

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
2	Stand der Technik	4
3	Mikrofon	5
3.1	Grundlagen	5
3.1.1	MEMS	5
3.1.2	I2S	6
3.1.3	PDM	6
3.1.4	PCM	7
3.1.5	Schalldruckpegel	8
3.1.6	Frequenzbewertung	8
3.2	Komponentenwahl	9
3.2.1	Kriterien	9
3.2.2	Vergleich	10
3.2.3	Fazit	10
4	Mikrocontroller	11
4.1	Grundlagen	11
4.1.1	DMA	11
4.1.2	Bootloader	11
4.1.3	RTC	12
4.1.4	Low Power	12
4.1.5	Peripherie in Hardware oder Software	12
4.2	Komponentenwahl	13
4.2.1	Kriterien	13
4.2.2	Vergleich	14
4.2.3	Fazit	14
5	LED	15
5.1	Grundlagen	15
5.1.1	Wellenlänge	15
5.1.2	Leistungsaufnahme	16
5.1.3	Lichtleistung	16

5.1.4	Vorwiderstand / Strombegrenzung	16
5.2	Komponentenwahl	16
5.2.1	Kriterien	16
5.2.2	Vergleich	17
5.2.3	Fazit	17
6	Entwicklung	18
6.1	Konzept	18
6.2	Hardware	20
6.2.1	PCB	20
6.2.2	Kosten	22
6.3	Software	23
6.3.1	Timer	23
6.3.2	Filterdesign	24
6.3.3	PDM	25
6.3.4	I ² C	26
6.3.5	SPI	26
6.3.6	RTC	26
7	Messungen	27
7.1	Leistungsaufnahme	27
7.2	Mikrofon-Messungen	29
7.3	Vergleich	29
8	Stolpersteine	30
9	Fazit und Ausblick	31
10	Anhang	32
10.1	Fremdwörter	33
10.2	Messmittel	33
10.3	PCB-Versionen	34
10.4	Software	35

1 Einleitung

1.1 Ausgangslage

Die Firma hEar hat es sich zum Ziel gesetzt, gegen **TODO**. Dazu wurde in der Masterarbeit von Sophie Mia Willener eine Marktanalyse durchgeführt, sowie ein erster Prototyp gebaut. Dieser Prototyp ist jedoch noch unhandlich und 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 kalibriert und dessen Qualität mit auf dem Markt bereits vorhandenen Geräten verglichen.

2 Stand der Technik

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

3.1.1 MEMS

Mittels **Micro Electro-Mechanical Systems** 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 (2), 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 (1), wobei je nach PCB-Layout nicht beide Varianten verwendet werden können.

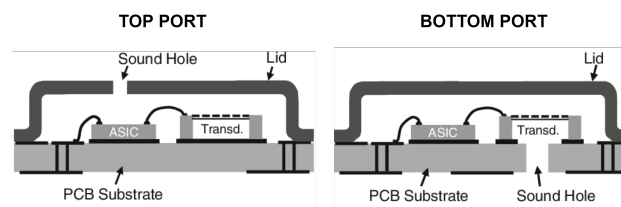


Figure 1: Unterschied MEMS-Mikrofone | Quelle: [1]

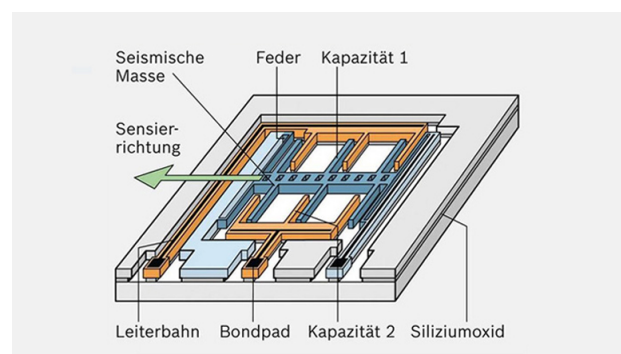


Figure 2: Beispiel MEMS-Beschleunigungssensor | Quelle: [2]

3.1.2 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**.

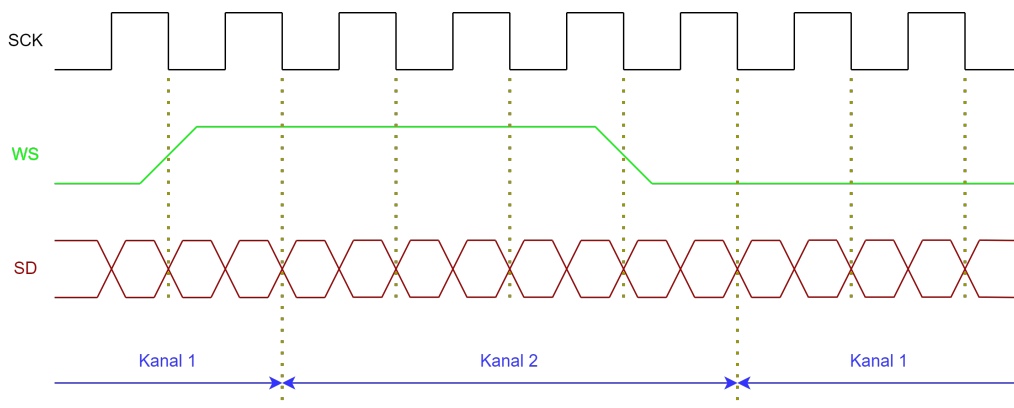


Figure 3: Übersicht I2S-Signale

3.1.3 PDM

Pulse Density Modulation 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 Taktrate (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 (3.1.2) werden lediglich zwei Pins zwischen Mikrofon und Empfänger benötigt:

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

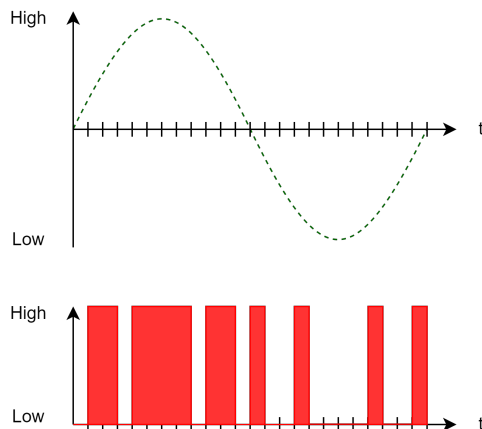


Figure 4: Beispiel PDM-Signal

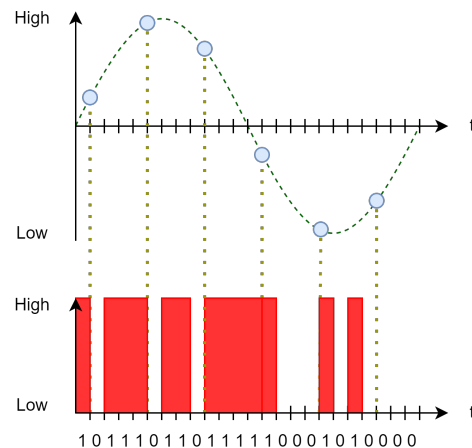


Figure 5: Beispiel PCM-Signal

3.1.4 PCM

Bei **P**ulse **C**ode **M**odulation wird jeder analoge Messwert in einem digitalen Bereich abgebildet (Abbildung 5). Je nach benötigter Genauigkeit fällt dieser Bereich mal grösser, mal kleiner aus. Bei der Datenübertragung mittels I²S (3.1.2) geschieht diese Umwandlung direkt im Sender und erzeugt somit das SD-Signal. Bei Sendern mit PDM-Ausgang (3.1.3) ist dies nicht der Fall.

Hier ist im Empfänger zwingend eine Peripherie notwendig, welche das PDM-Signal mittels Unterabtastung in ein PCM-Signal umwandelt.

3.1.5 Schalldruckpegel

TODO

3.1.6 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 [3] ist das Gehör besonders anfällig auf äussere Stimulation. Abbildung 6, ursprünglich durch Fletcher & Munson, mittlerweile auch durch den ISO226-Standard beschrieben, zeigt diesen Umstand. Um der Problematik aus Abbildung 6 Sorge tragen zu können, wird ein sogenanntes Frequenzbewertungsfilter ¹, Abbildung 7, 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

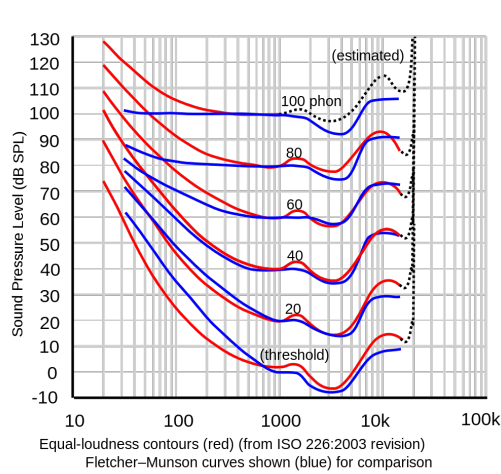


Figure 6: Phon-Kurven im Vergleich |
Quelle: [3]

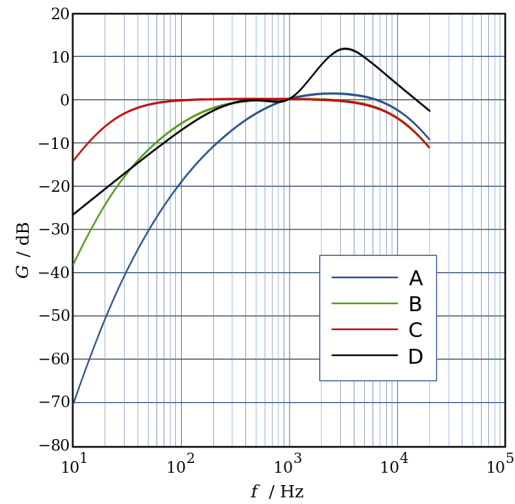


Figure 7: Frequenzbewertungsfilter |
Quelle: [4]

3.2 Komponentenwahl

3.2.1 Kriterien

- Standort der Mikrofonöffnung
- 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

4.1.1 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.

4.1.2 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.

4.1.3 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. [5]

4.1.4 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 8 ersichtlich, sinkt zwar die Leistungsaufnahme mit jeder Stufe, jedoch werden dabei gewisse Peripherien abgeschaltet und die allgemeine Startzeit des Systems wird erhöht.



Figure 8: Vergleich Low-Power-Modi STM | Quelle: [6]

4.1.5 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-Layouten.

- 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 9: 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

5.1.1 Wellenlänge

Das für den durchschnittlichen Menschen sichtbare Lichtspektrum beginnt bei 380nm (blau) und endet bei 780nm (rot)[7]. Wie der Abbildung 10 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.

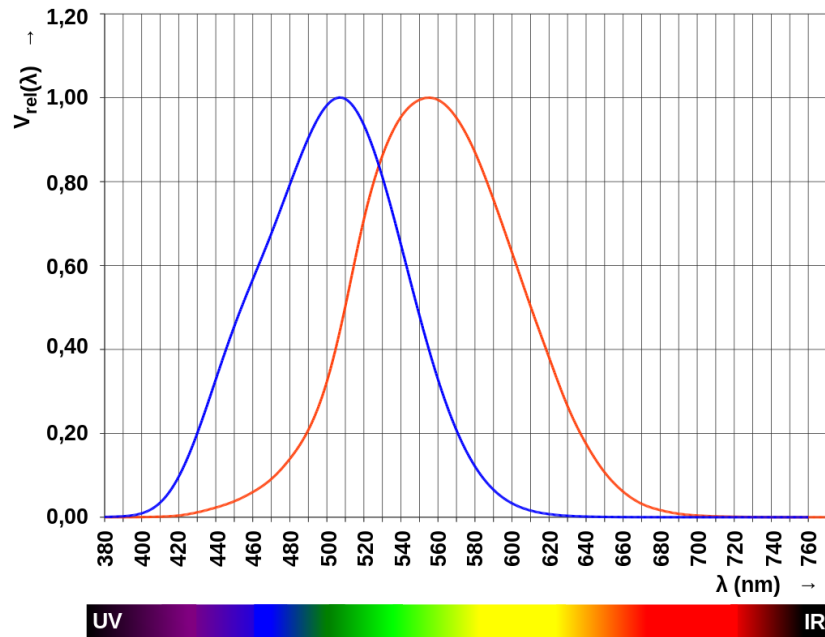


Figure 10: Sensitivität des menschlichen Auges auf das Lichtspektrum bei Tag (**schwarz**) und Nacht (**blau**) | Quelle: [7]

5.1.2 Leistungsaufnahme

TODO

5.1.3 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.

5.1.4 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 11, oder eine Konstantstromquelle eingesetzt werden. Dadurch entfällt der Vorwiderstand und die Effizienz des Teilsystems wird erhöht.

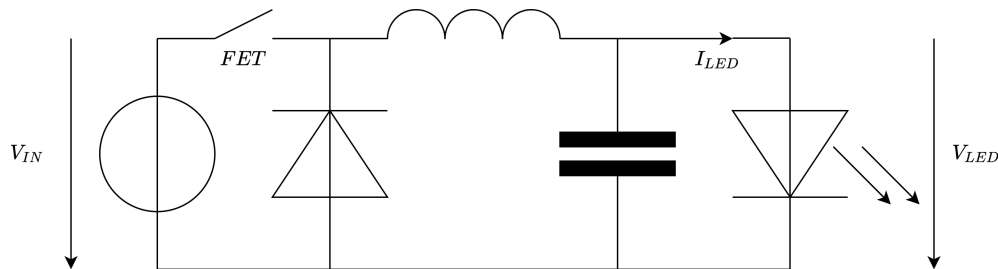


Figure 11: Buck Converter

5.2 Komponentenwahl

5.2.1 Kriterien

- Lichtleistung

²variiert je nach LED Typ und Farbe

- Wellenlänge

5.2.2 Vergleich

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

5.2.3 Fazit

Wie im Kapitel 5.1.1 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.

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

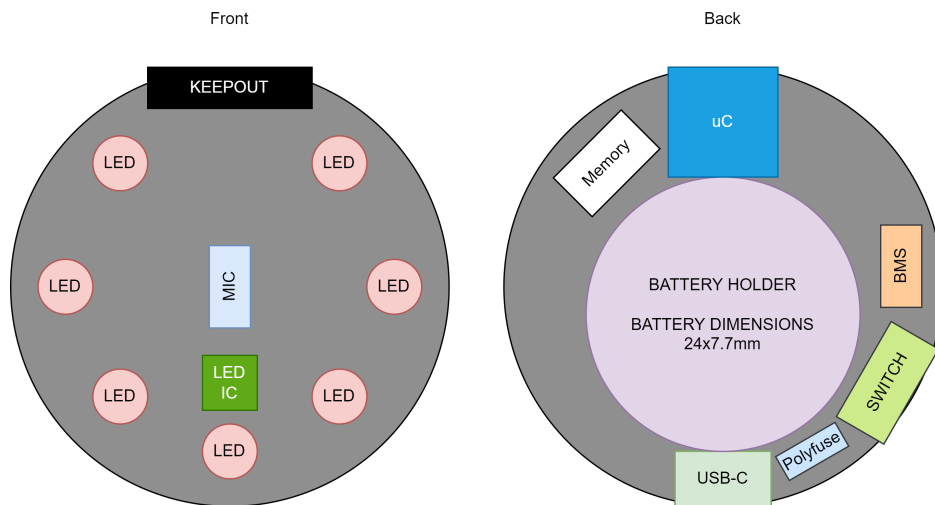


Figure 12: Konzept PCB-Layout

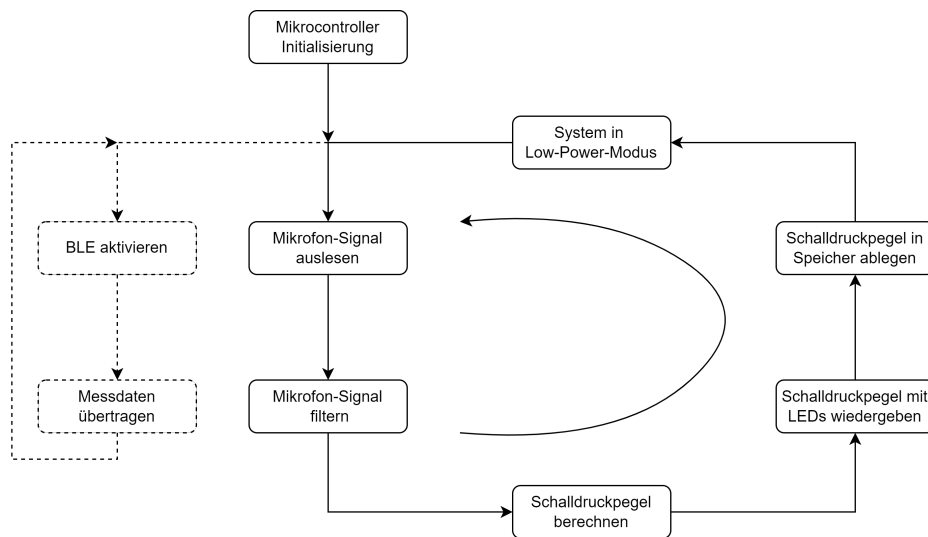


Figure 13: Konzept Softwareablauf

6.2 Hardware

6.2.1 PCB

Das PCB durchlief mehrere Iterationen. Nachfolgend treten die Änderungen mit den benötigten Zusatzinformationen chronologisch auf. 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. **TODO** IN DEN ANHANG BILDER DER DIV. VERSIONEN DES PCB

Sicherung

Der Fall eines Kurzschlusses auf Geräteseite wird mittels einer rückstellbaren Sicherung (PPTC⁴) 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 5.1.4). 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.

⁴**P**olymeric **P**ositive **T**emperature **C**oefficient, automatisch rückstellbare Sicherung von Littlefuse

USB-C-Buchse

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.

P-Kanal MOSFET

Für den Verpolungsschutz kann im Grunde auch eine simple Diode (oder Schottky-Diode⁵) verwendet werden. Der daraus folgende Spannungsabfall ist jedoch für ein akkubetriebenes Gerät nicht ideal. Die Lösung bietet ein P-Kanal-MOSFET, wie in Abbildung 14. Die Z-Diode, sowie der Gate-Widerstand, werden jedoch weggelassen, da die Batteriespannung die maximale Source-Gate-Spannung des gewählten FETs nicht überschreitet.

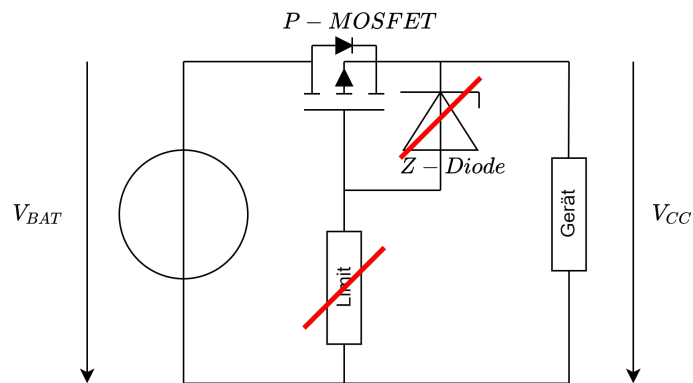


Figure 14: Verpolungsschutz mit P-Kanal MOSFET

6.2.2 Kosten

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.

Die vorhandenen Kondensatoren, sowie die benötigten Widerstände werden in der Tabelle 3 unter Diverse zusammengefasst. Dies aus dem Grund,

⁵Die 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 IC	1.35
SunLED	XZCM2CRK53WA-8VF	LED RED CLEAR 2SMD	0.2072
C&K	JS102011SAQN	Schalter 0.3A@6V	0.453
Keystone Electronics	1025-7	Batteriehalter 24x7.7mm	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 TOP	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 13 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 10.4 zu finden.

6.3.1 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 15 ersichtlich.

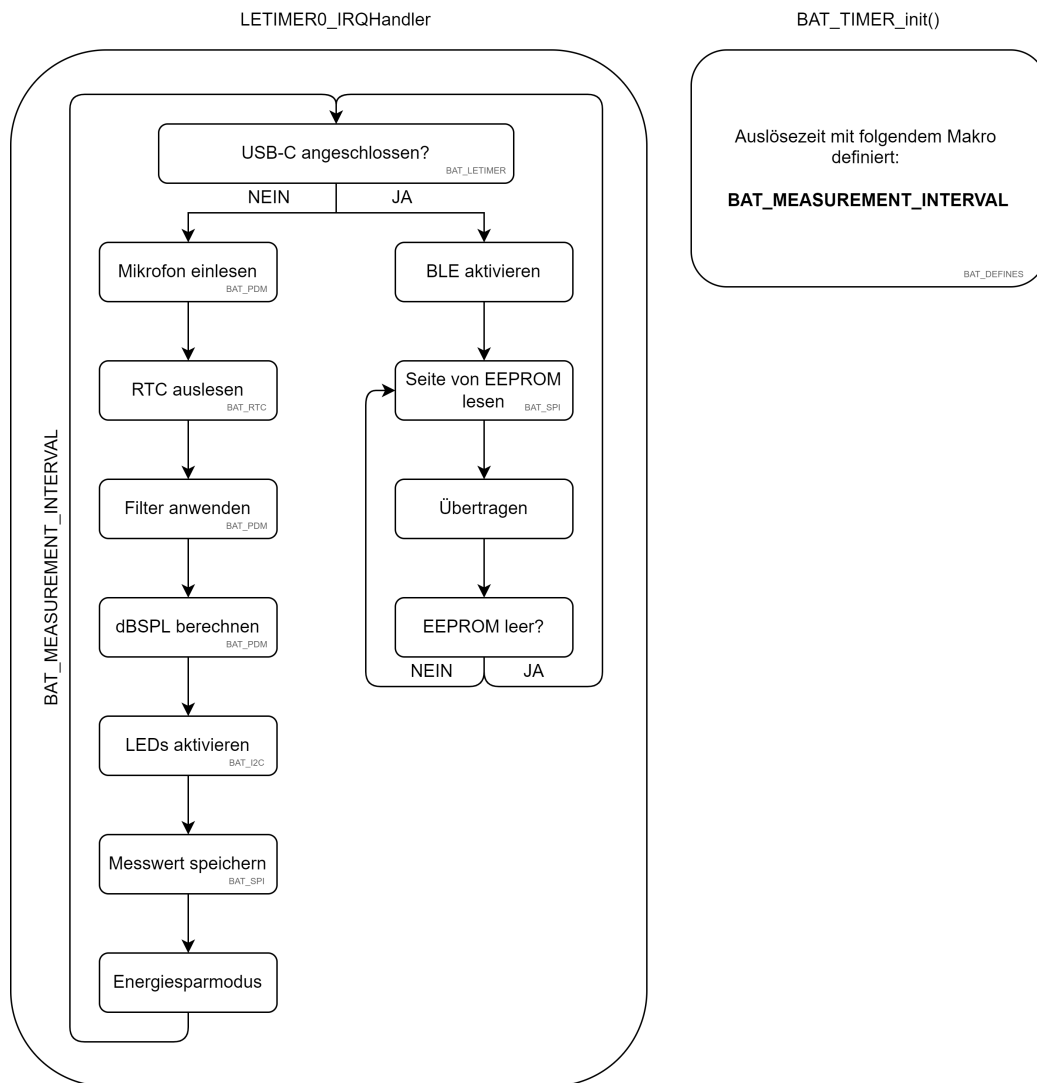


Figure 15: Übersicht zu (LE)Timer-Funktionalität

6.3.2 Filterdesign

Wie im Unterkapitel 3.1.6 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 werden jedoch ausschliesslich in der S-Ebene (Laplace-Bereich, zeitkontinuierlich) veröffentlicht. Dadurch müssen diese mit der bilinen Transformation [8] vom Frequenz- in den Zeitbereich transformiert werden.

$$G_A(s) = \frac{7.39705 \cdot 10^9 \cdot s^4}{(s + 129.4)^2 \cdot (s + 676.7) \cdot (s + 4636) \cdot (s + 76617)^2} \quad (1)$$

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

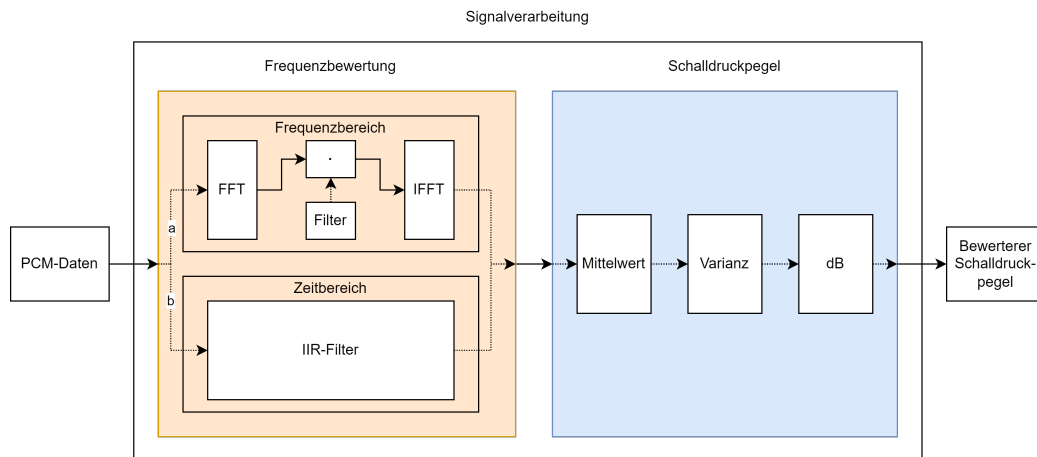


Figure 16: Unterschied Zeit- und Frequenzbereich zur Frequenzgewichtung

6.3.3 PDM

TODO

6.3.4 I²C

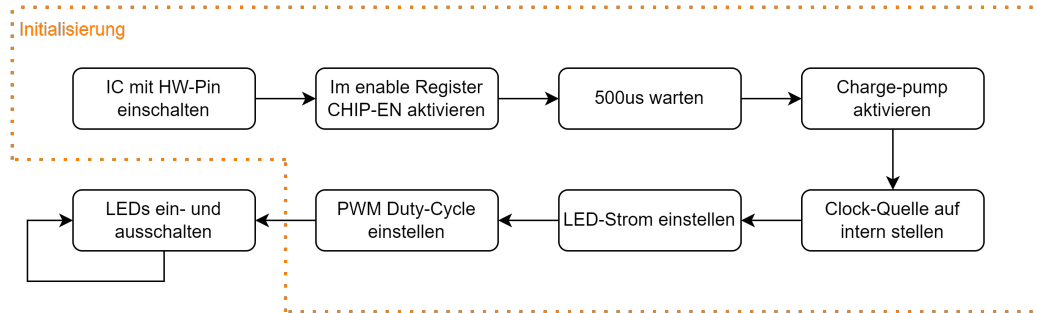


Figure 17: Softwareablauf I²C

6.3.5 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.

6.3.6 RTC

TODO

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 energieeffiziente Möglichkeit gewählt, ohne damit die Leistungsfähigkeit massgeblich zu beeinflussen.

Mikrocontroller

TODO

Mikrofon

Wie der Formel 3 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 30ms Start- und Messzeit entfällt. Dadurch sind höher aufgelöste Messintervalle möglich. Siehe Messung TODO der einzelnen Module.
- Das Mikrofon wird nur dann aktiviert, wenn es benötigt wird. Dadurch sinkt die benötigte Leistung von $580\mu Ah$ auf $87.2\mu Ah$ (3). 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.

$$Leistung_{Mikrofon} = \underbrace{580\mu A \cdot 30ms \cdot 4}_{Performance-Modus} + \underbrace{20\mu A \cdot 220ms \cdot 4}_{Standby} = 87.2\mu Ah \quad (3)$$

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 ($3mAh$) von 512 Bytes. Gemäss folgender Mischrechnung (4) kann die ungefähre Leistungsaufnahme approximiert werden.

$$\underbrace{3mA \cdot 4.5ms}_{\text{Schreiben}} + \underbrace{1.5mA \cdot 2ms}_{\text{Lesen}} + \underbrace{35\mu A \cdot 993.5ms}_{\text{Standby}} = 51.3\mu Ah^6 \quad (4)$$

Übersicht berechnet

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

Table 4: Berechnete Ströme des Gesamtsystems

Übersicht gemessen

TODO

⁶Alle Zeiten gemäss Datenblatt

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

Table 5: Gemessene Ströme des Gesamtsystems

7.2 Mikrofon-Messungen

TODO

7.3 Vergleich

TODO

8 Stolpersteine

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

9 Fazit und Ausblick

TODO

10 Anhang

References

- [1] G. Feiertag, M. Winter, and A. Leidl, “Flip chip packaging for MEMS microphones,” *Microsystem Technologies*, vol. 16, pp. 817–823, May 2010.
- [2] “Peripherer Beschleunigungssensor.”
- [3] 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.
- [4] “Frequenzbewertung,” Oct. 2023. Page Version ID: 238201232.
- [5] G. Dighe, “TPS65950 Real-Time Clock Timing Compensation,” Oct. 2008.
- [6] “STM32L4 Series - PDF Documentation,” Mar. 2024.
- [7] “V-Lambda-Kurve,” Dec. 2023. Page Version ID: 240001066.
- [8] A. V. Oppenheim, *Zeitdiskrete Signalverarbeitung*. R. Oldenbourg.

Abbildungsverzeichnis

1	Unterschied MEMS-Mikrofone Quelle: [1]	5
2	Beispiel MEMS-Beschleunigungssensor Quelle: [2]	5
4	Beispiel PDM-Signal	7
5	Beispiel PCM-Signal	7
6	Phon-Kurven im Vergleich Quelle: [3]	9
7	Frequenzbewertungsfilter Quelle: [4]	9
8	Vergleich Low-Power-Modi STM Quelle: [6]	12
9	Vergleich von möglichen Mikrocontrollern	14
10	Sensitivität des menschlichen Auges auf das Lichtspektrum bei Tag (schwarz) und Nacht (blau) Quelle: [7]	15
11	Buck Converter	16
12	Konzept PCB-Layout	19

13	Konzept Softwareablauf	19
14	Verpolungsschutz mit P-Kanal MOSFET	22
15	Übersicht zu (LE)Timer-Funktionalität	24
16	Unterschied Zeit- und Frequenzbereich zur Frequenzgewichtung	25
17	Softwareablauf I ² C	26
18	V1-0 Front	34
19	V1-0 Back	34
20	V1-1 Front	34
21	V1-1 Back	34
22	V1-2 Front	35
23	V1-2 Back	35
24	V1-3 Front	35
25	V1-3 Back	35

10.1 Fremdwörter

CRC

Register

Pins

Embedded

ppm

flashen

Li-Po

Li-Ion

RTOS

10.2 Messmittel

- Saleae Logic Analyzer - Logic 8
S/N: T&A 36 093
- Logic 2
Version: 2.4.14

10.3 PCB-Versionen

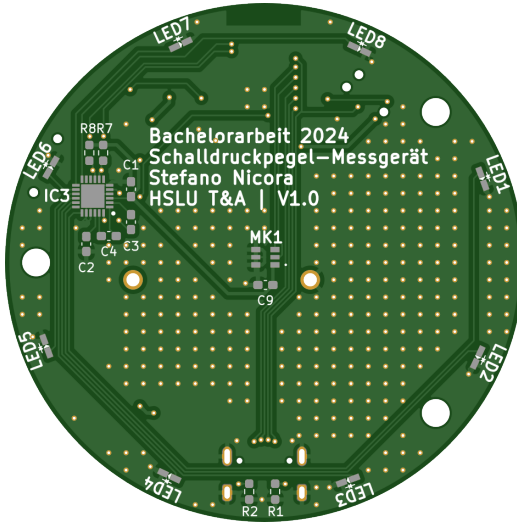


Figure 18: V1-0 Front

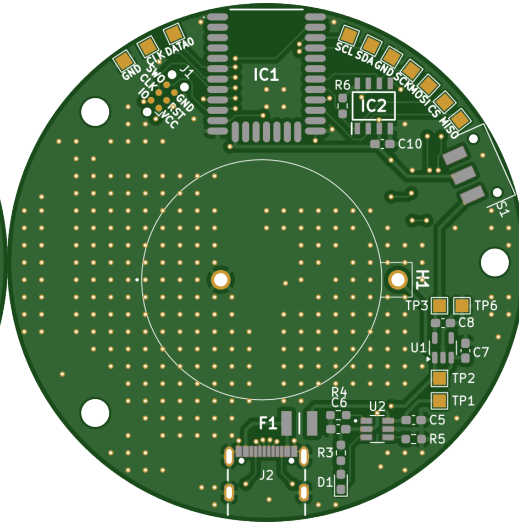


Figure 19: V1-0 Back

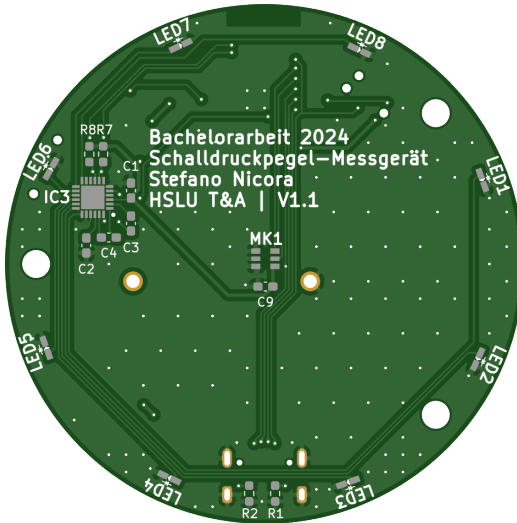


Figure 20: V1-1 Front

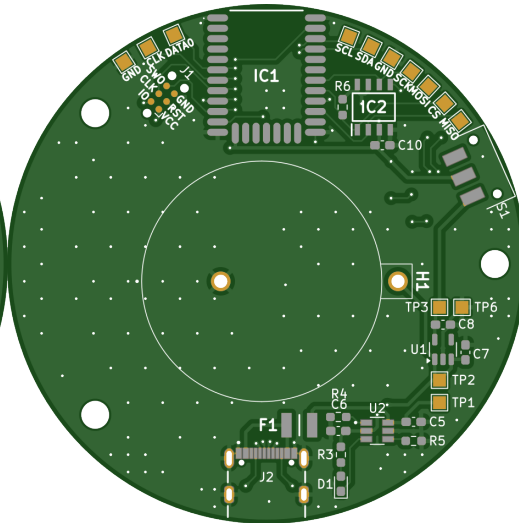


Figure 21: V1-1 Back

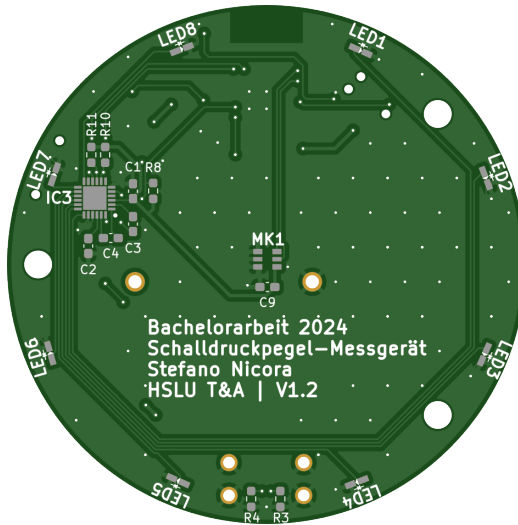


Figure 22: V1-2 Front

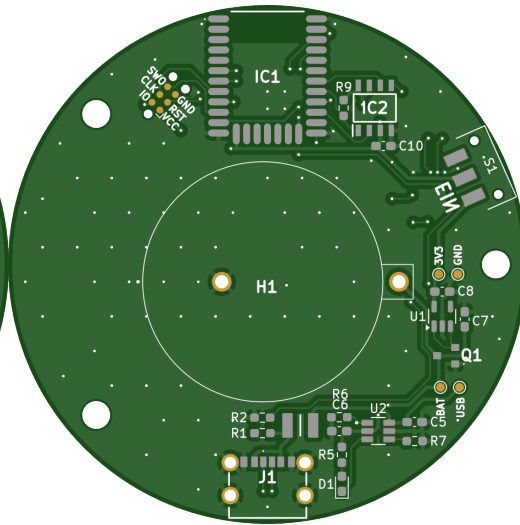


Figure 23: V1-2 Back

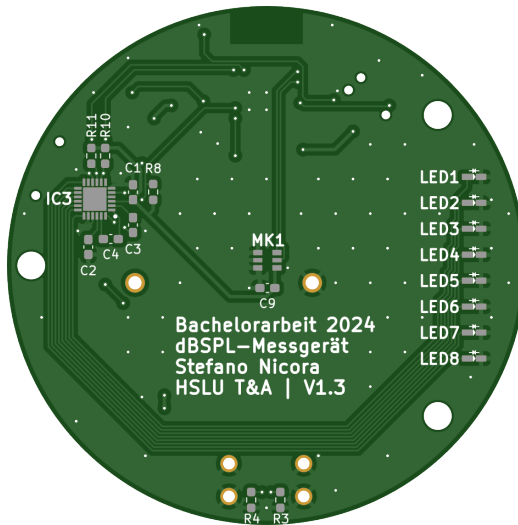


Figure 24: V1-3 Front

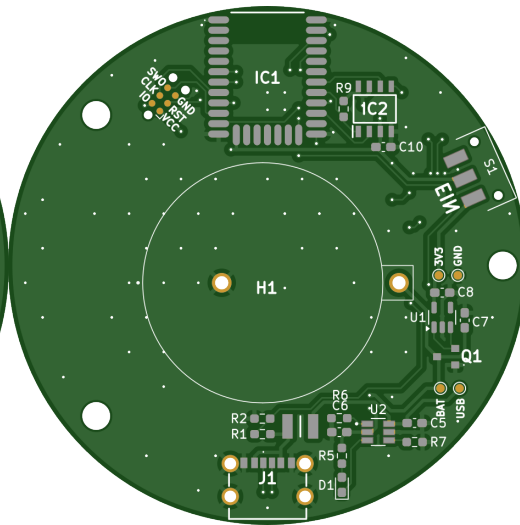


Figure 25: V1-3 Back

10.4 Software