Hochschule Luzern
Technik und Architektur

Bachelor Thesis

Gerät zur Überwachung von Umgebungslärm

Stefano Nicora

7. Juni 2024

Bachelor-Thesis an der Hochschule Luzern - Technik & Architektur

Titel	**Gerät zur Überwachung von Umgebungslärm**
Diplomandin/Diplomand	**Nicora, Stefano**
Bachelor-Studiengang	**Bachelor Elektrotechnik und Informationstechnologie**
Semester	**FS24**
Dozentin/Dozent	**Eberle, Patric**
Expertin/Experte	**Jäggi, Reto**

Abstract Deutsch
Die nachfolgende Arbeit befasst sich mit der Entwicklung einer kombinierten Software- und Hardware-Lösung zur Erfassung von Umgebungslärm. In einem ersten Schritt wurden die benötigten Bauteile identifiziert und evaluiert. Darauf folgte die Konzeptionierung sowie die Entwicklung der eigentlichen Soft- und Hardwareplattform. In dieser Phase, hat die Hardware drei Iterationen durchlaufen. Im Anschluss wurde das vorliegende Produkt mit einem Referenzgerät verifiziert. Dieser Vergleich hat gezeigt, dass das Gerät zwar einsatzfähig ist, jedoch noch Verbesserungs- und Erweiterungspotential aufweist. Dazu wurden entsprechende Leitfäden formuliert.

Abstract Englisch
The following work deals with the development of a combined software and hardware solution for recording environmental noise. In a first step, the required components were identified and evaluated. This was followed by the conceptualisation and development of the respecive software- and hardware-platforms. In this phase, the hardware went through a total of three iterations. The created product was then verified with a reference device. This comparison showed that although the device is operational, there is still potential for improvement and expansion. Corresponding guidelines were formulated for this purpose.

Ort, Datum Luzern, 07.06.2024
© Stefano Nicora, Hochschule Luzern – Technik & Architektur

Alle Rechte vorbehalten. Die Arbeit oder Teile davon dürfen ohne schriftliche Genehmigung der Rechteinhaber weder in irgendeiner Form reproduziert noch elektronisch gespeichert, verarbeitet, vervielfältigt oder verbreitet werden.

Sofern die Arbeit auf der Website der Hochschule Luzern online veröffentlicht wird, können abweichende Nutzungsbedingungen unter Creative-Commons-Lizenzen gelten. Massgebend ist in diesem Fall die auf der Website angezeigte Creative-Commons-Lizenz.

Inhaltsverzeichnis

1 Einleitung **1**
1.1 Ausgangslage 1
1.2 Ziele 1
1.3 Vorgehen 2

2 Stand der Technik **3**

3 Mikrofon **4**
3.1 Grundlagen 4
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 18
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 24
6.3 Software 24

7 Messungen **33**
7.1 Ausführungsgeschwindigkeit 33
7.2 Energieaufnahme 33
7.3 Mikrofon-Messungen 36

8 Validieren der Anforderungen **41**

9 Stolpersteine **42**

10 Fazit und Ausblick **43**

11 Anhang **46**

1 Einleitung

Das nachfolgende Kapitel befasst sich mit den Grundanforderungen des Projektes. Unter anderem, welche Ziele erreicht werden sollen und wie sieht das gesamtheitliche Vorgehen aus.

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 konzeptionelle Idee für ein Messgerät ausgearbeitet. Zusätzlich dazu wurde eine Marktanalyse durchgeführt sowie ein erster Prototyp gebaut. Dieser ist jedoch noch unhandlich, nicht verifiziert und somit nicht für den Massenmarkt geeignet. An diesen Prototypen knüpft nun die nachfolgende Bachelorarbeit an und versucht die formulierten Ziele umzusetzen.

1.2 Ziele

In Übereinstimmung mit der geschilderten Ausgangslage, beabsichtigt diese Arbeit 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.

- Die Bauform der Platine fällt rund aus.
- Die Gesamtkosten betragen maximal 50 CHF.

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

1.3 Vorgehen

Zu Projektbeginn, wurde mit hEar die zu erreichenden Ziele der Arbeit ausgearbeitet. Auf Basis dessen wurde der Anforderungskatalog (vgl. Anhang 11) erstellt. Dieser ermöglichte es anschliessend, eine umfangreiche Risikoanalyse (vgl. Anhang 11) sowie einen geeigneten Zeitplan (vgl. Anhang 11)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 folgte zum Schluss die Verifizierung mit den dazugehörigen Messungen (7) und die daraus abgeleiteten Schlussfolgerungen (10).

2 Stand der Technik

Eine Vielzahl von unterschiedlichen Herstellern bietet diverse Messgeräte zur Messung des Schalldruckpegels an. Die Preise reichen von 10 CHF für ein nicht genauer spezifiziertes Gerät von beispielsweise AliExpress bis hin zu über 3000 CHF für ein XL2 (vgl. Abbildung 1) von NTI Audio (inkl. M2211-Mikrofon). Gewisse Gemeinsamkeiten haben alle diese Geräte. 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. Diese Geräte sind jedoch 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. Folglich wird es mit dem oben genannten XL2 verglichen. Die zentralen Parameter([1]) sind die folgenden:

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

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

3 Mikrofon

Als erste Kernkomponente gilt es, ein geeignetes Mikrofon zu evaluieren. Ein ungeeignetes Mikrofon entscheidet darüber, ob das Endprodukt seinen Zweck erfüllt oder nicht. Aus diesem Grund folgen anschliessend die benötigen Grundlagen, sowie die Komponentenwahl.

3.1 Grundlagen

MEMS

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

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

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

I2S

Inter-**I**ntegrated **S**ound (I^2S) bezeichnet eine Bus-Schnittstelle, welche von Philips zur Übertragung von digitalen Audiosignalen entwickelt wurde. Ähnlich wie I^2C (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 unabhängige Mikrofone, zu übertragen.

- **SD** (Serial Data)
  Beinhaltet den eigentlichen Datenstream mit der Datenrate, definiert durch **SCK**, und der Länge, definiert durch **WS**.

Abbildung 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 zu verarbeitende 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 Taktrate, mit welcher die Daten übertragen werden.

Abbildung 5: Beispiel PDM-Signal

Abbildung 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.

Schalldruck(pegel)

Damit wird 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 Schalldruck auch mit **S**ound **P**ressure **L**evel (SPL) angegeben. Da das menschliche Gehör Lautstärke jedoch logarithmisch wahrnimmt, wird der SPL in der Akustik mittels dBSPL (1) angegeben.

$$dB_{SPL} = 20 \cdot log_{10}(\frac{P}{P_0}) \tag{1}$$

Abbildung 7: Grundbegriffe Akustik | Beispiel: ICS-41351

AOP

Der **A**coustic **O**verload **P**oint bezeichnet den durch ein Mikrofon maximal messbaren SPL, ohne dass es dabei zu einem Klirrfaktor (THD) von mehr als 10% kommt. Dieser ist insbesondere dann wichtig, wenn Messungen in lauten Umgebungen vorgenommen werden müssen.

SNR

Der **S**ignal to **N**oise **R**atio oder Signal Rausch Abstand beschreibt die Differenz zwischen dem Referenzschalldruckpegel von 94dBSPL bei 1kHz und dem Rauschboden. Je höher diese Distanz, desto leisere Signale können noch rauschfrei gemessen werden.

Rauschboden

Dieser bezeichnet den kleinstmöglich noch messbaren Wert, welcher nicht im Grundrauschen untergeht. Er ist vom SNR des Mikrofons abhängig.

Dynamikbereich

Mit dem Dynamikbereich 7 wird der maximal messbare Schalldruck-Unterschied bezeichnet. Dieser wird folgendermassen berechnet:

$$DynamicRange(DR) = \underbrace{dBFS_{@1kHz}}_{Datenblatt[4]} + \underbrace{SNR}_{Datenblatt[4]} \tag{2}$$

Signalauflösung

Abbildung 8: Mind. benötigte Auflösung in Bit für gewünschten max. SPL

Zeitgewichtung

Die Zeitgewichtung wird mit dem Standard IEC 61672-1 beschrieben und definiert, wie schnell die Anzeige des Gerätes auf eine Pegeländerung reagieren kann. Dabei wird gemäss Abbildung 9 zwischen den Modi **S**low und **F**ast unterschieden. Die Modi stammen aus der Zeit der analogen Anzeigesysteme, wobei schnelle Änderungen der Anzeige nur schwer ablesbar sind. Implementationstechnisch werden neuere Messwerte stärker gewichtet, als die alten um auf kurzzeitige Amplitudenänderungen besser reagieren zu können.

Abbildung 9: Unterschied der Zeitgewichtung | Quelle: [5]

Frequenzbewertung

Unser Gehör reagiert zum einen nichtlinear auf Lautstärkeveränderungen, zum anderen auch unterschiedlich sensitiv auf unterschiedliche Frequenzen im hörbaren Bereich (20Hz-20kHz). Insbesondere im Frequenzbereich zwischen 3kHz bis 4kHz [6] ist das Gehör besonders anfällig auf äussere Stimulationen. Abbildung 10, ursprünglich durch Fletcher & Munson, mittlerweilen auch durch den ISO226-Standard beschrieben, zeigt diesen Umstand. Um der Problematik aus Abbildung 10 Sorge tragen zu können, wird ein sogenannter Frequenzbewertungsfilter [1], Abbildung 11, 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 zur Messung in besonders lauter Umgebung eingesetzt

[1] Weighting curves

Abbildung 10: Phon-Kurven im Vergleich | Quelle: [6]

Abbildung 11: Frequenzbewertungsfilter | Quelle: [7]

3.2 Komponentenwahl

Wie den Anforderungen, sowie den Grundlagen zu entnehmen ist, müssen für die Wahl des besten Mikrofons gewisse Kritierien berücksichtigt werden.

3.2.1 Kriterien

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

3.2.2 Vergleich

Typ	**Data**	**Öffnung**	**SNR[dB]**	**AOP[dB]**	f_{min}**[Hz]**	f_{max}**[Hz]**
ICS-43434	I2S	unten	65	120	60	20000
ICS-41351	PDM	oben	65	129.5	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

Tabelle 1: Vergleich Mikrofone

3.2.3 Fazit

Ein Drittel der untersuchten Mikrofone haben die Mikrofon-Öffnung auf der Unterseite. Dies ermöglicht es, einen höheren SNR gewährleisten zu können, jedoch ist diese Montageart für das Endprodukt nicht geeignet (vgl. Kapitel 6). Bei den restlichen Mikrofonen sticht das ICS-41351 von TDK InvenSense mit seinem hohen SNR, AOP sowie der hohen Frequenzbandbreite heraus.

4 Mikrocontroller

Der Mikrocontroller repräsentiert die zweite Kernkomponente des Systems. Aus diesem Grund folgen anschliessend die benötigen Grundlagen, sowie die eigentliche Komponentenwahl.

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, I^2S, 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 sind zwei Möglichkeiten vorhanden, 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 I^2S einkommende Daten automatisch aus dem Eingangsregister in den Speicher geladen werden. Bei genügend grosser Datenmenge (definiert durch den Entwickler), kann der Rechenkern wieder aus dem Energiesparmodus aufgeweckt werden und gesammelten Daten verarbeiten.

- 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 der Datentransfer 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 herunterzuladen 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 **R**eal **T**ime **C**lock 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 4 min und 19 s @32kHz entspricht, enthalten die meisten RTCs Kompensationsmechanismen, um diese Zeit auf unter 100 ms zu bringen. [8]

Low Power

Mit Low Power wird, insbesondere bei Embedded-Systemen, die reduzierte Energieaufnahme 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 12 ersichtlich, sinkt zwar die Energieaufnahme mit jeder Stufe, jedoch werden dabei gewisse Peripherien abgeschaltet und die allgemeine Startzeit des Systems wird erhöht.

Abbildung 12: Vergleich Low-Power-Modi STM | Quelle: [9]

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 vorhanden) 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 geeignetsten 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	-

Abbildung 13: 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 Energieaufnahme bei einer gewissen Taktrate. Dadurch wird die Wahl nicht eingeschränkt, was die 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 zentralen 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 Charakteristiken 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)[10]. Wie der Abbildung 14 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.

Abbildung 14: Sensitivität des menschlichen Auges auf das Lichtspektrum bei Tag (**rot**) und Nacht (**blau**)| Quelle: [10]

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, >= Schwellspannung der LED [2], wird diese grundsätzlich zu einem Kurzschluss. Um den Stromfluss durch die LED begrenzen zu können, wird im Regelfall ein Vorwiderstand verwendet. Der Nachteil des Vorwiderstandes ist es, dass, gegeben durch das ohmsche Gesetzt, über diesem elektrische Leistung in Wärme umgewandelt wird. Bei einem akkubetriebenen Gerät ist dies unerwünscht. Als Alternative kann ein Buck Converter, Abbildung 15, oder eine Konstantstromquelle eingesetzt werden. Dadurch entfällt der Vorwiderstand und die Effizienz des Teilsystems wird erhöht.

Abbildung 15: Buck Converter

5.2 Komponentenwahl

Die Wahl der korrekten LED ist bei einem batteriebetriebenen Gerät von enormer Wichtigkeit. Eine ineffiziente LED verringert die Gesamtlaufzeit oder erfordert einen grösseren Akku.

[2] variiert je nach LED Typ und Farbe

5.2.1 Kriterien

Für eine effiziente und helle LED sind folgende Kriterien wichtig:

- Lichtleistung
- 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

Tabelle 2: Vergleich LED

5.2.3 Fazit

Wie im Kapitel 5.1 ersichtlich, ist die Abwägung zwischen Energieaufnahme 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 Industrieparter hEar, dient das Gerät an erster Stelle als Akustik-Warngerät. Warnungen werden üblicherweise mit einer Wellenlänge von 780nm (Rot) gekennzeichnet. Dadurch wird im Endprodukt die Low-Power-LED XZCM2CRK53WA-8V von SunLED eingesetzt.

[3] bei 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 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)
- Schalter, 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

Abbildung 16: Konzept PCB-Layout

Abbildung 17: Konzept Softwareablauf

6.2 Hardware

Auf Basis des Konzepts wurde das PCB entworfen. Dabei wurde für die optimale Platzierung, sowie die zusätzlichen Widerstände und Kondensatoren, die jeweiligen Datenblätter der Hersteller konsultiert.

6.2.1 PCB

Das PCB durchlief dabei mehrere Iterationen. Nachfolgend treten die Änderungen mit den benötigten Zusatzinformationen chronologisch auf [4]. Zudem befindet sich nachfolgend eine Übersicht, wieso, welches Bauteil eingesetzt wird.

V1-1
Lediglich kleinere Verdrahtungs- und Platzierungsoptimierungen

V1-2
Folgende Anpassungen wurden vorgenommen:

- Akku-Verpolungsschutz mittels P-Kanal MOSFET
- Testpads für I^2C, 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

[4] Detailierte Abbildungen der Versionen befinden sich im Anhang 11

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.

Sicherung
Im falle eines Kurzschlusses auf Geräteseite wird mittels einer rückstellbaren Sicherung (PPTC[5]) 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 Energieaufnahme 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

[5] **P**olymeric **P**ositive **T**emperature **C**oefficient, automatisch rückstellbare Sicherung von Littlefuse

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. Dadurch wird ein möglichst effizienter und kostengünstiger Spannungsregler verwendet. Wie auch bereits das BMS, weist der Spannungsregler möglichst wenig externe Bauteile auf.

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. Dies, weil auf den geplanten Anschlüssen zeitweise 5 V vom USB-Standard anliegen. Dadurch kann eine kostenoptimiertere Buchse verwendet werden.

P-Kanal MOSFET
Für den Verpolungsschutz kann im Grunde auch eine simple Diode (oder Schottky-Diode[6]) verwendet werden. Der daraus folgende Spannungsabfall ist jedoch für ein akkubetriebenes Gerät nicht ideal. Die Lösung bietet ein P-Kanal-MOSFET, wie in Abbildung 18 ersichtlich. Die Z-Diode, sowie der Gate-Widerstand, werden jedoch weggelassen, da die Batteriespannung die maximale Source-Gate-Spannung des gewählten FETs nicht überschreitet.

Abbildung 18: Verpolungsschutz mittels P-Kanal MOSFET

[6]Die Schwellspannung entspricht nur ca. 0.2V

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 zusammengenommen. Dies aus dem Grund, da keines dieser Bauteile einer besonderen Toleranz unterliegt. Dadurch kann bei der PCB-Bestellung eine kostenoptimierte 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

Tabelle 3: Materialliste | Stand: 01.04.2024

6.3 Software

Im Kern besteht die Software, wie in Abbildung 17 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 11 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 Schlaufe zu steuern. Die Programmabfolge ist in Abbildung 19 ersichtlich.

Abbildung 19: 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 verwendeten Frequenzbewertungsfilter sind jedoch ausschliesslich in der S-Ebene (Laplace-Bereich, zeitkontinuierlich) erhältlich. Diesbezüglich stehen, wie in Abbildung 20 ersichtlich, zwei Wege offen:

- **Frequenzbereich**
  Hier wird das PCM-codierte Signal mittels einer Fast Fourier Transformation (FFT) in den Frequenzbereich transformiert. Anschliessend können die Formeln 3 oder 4 auf das Signal angewendet werden, um die gewünschte Gewichtung vorzunehmen. Um anschliessend den Schalldruckpegel berechnen zu können, muss das Signal mittels einer inversen FFT wieder in den Zeitbereich transformiert werden. Je genauer die Frequenzbewertung sein soll, desto kleiner sind die Abstufungen von FFT und IFFT zu wählen, was zu einer Erhöhung des Berechnungsaufwandes auf dem Mikrocontroller führt.

- **Zeitbereich**
  Im Gegensatz zum Frequenzbereich muss das PCM-codierte Signal nicht erst in den Frequenzbereich transformiert werden, sondern es kann direkt durch das zeitdiskrete Filter die Gewichtung vorgenommen werden. Dabei treten jedoch zwei Hauptprobleme auf:

  - Ein diskretes Filter im Zeitbereich ist immer nur eine Approximation eines Filters im Frequenzbereich. Dies verringert die Genauigkeit des implementierten Filters.
  - Die Umwandlung eines zeitkontinuierlichen Filters in einen zeitdiskreten ist nicht trivial. Dadurch muss dieser mit beispielsweise der bilinaren Transformation [11] vom Frequenz- in den Zeitbereich transformiert werden.

  Die benötigten A- und C-Gewichtungsfilter sind bereits in Matlab [7] inkludiert. Somit können die Filterkoeffizienten direkt exportiert und in C-Code implementiert werden.

[7] filterBuilder, Signal Processing Toolbox

$$G_A(s) = \frac{7.39705 \cdot 10^9 \cdot s^4}{(s+129.4)^2 \cdot (s+676.7) \cdot (s+4636) \cdot (s+76617)^2} \tag{3}$$

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

Abbildung 20: Unterschied Zeit- und Frequenzbereich zur Frequenzgewichtung

Filterimplementation

Die aus Matlab exportieren Filterkoeffizienten weisen einen entscheidenden Unterschied zu gewöhnlichen IIR-Filterkoeffizienten auf. Der Gesamtfilter wird in Teilfilter, sogenannte BiQuads, aufgeteilt, welche anschliessend kaskadiert werden. Dies, weil die Stabilität von Filtern mit tiefer Ordnung leichter kontrolliert werden kann als bei jenen mit einer hohen Ordnung. Dadurch besteht ein einzelnes BiQuad-Filter-Element jeweils aus einem IIR-Filter zweiter Ordnung. Dabei existieren, wie in Abbildung 21 aufgezeigt, vier verschiedene Arten der BiQuad-Implementation. Oftmals verfügen Mikrocontroller bereits über eine Hardware-Implementation einer dieser Arten. Der in dieser Arbeit gewählte jedoch nicht. Die Wahl der Implementation ist dadurch frei. Aus diesem Grund wurde die "Transposed Direct Form 2" gewählt. Dies, da diese zwar mehr Variablen zur als Zwischenspeicher, jedoch weniger Rechenoperationen benötigt.

Abbildung 21: Übersicht BiQuad-Filter

PDM Clock

Das Mikrofon benötigt einen exakten Clock, um die PDM-Daten an den Mikrocontroller bzw. dessen PDM2PCM-Periphiere zu übertragen. Um das Mikrofon im "HIGH PERFORMANCE MODE" laufen lassen zu können, wird gemäss Datenblatt ([4]) ein Clock von 3.072MHz benötigt. Da dieser nicht direkt aus einem der bereits verfügbaren Clocks abgeleitet bzw. heruntergeteilt werden kann, muss dieser mittels dem integrierten PLL erzeugt werden. Der Prozess ist in Abbildung 22 ersichtlich, wobei der effektive PLL-Clock mittels der Formel 5 berechnet werden muss.

$$Frequenz_{PLL} = \underbrace{Frequenz_{ref}}_{LFXO} \cdot \frac{\overbrace{N+1}^{300<=N<=4095}}{\underbrace{M+1}_{0<=M<=4095}} \tag{5}$$

Abbildung 22: Clock-Muxing für 3.072MHz PDM

PDM CIC-Filter

Um aus dem 1-Bit PDM-Datenstream ein verarbeitbares PCM-Signal zu erhalten, wird die integrierte CIC-Filterstruktur verwendet. Gemäss [12], (7) sowie [4] muss diese folgendermassen konfiguriert sein:

- Dezimierungsrate: 64
- Wortbreite: 24 Bit
- Verstärkung (7): 0 dB
- Filterordnung: 5
- Clock-Dezimierung (6): 0
- Abtastrate: 48 kHz

$$Dezimierung = \frac{Taktfrequenz}{Abtastrate \cdot Dezimierungsrate} - 1 \tag{6}$$

$$Verstärkung = 30 - ceil\left(\frac{log_{10}\left(Dezimierungsrate^{Filterordnung}\right)}{log_{10}(2)}\right) \tag{7}$$

Schalldruckpegel

Wie in Abbildung 20 ersichtlich, durchläuft die Schalldruckpegel-Berechnung drei Phasen:

- Mittelwert | Offset-Korrektur
  Das gemessene und gefilterte Signal ist in den meisten Fällen nicht mittelwertfrei. Dadurch beinhaltet dieses einen unbekannten Offset von der X-Achse. Um im Anschluss die Signalenergie sowie den dazugehörigen dB-Wert korrekt berechnen zu können, muss das Signal jedoch mittelwertfrei sein. Dazu wird die folgende Formel vor jeder Umrechnung angewendet:

$$\bar{x} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^{n} Sample_i \tag{8}$$

- RMS | Signalenergie
  Um aus dem mittelwertfreien Signal den dB-Wert berechnen zu können, muss zuvor die mittlere Signalenergie berechnet werden. Dies geschieht mit der nachfolgenden Formel:

$$x_{RMS} = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^{n} (Sample_i - \bar{x})^2} \tag{9}$$

- dB-Umwandlung
  Zur effektiven Berechnung des Schalldruckpegels muss die allgemein gültige Formel aus der Theorie (1) mit den maximalen Messwerten erweitert werden. Gleichzeitig wird der Referenz-Schalldruckpegel P_0 durch den maximalen, digitalen Wert, $dBFS$, ersetzt. Daraus entsteht folgende, finale Formel:

$$dBSPL = \underbrace{129.5dB}_{AOP\,[4]} + 20 \cdot log_{10}\left(\frac{x_{RMS}}{8388607}\right) \tag{10}$$

---

n = Anzahl gemessene Samples
dBFS = $\frac{2^{Auflösung}}{2}$

I²C

Abbildung 23: 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

Die RTC wird, im Gegensatz zur restlichen Peripherie, nicht selbst aufgesetzt und betrieben. Dies ist darauf zurückzuführen, dass der BLE-Stack von Silicon Labs zum Zeitmanagement denselben Zeitgeber verwendet. Dadurch ist der Zugriff auf die RTC limitiert und kann nur über die nachfolgende Funktion abgerufen werden:

$$sl_sleeptimer_get_time()$$

Dabei wird die Zeit auf die Sekunde genau zurückgegeben und kann somit für die Erzeugung des Zeitstempels verwendet werden.

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, gemäss Formel 1, einer Lautstärkeverdoppelung. Somit sieht die momentane Skalierung folgendermassen aus:

Abbildung 24: Aufteilung dBSPL 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 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 4 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	

Tabelle 4: Ausführungsgeschwindigkeit der einzelnen Funktionen

7.2 Energieaufnahme

Die Energieaufnahme 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
Die Energieaufnahme des Mikrocontrollers ist nicht nur von der eigentlichen Taktrate abhängig, sondern auch welche Peripherieblöcke und Low-Power-Modi gerade aktiv sind. Dadurch lässt sich die Energieaufnahme nur sehr grob abschätzen. Mit den benötigten Peripherien aktiv, jedoch ohne eine Berechnung durchzuführen und in einen Low-Power-Modus zu wechseln, könnte die Energieaufnahme folgendermassen aussehen:

$$\approx \underbrace{27\mu A/MHz \cdot 76.8MHz}_{\mu C} + \underbrace{10\mu A/MHz \cdot 76.8MHz}_{Peripherie} = 2842\mu Ah \qquad (11)$$

Mikrofon
Wie der Formel 12 entnommen werden kann, gibt es zwei Möglichkeiten das Mikrofon zu verwenden:

- Das Mikrofon wird konstant im Performance-Modus betrieben. Durch den Einsatz von DMA sind die benötigten Messewerte 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 4 ersichtlich.

- Das Mikrofon wird nur dann aktiviert, wenn es benötigt wird. Dadurch sinkt die benötigte Leistung von $580\mu Ah$ auf 87.2 μAh (12). In der Folge erhöht sich die benötigte Messzeit um 20ms. Dies aus dem Grund, dass keine DMA verwendet wird und das Mikrofon vom Standby-Betrieb (20 μA) in den Performance-Modus (580 μA) wechselt.

$$Leistung_{Mikrofon} \approx \underbrace{580\mu A \cdot 120ms}_{Performance-Modus} + \underbrace{20\mu A \cdot 880ms}_{Standby} = 87.2\mu Ah \qquad (12)$$

EEPROM
Der Chip weist eine Vielzahl von unterschiedlichen Leistungsmodi auf. Die Energieaufnahme variiert zwischen dem niedrigen Standby-Modus ($35\mu Ah$)

und dem Schreiben einer Seite ($3mAh$) von 512 Bytes. Gemäss folgender Mischrechnung (13) kann die ungefähre Energieaufnahme approximiert werden.

$$\approx \underbrace{3mA \cdot 4.5ms}_{Schreiben} + \underbrace{1.5mA \cdot 2ms}_{Lesen} + \underbrace{35\mu A \cdot 993.5ms}_{Standby} = 51.3\mu Ah^{8} \tag{13}$$

Übersicht berechnet

Bauteil	**Strom**	**Bemerkung**
Mikrocontroller	2842 μAh	
LEDs	800 μAh	100μAh pro LED $\cdot$ 8 LEDs
LED-Treiber	600 μAh	Alle Ausgänge EIN
EEPROM	51.3 μAh	
Mikrofon	87.2 μAh	Low-Power-Modus
Total	4.4 mAh	
Total Arbeitstag à 12h	**52.6** mAh	

Tabelle 5: Berechnete Energieaufnahme des Gesamtsystems

Übersicht gemessen

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	

Tabelle 6: Gemessene Energieaufnahme des Gesamtsystems

Wie insbesondere der Tabelle 6 zu entnehmen ist, kann die Einsatzdauer von 12 Stunden mit einem 50mAh-Akku abgedeckt werden.

[8] Alle Zeiten gemäss Datenblatt

7.3 Mikrofon-Messungen

Das MEMS-Mikrofon, sowie das M2211 von NTI, wurden beide jeweils vor jeder Messung mittels dem CAL200 auf 94dBSPL kalibriert. Da die Abstände zwischen den Mikrofonen und dem CAL200 nicht identisch sind, wurden zudem noch eine Feinkalibrierung durchgeführt. Genauere Angaben dazu sind dem Anhang Messmittel sowie Kalibrationsmessung zu entnehmen.

Messaufbau SPL

- Messfrequenz: 1 kHz
- Amplitude: 1 Vrms
- Signalform: Sinus
- Gewichtung: Z
- Distanz zu Signalquelle: 100 mm ... 800 mm
- Zeitgewichtung: Slow
- Visualisierung: 30

Messaufbau Frequenzgang

- Messfrequenz: 10 Hz ... 20 kHz
- Amplitude: 1 Vrms
- Signalform: Sinus
- Gewichtung: A, C, Z
- Zeitgewichtung: Slow
- Distanz zu Signalquelle: 200 mm
- Visualisierung: 29

Abbildung 25: Frequenz vs. Schalldruckpegel-Plot der ungewichteten Messung | dB(Z)

Wie in Abbildung 25 ersichtlich, kann die Messung grob in zwei Bereiche eingeteilt werden:

- Bereich zwischen 50Hz und 2kHz
  Dieser ist unproblematisch, da er die Kennlinie des Referenzmikrofons widerspiegelt. Die vorhandenen Nichtlinearitäten sind auf den verwendeten Messlautsprecher sowie den dazugehörigen Verstärker zurückzuführen.

- Bereich grösser als 2kHz
  Auch hier folgen die beiden Mikrofone der Nichtlinearität des Messaufbaus. Jedoch reagiert das MEMS-Mikrofon sensitiver auf diesen

Frequenzbereich, als das Referenzprodukt. Dieses Phänomen ist auf den Helmholtz Effekt zurückzuführen. Dieser tritt, bauartbedingt, ab einer gewissen Frequenz bei allen MEMS-Mikrofonen auf. Ersichtlich ist dieser in [4], Abbildung 4. Dabei schwingt das Mikrofongehäuse mit der Membrane mit (wobei eine gewisse Resonanz entsteht) und erzeugt somit einen höheren Schalldruck.

Abbildung 26: Frequenz vs. Schalldruckpegel-Plot der gewichteten Messung | dB(A)

Wie in Abbildung 26 aufgezeigt, werden die Frequenzen bis ca. 1kHz gedämpft. Dies entspricht der Filtercharakteristik, welche in Abbildung 11 ersichtlich ist. Somit kann bestätigt werden, dass der implementierte Filter funktioniert.

Abbildung 27: Frequenz vs. Schalldruckpegel-Plot der gewichteten Messung | dB(C)

Auch der in Abbildung 27 gezeigte Frequenzgang repräsentiert den erfolgreich umgesetzten C-Gewichtungsfilter. Dabei werden die hohen Frequenzen etwas stärker gedämpft als beim dB(A)-Filter. Als Referenz dient auch hier die Abbildung 11.

Abbildung 28: Distanz vs. Schalldruckpegel-Plot

Abbildung 28 zeigt, dass nach der initialen Kalibration (siehe Anhang 11) der Schalldruckpegel keine Abweichung vom Referenzgerät erfährt. Somit kann bestätigt werden, dass das Mikrofon sich bei abnehmender Distanz, im Vergleich zum XL2, gleich verhält. Zudem ist das reziproke Abstandsgesetz (1/r) in den Messwerten ersichtlich. Gemäss diesem sinkt der Schalldruckpegel bei doppelter Distanz um den Faktor 6.021dB und wird gemäss folgender Formel berechnet:

$$dB_{neu} = dB_{Ref} - 20 \cdot log_{10} \left(\frac{Abstand_{neu}}{Abstand_{ref}} \right) \tag{14}$$

8 Validieren der Anforderungen

Die im Kapitel 1.2 definierten Ziele können nun anhand der Arbeit validiert werden.

- ✓ Die Laufzeit des Gerätes soll mindestens 12 Stunden betragen.
  Gemäss Unterkapitel 6 reicht ein 50mAh-Akku, um das Gerät während 12 Stunden betreiben zu können. Momentan verbaut ist ein 200mAh-Akku.

- ✓ Das Gerät wird mit einem Akku betrieben. Dieser wird via eines USB-C-Anschlusses aufgeladen.
  Das Gerät verfügt über einen Li-Io-Akku sowie einen power-only USB-C Anschluss. Siehe Kapitel 6.1.

- ✓ Der Schalldruckpegel wird mit einem MEMS-Mikrofon aufgezeichnet.
  Dazu wird das ICS-41351 von TDK eingesetzt. Siehe Kapitel 3.

- ✓ Die Messdaten werden in regelmässigen Abständen auf dem Gerät gespeichert.
  Das Messintervall kann über das Define angepasst werden. Siehe Kapitel 6.3.

- ✓ Das Gerät verfügt über eine BLE-Schnittstelle, um die Messdaten drahtlos an ein Zielgerät zu übertragen.
  Der Mikrocontroller ist zur Datenübertragung vorbereitet. Siehe Kapitel 6.1.

- ✓ Der aktuelle Schalldruckpegel wird auf der Vorderseite des Gerätes visuell dargestellt.
  Es befinden sich 8 LEDs auf der Vorderseite des Gerätes, welche in ± 3dB Abständen den Schalldruckpegel anzeigen. Siehe Kapitel 6.3.

- ✓ Die Bauform der Platine fällt rund aus.
  Siehe Kapitel 11 im Anhang.

- ✓ Die Gesamtkosten betragen maximal 50 CHF.
  Mit 17.90 CHF wurde dieses Ziel klar erreicht. Siehe Kapitel 6.2.2 für eine detaillierte Auflistung der Kosten.

9 Stolpersteine

Stolpersteine gab es in dieser Arbeit einige. Auf gewisse werde ich nachfolgend genauer eingehen.

RTC
Der Einsatz der RTC hat auf zweierlei Arten zu Problemen geführt. Wie sich während der Arbeit herausgestellt hat, benötigt der BLE-Stack von Silicon Labs für das Zeitmanagement die RTC. Dadurch kann diese nicht frei und flexibel eingesetzt werden, sondern muss über spezielle Funktionen abgegriffen werden. Gleichzeitig setzt sich die RTC bei jedem Neustarts des Systems zurück. Dadurch kann kein anhaltender Zeitstempel, mit Referenz zur lokalen Zeit, erzeugt werden. Dies ist bei der aktuellen Implementation so angedacht, für ein fertiges Produkt ist dies jedoch nicht ideal.

BLE
Der BLE-Stack weist eine hohe Komplexität auf. Dadurch wird dieser grundsätzlich nicht selbst implementiert, sondern vom Hersteller des Mikrocontrollers zur Verfügung gestellt. Dies birgt jedoch die Gefahr, dass gewisse Peripherien einen Doppelnutzen erfahren, wie dies beispielsweise auch bei der RTC der Fall ist. Genauso war es auch beim PLL, welcher zur Erzeugung des Mikrofon-Clocks benötigt wird, der Fall. Auch dieser muss mit dem BLE-Stack "geteilt" werden, was die Implementation erschwert hat.

Mikrofon
Mikrofone mit digitalem Ausgang sollten grundsätzlich einfacher in der Handhabung sein als jene mit analogen. Dies konnte jedoch nicht festgestellt werden. Unklarheiten im Bezug zum Ausgangssignal des Mikrofons sowie des anschliessenden PCM-Peripherieblocks haben die Arbeit erheblich erschwert. Ich bin auch nach Abschluss dieser Arbeit noch nicht komplett davon überzeugt, dass das ausgegebene PCM-Signal einer vorzeichenbehafteten 24-Bit-Zahl (int32_t) entspricht. Der hohe Offset-Fehler, welcher bei der dBSPL-Berechnung berücksichtigt werden muss, untermauert meine Vermutung.
Rückfragen an den Hersteller blieben unbeantwortet.

10 Fazit und Ausblick

Mit dieser Arbeit habe ich ein Produkt geschaffen, welches zwar nicht komplett an ein NTI XL2 herankommt, jedoch in seiner Preiskategorie durchaus seinen Platz verdient hat. Der Prototyp erfüllt alle im Anforderungskatalog gewünschten Anforderungen, ist soweit einsatzbereit und kann in einer nachfolgenden Arbeit weiterentwickelt werden. In dieser sollten folgende Themenbereiche behandelt werden:

- BLE
  Die Hardware ist soweit für die Datenübertragung vorbereitet. Nun soll die Datenübertragung mittels zugehörigem BLE-Stack implementiert werden.

- Interface
  Die Messdaten befinden sich momentan nur auf dem EEPROM. In Verbindung mit der BLE-Implementation ist eine visuelle Applikation auf dem Zielgerät, z. B. einem Smartphone, zu implementieren. Neben dem Herunterladen der Messdaten können so auch Einstellungen wie LED-Helligkeit, Mess-Intervall oder die Aufteilung der Werte auf die LEDs auf dem Messgerät vorgenommen werden.

- RTC
  Die momentane Implementation ermöglicht es nicht, einen Zeitstempel im UNIX-Format den Messdaten anzuhängen. Dies aus dem einfachen Grund, dass bei einem leeren Akku diese Zeit nicht weiter gezählt wird. Als Alternative könnte der initiale Zeitstempel via BLE auf das Messgerät übertragen und für die anstehende Messung verwendet werden.

- Zeitgewichtung
  Die im Unterkapitel 3.1 eingeführte Gewichtung der Messungen wurde bis kurz vor Abschluss der Arbeit fehlinterpretiert. Dadurch wurden die Messwerte in einem fixen Intervall ausgewertet und nicht kontinuierlich. Obschon das Kapitel 8 zeigt, dass die Messungen akkurat sind, entspricht dies nicht dem Industriestandard.

- Low-Power
  Bei der Entwicklung wurde ein besonders Augenmerk auf die Energieeffizienz gelegt. Nichtsdestotrotz, kann das System noch energieeffizienter ausgelegt werden. Insbesondere ein Mikrocontroller mit integrierter

BiQuad-Hardware würde die hohe Berechnungszeit (siehe Tabelle 4) reduzieren.

- Bluetooth-Zertifizierung
  Gemäss Spezifikation von Bluetooth ist jedes Gerät zu zertifizieren ([13]). Dementsprechend auch Geräte, welche aus bereits zertifizierten Geräten zusammengestellt werden. Ohne Zertifizierung darf ein Gerät nicht verkauft werden. Die Zertifizierung generiert erhebliche Mehrkosten ([14]).

- Sensitivitäts-Filter
  Wie in den Mikrofon-Messungen ersichtlich, ist das MEMS-Mikrofon sensitiver im Frequenzbereich >2kHz als das Referenzgerät. Dieser Umstand soll durch einen zusätzlichen Software-Filter korrigiert werden.

- Rauschboden | SNR
  In den Mikrofon-Messungen wird der Rauschboden nicht explizit aufgeführt. Der im Datenblatt ([4]) aufgeführte SNR konnte in dieser Arbeit jedoch nicht verifiziert werden. Der gemessene Rauschboden liegt bei ca. 65dB. Deshalb wurden im Anhang, Kapitel Grundrauschen, mögliche Fehlerquellen überprüft, um diese in einer Folgearbeit zu beseitigen.

Danksagung

Als aller erstes möchte ich mich bei bei meinem Industriepartner, hEar, bedanken, ohne welchen das Projekt niemals in meine Hände gelangt wäre. Gleichzeitig möchte ich mich auch bei meinen beiden Betreuern, Filippo Parisi und Patric Eberle, für die Unterstützung während des Semesters bedanken. Ein besondere Dank gilt zudem folgenden Personen:

- Pascal Jund und Jürgen Wassner für die tatkräftige Unterstützung bei der Implementation von zeitdiskreten Filtern auf einer Embedded-Plattform.
- Manuel Isenegger für die Unterstützung bei Akustikthemen aller Art.
- Katharina Wick für die sprachliche Korrektur, sowie der darin enthaltenen, konstruktiven Kritik meiner gesamten Arbeit.
- Meinen Kommiliton:innen für die unzähligen konstruktiven Diskussionen und Möglichkeiten des Austausches im BAT-Raum.

11 Anhang

Quellenverzeichnis

[1] "XL2 Schallpegelmesser & Akustik-Analysator | NTi Audio," zugriff:2024-04-28. [Online]. Available: https://www.nti-audio.com/de/produkte/schallpegelmesser/xl2-audio-akustik-analysator

[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," zugriff:2024-04-27. [Online]. Available: https://www.bosch-mobility.com/de/loesungen/sensoren/peripherer-beschleunigungssensor/

[4] "https://invensense.tdk.com/wp-content/uploads/2020/07/DS-000157-ICS-41351-v1.4.pdf," zugriff:2024-05-11. [Online]. Available: https://invensense.tdk.com/wp-content/uploads/2020/07/DS-000157-ICS-41351-v1.4.pdf

[5] "Was bedeuten die Begriffe 'Fast', 'Slow', 'Impulse' Zeitgewichtung?" zugriff:2024-05-23. [Online]. Available: https://www.nti-audio.com/de/service/wissen/was-bedeuten-die-begriffe-fast-slow-impulse-zeitgewichtung

[6] 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. [Online]. Available: https://www.ncbi.nlm.nih.gov/books/NBK207834/

[7] "Frequenzbewertung," Oct. 2023, page Version ID: 238201232. [Online]. Available: https://de.wikipedia.org/w/index.php?title=Frequenzbewertung&oldid=238201232

[8] G. Dighe, "TPS65950 Real-Time Clock Timing Compensation," Oct. 2008, zugriff:2024-03-04. [Online]. Available: https://www.ti.com/lit/an/swca024/swca024.pdf

[9] "STM32L4 Series - PDF Documentation," Mar. 2024, zugriff:2024-03-18. [Online]. Available: https://www.st.com/en/microcontrollers-microprocessors/stm32l4-series/documentation.html

[10] "V-Lambda-Kurve," Dec. 2023, page Version ID: 240001066. [Online]. Available: https://de.wikipedia.org/w/index.php?title=V-Lambda-Kurve&oldid=240001066

[11] A. V. Oppenheim, *Zeitdiskrete Signalverarbeitung*. R. Oldenbourg, 1989.

[12] L. Silicon, "EFR32xG22 Wireless Gecko Reference Manual," 2022, zugriff:2024-05-11. [Online]. Available: https://www.silabs.com/documents/public/reference-manuals/efr32xg22-rm.pdf

[13] "Bluetooth Zertifizierung," zugriff:2024-05-14. [Online]. Available: https://www.bluetooth.com/develop-with-bluetooth/qualification-listing/

[14] "Bluetooth Zertifizierungskosten," zugriff:2024-05-14. [Online]. Available: https://www.bluetooth.com/fee-schedule/

Abbildungsverzeichnis

1 XL2 von NTI Audio | Quelle: [1] 3
2 Unterschied MEMS-Mikrofone | Quelle: [2] 4
3 Beispiel MEMS-Beschleunigungssensor | Quelle: [3] 4
5 Beispiel PDM-Signal 6
6 Beispiel PCM-Signal 6
7 Grundbegriffe Akustik | Beispiel: ICS-41351 7
8 Mind. benötigte Auflösung in Bit für gewünschten max. SPL . 8
9 Unterschied der Zeitgewichtung | Quelle: [5] 9
10 Phon-Kurven im Vergleich | Quelle: [6] 10
11 Frequenzbewertungsfilter | Quelle: [7] 10
12 Vergleich Low-Power-Modi STM | Quelle: [9] 13
13 Vergleich von möglichen Mikrocontrollern 15
14 Sensitivität des menschlichen Auges auf das Lichtspektrum bei Tag (**rot**) und Nacht (**blau**)| Quelle: [10] 16
15 Buck Converter 17
16 Konzept PCB-Layout 20
17 Konzept Softwareablauf 20
18 Verpolungsschutz mittels P-Kanal MOSFET 23
19 Übersicht zu (LE)Timer-Funktionalität 25
20 Unterschied Zeit- und Frequenzbereich zur Frequenzgewichtung 27
21 Übersicht BiQuad-Filter 28
22 Clock-Muxing für 3.072MHz PDM 29
23 Softwareablauf I^2C 31
24 Aufteilung dBSPL auf 8 LEDs 32
25 Frequenz vs. Schalldruckpegel-Plot der ungewichteten Messung | dB(Z) 37
26 Frequenz vs. Schalldruckpegel-Plot der gewichteten Messung | dB(A) 38
27 Frequenz vs. Schalldruckpegel-Plot der gewichteten Messung | dB(C) 39
28 Distanz vs. Schalldruckpegel-Plot 40

Fremdwörter & Abkürzungen

Abkürzung	Beschreibung
BLE	Bluetooth Low Energy
BMS	Battery Management System | Akku-Laderegelung
CRC	Cyclic Redundancy Check
Embedded	In das Gerät integriert
FFT	Fast Fourier Transformation
FIR	Finite Impulse Response
Flashen	Software auf Mikrocontroller laden
I2C	Inter-Integrated Circuit (Bus-System)
IC	Integrated Circuit | Integrierter Schaltkreis
IFFT	Inverse Fast Fourier Transformation
IIR	Infinite Impulse Response
Li-Ion	Lithium-Ionen
Li-Po	Lithium-Polymer
Peripherie	Gruppe von Hardware-Funktionen um z.B. das PCM-Signal zu generieren
Pins	Physikalischer Anschluss am Mikrocontroller
PLL	Phase Locked Loop
ppm	Parts Per Million
PPTC	Polymeric Positive Temperature Coefficient
Register	Schnellste Speichereinheit im Mikrocontroller
RMS	Root Mean Square | Effektivwert eines Signals
RTOS	Real Time Operating System | Betriebssystem auf Mikrocontroller
SPI	Serial Peripheral Interface (Bus-System)
THD	Total Harmonic Distortion | Klirrfaktor
UNIX-Format	Zeitformat gezählt ab 01.01.1970
WLAN	Wireless Local Area Network

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: A2A-17216-E0
- M2211 Messmikrofon
  S/N: 7579
- Larson Davis CAL200 (1kHz / 94dBSPL Referenzquelle)
  S/N: 17902
- XL2 Projector PRO
  Version: 1.54
- Simplicity Studio
  Version: SV5.8.1.1
- Gecko SDK Suite
  Version: 4.4.1
- MSO6052A Mixed Signal Oscilloscope
  S/N: T&A 45

Messaufbau

(a) MEMS hinten

(b) NTI hinten

(c) MEMS Vogelperspektive

(d) NTI Vogelperspektive

Abbildung 29: Messaufbau Frequenzgang

(a) Messobjekt hinten

(b) Messobjekt Vogelperspektive

(c) Reflexionsarme Messkammer

Abbildung 30: Messaufbau SPL

Kalibrationsmessung

Abbildung 31: Kalibrationsmessung über die Distanz

Distanz [mm]	**MEMS**	**Referenz**	**Delta**
100	83.7	87.1	3.4
200	78	82.7	4.7
300	76.3	80.6	4.3
400	74.5	79.9	5.4
500	73.1	78.2	5.1
600	70.8	77.5	6.7
700	70.7	77.1	6.4
800	69.1	75.5	6.4

Grundrauschen | Rauschboden

Eine Vielzahl von Störquellen können die Signalqualität, trotz digitaler Signalverarbeitung, beeinträchtigen. Im Anschluss werden folgende Quellen untersucht:

- Clock-Stabilität | Clock-Drift
  Wie Konstant ist der Clock, welcher vom Mikrocontroller generiert wird?

- Spannungsversorgung
  Hat die Speisung via USB einen Einfluss auf den Rauschboden?

- Start-Zeit des Mikrofons
  Reichen die 20ms, welche gemäss Datenblatt als Startzeit angegeben sind, um das Mikrofon komplett zu starten?

Clock-Stabilität
Abbildungen 32 und 33 zeigen, dass der Clock im Mittel die gewünschte Taktrate von 3.072MHz erreicht. Gleichzeitig weist der Clock eine maximale Abweichung von 1.7% auf.

Abbildung 32: Clock-Stabilität gemessen mit Logic Analyzer

Abbildung 33: Clock-Stabilität gemessen mit Oszilloskop

Spannungsversorgung
Wie Abbildung 34 zeigt, ist das Rauschen zwar von der Spannungsversorgung abhängig, jedoch relativiert sich dieser Einfluss wieder. Wird der gesamt mögliche Messbereich von 24 Bit (16777216 Abstufungen) betrachtet liegen im Mittel 2000 Messpunkte zwischen der Batteriespeisung und der USB-Speisung. Dies entspricht ca. 0.012% des gesamten Messbereiches.

$$Distanz\,[\%] = \frac{Mittlerer\,Abstand}{Messbereich} \cdot 100$$

Abbildung 34: Einfluss von Spannungsquellen auf das Mikrofonrauschen

Start-Zeit
Abbildung 35 zeigt deutlich, dass das Mikrofon-Grundrauschen verbessert wird, sofern das Mikrofon jeweils nicht nach jeder Messung in den Energiesparmodus versetzt wird. So konnte ein Rauschboden von bis zu 37dB gemessen werden, welcher demjenigen aus dem Datenblatt ([4]) sehr nahe kommt. Bei den Messungen im freilaufenden Modus variierte der Rauschboden jedoch um jeweils bis zu 14dB.

Abbildung 35: Einfluss der Startzeit auf das Mikrofonrauschen

Fazit
Die drei Messungen zeigen, dass jede untersuchte Fehlerquelle einen Einfluss auf das SNR hat. Insbesondere das Ein- und Ausschalten des Mikrofons scheint den hohen Rauschboden zu erklären und muss in einer Folgearbeit überarbeitet werden.

PCB-Versionen

Abbildung 36: V1-0 Front

Abbildung 37: V1-0 Back

Abbildung 38: V1-1 Front

Abbildung 39: V1-1 Back

Abbildung 40: V1-2 Front

Abbildung 41: V1-2 Back

Abbildung 42: V1-3 Front

Abbildung 43: V1-3 Back

Schema

USB-C & Debug & Programming
Microcontroller
LED
EEPROM
Microphone
Mechanical
Power
Testpoints
Auxiliary components
Hochschule Luzern, Technik & Architektur
Title: Schalldruckpegelmessgerät
Size: A4
Date: 2024-05-04
KiCad E.D.A. 8.0.0
Rev: 1.2
Id: 1/1

Software

https://github.com/Froster2406/BAT2024

Oder alternativ im digitalen Anhang unter:

Entwicklung/Software/custom

Aufgabenstellung

Horw, 19. Februar 2024
Seite 1/2

Bachelor Thesis im Studiengang Elektrotechnik und Informationstechnologie

Aufgabe für Herrn Nicora Stefano

Entwicklung einer PCB zur Analyse von Umgebungslärm

Fachliche Schwerpunkte
Embedded Systems, Akustik, PCB-Design, Signalverarbeitung

Einleitung
hEar ist ein Start-up im Bereich Design, Akustik und Prävention von Problemen im Zusammenhang mit dem Gehör. Nach ersten Machbarkeitstests streben wir die Entwicklung eines Geräts an, das kontinuierlich den Geräuschpegel während des gesamten Tages überwacht. Durch ein System von Lichtindikatoren wird sofortiges Feedback zur Umgebung gegeben, um ein höheres Bewusstsein zu fördern und präventive Massnahmen für die Gesundheit des Gehörs zu unterstützen.

Aufgabenstellung
- Einarbeitung in die Akustik
- Analyse des Stands der Technik und der Wissenschaft
- Vertiefung der Techniken der Schallmessung und -analyse
- Kritische Prüfung von MEMS-Mikrofonen, Mikrocontrollern und LEDs zur Optimierung des Gleichgewichts zwischen Leistung und Energieeffizienz
- Entwurf und Herstellung von Prototypen von Leiterplatten (PCB)
- Softwareentwicklung für die Schallanalyse
- Durchführung von Tests und Überprüfung der Systemleistung durch Vergleich mit den auf dem Markt befindlichen Produkten
- Analyse des Schalls in verschiedenen Situationen und Bestimmung des Risikos für das menschliche Gehör
- Dokumentation in einem Bericht
- Die genauen Aufgaben werden zu Beginn des Projekts besprochen

Termine

Start der Arbeit:	Montag 19.2.2024
Zwischenpräsentation:	Zu vereinbaren im Zeitraum 8.4. – 3.5.2024
Abgabe Schlussbericht:	Freitag 7. Juni 2024, vor 16:00 im D311
Abgabe Digitale Doku:	Gemäss separater Anweisung der Studiengangleitung
Abschlusspräsentation:	Zu vereinbaren im Zeitraum 10.6. – 28.6.2024
Diplomausstellung:	Mittwoch 3. Juli 2024 (Teilnahme obligatorisch!)

Horw, 19.2.2024
Seite 2/2
Diplomarbeit im Fachbereich
Elektrotechnik und Informationstechnologie

Dokumentation

Der gebundene Schlussbericht enthält keine Selbständigkeitserklärung und ist in einfacher Ausführung zu erstellen. Er enthält zudem zwingend

- einen sehr kurzen, englischen Abstract.
- Ein Titelblatt, gleich hinter dem Deckblatt, gemäss Weisungen der Studiengangleitung
- Eine SD-Hülle, innen, auf der Rückseite des Berichtes für den Betreuer

Alle Exemplare des Schlussberichtes müssen komplett und termingerecht gemäss Angaben der Studiengangleitung abgeben werden. Zusätzlich muss eine SD-Speicherkarte mit dem Bericht (inkl. Anhänge), dem Poster und den Präsentationen, Messdaten, Programmen, Auswertungen, usw. unmittelbar nach der Präsentation abgeben werden.
Die gesamte Dokumentation ist zudem gemäss Anweisungen der Studiengangleitung elektronisch auf einen Server zu laden. Sämtliche abzugebende Teile der Dokumentation sind Bestandteile der Beurteilung.

Fachliteratur/Web-Links/Hilfsmittel

Wird bei Projektstart definiert

Geheimhaltungsstufe: Vertraulich

Verantwortlicher Dozent/Betreuungsteam, Industriepartner

Dozent	Prof. Dr. Patric Eberle	patric.eberle@hslu.ch
Industriepartner	hEar St.Anna Strasse 38 6006 Luzern Fr. S. Willener sophie.willener@bluewin.ch Tel. +41 79 856 14 81	
Experte	Hr. Reto Jäggi reto.jaeggi@ch.mullermartini.com	

Hochschule Luzern
Technik & Architektur

Prof. Dr. Patric Eberle

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

Risikoanalyse

Risikoanalyse

Risiko	Beschreibung	W'keit	Auswirkung	Auswirkung	Massnahmen	Risikowert
Nicht genügend Akku-Nennladung	Die Energieaufnahme der gesamten Schaltung übersteigt die mögliche Energieleistungsdichte der kommerziell erhältlichen Akkus	3	Das Produkt kann im gewünschten Rahmen nicht umgesetzt werden	4	Hauptursache finden und mit Alternativen lösen	12
Leistungsaufnahme der LEDs	Die Leistungsaufnahme der LEDs reduziert die Einsatzdauer des Produktes	3	Die Mindestlaufzeit des Gerätes kann nicht eingehalten werden	4	Alternativen in der Evaluationsphase finden	12
Gerät kann nicht programmiert werden	Die Programmierschnittstelle kann nicht verwendet werden	2	Die Software kann nicht auf das Gerät geladen werden	4	Genaue Prüfung der Kriterien bei der Auswahl	8
PCB wird nicht rechtzeitig bestellt / geliefert	Infolge Lieferschwierigkeiten 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)	8
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 eruieren	6
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	6
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	4
Halbleiterknappheit	Die benötigten Bauteile sind nicht mehr lieferbar	1	Das Produkt kann nicht fertig gebaut und getestet werden	4	Mehrere Lieferanten für das selbe Bauteil, Standard-Bauteile einsetzten	4
Krankheitsbedingter Ausfall	Die Arbeit muss krankeitsbedingt unterbrochen werden	1	Der Projektplan kann nicht eingehalten werden	4	Spielraum bereits im Projektplan einberechnen	4
Kostendach überstiegen	Die Anschaffung der Bauteile übersteigt das vorgegebene Kostendach	1	Die Arbeit könnte im geplanten Massstab nicht durchgeführt werden	3	Detailierte Kostenaufstellung zu Beginn des Projektes	3
Der falsche Mikrocontroller wurde eingesetzt	Für den Einsatzzweck wurde der falsche Mikrocontroller eingesetzt	1	Das Projekt kann nicht im beschriebenen Rahmen durchgeführt werden	3	Genaue Prüfung der Kriterien bei der Auswahl	3

W'keit: 1 = Tief, 3 = Hoch

Auswirkung: 1 = Tief, 4 = Hoch

Risikowert: 1 = minimal, 12 = maximal

Zeitplan

	19.02 SW 01	26.02 SW 02	04.03 SW 03	11.03 SW 04	18.03 SW 05	25.03 SW 06	01.04 SW 07	08.04 SW 08	15.04 SW 09	22.04 SW 10	29.05 SW 11	06.05 SW 12	13.05 SW 13	20.05 SW 14	27.05 SW15	03.06 -	
						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																02.06	
Prototyping & Testing																	
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																07.06	
Abschlusspräsentation vorbereiten																	
Abschlusspräsentation																	10.06-28.06

Projekt-Meilensteine

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

kritische Tätigkeiten sind rot hervorgehoben

Journal

Wann	Beschreibung	Zeit (h)
17.02.2024	Ordnerstruktur aufsetzten, Recherche	4
18.02.2024	Einrichtung Git, Vorbereitung Dokumente	3
19.02.2024	KickOff, Recherche	6
20.02.2024	Recherche Mikrocontroller, Vorbereitung Dokumente	5
21.02.2024	Recherche Mikrocontroller und LEDs, Leistungsaufnahme	9
25.02.2024	Technologierecherche, Zeitplan, Risikoanalyse, Anforderungskatalog	7
26.02.2024	Sitzung 2, Technologierecherche, Planung	6
27.02.2024	Dokumentationsbeginn, Technologierechereche	5
02.03.2024	Vergleich Mikrokontroller	4
03.03.2024	Recherche Flash-Chips, BLE vs Bluetooth Classic	5
04.03.2024	Vergleich LEDs, MEMS-Mikrofon; Einarbeitung LaTeX & Zotero	8
05.03.2024	Sitzung, Bauteilbestellung, Einrichten KiCad	6
06.03.2024	PCB-Schema zeichnen	3
09.03.2024	PCB-Schema V1.0 beenden	3
10.03.2024	PCB-Layout Planung	4
11.03.2024	PCB-Routing, Einrichtung Simplicity Studio	8
12.03.2024	Sitzung, PCB-Routing	4
13.03.2024	PCB-Routing	5
15.03.2024	PCB-Routing, Besprechung Christoph Zumbühl	3
16.03.2024	Bestückung Breakout-Board, Doku weiterführen	5
17.03.2024	Erste Tests mit DIE und Mikrofon	3
18.03.2024	Einarbeitung Filterdesign, RTC, Korrespondenz	7
19.03.2024	Sitzung, Softwareentwicklung	6
23.03.2024	Softwareentwicklung SPI	3
24.03.2024	Softwareentwicklung I2C, Dokumentation	4
25.03.2024	Softwareentwicklung, Testing	7
26.03.2024	Sitzung, Softwareentwicklung I2C	7
27.03.2024	Softwareentwicklung I2C	7
28.03.2024	Softwareentwicklung I2C, PCB Redesign	8
29.03.2024	Einarbeitung PDM	6
30.03.2024	Einarbeitung PDM	6

Wann	**Beschreibung**	**Zeit (h)**
01.04.2024	Softwareentwicklung PDM, Dokumentation	7
02.04.2024	Softwareentwicklung Timer, RTC	7
03.04.2024	Dokumentation	6
06.04.2024	PCB Löten, Fehlersuche, Anpassungen	8
08.04.2024	PCB Programmieren, Fehlersuche	4
09.04.2024	Sitzung, Besprechung Filter Jürgen Wassner	5
10.04.2024	Filterdesign, Besprechung Filter Pascal Jund	6
13.04.2024	Filterdesign	2
14.04.2024	Filterdesign, PPP vorbereiten, Dokumentation	4
15.04.2024	PDM-Fehlersuche, Dokumentation	7
16.04.2024	Sitzung, PDM-Fehlersuche, Dokumentation	7
17.04.2024	PDM-Fehlersuche, Dokumentation	6
20.04.2024	PDM Implementation blocking, PCB revision V1-3	8
21.04.2024	Dokumentation weiterführen	5
22.04.2024	Softwareentwicklung, PDM Fehlersuche	8
23.04.2024	Sitzung Sophie, Softwareentwicklung	7
24.04.2024	Softwareentwicklung	7
26.04.2024	Präsentation inkl. Vorbereitung	3
27.04.2024	Evaluation alternative RTC $->$ keine	4
28.04.2024	Dokumentation Abschnitt: State of the Art	2
29.04.2024	Softwareentwicklung, Dokumentation	7
30.04.2024	Sitzung, Softwareentwicklung, Messungen	6
01.05.2024	Softwareentwicklung	4
04.05.2024	Dokumentation weiterführen	4
05.05.2024	Dokumentation weiterführen	3
06.05.2024	PCB V1-3 löten, Messungen	7
07.05.2024	Messungen, Fehlersuche PDM	6
08.05.2024	Messungen, Fehlersuche PDM	4
09.05.2024	Fehlersuche PDM	8
11.05.2024	Fehlersuche PDM	5
12.05.2024	Messungen, Dokumentation weiterführen	6
13.05.2024	Messungen, Dokumentation weiterführen	6
14.05.2024	Sitzung, Dokumentation weiterführen	6
15.05.2024	Dokumentieren, Fehlersuche	5
18.05.2024	Fehlersuche IDE	6
19.05.2024	Fehlersuche IDE, Dokumentation überarbeiten	7

Wann	**Beschreibung**	**Zeit [h]**
20.05.2024	Messungen beenden, Dokumentation überarbeiten	6
21.05.2024	Sitzung, Dokumentation weiterführen	4
22.05.2024	Plakat & Präsentation vorbereiten	10
	Optional und nicht mehr Teil der eigentlichen Arbeit	
24.05.2024	Fehlersuche SNR	4
25.05.2024	Messung SNR mit unterschiedlichen Speisespannungen	7
26.05.2024	Messung SNR mit unterschiedlichen Startzeiten	6
27.05.2024	Messung Clock-Jitter	6
28.08.2024	Einbinden der Messungen in die Dokumentation (Anhang)	8
	Total	**390**
	Total (inkl. optionalem Teil)	421