

HOCHSCHULE LUZERN
TECHNIK UND ARCHITEKTUR

BACHELOR THESIS

Entwicklung einer PCB zur Analyse von Umgebungslärm

Stefano Nicora

7. Juni 2024

Inhaltsverzeichnis

1	Einleitung	3
1.1	Ausgangslage	3
1.2	Ziele	3
1.3	Vorgehen	3
2	Stand der Technik	5
3	Mikrofon	6
3.1	Grundlagen	6
3.2	Komponentenwahl	10
3.2.1	Kriterien	10
3.2.2	Vergleich	11
3.2.3	Fazit	11
4	Mikrocontroller	12
4.1	Grundlagen	12
4.2	Komponentenwahl	14
4.2.1	Kriterien	14
4.2.2	Vergleich	15
4.2.3	Fazit	15
5	LED	16
5.1	Grundlagen	16
5.2	Komponentenwahl	17
5.2.1	Kriterien	17
5.2.2	Vergleich	18
5.2.3	Fazit	18
6	Entwicklung	19
6.1	Konzept	19
6.2	Hardware	21
6.2.1	PCB	21
6.2.2	Kosten	23
6.3	Software	24

7	Messungen	28
7.1	Leistungsaufnahme	28
7.2	Ausführungsgeschwindigkeit	30
7.3	Mikrofon-Messungen	32
7.4	Vergleich	32
8	Stolpersteine	33
9	Fazit und Ausblick	34
10	Anhang	36
10.1	Fremdwörter	37
10.2	Messmittel	38
10.3	PCB-Versionen	39
10.4	Schema	41
10.5	Software	42
10.6	Anforderungskatalog	43
10.7	Risikoanalyse	44
10.8	Zeitplan	45

1 Einleitung

1.1 Ausgangslage

Die Firma hEar hat es sich zum Ziel gesetzt, gegen die, für unsere Ohren schädliche Lärmbelästigung, vorzugehen. Dazu wurde in der Masterarbeit von Sophie Mia Willener eine Marktanalyse durchgeführt, sowie ein erster Prototyp gebaut. Dieser ist jedoch noch unhandlich, nicht verifiziert und somit nicht für den Massenmarkt geeignet.

1.2 Ziele

Das Ziel dieser Arbeit ist es, in einem ersten Schritt, auf Basis des vorhandenen Prototypen, ein funktionales, kompaktes und portables Schalldruckpegel-Messgerät zu entwickeln. Dabei sollen folgende Rahmenbedingungen zwingend eingehalten werden:

- Die Laufzeit des Gerätes soll mindestens 12 Stunden betragen.
- Das Gerät wird mit einem Akku betrieben. Dieser wird via eines USB-C-Anschlusses aufgeladen.
- Der Schalldruckpegel wird mit einem MEMS-Mikrofon aufgezeichnet.
- Die Messdaten werden in regelmässigen Abständen auf dem Gerät gespeichert.
- Das Gerät verfügt über eine BLE-Schnittstelle um die Messdaten drahtlos an ein Zielgerät zu übertragen.
- Der aktuelle Schalldruckpegel wird auf der Vorderseite des Gerätes visuell dargestellt.

In einem zweiten Schritt, wird das Gerät ausgemessen und dessen Qualität mit auf dem Markt bereits vorhandenen Geräten verglichen.

1.3 Vorgehen

In einem ersten Schritt, wurden mit hEar die zu erreichenden Ziele der Arbeit ausgearbeitet. Auf Basis dessen, wurde der Anforderungskatalog (Anhang

10.6) erstellt. Dieser ermöglichte es anschliessend, eine umfangreiche Risikoanalyse (Anhang 10.7) sowie einen geeigneten Zeitplan (Anhang 10.8) zu erstellen. Nach der initialen Projektphase wurden die nötigen Grundlagen für Mikrofone (3), LEDs 5 sowie Mikrocontroller (4) aufgearbeitet und mit dem aktuellen Stand der Technik (2) abgeglichen. Anschliessend folgte die Wahl der benötigten Bauteile sowie die eigentliche Hardware- und Softwareentwicklung (6). Nach der agilen Entwicklung folgten zum Schluss die diversen Messungen (7) und die daraus folgenden Schlussfolgerungen.

2 Stand der Technik

Um den Schalldruckpegel messen zu können, existiert eine Vielzahl von Messgeräten von einer Vielzahl von unterschiedlichen Herstellern. Die Preise reichen von 10 CHF für ein nicht genauer spezifiziertes Gerät von AliExpress bis hin zu über 3000 CHF für ein XL2 von NTI Audio (inkl. M2211-Mikrofon). Eines haben jedoch alle diese Geräte gemeinsam. Sie weisen eine Frequenzbandbreite von mind. 10kHz auf, verfügen über ein Display um die Messwerte anzuzeigen, fangen den Schall mittels eines Kondensator-Mikrofons auf und implementieren mindestens den dB(A)-Gewichtungsfilter 3.1. Doch diese Geräte sind alle durch ihre klobige Bauweise sowie ihr, für nichttechnisches Personal ungeeignetes Design, nicht für den Massenmarkt geeignet. Nichtsdestotrotz soll das in dieser Arbeit entwickelte Gerät den Parametern eines hochwertigen Gerätes entsprechen. Dadurch wird es mit dem oben genannten XL2 mit den folgenden Parametern([1]) verglichen:

- Frequenzbereich: 5Hz - 20kHz
- Auflösung: 0.1dB
- Max. dBSPL: 144dBSPL
- Mikrofontyp: Kondensator
- Erfassung: Fast & Slow



Figure 1: XL2 von NTI Audio | Quelle: [1]

3 Mikrofon

Als erste Kernkomponente gilt es, ein geeignetes Mikrofon zu evaluieren. Aus diesem Grund folgen anschliessend die benötigten Grundlagen, sowie die Komponentenwahl.

3.1 Grundlagen

MEMS

Mittels **M**icro **E**lectro-**M**echanical **S**ystems werden Bauteile bezeichnet, welche eine Strukturgrösse von wenigen μm aufweisen. Aus diesem Grund werden diese mehrheitlich auf Basis von Halbleitern hergestellt. Beispiele dafür sind Gyroskope (3), Drucksensoren, Oszillatoren oder eben, Mikrofone. Bedingt durch die Strukturgrösse, können hiermit kleinere Kräfte oder Drücke zuverlässiger detektiert werden. Bei Mikrofonen wird zwischen top- und bottom-port unterschieden (2), wobei je nach PCB-Layout nicht beide Varianten verwendet werden können.

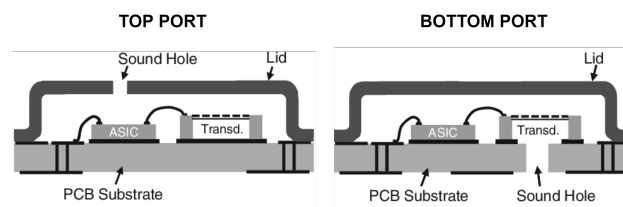


Figure 2: Unterschied MEMS-Mikrofone | Quelle: [2]

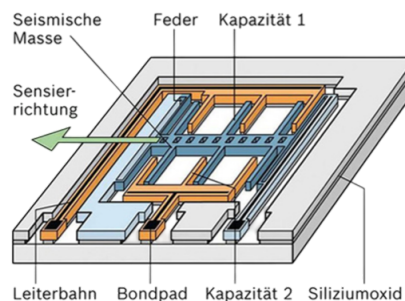


Figure 3: Beispiel MEMS-Beschleunigungssensor | Quelle: [3]

I2S

Inter-Integrated Sound (I²S) bezeichnet eine Bus-Schnittstelle, welche von Philips zur Übertragung von digitalen Audiosignalen entwickelt wurde. Ähnlich wie I²C (Inter-Integrated Circuit) wird die Schnittstelle jedoch nur innerhalb des Gerätes verwendet. Dabei werden drei Pins zwischen Sender (hier das Mikrofon) und dem Empfänger (hier der Mikrocontroller) benötigt:

- **SCK** (Serial Clock)
Generiert die Taktrate, welche gleichzeitig die Datenrate der Übertragung definiert. Die Taktrate wird vom Master (hier der Mikrocontroller) vorgegeben.
- **WS** (Word Select)
Gibt vor, welcher Audiokanal (R, L) übertragen werden soll. Dies ermöglicht es, entweder ein Stereo-Signal oder zwei Mono-Signale wie zum Beispiel zwei Mikrofone zu übertragen.
- **SD** (Serial Data)
Beinhaltet den eigentlichen Datenstream mit der Datenrate definiert durch **SCK** und der Länge definiert durch **WS**.

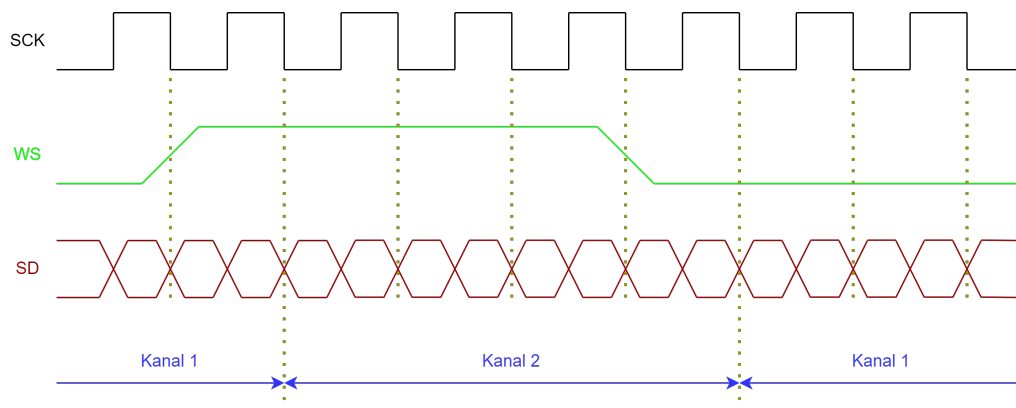


Figure 4: Übersicht I2S-Signale

PDM

Pulse **D**ensity **M**odulation oder Pulsdichtemodulation bezeichnet die Darstellung eines analogen Signals in der digitalen Ebene. Dabei entspricht das Verhältnis zwischen der Anzahl der digitalen "1" und digitalen "0" der Amplitude des analogen Signales. Das PDM-Signal weist eine vielfach schnellere Takrate (meist Faktor 32 / 64), als das ursprünglich abgetastete Mikrofonsignal auf. Dadurch wird auftretendes Rauschen in einen höher gelegenen Frequenzbereich verschoben, welcher bei der anschliessenden Signalverarbeitung mit einem Tiefpassfilter abgeschnitten wird. Im Gegensatz zu I²S (3.1) werden lediglich zwei Pins zwischen Mikrofon und Empfänger benötigt:

- **DAT** (Data)
Beinhaltet den als PDM-Codierten Datenstream.
- **CLK** (Clock)
Generiert die Takrate, mit welcher die Daten übertragen werden.

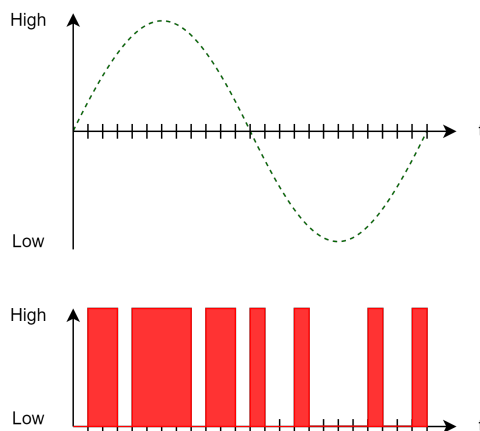


Figure 5: Beispiel PDM-Signal

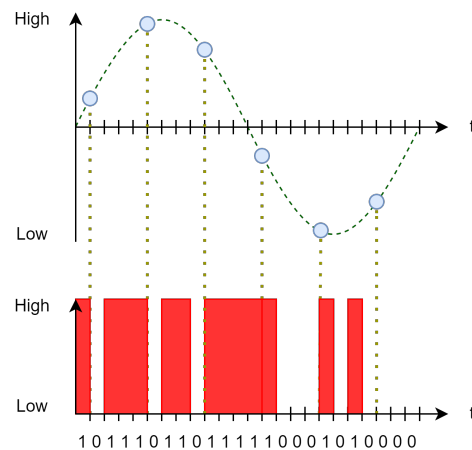


Figure 6: Beispiel PCM-Signal

PCM

Bei **P**ulse **C**ode **M**odulation wird jeder analoge Messwert in einem digitalen Bereich abgebildet (Abbildung 6). Je nach benötigter Genauigkeit fällt dieser Bereich mal grösser, mal kleiner aus. Bei der Datenübertragung mittels I²S

(3.1) geschieht diese Umwandlung direkt im Sender und erzeugt somit das SD-Signal. Bei Sendern mit PDM-Ausgang (3.1) ist dies nicht der Fall. Hier ist im Empfänger zwingend eine Peripherie notwendig, welche das PDM-Signal mittels Unterabtastung in ein PCM-Signal umwandelt.

Schalldruckpegel

Damit wird die der Bezug zwischen dem Schalldruck P , die Kraftauswirkung von Schallwellen auf ein Medium, und dem normierten Bezugswert P_0 von $20\mu Pa$ geschaffen. Oftmals wird der auch mit Sound Pressure Level (SPL) angegeben. Da das menschliche Gehör Lautstärke jedoch logarithmisch skaliert, wird dieser in der Akustik mittels dB SPL angegeben.

$$dB SPL = 20 \cdot \log_{10}\left(\frac{P}{P_0}\right) \quad (1)$$

Frequenzbewertung

Unser Gehör reagiert nicht nur nicht linear auf Lautstärkeveränderungen, sondern zusätzlich auch unterschiedlich Sensitiv auf unterschiedliche Frequenzen im hörbaren Bereich (20Hz-20kHz). Insbesondere im Bereich zwischen 3kHz bis 4kHz [4] ist das Gehör besonders anfällig auf äussere Stimulation. Abbildung 7, ursprünglich durch Fletcher & Munson, mittlerweile auch durch den ISO226-Standard beschrieben, zeigt diesen Umstand. Um der Problematik aus Abbildung 7 Sorge tragen zu können, wird ein sogenannten Frequenzbewertungsfilter ¹, Abbildung 8, eingesetzt. Dabei werden heutzutage nur noch die dB(A), sowie der dB(C)-Filter eingesetzt. Die beiden Filter unterscheiden sich folgendermassen:

- dB(A)
Reproduziert die 40 Phon Kurve
Widerspiegelt das menschliche Gehör besser, als der dB(C)-Filter
- dB(C)
Reproduziert die 100 Phon Kurve.
Filtert weniger tiefe und hohe Frequenzen als dB(A) heraus
Wird verwendet, um besonders laute Umgebungen zu messen

¹Weighting curves

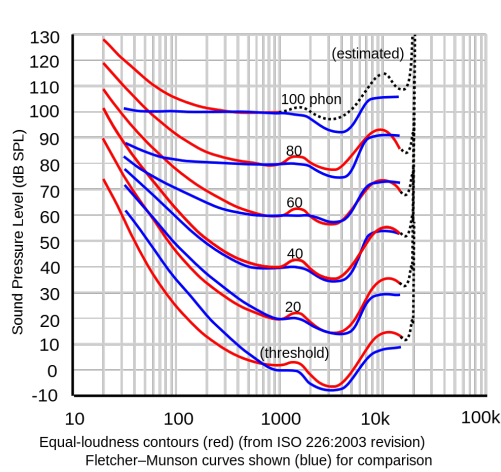


Figure 7: Phon-Kurven im Vergleich |
Quelle: [4]

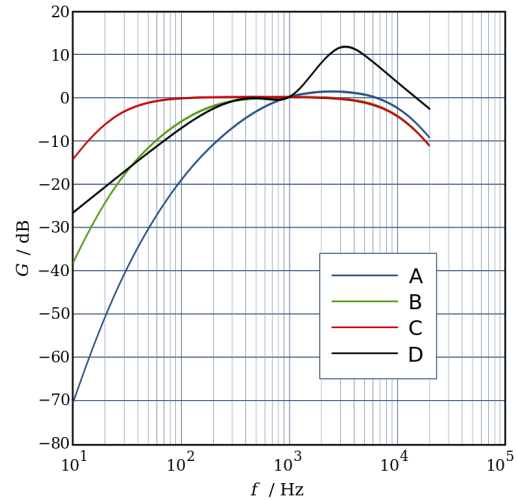


Figure 8: Frequenzbewertungsfilter |
Quelle: [5]

3.2 Komponentenwahl

3.2.1 Kriterien

- Standort der Mikrofon-Öffnung
- Ausgangssignal
- Maximaler Schalldruckpegel
- MEMS-Technologie
- Frequenzbereich

3.2.2 Vergleich

Typ	Protokoll	Öffnung	SNR	AOP[dB]	f_{min} [Hz]	f_{max} [Hz]
ICS-43434	I2S	Unten	65	120	60	20000
ICS-41351	PDM	Oben	65	120	50	20000
MMICT5838-00-012	PDM	Unten	68	133	27	20000
CMM-4737DT-26386-TR	PDM	Oben	58	120	100	10000
CMM-4737DT-26186-TR	PDM	Oben	58	120	100	10000
MP34DT05(-A)	PDM	Oben	64	122.5	100	10000
MP34DT06J	PDM	Oben	64	122.5	100	10000
SPH0645LM4H-B	I2S	Unten	65	120	20	10000

Table 1: Vergleich Mikrofone

3.2.3 Fazit

$\frac{1}{3}$ der untersuchten Mikrofone weisen die Mikrofon-Öffnung auf der Unterseite auf. Dies ermöglicht es, einen höheren SNR gewährleisten zu können, jedoch ist diese Montageart für das Endprodukt nicht geeignet (siehe Kapitel 6). Bei den restlichen Mikrofonen sticht das ICS-41351 von TDK InvenSense mit seinem hohen SNR, AOP sowie der hohen Frequenzbandbreite heraus. Dadurch hat dieses das Rennen gewonnen.

4 Mikrocontroller

4.1 Grundlagen

DMA

Bei **D**irect **M**emory **A**ccess handelt es sich um eine Art Steuerbaustein, welcher unabhängig und parallel zum eigentlichen Rechenkern arbeitet. Dieser hat, wie der Rechenkern selbst, Zugriff auf den gesamten Datenbus. Dieser ermöglicht es, effizient Daten von Peripherien wie der UART, I²S, SPI, ect. in den RAM und umgekehrt zu laden. Dadurch wird der Rechenkern entlastet und kann für wichtigere Aufgaben eingesetzt oder gar in einen Energiesparmodus versetzt werden. Dabei gibt es zwei Möglichkeiten mit dem DMA-Baustein zu interagieren:

- **Bus Master**
Der DMA-Baustein wird einmalig durch den Rechenkern aufgesetzt und läuft danach autonom. So können beispielsweise via I²S einkommende Daten automatisch aus dem Eingangsregister in den Speicher geladen werden und bei genügend grosser Datenmenge (definiert durch den Entwickler), kann Rechenkern wieder aus dem Energiesparmodus aufgeweckt werden.
- **Programmed I/O**
Jeder Arbeitsprozess des DMA-Bausteins wird durch den Rechenkern gestartet. Da sich DMA und Rechenkern den Datenbus teilen, wird so garantiert, dass die Speicheroperation zum gewünschten Zeitpunkt stattfindet.

Bootloader

Unter einem Bootloader versteht man Code, welcher grundsätzlich nach dem erstmaligen flashen, persistent im System bleibt. Er dient als Ausgangspunkt für die eigentliche Software und ermöglicht es beispielsweise auch, während der Laufzeit des Gerätes, Softwareupdates herunter zu laden und diese anschliessend einzuspielen. Insbesondere wenn Funkprotokolle wie Bluetooth oder WLAN eingesetzt werden, ist ein Bootloader oftmals unerlässlich. Der Nachteil ist jedoch, dass dieser den ohnehin knappen Speicherplatz weiter reduziert.

RTC

Unter einer **Real Time Clock** versteht man ein Stück Hardware (intern oder extern), welche die Zeit ab Inbetriebnahme misst. Übliche RTCs haben, aufgrund ihrer Bauweise eine Genauigkeit von 100ppm. Da dies einer Zeitverschiebung von 4min und 19s @32kHz entspricht, enthalten die meisten RTCs Kompensationsmechanismen, um diese Zeit auf unter 100ms zu bringen. [6]

Low Power

Mit Low Power wird, insbesondere bei Embedded-Systemen, die reduzierte Leistungsaufnahme beschrieben. Oftmals verfügen die Systeme über mehrere Modi mit jeweils unterschiedlichen Eigenschaften. Das Ziel ist es, mit jedem tieferen Modus etwas mehr Energie zu sparen und somit die Akkulaufzeit zu verlängern. Wie in Abbildung 9 ersichtlich, sinkt zwar die Leistungsaufnahme mit jeder Stufe, jedoch werden dabei gewisse Peripherien abgeschaltet und die allgemeine Startzeit des Systems wird erhöht.

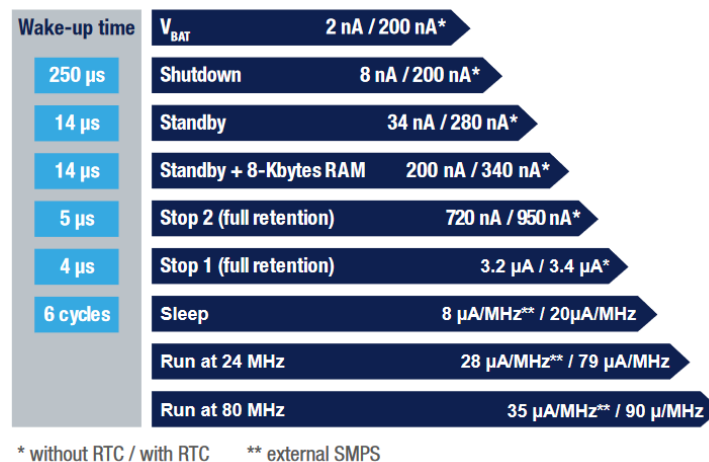


Figure 9: Vergleich Low-Power-Modi STM | Quelle: [7]

Peripherie in Hardware oder Software

Bei allen gängigen Kommunikationsprotokollen ist die Frage, wie diese implementiert werden sollen. Dabei stehen folgende Möglichkeiten zur Auswahl:

- in **Hardware**
 - + Die benötigte Infrastruktur (Register, CRC, etc.) sind bereits physikalisch

implementiert. Die Kommunikation kann dementsprechend vom Rechenkern abgekoppelt durchgeführt werden und ermöglicht eine gewisse Parallelität von mehreren Prozessen mit wenig Rechenaufwand. Insbesondere in Verbindung mit DMA, kann so viel Rechenzeit eingespart werden.

- Bei den meisten Mikrocontrollern ist die spezifische Hardware an einzelne Pins gebunden. Dies wirkt sich auf die Flexibilität des PCB-Layouts oder gar des Gesamtsystems (zu wenig Anschlüsse) aus.

- in **Software**

- + Die meisten Pins können flexibel für jedes Protokoll verwendet werden. Dadurch vereinfacht sich auch das PCB-Layout.

- Bei Verwendung von Ein-Kern-Systemen, welche im Embedded-Bereich mehrheitlich anzutreffen sind, kann keine echte Parallelität von Prozessen erfolgen. Dies verringert die Ausführungsgeschwindigkeit.

Grundsätzlich ist, nach Möglichkeit und Verfügbarkeit, eine Hardware-Peripherie zu bevorzugen. Insbesondere bei batteriebetriebenen Systemen mit langer Laufzeit, ist diese ausschlaggebend.

4.2 Komponentenwahl

Es existieren eine Vielzahl von Mikrocontroller-Herstellern. Viele dieser verfügen über eine breite Palette an BLE-tauglichen Chips. Um den geeigneten darunter zu finden, werden nachfolgend die benötigten Schnittstellen definiert und mehrere, vorselektionierte Mikrocontroller, miteinander verglichen.

4.2.1 Kriterien

- **I²S** + **PDM** zur Ansteuerung des Mikrofons.
- **SPI** zur Ansteuerung von möglichen Peripherien wie externe Speicherbausteine oder Displays.
- **I²C** zur Ansteuerung von Laderegler und LED-Treiber-IC.
- **DMA** zur energieeffizienten Verarbeitung der Daten.
- **RTC** um die gemessenen Werten mit einem Zeitstempel verknüpfen zu können.

- BLE-Fähiger Mikrocontroller mit vorgefertigter Antenne um die Integration zu vereinfachen.

4.2.2 Vergleich

Hersteller	Typ	I2S	I2C	SPI	DMA	BLE	PDM	RTC	ANT	Flash (kB)	uA/MHz	Zusatz
Infineon	CY8C63x6	x	x	x	x	x	x	x	-	<=512	40	Nicht via normale Distributoren
Infineon	CY8C63x7	x	x	x	x	x	x	x	-	<=512	40	Nicht via normale Distributoren
Microchip	BM83	x	x	-	-	x	x	-	-	-	-	Charge-controller für Akku Not recommended for new Designs
Nordic Semiconductor	nRF52832	x	x	x	x	x	x	x	x	<=512	58	ANT: BMD-350-A-R (u-blox)
Nordic Semiconductor	nRF52833	x	x	x	x	x	x	x	x	512	52	ANT: NINA-B406-00B (u-blox) BL653 (Lairdconnect)
Nordic Semiconductor	nRF52840	x	x	x	x	x	x	x	x	1024	52	ANT: NINA-B302-00B (u-blox) BMD-340-A-R (u-blox) BL654PA (Lairdconnect)
Nordic Semiconductor	nRF5340	x	x	x	x	x	x	x	x	1024	48	ANT: NORA-B106-00B (u-blox) BL5340 (Lairdconnect)
Silicon Labs	EFR32BG22	x	x	x	x	x	x	x	x	<=512	27	ANT: BGM220P Lyra P (Lairdconnect)
Silicon Labs	EFR32BG27	x	x	x	x	x	x	x	-	768	29	-
STmicro	STM32WB		x	x	x	x		x	x	1024	53	ANT: STM32WB5MMG
STmicro	BlueNRG-LP	x	x	x	x	x	x	x	-	256	18	-

Figure 10: Vergleich von möglichen Mikrocontrollern

4.2.3 Fazit

Wie dem Vergleich zu entnehmen ist, unterscheiden sich die Mikrocontroller meist nur in der integrierten Flash-Grösse sowie der Leistungsaufnahme bei einer gewissen Taktrate. Dadurch wird die Wahl nicht eingeschränkt, was eine geeignete Evaluation nicht vereinfacht. Ausschlaggebend ist jedoch der Formfaktor. Bis auf Silicon Labs und STmicro muss für einen Mikrocontroller mit vorgefertigter Antenne auf Drittanbieter ausgewichen werden. In Zeiten von Katastrophen wie COVID oder Kriegen inmitten von Handelsrouten ist die Produktverfügbarkeit einer der zentraler Aspekte. Aus diesem Grund wird nachfolgend der EFR32BG22 von Silicon Labs bzw. dessen Modul-Variante, der **BGM220P**, eingesetzt.

5 LED

Die visuelle Darstellung des Schalldruckpegels kann auf verschiedene Arten umgesetzt werden. Da hEar explizit eine Darstellung mittels LED wünscht, werden nachfolgend die wichtigsten Eigenschaften eingeführt und anschliessend ein passendes Produkt evaluiert.

5.1 Grundlagen

Wellenlänge

Das für den durchschnittlichen Menschen sichtbare Lichtspektrum beginnt bei 380nm (blau) und endet bei 780nm (rot)[8]. Wie der Abbildung 11 zu entnehmen ist, entspricht die Sensitivität einer Gausskurve. Dabei erreicht diese ihr Maximum bei 555nm (grün) bei Betrachtung der Tageskurve. Dementsprechend kann beim Einsatz einer 555nm-LED im Gegensatz zu LEDs mit einer tieferen oder höheren Wellenlänge die zugeführte Leistung bei gleichwertiger Lichtempfindlichkeit reduziert werden.

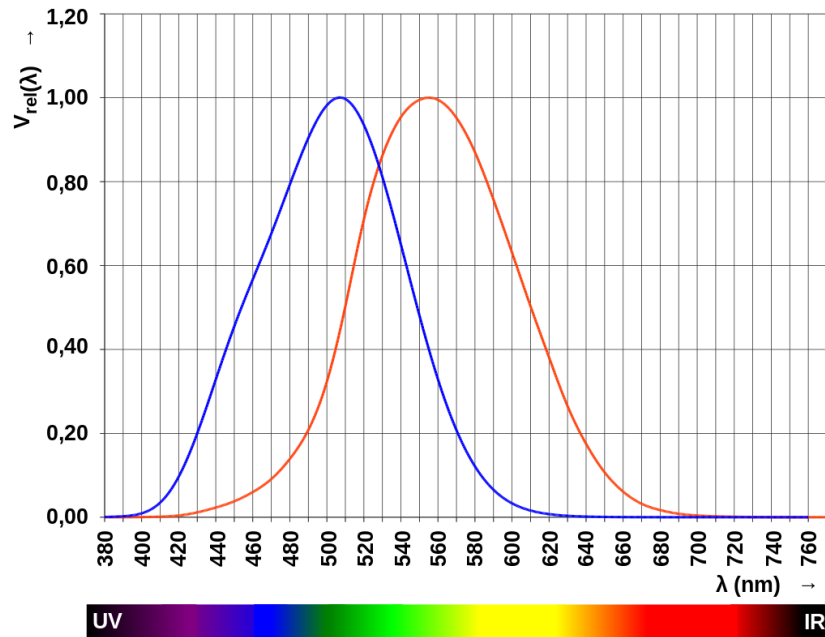


Figure 11: Sensitivität des menschlichen Auges auf das Lichtspektrum bei Tag (**schwarz**) und Nacht (**blau**) | Quelle: [8]

Lichtleistung

Neben der Wellenlänge, ist die Lichtleistung ausschlaggebend für die wahrgenommene Helligkeit einer LED. Dabei wird die Lichtleistung in Candela [cd] angegeben, wobei 1 cd der Helligkeit einer Kerze entspricht. Bei einer typischen LED verhält sich die Lichtleistung linear mit dem zugeführten Strom.

Vorwiderstand / Strombegrenzung

Nach Anlegen einer Spannung, \geq Schwellspannung der LED ², wird diese grundsätzlich zu einem Kurzschluss. Um den Stromfluss durch die LED begrenzen zu können, wird normalerweise ein Vorwiderstand verwendet. Der Nachteil des Vorwiderstandes ist es, dass, gegeben durch das ohmsche Gesetz, über diesem elektrische Leistung in Wärme umgewandelt wird. Bei einem akkubetriebenen Gerät ist dies unerwünscht. Als Alternative kann ein buck converter, Abbildung 12, oder eine Konstantstromquelle eingesetzt werden. Dadurch entfällt der Vorwiderstand und die Effizienz des Teilsystems wird erhöht.

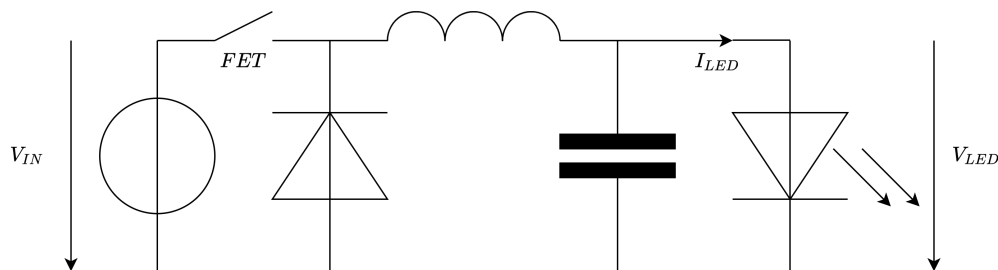


Figure 12: Buck Converter

5.2 Komponentenwahl

5.2.1 Kriterien

- Lichtleistung
- Wellenlänge

Hersteller	Typ	Farbe	Intensität[mcd] ³	Spannung [V]
SunLED	XZCM2CRK53WA-8VF	Rot	180	2.1
SunLED	XZCDGK53W-8VF	Grün	250	3.1
SunLED	XZCFBB53W-8VF	Blau	30	3
Worldsemi	WS2018	Rot	55	2.2
Worldsemi	WS2018	Grün	110	3.1
Worldsemi	WS2018	Blau	20	3.4
RND	135-00184	Rot	7	1.6

Table 2: Vergleich LED

5.2.2 Vergleich

5.2.3 Fazit

Wie im Kapitel 5.1 ersichtlich, ist die Abwägung zwischen Leistungsaufnahme der LED und der effektiven Photonenabgabe nicht trivial. Aus technischer Sicht macht dementsprechend eine LED mit einer Wellenlänge von 555nm (Grün) am meisten Sinn. Nach Rücksprache mit dem Industriepartner, hEar, dient das Gerät an erster Stelle als Warngerät. Warnungen werden üblich mit einer Wellenlänge von 780nm (Rot) gekennzeichnet. Dadurch wird im Endprodukt die Low-Power-LED XZCM2CRK53WA-8V von SunLED eingesetzt.

²variiert je nach LED Typ und Farbe

³bei einem Strom von 2mA

6 Entwicklung

Die im Unterkapitel 1.2 definierten Ziele sollen nun umgesetzt werden. Dazu soll die von aussen sichtbare Vorderseite möglichst wenig Bauteile aufweisen, um das visuelle Design nicht zu beeinträchtigen. Mit einer angestrebten Gesamtgrösse von 60mm Durchmesser, können die gewählten Bauteile geradenoch auf dem PCB in einer symmetrischen Art platziert werden.

6.1 Konzept

Front Die Vorderseite weist folgende Bauteile auf:

- 8 LEDs
- Mikrofon
- LED-Treiber-IC

Zudem sind die LEDs sind ringförmig angeordnet, um der Anforderung eines visuellen Ladebalkens entsprechen zu können.

Back Die Rückseite hingegen, beinhaltet folgende Bauteile:

- USB-C-Ladeanschluss
- Polyfuse (Automatisch rückstellbarer Überstromschutz)
- Switch um generell das Gerät ein- und auszuschalten
- BMS, um den Akku sicher auf- und entladen zu können
- Mikrocontroller, welcher sich aufgrund seiner Antenne am Rand des PCBs befinden muss
- Akkuhalter
- Optionaler Speicherbaustein

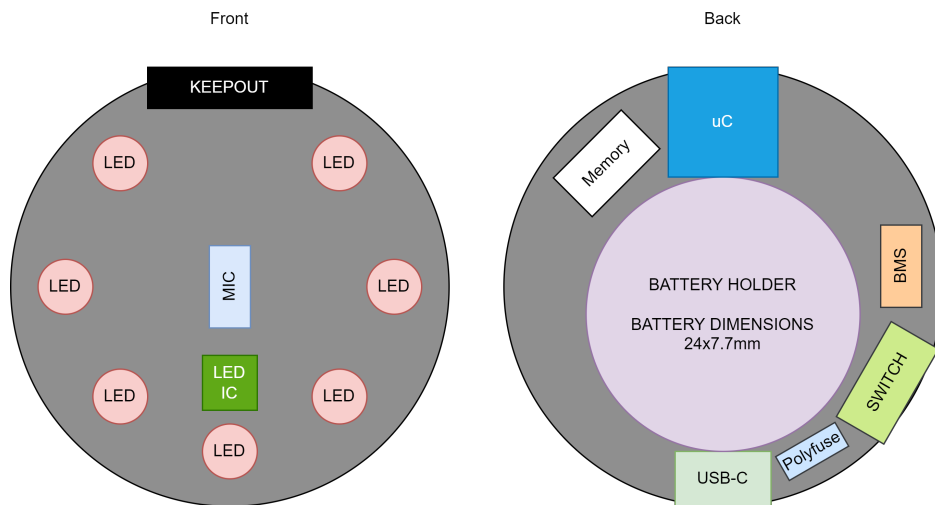


Figure 13: Konzept PCB-Layout

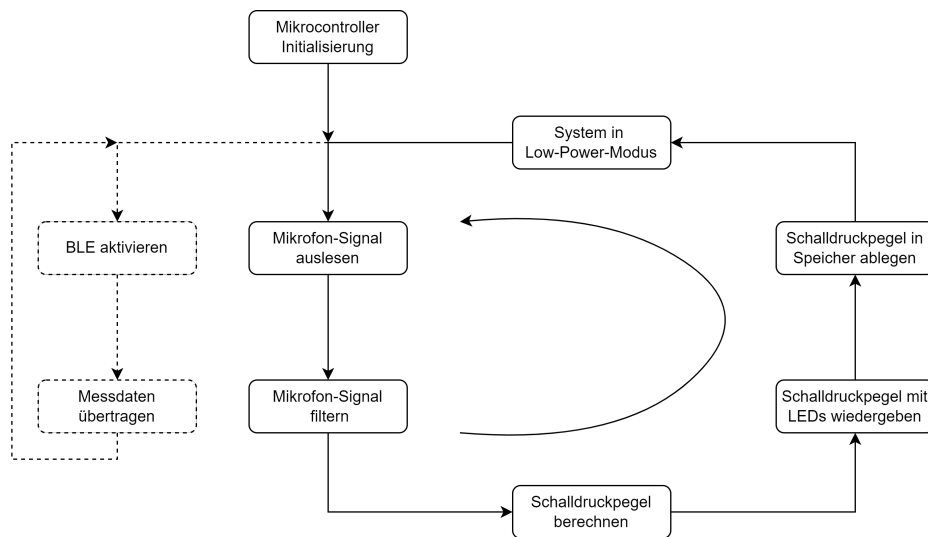


Figure 14: Konzept Softwareablauf

6.2 Hardware

6.2.1 PCB

Das PCB durchlief mehrere Iterationen. Nachfolgend treten die Änderungen mit den benötigten Zusatzinformationen chronologisch auf ⁴. Zudem findet sich eine Übersicht, wieso, welche Bauteile eingesetzt werden.

V1-1

Lediglich kleinere Verdrahtungs- und Platzierungsoptimierungen.

V1-2

Folgende Anpassungen wurden vorgenommen:

- Akku-Verpolungsschutz mittels P-Kanal MOSFET.
- Testpads für I²C, SPI und PDM entfernt.
- USB-C 16 Pin Buchse durch 6 Pin Buchse (power only) ersetzt.
- Rotation der LEDs um 40° im Gegenuhrzeigersinn, um die Reihenfolge der LEDs zu gewährleisten. Zusätzliche Optimierung der Platzierung der LEDs, um die Verdrahtung zu vereinfachen.
- TRIG-Pin des LED-Treiber-ICs auf Masse geschaltet.
- Spannungsteiler zur Messung der Speisespannung via USB-C.
- Optionaler Pullup-Widerstand an DRV_EN um den Anschluss nicht immer manuell schalten zu müssen.

V1-3

Auf Wunsch von hEar wurde zusätzlich noch ein PCB entwickelt, welches funktionsidentisch mit dem Vorgänger ist. Einzig die LEDs sind nun nicht mehr ringförmig angeordnet, sondern erstrecken sich neu auf einer vertikalen Linie.

⁴Detaillierte Abbildungen der Versionen befinden sich im Anhang 10.3

Sicherung

Der Fall eines Kurzschlusses auf Geräteseite wird mittels einer rückstellbaren Sicherung (PPTC⁵) der Stromfluss unterbrochen. Die gewählte Sicherung blockiert bei einem Strom von 400mA komplett und setzt sich automatisch wieder zurück, sobald die Speisung abgetrennt wird.

LED-Treiber

Die Aufgabe des Treibers ist es, den LED-Strom möglichst Energieeffizient zu regeln (siehe 5.1). Der gewählte Treiber ermöglicht es, alle 8 LEDs individuell in 100uA-Schritten zu regeln. So kann die Leistungsaufnahme des Gesamtsystems kontrolliert werden.

Akku-Laderegler | BMS

Das **B**attery **M**anagement **S**ystem wurde aufgrund folgender, benötigter Eigenschaften gewählt:

- Möglichst wenige externe Bauteile
- Über- und Unterspannungsschutz
- Überstromschutz
- Keine direkte Ansteuerung mittels Mikrocontroller nötig
- Möglichkeit zur visuellen Darstellung des Ladestatus
- Unterstützung von Li-Po und Li-Ion Akkus

Spannungsregler

Der Akku weist eine maximale Nennspannung von 4.2V (Typ. 3.6V) auf. Alle gewählten Halbleiter erlauben jedoch maximal eine Speisespannung von 3.6V. Deswegen wird ein möglichst effizienter und kostengünstiger Spannungsregler verwendet. Wie auch bereits das BMS, weist der Spannungsregler möglichst wenig externe Bauteile auf.

⁵Polymeric Positive Temperature Coefficient, automatisch rückstellbare Sicherung von Littlefuse

Die in V1-0 verwendete Buchse (16 Pin) wird durch eine 6 Pin (power only) ersetzt. Dies, da die ursprünglich geplante Möglichkeit, den Mikrocontroller via USB zu programmieren, wieder verworfen wurde. Dadurch kann eine günstigere Buchse verwendet werden.

Für den Verpolungsschutz kann im Grunde auch eine simple Diode (oder Schottky-Diode⁶) verwendet werden. Der daraus folgende Spannungsabfall ist jedoch für ein akkubetriebenes Gerät nicht ideal. Die Lösung bietet ein P-Kanal-MOSFET, wie in Abbildung 15. Die Z-Diode, sowie der Gate-Widerstand, werden jedoch weggelassen, da die Batteriespannung die maximale Source-Gate-Spannung des gewählten FETs nicht überschreitet.



Die Tabelle 3 beinhaltet alle anfallenden Materialkosten exkl. Versand. Zudem wurde JLCPCB als PCB-Hersteller gewählt, da zum einen die Qualität bei 2-Layer-PCBs ausreicht und zum anderen mit der Anbindung an LCSC die Bestückung der PCBs direkt im selben Werk stattfindet. Dadurch verkürzt sich die Fertigung des Endproduktes.

⁶Die Schwellspannung entspricht nur ca. 0.2V

dass keines dieser Bauteile einer besonderen Toleranz unterliegt. Dadurch kann bei der PCB-Bestellung eine kosten-optimierte Wahl getroffen werden.

Hersteller	Typ	Bezeichnung	Preis/100
JLCPCB	-	PCB inkl. Versand	0.394
Texas Instruments	BQ21040DBVR	Batterie-Management	0.516
Microchip Technology	MIC5504-3.3YM5-TR	3V3 LDO	0.095
RS PRO	LIR2477	Akku	4.085
Littlefuse	1210L020WR	Rückstellbare Sicherung	0.205
Texas Instruments	LP55231SQX/NOPB	9-Kanal LED-Treiber	1.35
SunLED	XZCM2CRK53WA-8VF	LED RED CLEAR	0.2072
C&K	JS102011SAQN	Schalter 0.3A@6V	0.453
Keystone Electronics	1025-7	Batteriehalter	1.26
STMicroelectronics	M95P16-IXMNT/E	16MBit SPI EEPROM	0.843
Silicon Labs	BGM220PC22WGA2R	Mikrocontroller	6.33
TDK InvenSense	ICS-41351	MEMS-Mikrofon	1.05
GCT	640-USB4125-GF-A	USB-C Buchse 6 Pin	0.381
Toshiba	SSM3J334R,LF	P-Channel MOSFET	0.109
Diverse	Capacitor & Resistor	Abmessung: 0603 [Inch]	0.6
			17.90 CHF

Table 3: Materialliste | Stand: 01.04.2024

6.3 Software

Im Kern besteht die Software, wie in Abbildung 14 gezeigt, aus einem einzelnen, sich wiederholenden Kreis. Durch den einfach gehaltenen Ablauf, wird auf den Einsatz eines RTOS verzichtet. Um diesen Abschnitt übersichtlich zu halten sind Timing-Diagramme sowie die Software im Anhang 10.5 zu finden.

Timer

Die Timer-Implementation dient als Hauptschleife, um die Datenaggregation, Verarbeitung und Ausgabe steuern zu können.

Das Makro **BAT_MEASUREMENT_INTERVAL** ermöglicht es, auf wenige

Millisekunden genau die Schleife zu steuern. Die Programmabfolge ist in Abbildung 16 ersichtlich.

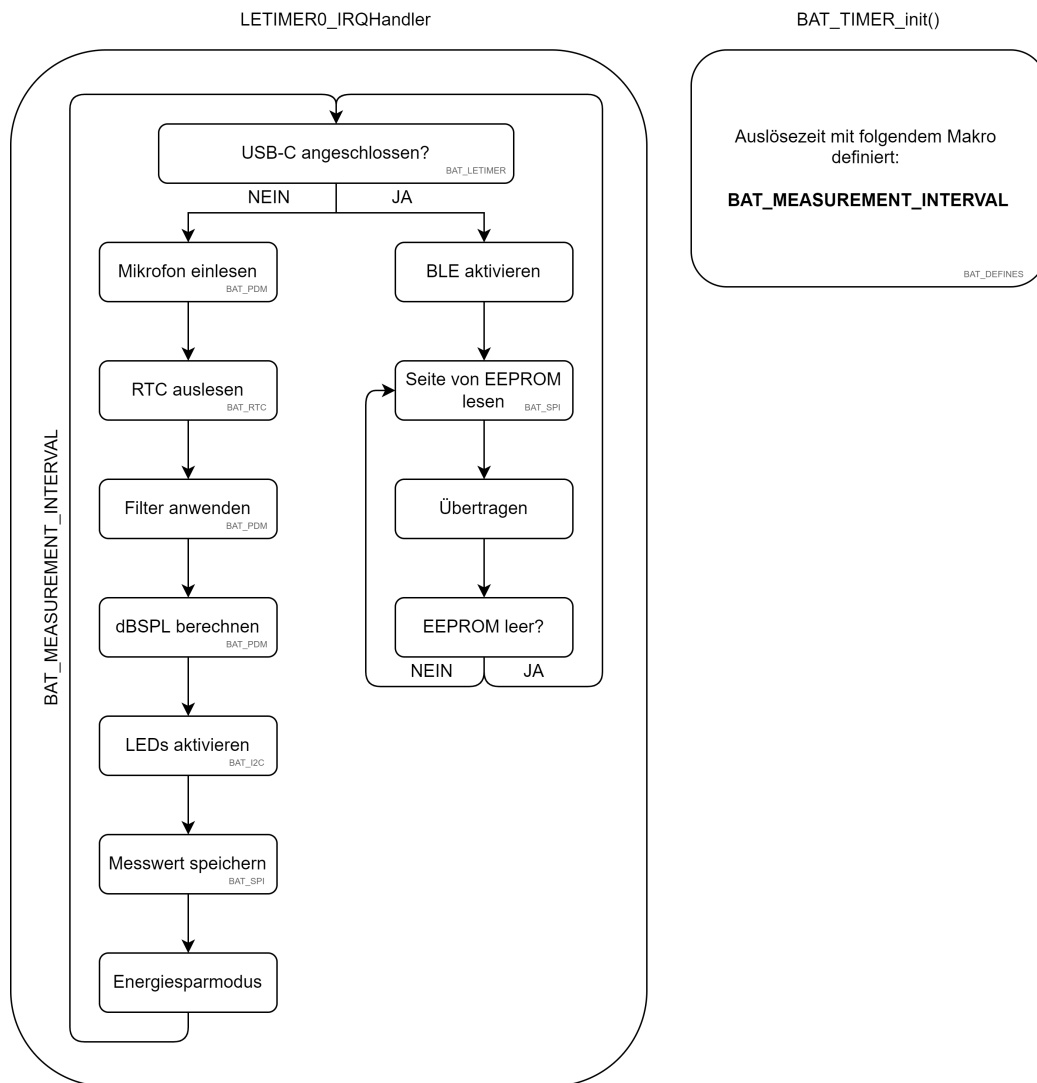


Figure 16: Übersicht zu (LE)Timer-Funktionalität

Filterdesign

Wie im Unterkapitel 3.1 erläutert, reagiert unser Gehör nicht auf alle Frequenzen gleich. Um diese Frequenzbewertung in die Schalldruckpegel-Berechnung

einfließen zu lassen, wird ein digitales, diskretes Filter benötigt. Die benötigten Frequenzbewertungsfilter sind jedoch ausschliesslich in der S-Ebene (Laplace-Bereich, zeitkontinuierlich) erhältlich. Dadurch müssen diese mit beispielsweise der bilinearen Transformation [9] vom Frequenz- in den Zeitbereich transformiert werden.

$$G_A(s) = \frac{7.39705 \cdot 10^9 \cdot s^4}{(s + 129.4)^2 \cdot (s + 676.7) \cdot (s + 4636) \cdot (s + 76617)^2} \quad (2)$$

$$G_C(s) = \frac{5,91797 \cdot 10^9 \cdot s^2}{(s + 129,4)^2 \cdot (s + 76617)^2} \quad (3)$$

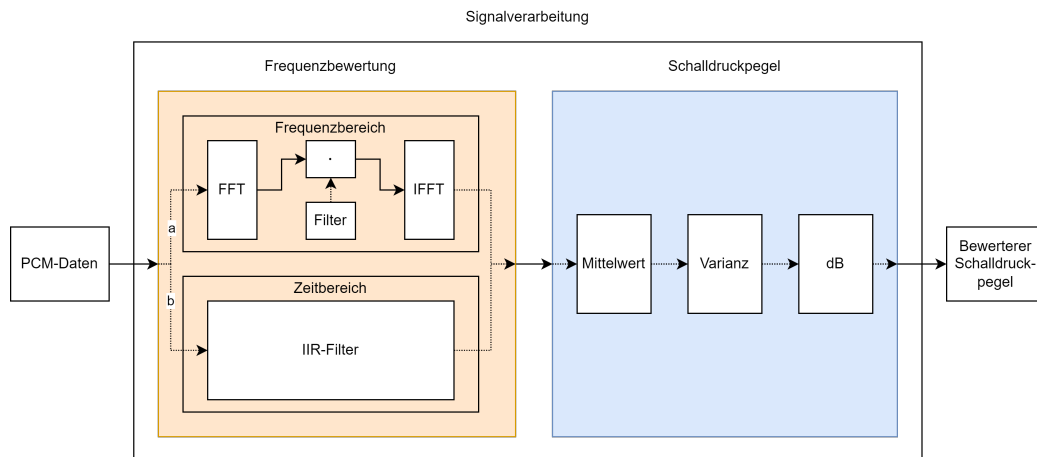


Figure 17: Unterschied Zeit- und Frequenzbereich zur Frequenzgewichtung

TODO

PDM

TODO

I²C

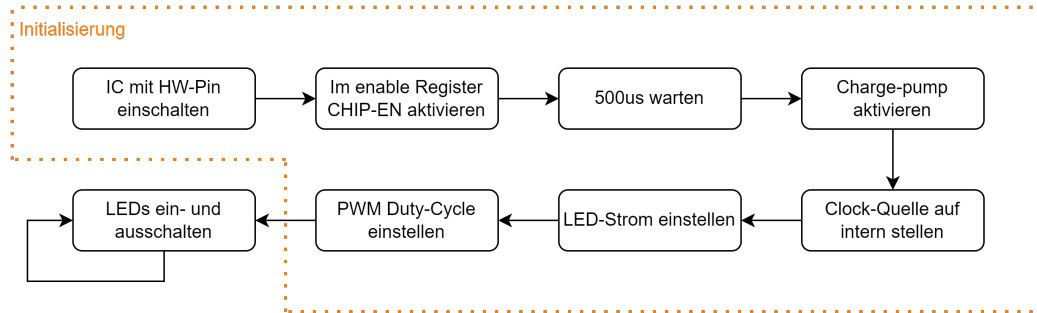


Figure 18: Softwareablauf I²C

SPI

Da der SPI-Treiber hauptsächlich mittels der SPIDRV-Bibliothek von Silicon Labs implementiert ist, fällt der Treiber schlank aus. Es existieren lediglich jeweils eine Funktion um eine neue Seite (512 Bytes) im Speicher zu beschreiben und um diese auch wieder auszulesen bzw. zu löschen.

RTC

TODO

LEDs

Auf Wunsch des Industriepartners, werden die SPL-Werte so auf die 8 LEDs abgebildet, dass der 85dB(A)-Wert auf LED 4 zu liegen kommt mit jeweils einer Veränderung von +3dB(A) auf die nachfolgenden LEDs. Dabei entspricht ein Schritt von +3dB einer Lautstärkeverdoppelung. Somit sieht die momentane Skalierung folgendermassen aus:

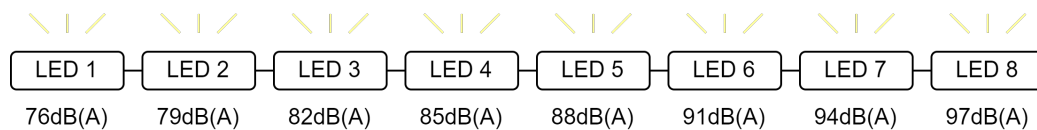


Figure 19: Aufteilung dB SPL auf 8 LEDs

7 Messungen

Ein System kann qualitativ nur mit Messungen auf seine Einsatzfähigkeit untersucht werden. Dadurch erfolgen nachfolgend theoretische und praktische Messwerte.

7.1 Leistungsaufnahme

Die Leistungsaufnahme eines Systems zu quantifizieren, stellt sich als durchaus komplex dar. Viele Variablen, Abwägung von Verarbeitungsgeschwindigkeit mit der gegensätzlichen Energieeffizienz und nicht genau spezifizierte Parameter erschweren die Festlegung der Rahmenbedingungen. Bei der Auslegung der nachfolgenden Parameter wird stets die energieeffizienteste Möglichkeit gewählt, ohne damit die Leistungsfähigkeit massgeblich zu beeinflussen.

Mikrocontroller

TODO

Mikrofon

Wie der Formel 4 entnommen werden kann, gibt es zwei Möglichkeiten das Mikrofon zu betreiben:

- Das Mikrofon wird konstant im Performance-Modus betrieben. Durch den Einsatz von DMA sind die benötigten Messwerte jeder Zeit verfügbar und die 20ms Startzeit des Mikrofons entfällt. Dadurch sind höher aufgelöste Messintervalle möglich. Dazu sind die Messungen der einzelnen Funktionen in Tabelle 6) ersichtlich.
- Das Mikrofon wird nur dann aktiviert, wenn es benötigt wird. Dadurch sinkt die benötigte Leistung von $580\mu Ah$ auf $87.2\mu Ah$ (4). Dadurch erhöht sich jedoch die benötigte Messzeit um 20ms. Dies aus dem Grund, dass keine DMA verwendet wird und das Mikrofon vom Standby-Betrieb ($20\mu A$) in den Performance-Modus ($580\mu A$) wechselt.

$$Leistung_{Mikrofon} = \underbrace{580\mu A \cdot 30ms \cdot 4}_{Performance-Modus} + \underbrace{20\mu A \cdot 220ms \cdot 4}_{Standby} = 87.2\mu Ah \quad (4)$$

EEPROM

Der Chip weist eine Vielzahl von unterschiedlichen Leistungsmodi auf. Die Leistungsaufnahme variiert zwischen dem niedrigen Standby-Modus ($35\mu Ah$) und dem Schreiben einer Seite ($3mA$) von 512 Bytes. Gemäss folgender Mischrechnung (5) kann die ungefähre Leistungsaufnahme approximiert werden.

$$\underbrace{3mA \cdot 4.5ms}_{\text{Schreiben}} + \underbrace{1.5mA \cdot 2ms}_{\text{Lesen}} + \underbrace{35\mu A \cdot 993.5ms}_{\text{Standby}} = 51.3\mu Ah^7 \quad (5)$$

Übersicht berechnet

Bauteil	Strom	Bemerkung
Mikrocontroller	$3200 \mu Ah$	Alle Peripherien EIN
LEDs	$800 \mu Ah$	$100\mu Ah$ pro LED · 8 LEDs
LED-Treiber	$600 \mu Ah$	Alle Ausgänge EIN
EEPROM	$51.3 \mu Ah$	
Mikrofon	$87.2 \mu Ah$	Low-Power-Modus
Total	$4.7 mAh$	
Total Arbeitstag à 12h	$56.9 mAh$	

Table 4: Berechnete Ströme des Gesamtsystems

Übersicht gemessen

⁷ Alle Zeiten gemäss Datenblatt

Bauteil	Strom	Bemerkung
Mikrocontroller	1760 μAh	Alle Peripherien EIN
LEDs	780 μAh	Alle LEDs EIN
LED-Treiber	820 μAh	Alle Ausgänge EIN
EEPROM	70 μAh	
Mikrofon	103 μAh	Messintervall: 250ms
Total	3.5 mAh	
Total Arbeitstag à 12h	42.40 mAh	

Table 5: Gemessene Ströme des Gesamtsystems

TODO

7.2 Ausführungsgeschwindigkeit

Um die Dauer einer Funktion messen zu können, wurde ein GPIO-Pin zu Beginn sowie am Ende der jeweiligen Funktion umgeschaltet und mit den Logic-Analyzer ausgewertet. Aus 20 Funktionsaufrufen wurde anschliessend der Mittelwert berechnet und in Tabelle 6 aufgeführt.

Die Messungen zeigen, dass hauptsächlich das messen der Werte, sowie die Filterung dieser die meiste Zeit in Anspruch nimmt. Gleichzeitig kann jedoch so verifiziert werden, dass ein Messintervall von 125ms (Messmodus: Fast) möglich ist.

Funktionsname	Zeit [ms]	Bemerkung
app_init	10.4	RTC, SPI, I2C, PDM, Timer, GPIO
PDM_readMicrophone	20.8	128 Samples; Low-Power
RTC_convertTimeToString	0.16	Format: 00:00:00
PDM_applyAWeightingFilter	15.2	128 Samples
PDM_convertPCMTodBSPL	0.81	128 Samples
PDM_convertSPLToString	0.28	
I2C_enableLedRange	0.62	
LOGGING_generateLogString	0.01	Länge: 13 char
SPI_writePage / SPI_readPage	4.4	512 Bytes
Total	52.68 ms	
Total pro Messintervall	42.28 ms	

Table 6: Ausführungsgeschwindigkeit der einzelnen Funktionen

TODO

7.3 Mikrofon-Messungen

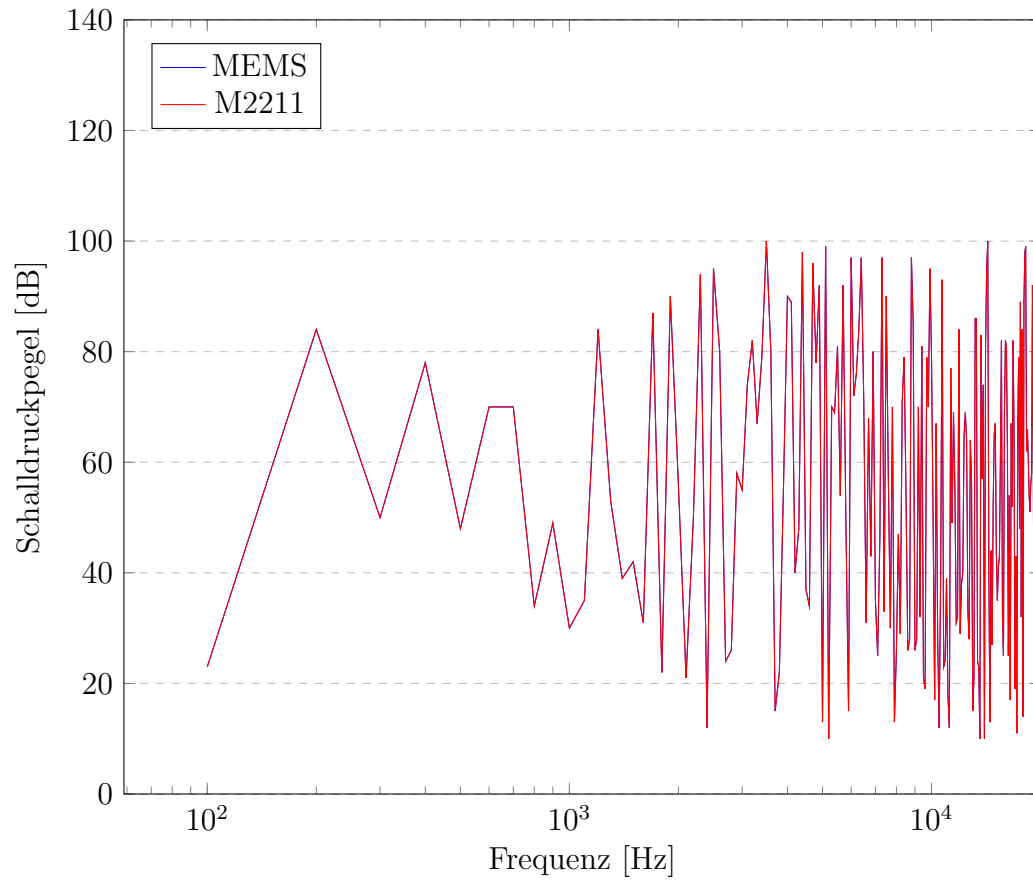


Figure 20: Frequenz vs Schalldruckpegel-Plot der ungewichteten Messung

7.4 Vergleich

TODO

8 Stolpersteine

RTC, BLE, Filterdesign, Debugger, PDM / Startup-zeit

9 Fazit und Ausblick

Parameter: Welche LED leuchtet bei welchem Wert, Wie Hell LED, Wie viel Loggen **TODO**

Danksagung

TODO

10 Anhang

References

- [1] “XL2 Schallpegelmesser & Akustik-Analysator | NTi Audio.”
- [2] G. Feiertag, M. Winter, and A. Leidl, “Flip chip packaging for MEMS microphones,” *Microsystem Technologies*, vol. 16, pp. 817–823, May 2010.
- [3] “Peripherer Beschleunigungssensor.”
- [4] N. R. C. U. C. o. D. D. f. I. w. H. Impairments, R. A. Dobie, and S. V. Hemel, “Basics of Sound, the Ear, and Hearing,” in *Hearing Loss: Determining Eligibility for Social Security Benefits*, National Academies Press (US), 2004.
- [5] “Frequenzbewertung,” Oct. 2023. Page Version ID: 238201232.
- [6] G. Dighe, “TPS65950 Real-Time Clock Timing Compensation,” Oct. 2008.
- [7] “STM32L4 Series - PDF Documentation,” Mar. 2024.
- [8] “V-Lambda-Kurve,” Dec. 2023. Page Version ID: 240001066.
- [9] A. V. Oppenheim, *Zeitdiskrete Signalverarbeitung*. R. Oldenbourg.

Abbildungsverzeichnis

1	XL2 von NTI Audio Quelle: [1]	5
2	Unterschied MEMS-Mikrofone Quelle: [2]	6
3	Beispiel MEMS-Beschleunigungssensor Quelle: [3]	6
5	Beispiel PDM-Signal	8
6	Beispiel PCM-Signal	8
7	Phon-Kurven im Vergleich Quelle: [4]	10
8	Frequenzbewertungsfilter Quelle: [5]	10
9	Vergleich Low-Power-Modi STM Quelle: [7]	13
10	Vergleich von möglichen Mikrocontrollern	15
11	Sensitivität des menschlichen Auges auf das Lichtspektrum bei Tag (schwarz) und Nacht (blau) Quelle: [8]	16

12	Buck Converter	17
13	Konzept PCB-Layout	20
14	Konzept Softwareablauf	20
15	Verpolungsschutz mit P-Kanal MOSFET	23
16	Übersicht zu (LE)Timer-Funktionalität	25
17	Unterschied Zeit- und Frequenzbereich zur Frequenzgewichtung	26
18	Softwareablauf I ² C	27
19	Aufteilung dBSPL auf 8 LEDs	27
20	Frequenz vs Schalldruckpegel-Plot der ungewichteten Messung	32

10.1 Fremdwörter

CRC
 Register
 Pins
 Embedded
 ppm
 flashen
 Li-Po
 Li-Ion
 RTOS

10.2 Messmittel

Farblich gekennzeichnete Geräte und Software gehören zusammen.

- Saleae Logic Analyzer - Logic 8
S/N: T&A 36 093
- Logic 2
Version: 2.4.14
- Audio Precision 2700
S/N: SYS2-31822
- AP2700 Control Software
Version: 3.30 (Build 118)
- MCUXpresso IDE
Version: 11.8.1 [Build 1197] [2023-10-27]
- NXP MCU-Link Pro CMSIS-DAP
Version: V3.108
S/N: FDS0PNBVSQUQZ
- NTI XL2
S/N:

10.3 PCB-Versionen

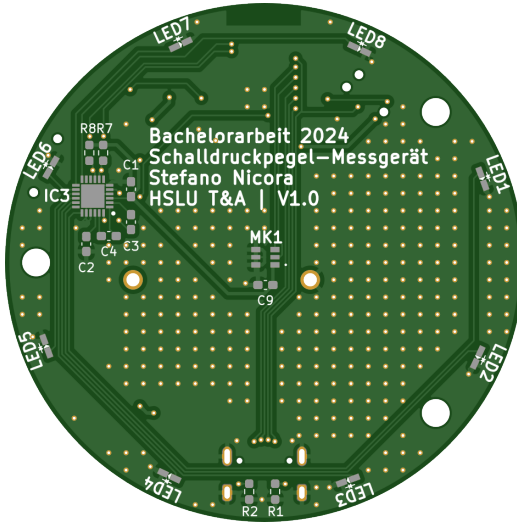


Figure 21: V1-0 Front

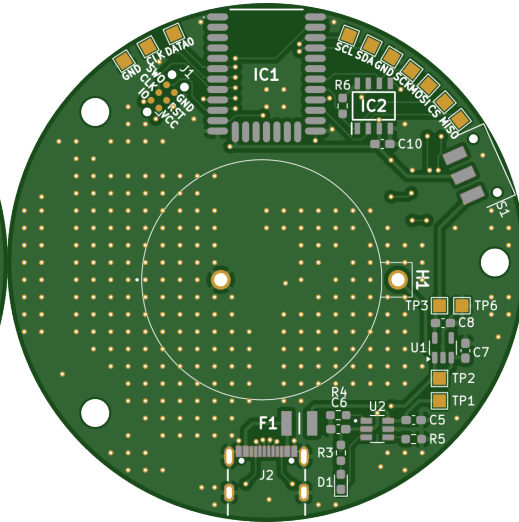


Figure 22: V1-0 Back

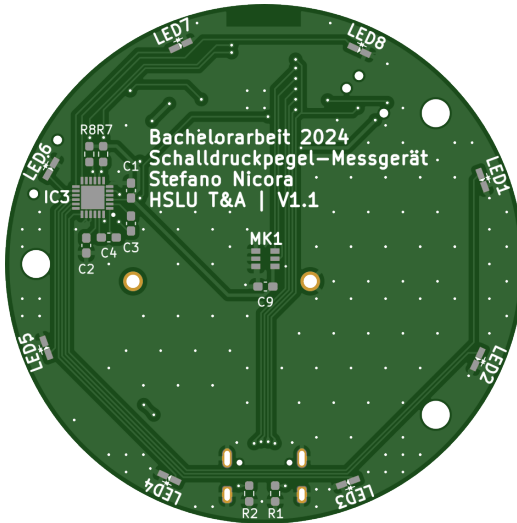


Figure 23: V1-1 Front

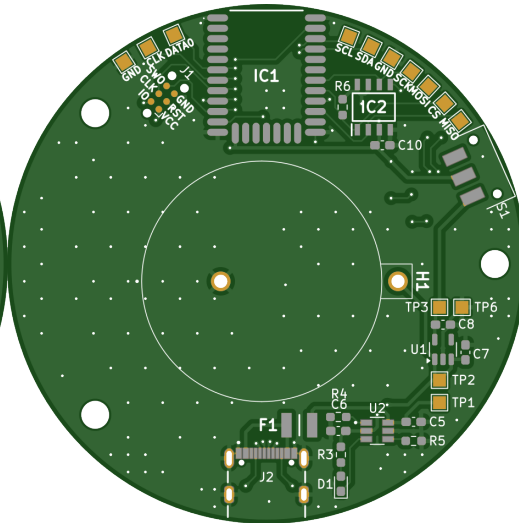


Figure 24: V1-1 Back

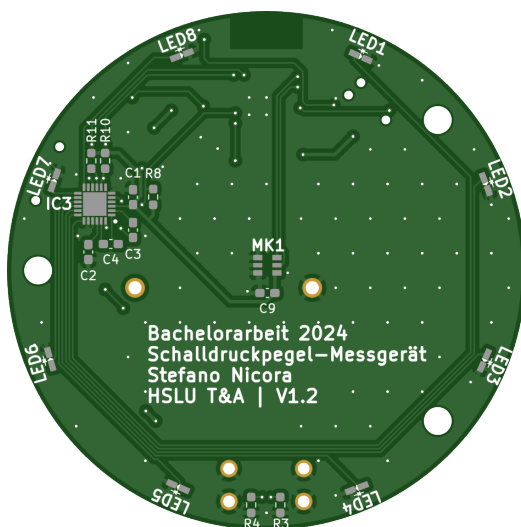


Figure 25: V1-2 Front

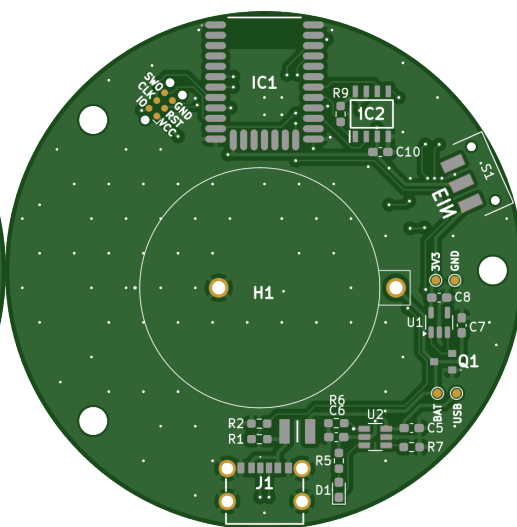


Figure 26: V1-2 Back

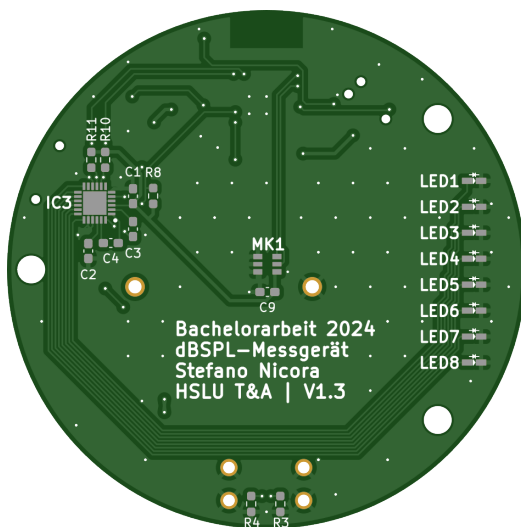


Figure 27: V1-3 Front

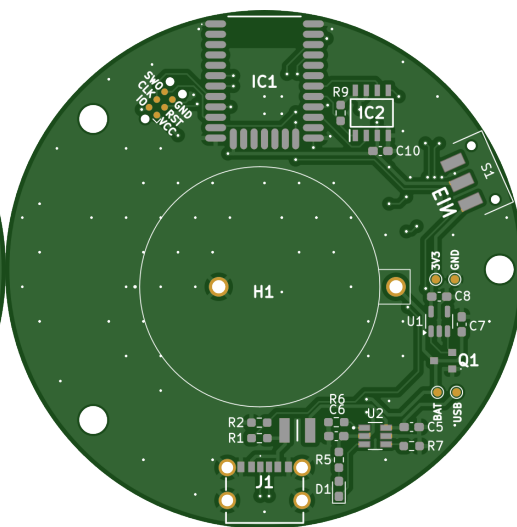
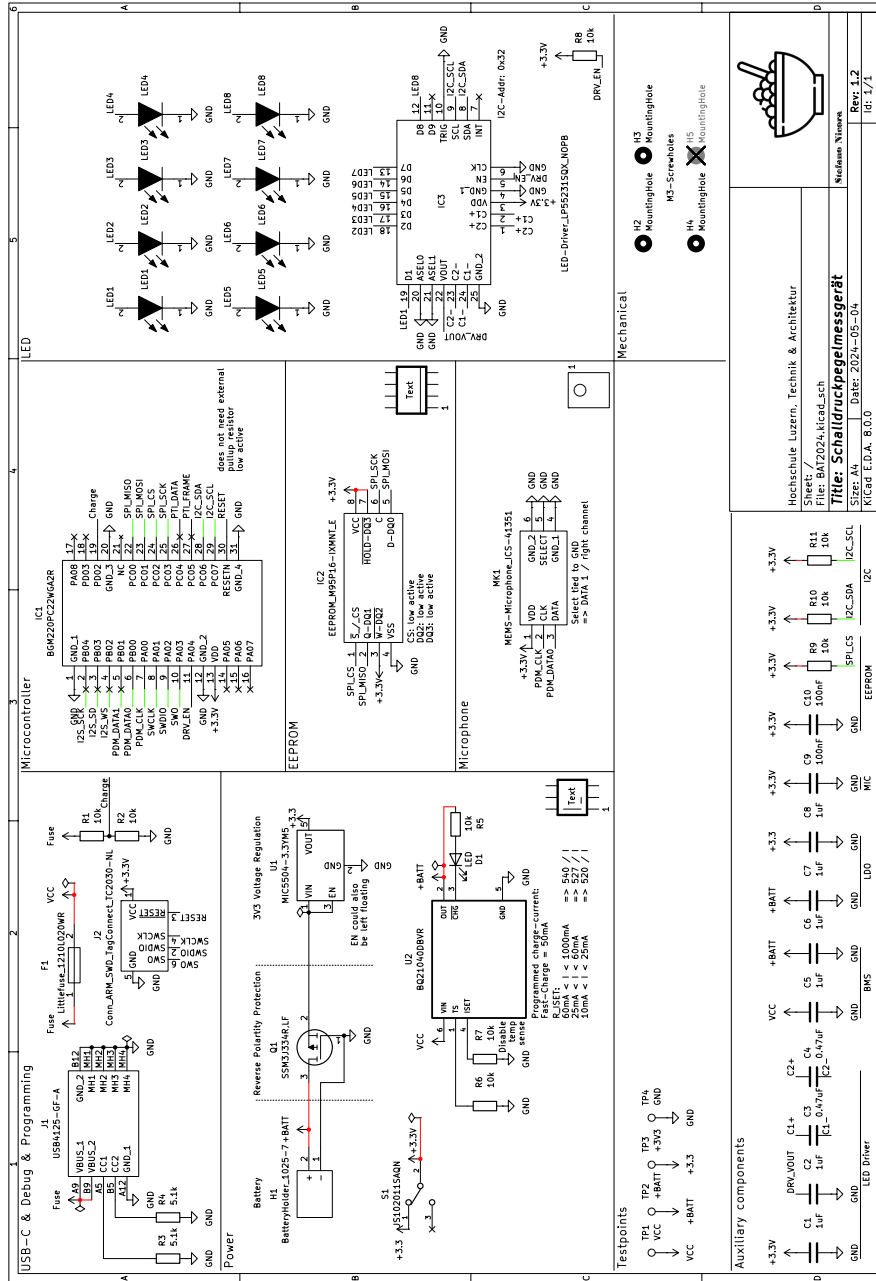


Figure 28: V1-3 Back

10.4 Schema



10.5 Software

TODO

10.6 Anforderungskatalog

Nr.	M/K/N	Thema	Beschreibung
1	M	Speisung	Das Gerät verfügt über einen wiederaufladbaren Akku. Dieser wird mittels USB-C-Buchse aufgeladen.
2	M	Formfaktor	Die Bauform des PCB ist rund. Die genauen Dimensionen werden mit hEar definiert.
3	M	Laufzeit	Die Laufzeit soll mindestens 12 Stunden betragen. Dies deckt einen gängigen Arbeitstag ab.
4	M	Kommunikation	Das Gerät weist eine Bluetooth low energy (BLE) Schnittstelle auf. Durch diese werden die Messdaten an ein Empfangsgerät übertragen. Die Implementation dieser ist jedoch nicht Teil der Arbeit.
5	M	Messdaten-Logging	Die Messdaten werden in einem noch zu definierendem Zeitintervall lokal gespeichert.
6	M	Zeitstempel	Die Messdaten sollen über einen Zeitstempel verfügen.
7	M	Visuelle Anzeige	Der gemessene Schalldruckpegel wird visuell auf der Front des Gerätes dargestellt.
8	M	Kosten	Die Gesamtkosten entsprechen maximal 50 CHF.
9	M	Mikrofon	Der Schalldruckpegel soll mittels eines MEMS-Mikrofons aufgenommen werden.
10	K	LEDs	Die visuelle Darstellen des Schalldruckpegels erfolgt über LEDs auf der Front des Gerätes.
11	N	Bauteile	Die Bauteile sollen von Hand lötbar sein. Gleichzeitig sollen die Platinen maschinell bestückt werden können.

M: Muss, K: Kann, N: Nice to have

10.7 Risikoanalyse

Risikoanalyse					
Risiko	Beschreibung	W'heit	Auswirkung	Auswirkung	Risikowert
Nicht genügend Akku-Nennladung	Die Energieaufnahme der gesamten Schaltung übersteigt die mögliche Energieleistungsdichte der kommerziell erhältlichen Akkus	3	Das Produkt kam im gewünschten Rahmen nicht umgesetzt werden	4	Hauptursache finden und mit Alternativen lösen
Leistungsaufnahme der LEDs	Die Leistungsaufnahme der LEDs reduziert die Einzahltau des Produktes	3	Die Mindestlaufzeit des Gerätes kann nicht eingehalten werden	4	Alternativen in der Evaluationsphase finden
Gerät kam nicht programmiert werden	Die Programmierschnittstelle kann nicht verwendet werden	2	Die Software kann nicht auf das Gerät geladen werden	4	Genauere Prüfung der Kriterien bei der Auswahl
PCB wird nicht rechtzeitig bestellt / geliefert	Frühe Lieferverzögerungen wird das PCB erst viel später geliefert als geplant	2	Der Projektplan kann nicht eingehalten werden	4	PCB wird so entwickelt, dass dieses auch in der Schweiz produziert werden kann (mit Aufpreis)
Messgeräte defekt	Messungen der Energieeffizienz oder des Schalldruckpegels können nicht durchgeführt werden, da die Messgeräte defekt sind	2	Der Projektplan kann nicht eingehalten werden	3	Alternative Messgeräte eruiieren
PCB-Layout ist nicht rechtzeitig fertig	Das PCB-Layout wird nicht bis zum geplanten Termin fertig	2	Der Projektplan kann nicht eingehalten werden	3	Spielraum bereits im Projektplan einberechnen
Kein passendes MEMS-Mikrofon	Die auf dem Markt vorhandenen Mikrofone erfüllen die gewünschten Anforderungen nicht	1	Alternativen zu MEMS-Mikrofonen müssen geprüft werden	4	Abklärung der Anforderungen bereits bei der Recherche
Halbleiterknappheit	Die benötigten Bauteile sind nicht mehr lieferbar	1	Das Produkt kam nicht fertig gebaut und getestet werden	4	Mehrere Lieferanten für das selbe Bauteil, Standard-Bauteile einsetzen
Krankheitsbedingter Ausfall	Die Arbeit muss krankheitsbedingt unterbrochen werden	1	Der Projektplan kann nicht eingehalten werden	4	Spielraum bereits im Projektplan einberechnen
Kostendruck überlegen	Die Anschaffung der Bauteile übersteigt das vorgegebene Kostenbudget	1	Die Arbeit könnte im geplanten Massstab nicht durchgeführt werden	3	Detaillierte Kostenaufstellung zu Beginn des Projektes
Der falsche Mikrocontroller wurde für den Einsatzzweck wurde der falsche Mikrocontroller eingesetzt		1	Das Projekt kann nicht im beschriebenen Rahmen durchgeführt werden	3	Genauere Prüfung der Kriterien bei der Auswahl
W'heit: 1 = Tief, 3 = Hoch					
Auswirkung: 1 = Tief, 4 = Hoch					
Risikowert: 1 = minimal, 12 = maximal					

10.8 Zeitplan

Zeitplan		19.02	26.02	04.03	11.03	18.03	25.03	01.04	08.04	15.04	22.04	29.04	06.05	13.05	20.05	27.05	03.06
		SW 01	SW 02	SW 03	SW 04	SW 05	SW 06	SW 07	SW 08	SW 09	SW 10	SW 11	SW 12	SW 13	SW 14	SW 15	-
		Ostern															
Vorbereitung, Recherche und Doku																	
Kickoff-Meeting		19.02															
Recherchen																	
Evaluation Microcontroller																	
Evaluation MEMS Mikrofon																	
Evaluation visuelle Anzeige																	
Zeitplan & Anforderungsliste erstellt			26.02														
Dokumentation weiterführen																	
Dokumentation beendet																	
Prototyping & Testing																	02.06
Arbeiten mit dem Evaluationsboard																	
Ausarbeitung des Konzeptes																	
Entwicklung PCB																	
Entwicklung Software																	
Zwischenpräsentation vorbereiten																	
Zwischenpräsentation											26.04						
Finalisierung																	
Optimierung des Codes																	
Bereinigung der Codebase																	
Reserve																	
Vorbereitung / Abgabe Plakat																	
Schlussabgabe Dokumentation																	07.08
Abschlusspräsentation vorbereiten																	
Abschlusspräsentation																	
																	10.06-28.06

Projekt-Meilensteine	19.02.2024
Projektstart	TBD
Zwischenpräsentation	07.06.2024
Abgabe Schlussbericht	10.6.-28.6.
Abschlusspräsentation	03.07.2024
Diplomausstellung	

kritische Tätigkeiten sind rot hervorgehoben