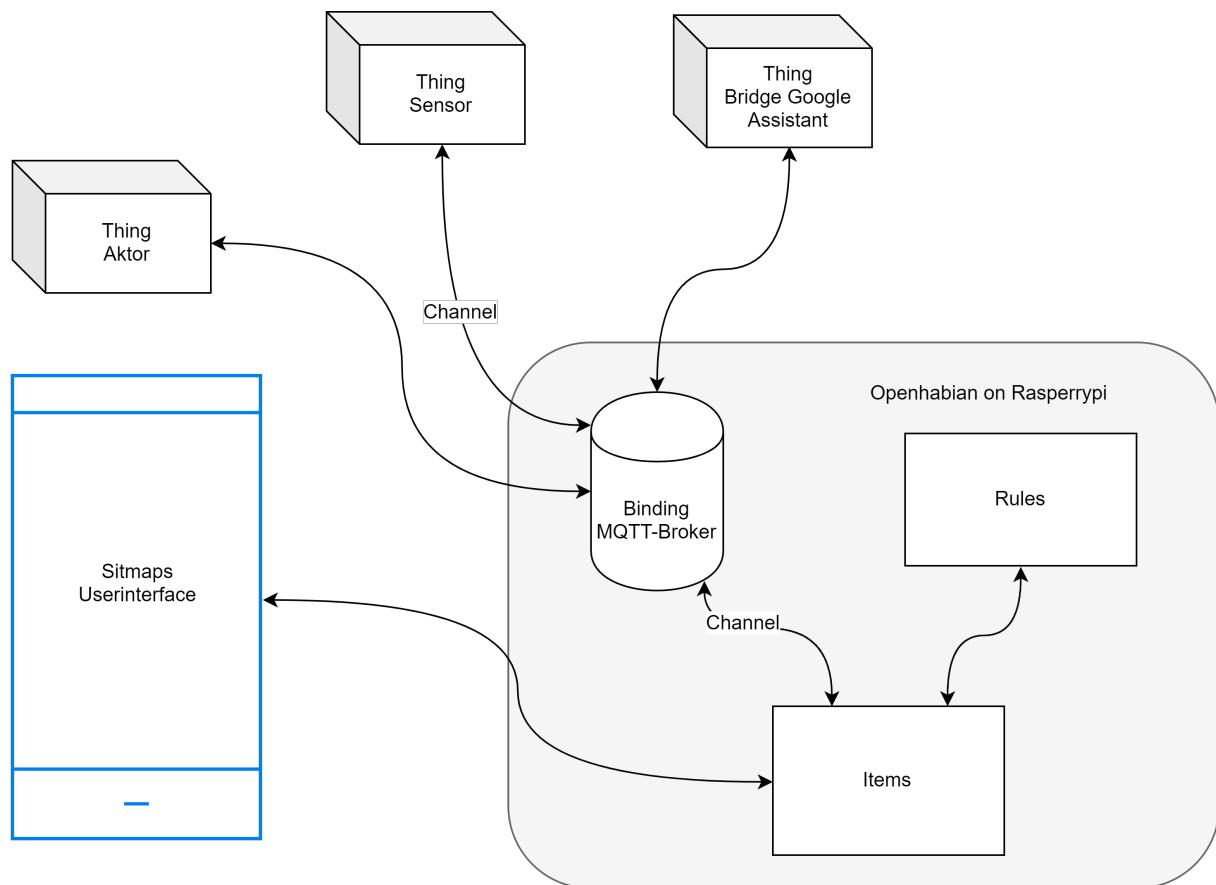


Abbildung 5.16: Komponenten und Verbindungen von Openhab

5.8.1 Bindings

Als Schnittstelle von den Items zu den Things wird ein MQTT-Broker benötigt. Um die Systemzuverlässigkeit zu steigern wurde ein eigener Broker installiert, so kann die Kommunikation auch ohne Netzwerkanschluss ans Öffentliche Netz funktionieren. Ein weiterer Vorteil ist die Sicherheit, es kann auf Passwörter verzichtet werden, da kein Zugriff von ausserhalb des Home-Netzwerk möglich ist.

5.8.2 Things

Als Geräte wurden drei Komponenten hinzugefügt, welche in der Abbildung 5.16 zu erkennen sind. Zum Aktor Thing gelangen im ganzen 8 Channels, um die Relais einzeln anzusprechen wurde pro Relais eine MQTT-Topic erstellt welche je einen Channel verfügt und so mit je einem Item verbunden. Zwei Channel sind für die 0-10 Volt Eingänge und zwei weiter Channel für die 0-10 Volt Ausgänge. Das Sensor Thing verfügt 5 Channel jeder Taster einzeln und ein Channel für die Temperaturmessung.

5.8.3 Channel

Die Channes sind die Verbindungen von den Geräten zu den Items also den Software-Zustände, in diesem Projekt werden alle möglichen Fähigkeiten der Geräte genutzt und mit einem Channel gebunden.

5.8.4 Item

Das Item zeigt den Status des Verbrauchers oder den gemessenen Wert eines Sensors an. Items werden verwendet wenn Regeln definiert werden, ebenso sind sie mit den Channels verlinkt und können einzeln oder als Gruppen auf dem Sitmap genutzt werden. Als anwendung eines Icons können verschiedene Typen gewählt werden. In diesm Projekt wird in erste Linie der normale Switch verwendet welcher in den Zustand ON oder OFF geschalten wird. Für die 0-10 Volt ausgänge werden Dimmer verwendet die als Slider in der Sitmap angezeigt wird und Sie generieren je nach Position einen Wert zwischen 0-1. Um die Messwerte an den 0-10 Volt Eingängen zu verwenden werden die Items als Number genutzt.

5.8.5 Rules

Automatische Prozesse werden mit i Rules definiert. Um das System Benutzerfreundlicher zu Gestalten werden in den Rules die Befehle der Taster verarbeitet und die Entsprechenden Befehle an die Relais generiert. So kann gewährleistet werden, dass der Kunde selber keine Änderungen an den Aktoren und Sensoren selber vornehmen muss. Die Rule Syntax basiert auf Xbase [17]. Um die Aufgaben der Befehls Weiterleitung zu übernehmen bestehen die Ruls im wesentlichen aus when und then. In diesem Fall sind sie im Teil when, auf den Empfang des jeweiligen Update getriggert. Somit wird mit einem Update des Status der Teil then ausgelöst, wo sich eine if Bedingung befinden. In diese Bedingung wird der Stus überprüft

5.8.6 Sitmaps

5.8.7 Lizenzen

Die Bibliotheken welche in den Kapiteln 5.5.1 , 5.4 erwähnt wurden, sind freie Softwarepakete und können unter der Bedingung der GNU Lesser General Public Lizenz (LGPL) geändert werden. Die LGPL gibt die Freiheit das Programm, für jeden Zweck auszuführen, anzupassen und die Änderungen zu veröffentlichen. [18].

anpassen
auf github
min 1 ganze Seite,
veröffentlichen usw

5.9 Server und Broker

Als Server wird ein Versuch aufgebaut, in dem ein Raspberry Pi der 4 Generation als inhouse Server verwendet wird. Auf dem Markt sind gibt es unzählige kostenlose Online-MQTT-Broker, bei diesen aber Zuverlässigkeit und Diskretion nicht den Projekt Bedingungen entspricht. Daher

anpassen

kann entweder eine teure Cloud-Server Lösung online gekauft oder ein eigener Broker eingerichtet werden. In diesem Projekt wird auf das Raspberry ein MQTT Broker installiert, dazu wird der viel verbreitete Mosquitto Broker getestet. Der Mosquitto Broker ist Open Source von Eclipse und befindet sich bereits in den Repositoris der betreffenden Distribution. Möglich ist aber auch direkt den Server von openHAB (folglich: Kapitel 5.4.4) zu verwenden.

Inbetriebnahme Raspi

In diesem Artikel wird erklärt wie das Raspi in Betrieb genommen wird und ins gleiche Subnetz wie der Host verbunden wird. Nach dieser Inbetriebnahme können Befehle einfach mit Secure Shell (ssh) ausgeführt werden. Die Verbindung wird mit dem integrierten Funkchip welcher ab dem Modell Pi 3 vorhanden ist, hergestellt. Als erstes wird die Micro-SD-Karte des RasPis neu formatiert. Das Betriebssystem Raspian Booster Lite steht [19] zur Verfügung es ist ein Java SE Plattform Produkt und kann unter den Oracle Binary Code Licence Bedingungen verwendet werden. Um das Betriebssystem erfolgreich auf die Micro SD Karte zu flashen wird das Programm Etcher [20] verwendet. Um die Secure Shell nach dem Boot Vorgang zu benutzen wird ein leeres Textdokument im Boot Ordner erstellt mit dem Namen `ssh`, ohne Endung `.txt`. Danach können Netzwerkzugangsdaten in einem weiteren Textdokument `wpa_supplicant.conf` mit den lokalen Wlan Zugangsdaten erstellt werden, siehe nachfolgende Abbildung 5.17.

```
ctrl_interface=DIR=/var/run/wpa_supplicant GROUP=netdev
update_config=1
country=<your_ISO-3166-1_two-letter_country_code>

network={
    ssid="LA7722"
    psk="490f2490"
}
```

Abbildung 5.17: Konfiguration File wpa_supplicant

Im Lokalen Netzwerk kann nun kontrolliert werden ob sich ein Gerät also das RasPi verbunden hat und die IP-Adresse wird angezeigt. Mit dem Konsolenbefehl `ssh pi@192.168. . .` ist ein Login auf das RasPi möglich. Der Benutzername lautet `pi` und das Passwort `raspberry`. Die Netzwerkzugangsdaten können mit dem Befehl
`'sudo nano /etc/wpa_supplicant/wpa_supplicant.conf'` geändert werden.

Mosquitto

Als erstes, vor einer neuen Installation, soll das System des Raspberrys auf den neusten Stand gebracht werden, dies kann mit dem Befehl `'sudo apt-get update'` geschehen. Mit dem Befehl `'sudo apt-get install mosquitto'` wird der Server installiert und ist sofort einsatzbereit [21]. Beim installierten Mosquitto-Broker kann nun in einem Konfigurationsfile, Benutzer und Passwort generiert werden. Standartkonfigurationen sind durch die Installation bereits angelegt worden, wobei zusätzliche Einstellungen als Datei im Verzeichnis unter `'/etc/mosquitto/conf.d/'` abgelegt werden. Mit dem Befehl `'sudo mosquitto_passwd -c /etc/mosquitto/mqttpasswd systemreader'` wird der Benutzer Systemreader erstellt, das Passwort muss anschliessend festgelegt werden. Es wurde noch ein weiterer Benutzer `ravpi01` erstellt, wobei dann im Befehl zur Benutzererstellung das `'-c'` weggelassen werden muss sonst wird der erste Benutzer überschrieben. Die erstellten Benutzer können unter dem Befehl `'sudo nano /etc/mosquitto/mqttpasswd'` bearbeitet werden siehe Abbildung 5.18.

```
GNU nano 3.2                                     /etc/mosquitto/mqttnpasswd
systemreader:$6$nn9w4jx61FQGWcz$K9rawnP7BF0IjWrLUDZxnuv3zBQNFUj4ne6MCBQGBusUi3U3F2IsvxTmnpmlrsJzvRjCUvgItPHE9ZtFnPNNA==

revpi01:$6$hhTP3rr800fpbmJ$PeP7G0r6WYDxHzeKurtln8eNSTaV9P+9ep0ehv3GjW7tWaJd8XAvqMUEA1sJJrrUpBoGcI7s8EIVkrc5IkzFEw==
```

Abbildung 5.18: Konfiguration File Mosquitto

Um Benutzern eine Berechtigung auf bestimmte Topics zu geben, wird eine weitere Datei erstellt. Topics helfen Daten Stream auseinander zu halten. So können zum Beispiel Daten von einem Temperatursensor, der im Wohnzimmer misst, genau von den Daten des Sensors, welcher die Temperatur im Schlafzimmer misst, unterschieden werden. Die Datei wird mit dem Befehl '/etc/mosquitto/user.acl' angelegt. In Abbildung 5.19 ist dem systemreader die Berechtigung gegeben, dass er alles lesen darf und dem Benutzer revpi01, dass er nur in nur in 'temperatursensor1/revpi01/' schreiben und lesen darf.

```
GNU nano 3.2                                     /etc/mosquitto/user.acl
# Systemreader muss alles lesen können um es zu verarbeiten
user systemreader
topic read #
# Erster RevPi darf nur hier lesen und schreiben
user revpi01
topic readwrite temperatursensor1/revpi01/
# This affects all clients.
pattern write $SYS/broker/connection/%c/state
```

Abbildung 5.19: Konfiguration Topic Berechtigungen

Zu den beiden erstellten Dateien werden nun dem Mosquitto Konfigurationen hinzugefügt, mit dem Befehl 'sudo nano /etc/mosquitto/conf.d/secure.conf', Es öffnet sich ein File, bei welchem der Text wie in Abbildung 5.20 verfasst werden kann.

```
GNU nano 3.2                                     /etc/mosquitto/conf.d/secure.conf
allow_anonymous false
password_file /etc/mosquitto/mqttnpasswd
acl_file /etc/mosquitto/user.acl
```

Abbildung 5.20: Konfigurationen File hinzufügen

Der Mosquitto-Server soll nach den Konfigurationen neu gestartet werden. Mit dem Befehl 'sudo systemctl restart mosquitto' wird ein reboot durchgeführt und anschliessend kann mit dem Befehl 'sudo systemctl status mosquitto' den Staus des Mosquitto-Servers geprüft werden. Läuft das System korrekt, ist ein grüner Punkt ersichtlich, folglich Abbildung 5.21.

```
● mosquitto.service - Mosquitto MQTT v3.1/v3.1.1 Broker
   Loaded: loaded (/lib/systemd/system/mosquitto.service; enabled; vendor preset: enabled)
   Active: active (running) since Sun 2019-12-29 13:06:20 GMT; 18s ago
     Docs: man:mosquitto.conf(5)
           man:mosquitto(8)
 Main PID: 2319 (mosquitto)
    Tasks: 1 (limit: 2200)
   Memory: 628.0K
      CGroup: /system.slice/mosquitto.service
              └─2319 /usr/sbin/mosquitto -c /etc/mosquitto/mosquitto.conf

Dec 29 13:06:20 raspberrypi systemd[1]: Starting Mosquitto MQTT v3.1/v3.1.1 Broker...
Dec 29 13:06:20 raspberrypi mosquitto[2319]: Loading config file /etc/mosquitto/conf.d/secure.conf
Dec 29 13:06:20 raspberrypi systemd[1]: Started Mosquitto MQTT v3.1/v3.1.1 Broker.
```

Abbildung 5.21: Mosquitto Status

6 Hardware

6.1 Sensorbaustein

In diesem Unterkapitel werden die Anforderungen und die Hardware des Sensorbausteins behandelt. Vom Auftraggeber ist ein Sensorbaustein mit 4-Tasten-Feld und Temperaturfühler gefordert. Der Sensorbaustein wird dabei ähnlich einer Unterputzsteckdose montiert und hat eine WLAN-Schnittstelle um die Sensordaten auszulesen. In der Abbildung 6.1 ist die Übersicht des Sensorbausteins dargestellt. Der Baustein wird über ein AC/DC Wandler der an der Hauselektrik angeschlossen werden kann mit 5V Spannung versorgt. Da der Mikrocontroller auf 3.3V läuft, wird mithilfe eines weiteren Spannungswandlers die 5 V zu 3.3 V gewandelt, so kann auch der USB Anschluss als Spannungsversorgung dienen. Um den Mikrocontroller zu programmieren steht eine USB zu UART Verbindung, Taster zum Debuggen, Reseten oder Programmieren und eine Zustands-LED zur Verfügung. Um die Temperatur zu erfassen wird ein NTC verwendet. Da die mitgelieferte Meander-Antenne des ESP32 nur eine kleine Abstrahlleistung hat, kann optional noch eine grössere Antenne, wie z.B. eine zertifizierte grössere Patch-Antenne über RP-SMA angeschlossen werden, falls der ESP32S ausgewählt wird. Der Anwender wird ein Touch-Tastenfeld, sowie dazugehörige LEDs, für die Interaktion mit dem Baustein zur Verfügung haben. Zusammenfassend besteht der Sensorbaustein im wesentlichen aus 3 Teilen, nämlich der Spannungsversorgung, der Hauptplatine und der Frontplatte.

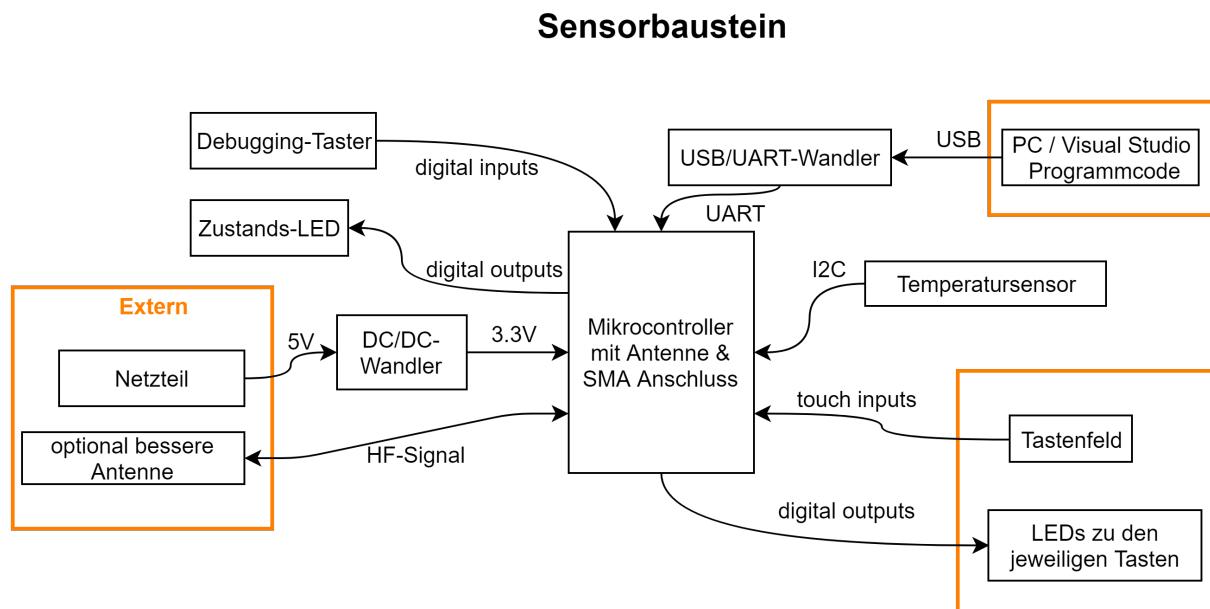


Abbildung 6.1: Übersicht Sensorbaustein

6.1.1 Übersicht Frontplatte

Die Frontplatte besteht aus einem 2-Lagen Print. Auf der Vorderseite (Abb. 6.2) sind vier runde Kupferflächen angebracht, welche als Touch Fläche fungieren. Wenn nun ein Anwender eine dieser Fläche berührt, wird die Kapazität zwischen dieser Fläche und Ground vergrössert. Natürlich befindet sich ein Lötstopplack zwischen Finger und Kupferfläche der Dielektrikum darstellt. Der ESP32 hat intern Touchsensoren verbaut, welche ein Signal auf auf die Pins geben und dann vermutlich mithilfe eines Spannungsteilers messen ob, dass Signal grösser oder kleiner wird. Zu den Tasten gibt es jeweils eine LED, welche von der Rückseite montiert werden. Der NTC ist auf der Rückseite der Frontplatte angebracht. Um die Temperatur der tatsächlichen Raumluft

zu messen wurde auf der Frontplatte eine Kupferfläche auf der Aussenseite angebracht, welche die Wärme via Vias zum NTC weitergibt. Als Verbindung zur Hauptplatine des Sensorbausteins ist ein 12-Pin Stecker mit 2.54 mm Rastermaß vorgesehen. Eine Randnotiz: Es wurde darauf geachtet, dass keine visuell störenden Vias, das optische Erscheinungsbild beeinträchtigen.

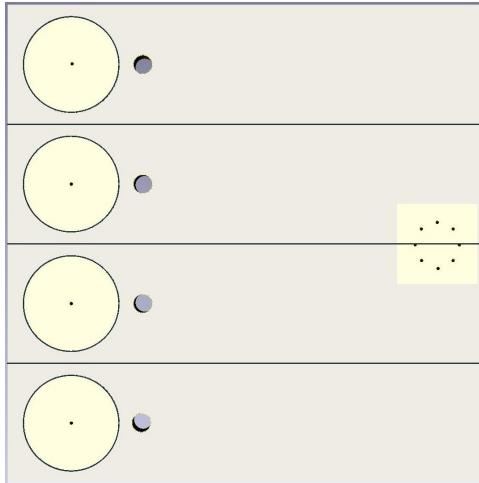


Abbildung 6.2: Frontplatte Vordersansicht

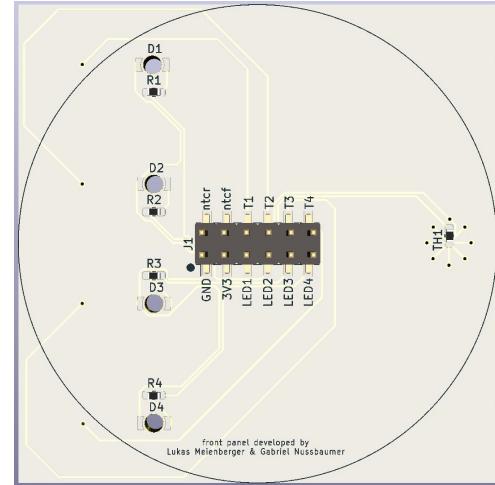


Abbildung 6.3: Frontplatte Rückansicht

6.1.2 Übersicht Hauptplatine

Auf der Vorderseite der Hauptplatine des Sensorbausteins (Abb. 6.4) befindet sich der ESP32, der Programmieranschluss über USB und den 5V/3V Wandler. Über die Buchse kann dann die Frontplatte angeschlossen werden, wobei auf die Richtung geschaut werden muss. Auf der Rückseite (Abb. 6.3) sind Shottky-Dioden, welche bei einem allfälligen ESD auf den Touchflächen greifen. Ebenso befinden sich dort Buttons, eine Status LED sowie 5V und RX/TX Anschlüsse. Randnotiz: Es wurde darauf geachtet, dass die Leiterbahnen zu den Dioden kürzer sind als, die zu den ADC Eingängen.

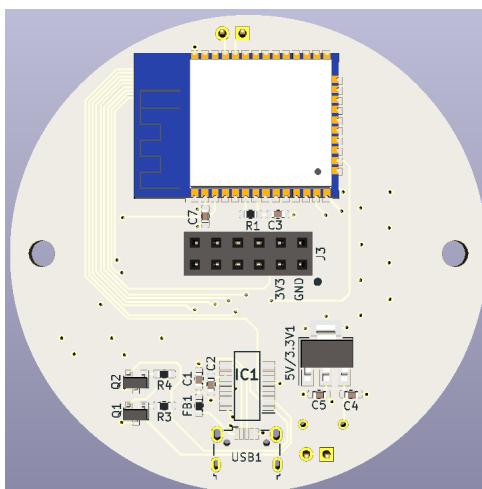


Abbildung 6.4: Hauptplatine Vordersansicht

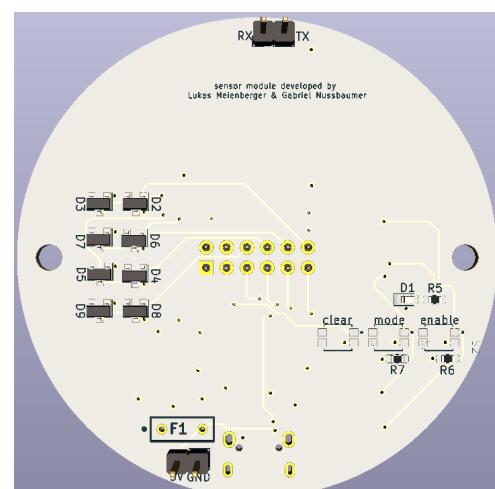


Abbildung 6.5: Hauptplatine Rückansicht

6.1.3 Übersicht Spannungsversorgung

6.1.4 Schutzbeschaltung

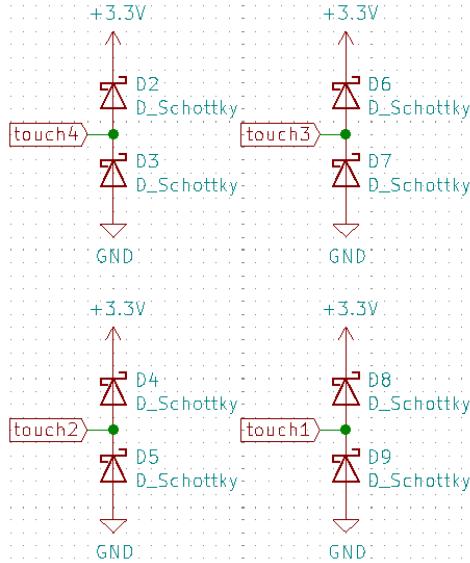


Abbildung 6.6: Shottky Dioden für ESD Schutz

6.1.5 Mikrocontroller

Um die Datenkommunikation über WLAN bereitzustellen wird entweder ein ESP32-WROOM oder der ESP32S, welcher im gleichen Formfaktor zur integrierten Antenne auch einen SMA Anschluss bietet, verwendet. Der ESP32 unterstützt Wi-Fi im Bereich von 2.4 GHz bis ca. 2.5 GHz [6]. Aus folgender Übersicht sind die zur Verfügung gestellten Ein-/Ausgänge des ESP32 zu entnehmen:

Name	Anzahl
Analog-to-Digital Converter (ADC) channels	18
SPI interfaces	3
UART interfaces	3
I2C interfaces	2
PWM output channels	16
Digital-to-Analog Converters (DAC)	2
I2S interfaces	2
Capacitive sensing GPIOs	10

Tabelle 6.1: I/O Uebersicht

Der ESP32 verfügt über alle benötigten Schnittstellen, die für den Sensorbaustein relevant sind. Im folgenden (Tabelle 6.2) sind die Inputs/Outputs des Mikrocontrollers (folglich Abb. 6.7), welcher im Sensorbausteins verwendet wird, aufgeführt:

Name	Anzahl
digital outputs für LEDs	5
digital inputs für Buttons	3
Capacitive sensing GPIOs für Touch Buttons	4
UART interface für Programmierung	3
I2C interfaces für Temperatursensor	3

Tabelle 6.2: I/O Sensorbaustein

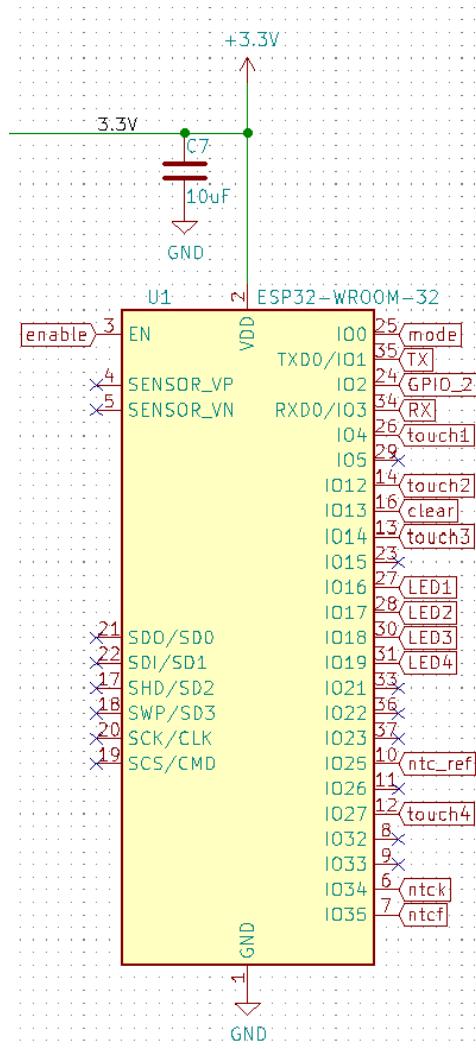


Abbildung 6.7: Mikrocontroller ESP32 im Sensorbaustein

6.1.6 Temperatursensor

Es wird der NTC NCU18WF104J60RB von Murata Electronics verwendet. Dieser hat den preislichen Vorteil gegenüber anderen Varianten, wie ein Temperaturfühler IC. Der verwendete NTC hat eine B-Konstante von 4250 K im Bereich 25/50 °C mit einer Toleranz von 2%. Der Widerstandswert des NTCs bei 25 °C beträgt 100 K mit einer Toleranz von 5%. Um die Temperatur zu ermitteln wird ein Spannungsteiler (Abb. 6.8) der aus einem 100 K ω Widerstand und dem NTC

besteht verwendet. Das Signal ntc_{ref} gibt eine Referenzspannung U_{ref} mithilfe eines DACs aus, da der DAC ungenau ist, wird dieses Signal mithilfe von $ntck$ eingelesen. Die Spannung über dem NTC U_{ntc} wird mit $ntcf$ gemessen und $ntcr$ ist mit Ground verbunden, welches eine separate Rückleitung zur Hauptplatine des Sensorbausteins verfügt, um allfällige Störeinflüsse zu vermeiden.

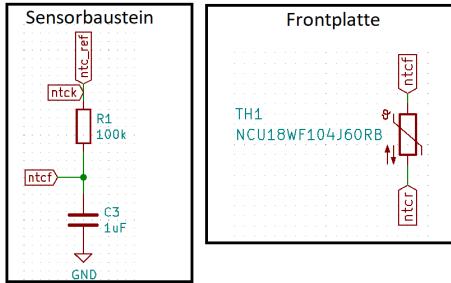


Abbildung 6.8: Schaltung Temperatursensor

6.1.7 Programmieranschluss

Der Mikrocontroller kann mittels eines USB to UART Wandlers programmiert werden. Hierzu wird der FT231XS-U verwendet. In Abbildung 6.9 ist das Schema abgebildet. Auf dem Schema sind dabei zwei Bipolartransistoren zu erkennen, welche es erlauben den ESP32 ohne drücken des Mode- und Enabletasters in den Programmiermodus zu versetzen. Falls es zu Komplikationen kommt steht aber auch die Option mittels des Enable- und Modetaster (Abb. 6.10) sich in den Programmiermodus zu versetzen offen. Dazu muss der Modetaster (auch während des ganzen Flashprozesses) gedrückt bleiben, dann mit dem Enabletaster mittels eines kurzen Betätigens den Reset ausgeführt werden und danach kann geflasht werden. Im Aktorbaustein befindet sich die gleiche Schaltung wieder. Falls man einen Systemreset machen möchte kann man den Clear Button betätigen. Die LED5 zeigt mittels eines kurzen Blinkens das Aufstarten des ESP32 an oder dass der ESP32 im Programmiermodus ist.

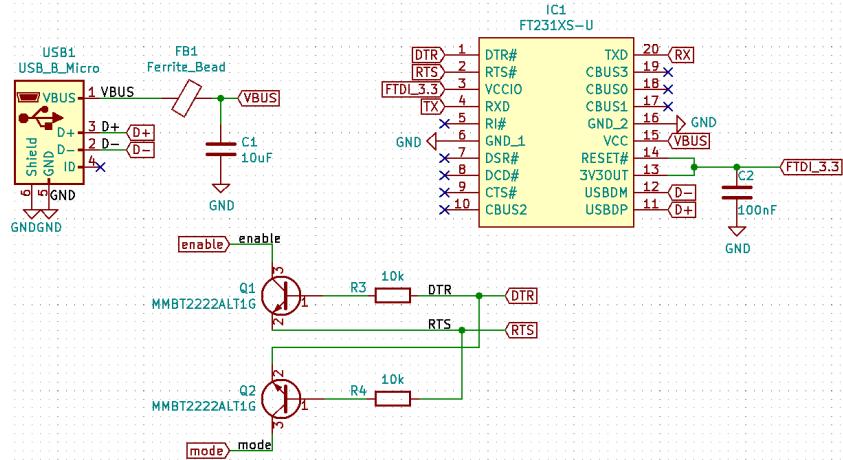


Abbildung 6.9: USB Anschluss

6.1.8 Spannungsversorgung

Der minimale Strom, welche die Spannungsquelle zur Verfügung stellen muss, ist laut Datenblatt vom ESP32 500 mA, wobei im Normalbetrieb 80 mA und im WiFi Sendebetrieb 160 mA

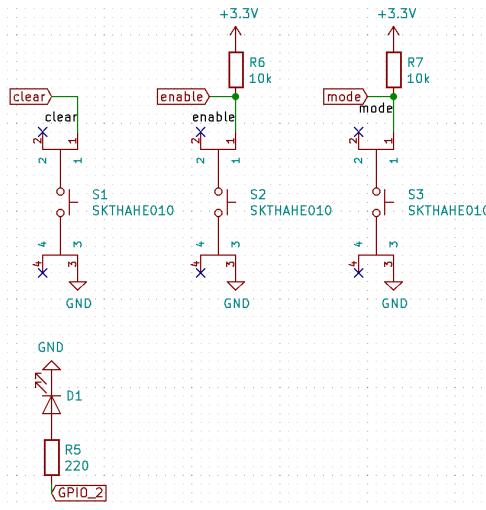


Abbildung 6.10: Buttons und LED auf Sensorbaustein

bis 260 mA gebraucht werden. Um den Sensorbaustein mit 5 V zu versorgen, macht es aus Platz gründen Sinn den 230 VAC zu 5 VDC Wandler separat und nicht auf der Hauptplatine zu haben. Dazu wurde der IRM-02-5 verwendet, welcher maximal 2 W zur Verfügung stellt. Der Mikrocontroller benötigt 3.3 V, jedoch soll der Sensorbaustein mit 5V betrieben werden können. Hierfür wird einen Spannungswandler eingesetzt. Der ausgewählte AP1117S33CTR hat einen maximale Input Spannung von 15V, eine maximale Dropoutspannung von 1.2 V bei 800 mA und ist, mit momentan 0.42\$ bei Digi-Key, günstig. Im Schema (Abb. 6.11) erkennt man, dass sowohl über USB wie auch über einen Stecker den Print mit 5 V versorgt werden können. Eingebaut ist eine PTC Sicherung sowie eine Diode die verhindern sollen, dass bei einem Kurzschluss oder ähnlichem der Sensorbautein anfängt grossen Schaden zu nehmen.

ist der Preis not-
wenig im Fachbe-
richt?

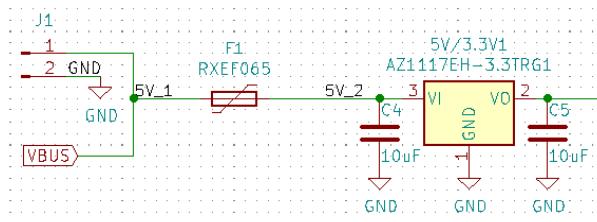


Abbildung 6.11: Spannungswandler Sensorbaustein

6.1.9 Platzstudie

Nun wird mittels einer Platzstudie überprüft ob der Sensorbaustein, mit den verwendeten Komponenten, wie eine Unterputzsteckdose eingebaut werden kann. Im Bild 6.12 ist eine Montageplatte für UP-Steckdosen abgebildet. Der blaue Kreis Zeigt dabei den Radius von 60 mm des Tasters bzw. Kleinkombination. Diese Masse wurden für die Dimensionen der Platine in Abbildung 6.13 übernommen. In Abbildung 6.14 ist zu erkennen wie der Sensorbaustein montiert wird. So wird die Spannungsversorgung mittels Distanzhalter an der Hauptplatine befestigt, welche wiederum an der Montageplatte angeschraubt wird. Die Fronplatte wird mit dem weißen Rahmen an die Hauptplatine gesteckt. Die Richtung des Steckers muss dabei beachtet werden, dazu dient der Markierungspunkt neben Stecker und Buchse. Die Abbildungen 6.15, 6.16 und 6.17 zeigen, wie der Sensorbaustein montiert aussieht.

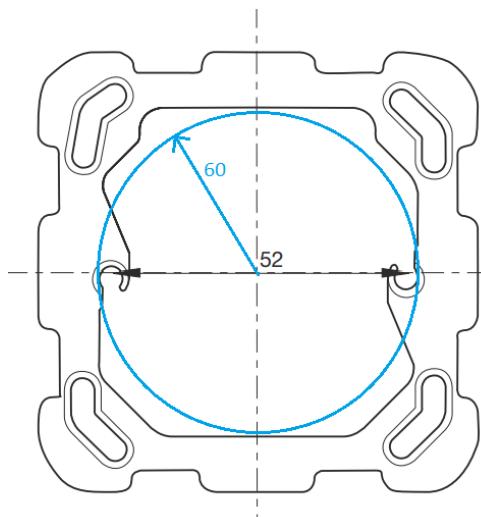


Abbildung 6.12: Montageplatte [22]

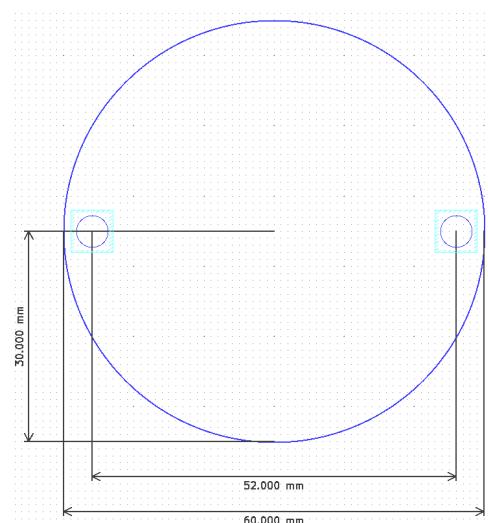


Abbildung 6.13: PCB Sensorbaustein Dimensionen



Abbildung 6.14: Montage des Sensorbausteins

6.2 Aktorbaustein

Im folgenden wird die Hardware des Aktorbausteins, ähnlich wie beim Sensorbaustein, beschrieben. Vom Auftraggeber ist ein Aktorbaustein mit 4 Relais, zwei Ausgängen 0..10 V und zwei Eingängen 0..10 V gefordert. Der Aktorbautein wird über 24V-Netzteil mit Spannung versorgt und mithilfe eines On-Off Schalters kann die Spannungsversorgung getrennt werden. Die Logik wird mit 3.3 V betrieben, dazu braucht es ein DC/DC Wandler der die 24 V in 3.3 V wandelt. Die Programmierschnittstelle ist dabei gleich wie beim Sensorbaustein (siehe Kapitel 6.1). Die Spannung der 0...10 V Ausgänge werden über PWM eingestellt und bei den 0...10 V Eingängen kommt der AD-Wandler des Mikrocontrollers zum Einsatz. Damit man weiß welche Relais geschaltet haben, werden LEDs zum Signalisieren verwendet. Um eine bessere Funkreichweite zu erzielen, kann bei dem Aktorbautein, wie beim Sensorbaustein, eine Antenne angebracht werden, angedacht ist die Verwendung einer zertifizierten Dipolantenne.

6.2.1 Mikrocontroller

Es wird wie schon im Sensorbaustein den ESP32 verwendet, dadurch kann garantiert werden, dass die WiFi-Systeme sich sowohl im Aktor- wie auch im Sensorbaustein sich in etwa gleich verhalten, wodurch der Entwicklungsaufwand minimiert wird. Die vom ESP32 benötigten I/Os

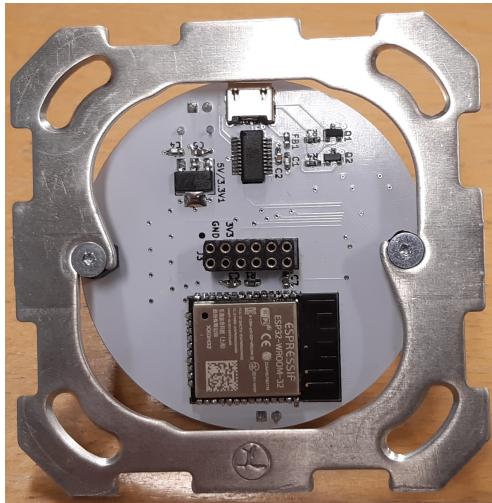


Abbildung 6.15: Montage des Sensors von vorne



Abbildung 6.16: Montage des Sensors von hinten

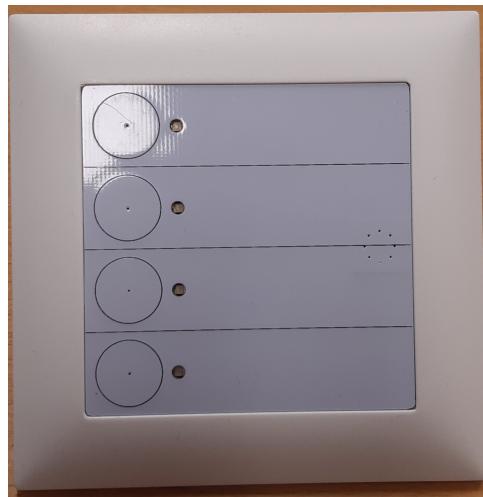


Abbildung 6.17: Frontansicht des fertig montierten Sensorbausteins

werden in der Tabelle 6.3 aufgelistet und in der Abbildung 6.19 erkennt man welche I/Os verwendet wurden. Der Programmieranschluss ist wie beim Sensorbaustein und wird nicht nochmals wiederholt.

Name	Anzahl
digital outputs für Relais & LED	10
digital inputs für Buttons	3
ADC inputs für „10 V“Eingänge	2
PWM outputs für „10 V“Ausgänge	2
UART Interface für Programmierung	3

Tabelle 6.3: I/O Aktorbaustein

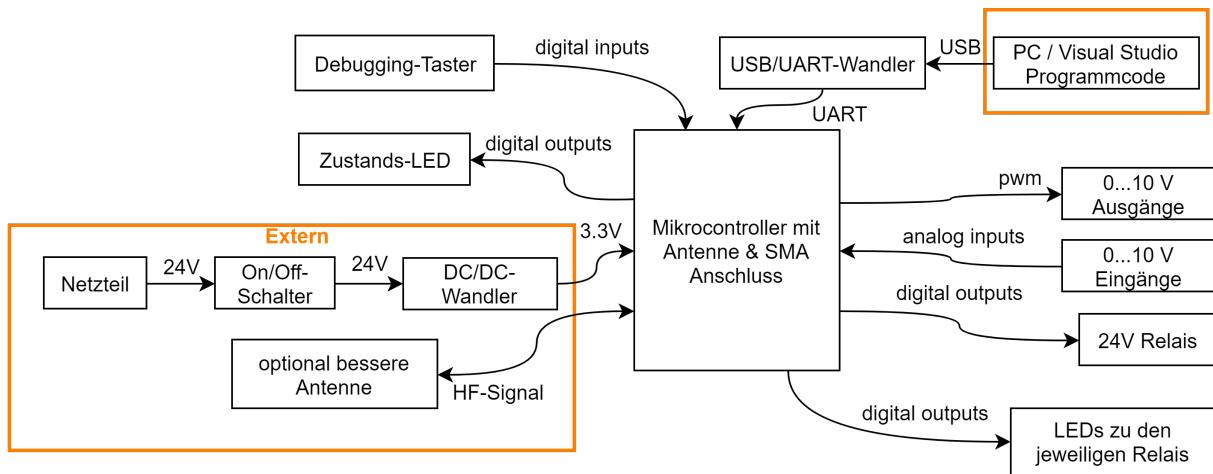


Abbildung 6.18: Übersicht Aktorbaustein

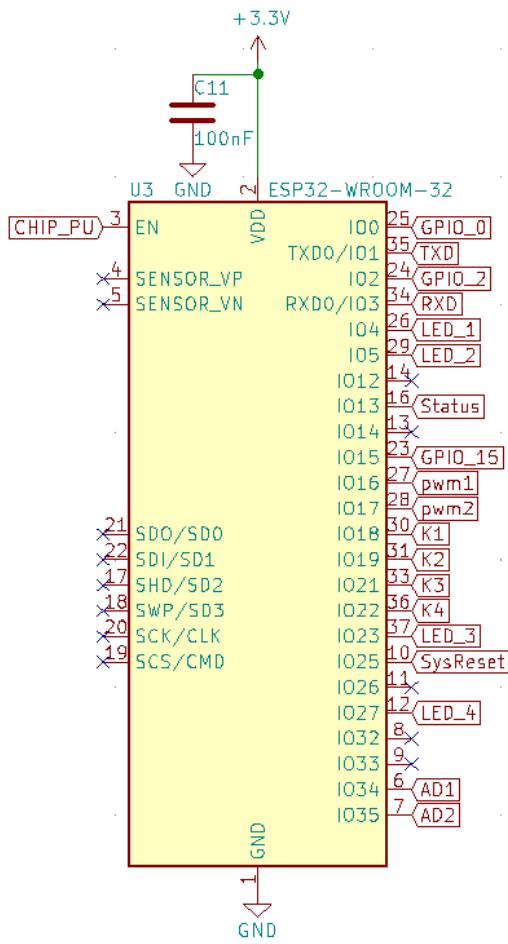


Abbildung 6.19: Mikrocontroller ESP32 im Aktorbaustein

6.2.2 Relais

Die Anforderungen an ein Relais sind, dass es 230 VAC schalten und die Relaisspule mit 24 VDC betrieben werden muss. In der Abbildung 6.20 ist die Schaltung für ein Relais abgebildet. Als

Relais wird ein G5LE-1-VD DC24 von Omron Electronics verwendet, welches mit den oben genannten Anforderungen kompatibel ist. Der maximale Schaltstrom beträgt 10 A und die maximale Schaltspannung 250 VAC oder 125 VDC. Die Nennspannung der Spule beträgt 24 VDC, dabei ist garantiert, dass die Spule noch bei 75 % also 18 V der Nennspannung anzieht und bei sicher 10 % der Nennspannung also 2.4 V loslässt. Mit dem Widerstand R_1 wird der Einschaltstrom auf 10 mA begrenzt, mithilfe der Freilaufdiode D1 kann die Selbstinduktionsspannung der Spule kurzgeschlossen werden und R_{24} ist ein Pull-Down-Widerstand, so dass der MOSFET sicher sperrt, falls der Output-Pin nicht angesteuert wird [23]. Als MOSFET wird der BSS123 eingesetzt, welcher sich typischerweise schon mit einer Steuerspannung von 1.7 V durchschaltet und eine Drain-Source-Spannung von bis zu 100 V vertragen kann. Um Energie zu sparen wird nach dem anziehen der Spule mittels eines PWMs die mittlere Spannung über der Spule gesenkt, ein kurzer Test hat ergeben, dass die verwendeten Relais bei 30 % der Nennspannung also 7.2 V sicher noch anziehen, was bedeutet, dass die Leistung von 400 mW auf 36 mW gesenkt wird.

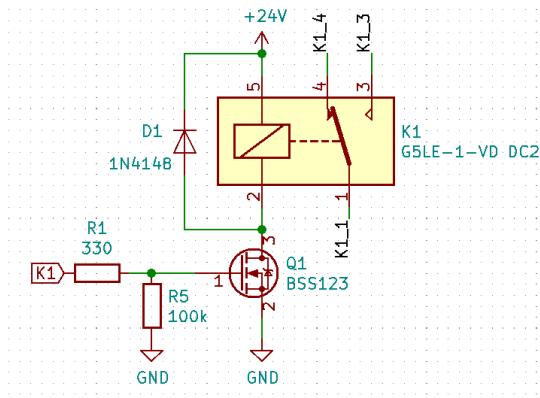


Abbildung 6.20: Relais im Aktorbaustein

6.2.3 Eingänge/Ausgänge 0..10 V

Die 10 V Eingänge werden mittels eines Varistors vor Überspannung geschützt (Abb. 6.21). Das Signal geht dann durch einen Puffer, damit die Signalquelle nicht belastet wird. Als Verstärker wird hierfür ein LM324A eingesetzt, da er sich gut als rail to rail OpAmp eignet. Als letztes wird mittels einer Spannungsteilers die obere Signalstärke von 10 V auf $10 V \cdot 22/(47+22) = 3.188 V$ beschränkt. Hier muss dann in der Praxis kalibriert werden, da die Widerstände Toleranz behaftet sind. Bei den 10 V Ausgängen wird jeweils ein PWM vom Mikrocontroller herausgegeben und dann das Signal mittels eines Tiefpasses geglättet (Abb. 6.22). Die Polfrequenz sowie die $-3dB$ Grenzfrequenz des Tiefpass erster Ordnung berechnet sich für einen 10 Bit AD Wandler und einen Quarz von 40 MHz, welcher im ESP32 verbaut ist, folgendermassen: 40 MHz Takt $\rightarrow 40 kHz$ PWM \rightarrow Zeitkonstante $\tau = 1000/40 kHz = 25 ms$ \rightarrow Zeit bis zum Endwert $t_{end} = \tau * \ln(1024) = 173 ms$ \rightarrow Grenzfrequenz $f_g = 1/\tau = 40 Hz$. Die Verzögerungszeit t_{end} ist im Übrigen gleich der Dauer bis die Spannung am Kondensator im Bereich von 1 LSB vom Endwert ist [24]. 173 ms Verzögerungszeit scheinen recht lange zu sein, wenn man diese Zeit verkürzen möchte, könnte man auf einen 8 Bit AD Wandler wechseln, wodurch die Polfrequenz auf 156 kHz angehoben wird. Ein anderer Trick besteht darin eine höhere Filterordnung zu wählen. Um eine Abschwächung von 1024 oder 60 dB des 40 kHz PWM Taktes zu erzielen, kann bei zweiter Filterordnung, welche 40 dB/dec Dämpfung hat, die 40 kHz nicht durch 3 Dekaden (Faktor 1000) sondern nur um 1.5 Dekaden (Faktor 31,6) teilen, um die neue Polfrequenz f_p herauszufinden. Hier macht es aber auch Sinn $-80 dB$ (Faktor 100) bei 40 KHz zu nehmen, um noch ein sauberes Ausgangssignal zu kriegen. Also ist die gewählte Polfrequenz

f_p bei 400 Hz , τ bei 2.5 ms und t_{end} bei 17 ms . Die Komponenten der Filterstufen wurden dann wie folgt gewählt: erste Stufe mit $R_1 = 3.9 \text{ k}\Omega$ & $C_1 = 100 \text{ nF}$ und die zweite Stufe mit $R_2 = 39 \text{ k}\Omega$ & $C_2 = 10 \text{ nF}$. Da $R_1 \cdot C_1 = R_2 \cdot C_2$ ist, ist die Polgüte $q_p = 0.5$, woraus resultiert, dass die Dämpfung bei der Polfrequenz $f_p = 400 \text{ Hz}$ einen Wert von -6 dB annimmt. Die -3 dB Grenzfrequenz ist folglich bei $f_g = f_p \cdot \sqrt{2^{1/2} - 1} = 257 \text{ Hz}$ [25] und die Dämpfung bei 40 kHz entspricht nach wie vor den gewünschten -80 dB . Nach dem Tiefpass gelangt das Signal in einen positiven Verstärker welcher die maximale Ausgangsspannung des ESP32 von 3.3 V auf theoretisch $3.3 \text{ V} \cdot (1 + 22/10) = 10.56 \text{ V}$ erhöht. An dieser Stelle muss auch wieder kalibriert werden, so dass die maximale Ausgangsspannung 10 V beträgt.

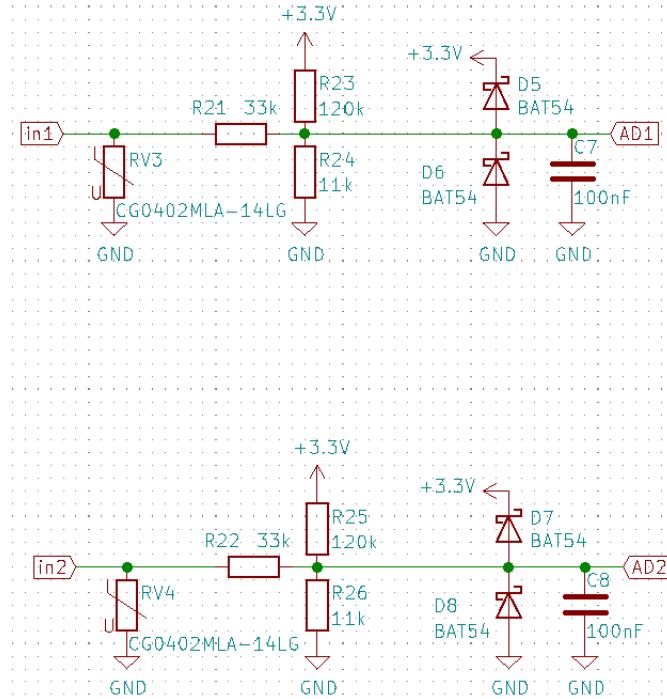


Abbildung 6.21: Eingänge 10 V Aktorbaustein

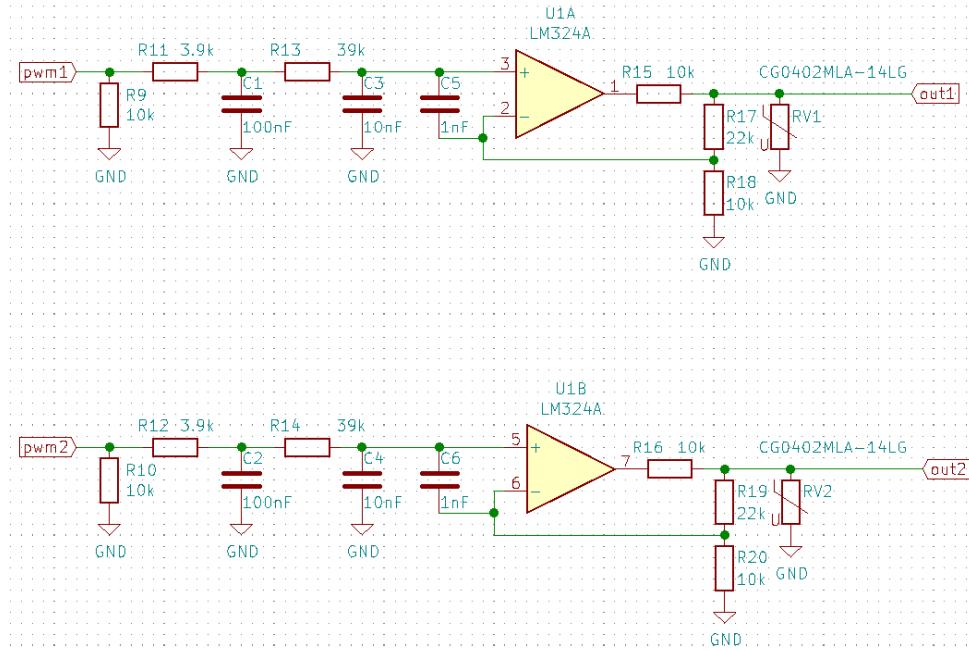


Abbildung 6.22: Ausgänge 10 V Aktorbaustein

6.2.4 Spannungsversorgung

Mithilfe eines üblichen 24 V Netzgerätes, welches einen Zylinderstecker 2.1 x 5.5 mm (engl. DC Barrel Jack) hat, kann der Aktorbaustein betrieben werden. So gibt z.B von XP-Power ein 18 W 24 V/DC Netzgerät für 11.73 CHF bei mouser. Um die Logik zu betreiben werden jedoch 3.3 V benötigt. Hier kommt der Spannungswandler MIC4680 zum Einsatz, welcher eine Effizienz von bis zu 90 % aufweist. Vom Wandler ausgegeben werden typischerweise 3.3 V, im aller schlimmsten Fall kann die Spannung jedoch zwischen 3.201 V und 3.399 V liegen. In der Abbildung 6.23 ist das Schema der 3.3 V Spannungsversorgung zu erkennen, es wurde hier noch eine Sicherung eingebaut da der Print nicht zerstört wird, falls zu viel Strom fliesst. Der Schraubklemmen sind dafür da, um z.B einen ON-OFF-Wippschalter, welcher am Gehäuse montiert wird, anzuschliessen. Die Beschaltung um den Spannungswandler ist dem Datenblatt des MIC4680 zu entnehmen.

zu viel nummerische Werte im Text eventuell Tabelle erstellen und Formeln separat

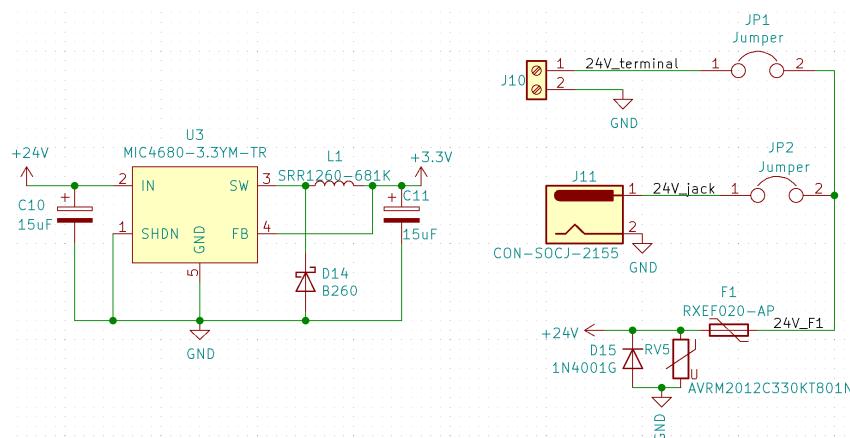


Abbildung 6.23: Spannungsversorgung Aktorbaustein

6.2.5 Interface

Die Ausgänge der Relais sowie die 10 V Ein- und Ausgänge sind auf Schraubklemmen geführt (Abb. 6.24). Es stehen insgesamt 6 LEDs zur Verfügung (Abb. 6.25). Die LEDs 1 bis 4 zeigen an ob das jeweilige Relais geschaltet hat. LED5 kann als Status LED verwendet werden. Die Buttons sind die gleichen wie im Sensorbaustein unter Punkt 6.1.7 Programmierananschluss.

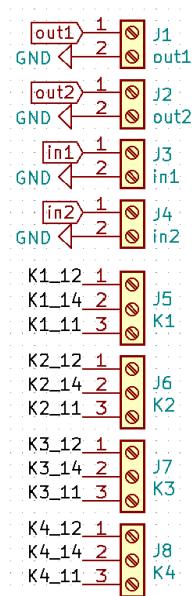


Abbildung 6.24: Klemmenanschlüsse
Aktorbaustein

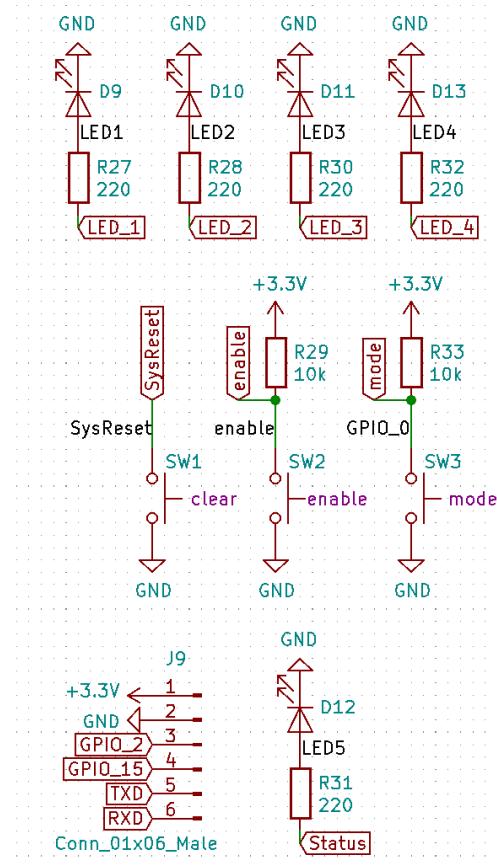


Abbildung 6.25: Buttons und LEDs Ak-
torbaustein

7 Validierung

In diesem Kapitel geht es darum, Anforderungen und Eigenschaften des Aktor- und Sensorbausteins zu testen.

7.1 Sensorbaustein

7.1.1 ESD Test

Der Sensorbaustein wird wie eine Unterputzsteckdose verbaut und die Frontplatte dient als User-Interface. Genauer bedeutet es, dass der Benutzer, die Touchflächen der Frontplatte berühren muss, um mit dem Sensorbaustein zu interagieren. Durch das berühren kann es jedoch zu elektrostatischen Entladungen kommen, die der Sensorbaustein überstehen muss. Deswegen wurde mithilfe eines ESD-Tests, getestet bis zu welchem Prüfschärfegrad, also bis zur welcher Entladespannung der Sensorbaustein funktioniert. In der Tabelle 7.1 sind die Prüfschärfegrade und deren Spannungen abgebildet. Für den Test wurde die Kontaktentladung genommen, mit welcher eine Entladung über einen Finger nachgestellt wird.

Der Testablauf war wie folgt [26]:

- Beginn beim tiefsten Schärfegrad
- 1 Entladung/s
- mind. 10 Entladungen, jeweils auf jeder Touchfläche

	Kontaktentladung	Luftentladung
Prüfschärfegrad	Prüfspannung [kV]	Prüfspannung [kV]
1	2	2
2	4	4
3	6	8
4	8	15
X	Spezial	Spezial

„X“ ist ein offener Prüfschärfegrad. Dieser Prüfschärfegrad muss in der Produktnorm festgelegt werden. Falls höhere Spannungen als die oben angegebenen festgelegt werden, sind möglicherweise besondere Prüfgeräte erforderlich.

Abbildung 7.1: ESD Testablauf [26]

Das Resultat war, dass der Sensorbaustein beim Prüfschärfegrad 4 Schaden nahm. Bei geringeren Spannungen war er funktionstüchtig. Was bedeutet, dass der Sensorbaustein Prüfschärfegrad 3 mit 6 kV erreicht hat. Der Schaden beim Grad 4 war sichtbar und befand sich beim Seriell/UART-Wandler (Abbildung: 7.2), was nicht zu erwarten war. Der betroffene Pin war die Spannungsversorgung des IC's, dazu wurden direkt die 5 V der Eingangsspeisung genommen, die Entweder über USB oder Pins angeschlossen wird. Beide Spannungsversorgungen sind miteinander verbunden, da in der Anwendung nur eines von beidem verwendet wird. Theoretisch wäre es auch möglich gewesen die 3.3 V als Versorgung des Seriell/UART-Wandlers zu nehmen, die Frage ist, ob dann der gleiche Schaden aufgetreten wäre. Die Schutzdiode welche Über- und Unterspannung ableiten sind mit Ground bzw. 3.3 V verbunden und nur der Seriell/UART-Wandler und der DC/DC Wandler sind an der 5 V Speisung angeschlossen. Schlussendlich ist der Strom über den Seriell/UART-Wandler abgeflossen und hat ihn zerstört.



Abbildung 7.2: Der Schaden am Seriell/Uart-Wandler welcher, wegen des ESD Tests mit Prüfschärfegrad 4 zu Stande kam

7.1.2 Energieverbrauch des Sensorbausteins

Der Sensorbaustein wurde unter folgenden Bedingungen gemessen:

1. ungeschalteter Normalzustand (Abbildung: 7.3)

(Der Sensorbaustein wird nicht bedient und hat eine Verbindung mit einem WLAN Netzwerk)

Der Sensorbaustein hat eine mittlere Leistungsaufnahme von ca. 370 mW. Auffällig ist, dass die Leistung mit einer Periode von 10 s schwankt, was dem zu Programm zugrunde liegt, denn die Temperaturmessung, denn das Status LED toggelt alle 10 s, um anzuzeigen, dass die Temperatur nach 10 s wieder gemessen wird. Unregelmäßige Leistungssprünge von bis zu ca. 400 mW kommen häufiger vor, was wahrscheinlich durch das WLAN ausgelöst wird.

2. geschalteter Normalzustand (Abbildung: 7.4)

(Der Sensorbaustein wird bedient und hat eine Verbindung mit einem WLAN Netzwerk)
In den Zeiten um ca. 35 s, 60 s und 85 s werden alle Vier Taster betätigt, die Leistungsaufnahme steigt um 10 mW von vorher 370 mW auf ca. 380 mW, was vertretbar ist.

3. Keine Verbindung (Abbildung: 7.5)

(Der Sensorbaustein findet kein zulässiges WLAN Netzwerk)

In diesem Zustand hat der Sensorbaustein eine mittlere Leistungsaufnahme von 930 mW, was beträchtlich ist. Dies ist daran geschuldet, dass der Sensorbaustein vermutlich seine Signalstärke erhöht, um ein Netzwerk zu finden. Deswegen wird nicht empfohlen, den Sensorbaustein, in diesem Zustand zu lassen.

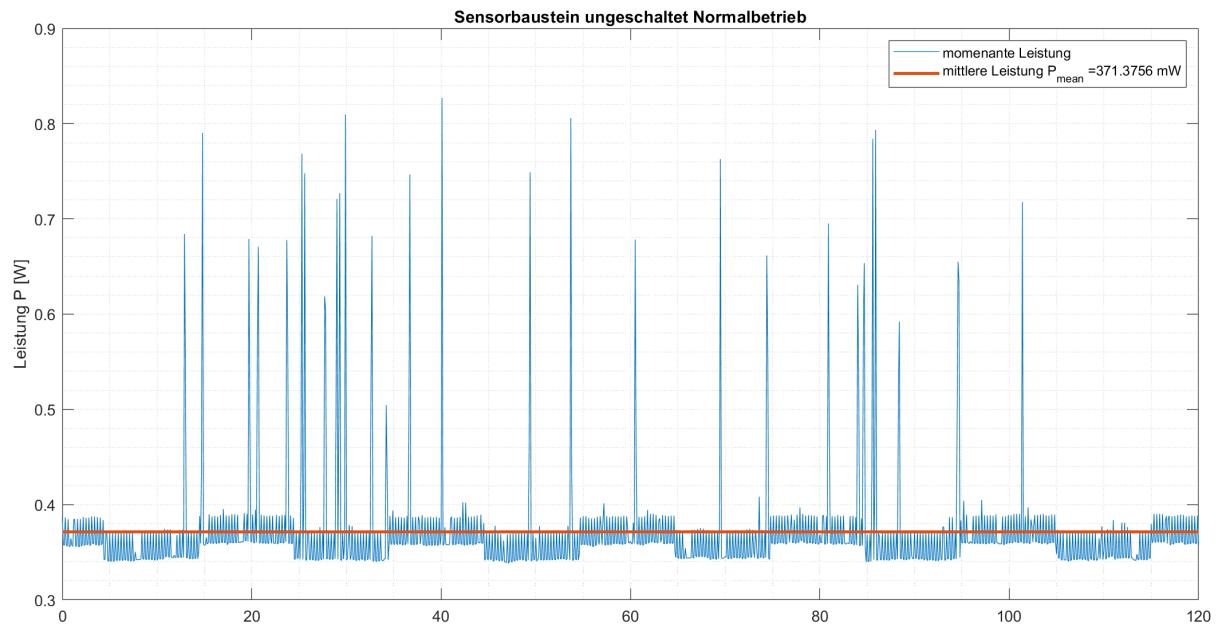


Abbildung 7.3: Die Leistung des Sensorbausteins, wenn er nicht bedient wird und mit dem Netzwerk verbunden ist

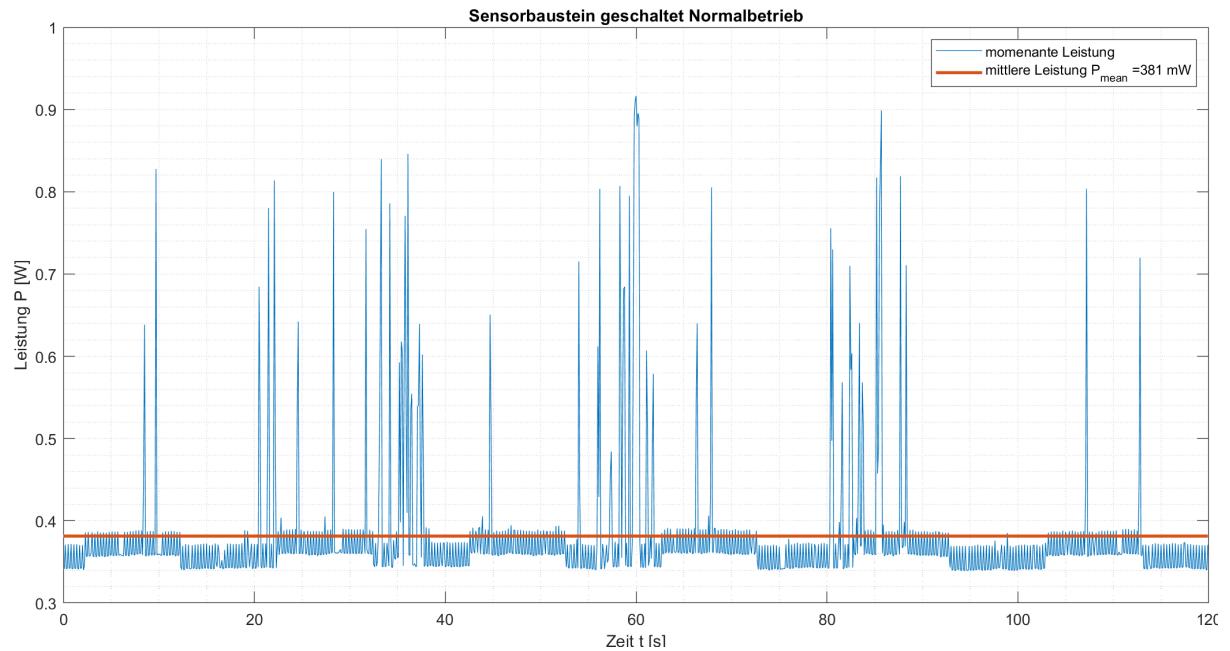


Abbildung 7.4: Die Leistung des Sensorbausteins, wenn er bedient wird und mit dem Netzwerk verbunden ist

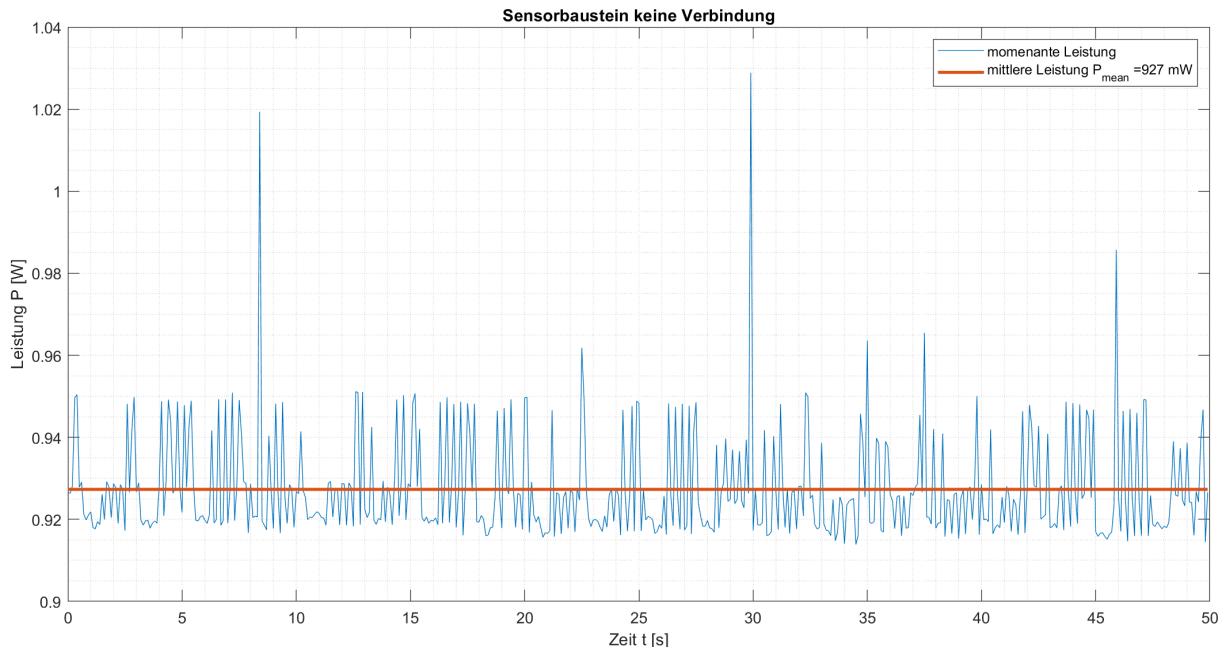


Abbildung 7.5: Die Leistung des Sensorbausteins, wenn er einen Verbindungsauflauf versucht, aber kein geeignetes WLAN Netzwerk vorhanden ist

7.1.3 Temperaturmessung

Es wird berechnet, wie gross die Abweichung der Temperaturmessung sein kann. Dazu wurde mit $U_{ref} = 2.39 V$ und einer Temperatur von $-4.6^\circ C \approx 5^\circ C$ gerechnet (folglich Kapitel 5.6.7), diese Temperatur wurde als untere Grenze genommen und sie wird die Abweichung im gewählten Temperaturbereich maximieren, folglich Gleichung ???. Gerechnet wird mit einem Vorwiderstand R_V von $100 k\Omega$ mit 1% Abweichung und einem NTC mit einem Widerstand von R_T , welcher 5% Abweichung hat.

Werte:

$$\begin{aligned}
 R_{T,4.6} &= 481 k\Omega \\
 R_{T,max} &= 481 k\Omega \cdot 1.05 = 505 k\Omega \\
 R_{T,20.2} &= 126 k\Omega \\
 R_{T,20.2,max} &= 126 k\Omega \cdot 1.05 = 132 k\Omega \\
 R_V &= 100 k\Omega \\
 R_{V,min} &= 100 \Omega \cdot 0.99 = 99 k\Omega \\
 B &= 4250 K \\
 T_0 &= 298.15 K
 \end{aligned}$$

Was als erhöhte Spannung an U_{ntc} bei $-4.6^\circ C$ anliegen würde:

$$U_{ntc,max} = U_{ref} \cdot \frac{R_{T,max}}{R_{T,max} + R_{V,min}} = 2.39 V \cdot \frac{505 k\Omega}{(505 k\Omega + 99 k\Omega)} = 2.00 V \quad (7.1)$$

(7.2)

Was als erhöhte Spannung an U_{ntc} bei 20.2°C anliegen würde:

$$U_{ntc,max} = U_{ref} \cdot \frac{R_{T,max}}{R_{T,max} + R_{V,min}} = 2.39 V \cdot \frac{132 k\Omega}{(132 k\Omega + 99 k\Omega)} = 1.37 V \quad (7.3)$$

Temperatur Berechnung bei -4.6°C im Mikrocontroller:

$$\frac{R_T}{R_{V,max}} = \frac{U_{ntc,max}}{U_{ref} - U_{ntc,max}} = 5.13 \quad (7.4)$$

$$T = \frac{1}{\frac{1}{T_0} + \frac{1}{B} \cdot \ln(\frac{R_T}{R_{V,max}})} = 267.46 K = -5.68^\circ C \quad (7.5)$$

$$\Delta T_{max} = -4.6^\circ C - (-5.7^\circ C) = 1.1 K \quad (7.6)$$

Temperatur Berechnung bei 20.2°C im Mikrocontroller:

$$\frac{R_T}{R_{V,max}} = \frac{U_{ntc,max}}{U_{ref} - U_{ntc,max}} = 1.34 \quad (7.7)$$

$$T = \frac{1}{\frac{1}{T_0} + \frac{1}{B} \cdot \ln(\frac{R_T}{R_{V,max}})} = 267.46 K = -5.68^\circ C \quad (7.8)$$

$$\Delta T_{max} = -4.6^\circ C - (-5.7^\circ C) = 1.1 K \quad (7.9)$$

8 Schluss

8.1 Reflektion

komplett
neu erstel-
len

In diesem Kapitel werden die Teilziele vom Pflichtenheft Reflektiert. In der untenstehenden Tabelle 8.1 sind die zu beginn des Projekts Definierten Teilziele so wie der Status, in welchem der Fachbericht am Ende verfasst wurde.

Teilziel	Definition	Status
1	Definitive vereinbarung ist unterschrieben	Erfüllt
2	Analyse und Evaluation Mikrocontroller	Erfüllt
3	Evaluation Funk Verbindung	Erfüllt
4	Evaluation Hardware Komponenten	Erfüllt
5	Analyse von verschiedenen FW-Frameworks	Erfüllt
6	Konzept der HW Infrastruktur erstellt	Erfüllt
7	Funktionsmuster, Fliegender Aufbau, Hotspotfunktion für Grundkonfiguration, MQTT Nachrichten können versendet werden	Erfüllt
8	Evaluation Server Software	Erfüllt
9	Dokumentation abgeschlossen	Erfüllt

Tabelle 8.1: Teilziele

Die Teilziele wurden erreicht, wobei im Verlauf des Projekts die Erkenntnis gewonnen wurde, dass die Evaluationen von Frameworks Teilziel 5 und Evaluation Server Software Teilziel 8, sehr viel Zeit in Beanspruchten. Im Idealfall hätte ein komplettes Funktionsmuster pro Framework aufgebaut werden sollen, wozu aber nicht genügend Zeit vorhanden war. Es konnte nur gerade ein Framework ausführlich getestet werden. Die Evaluation Server Software wurde auf zwei Favoriten beschränkt. Die Meilensteine konnten erreicht werden, wobei die der Termin Plan vom Projekt zeitlich nicht eingehalten wurde, so mussten durch Lösen von verschiedenen Problemen konnte in der Projektwoche nicht alle vorgesehenen arbeiteten erledigt werden und so kamen alle nachstehenden Arbeiten in Verzug.

8.2 Ausblick

Damit nicht die gleichen Probleme wie im Vergangenen Projekt auftauchen, wird ein Fixer Tag für das Projekt vorgesehen, Voraussichtlich ist dies der Samstag. Weil so viel Zeit zum Lösen von Problemen drauf gegangen war, wurde vorgenommen vermehrt die Hilfe vom Betreuer beanspruchen, somit sollen mehr Sitzungen stattfinden als im Projekt 5.

9 Ehrlichkeitserklärung

Hiermit erklären wir, dass die vorliegende Arbeit selbstständig von uns, ohne Hilfe Dritter und nur unter Benutzung der angegebenen Quellen verfasst wurde.

Projekt Team

Lukas Meienberger und Gabriel Nussbaumer

Ort, Datum

Unterschriften

Literatur

- [1] D. Wetherall und A. Tanenbaum, *Computernetzwerke*, 5. Aufl. München: Pearson Deutschland GmbH, 2012, ISBN: 978-3-86894-137-1.
- [2] (). Wi-Fi Alliance® Introduces Wi-Fi CERTIFIED WPA3™ Security | Wi-Fi Alliance, Adresse: <https://www.wi-fi.org/news-events/newsroom/wi-fi-alliance-introduces-wi-fi-certified-wpa3-security> (besucht am 13. Jan. 2020).
- [3] (). Mqtt-v5.0.Pdf, Adresse: <https://docs.oasis-open.org/mqtt/mqtt/v5.0/mqtt-v5.0.pdf> (besucht am 12. Jan. 2020).
- [4] (). Event Bus, Adresse: <https://www.openhab.org/docs/developer/utils/events.html> (besucht am 13. Juli 2020).
- [5] randomnerdtutorials. (2. Okt. 2019). ESP32 Pinout Reference: Which GPIO pins should you use?, Adresse: <https://randomnerdtutorials.com/esp32-pinout-reference-gpios/> (besucht am 28. Nov. 2019).
- [6] Espressif, *Esp32-Wroom-32_datasheet_en*, Sep. 2019.
- [7] (). Cc3235s.Pdf, Adresse: http://www.ti.com/lit/ds/symlink/cc3235s.pdf?HQS=TI-null-null-mousermode-df-pf-null-wwe&DCM=yes&ref_url=https%3A%2F%2Fwww.mouser.ch%2F (besucht am 10. Jan. 2020).
- [8] (). Visual Studio Code - Code Editing. Redefined, Adresse: <https://code.visualstudio.com/> (besucht am 8. Jan. 2020).
- [9] PlatformIO. (). PlatformIO is a new generation ecosystem for embedded development, Adresse: <https://platformio.org> (besucht am 8. Jan. 2020).
- [10] (). Arduino - AboutUs, Adresse: <https://www.arduino.cc/en/Main/AboutUs> (besucht am 1. Dez. 2019).
- [11] S. Media, director, *MQTT Binding 2.4 OPENHAB 2 Deutsch / MQTT Broker in OPENHAB 2 Anlegen / OPENHAB 2 Tutorial Deutsch*. Adresse: <https://www.youtube.com/watch?v=-8Wwi6MY0e8> (besucht am 19. Jan. 2020).
- [12] iobroker. (). Einsteiger – Willkommen! – ioBroker, Adresse: index-5.htm?page_id=6317&lang=de (besucht am 20. Jan. 2020).
- [13] M. Korte. (11. März 2018). Script über View ausführen, Adresse: <https://www.smarthome-tricks.de/software-iobroker/script-ueber-view-ausfuehren/> (besucht am 20. Jan. 2020).
- [14] zhouhan0126, *Zhouhan0126/WIFIMANAGER-ESP32*, 15. Dez. 2019. Adresse: <https://github.com/zhouhan0126/WIFIMANAGER-ESP32> (besucht am 28. Dez. 2019).
- [15] (). Arduino Client for MQTT, Adresse: <https://pubsubclient.knolleary.net/api.html#publish1> (besucht am 18. Jan. 2020).
- [16] (). Introduction, Adresse: <https://www.openhab.org/docs/> (besucht am 6. Aug. 2020).
- [17] (). Xtext - Language Engineering Made Easy!, Adresse: <http://www.eclipse.org/Xtext/#xbase> (besucht am 6. Aug. 2020).
- [18] (). gnu.org, Adresse: <https://www.gnu.org/licenses/quick-guide-gplv3> (besucht am 18. Jan. 2020).
- [19] (). Download Raspbian for Raspberry Pi, Adresse: <https://www.raspberrypi.org/downloads/raspbian/> (besucht am 22. Dez. 2019).
- [20] (). balenaEtcher - Home, Adresse: <https://www.balena.io> (besucht am 23. Dez. 2019).
- [21] (). Eigener Cloud-Server mit MQTT – RevPiModIO, Adresse: <https://revpimodio.org/iot-mqtt/> (besucht am 29. Dez. 2019).
- [22] Hager, *Hager_Kat1_08_Technik_D*, 2019.
- [23] Mikrocontroller.net. (). Relais Mit Logik Ansteuern – Mikrocontroller.Net, Adresse: https://www.mikrocontroller.net/articles/Relais_mit_Logik_ansteuern (besucht am 2. Jan. 2020).

- [24] A. Ronald. (15. Dez. 2017). Löcher für Steckdosen bohren | Vorgangsweise, Tipps und Tricks, Adresse: <https://richtig-bohren.net/loecher-fuer-steckdosen-bohren> (besucht am 28. Nov. 2019).
- [25] L. Miller. (). RC-Glied Für PWM, Adresse: <http://www.lothar-miller.de/s9y/categories/13-RC-Glied-fuer-PWM> (besucht am 31. Dez. 2019).
- [26] P. Schleuniger, „EMV_W8“, 8. Apr. 2020.