

BACHELORTHESIS  
Beke Romana Kühl

# Entwicklung eines Adapters mit externem Ultraschallmikrofon zur Detektion von Fledermausrufen auf mobilen Endgeräten

---

FAKULTÄT TECHNIK UND INFORMATIK  
Department Informations- und Elektrotechnik

Faculty of Computer Science and Engineering  
Department of Information and Electrical Engineering

Beke Romana Kühl

# Entwicklung eines Adapters mit externem Ultraschallmikrofon zur Detektion von Fledermausrufen auf mobilen Endgeräten

Bachelorarbeit eingereicht im Rahmen der Bachelorprüfung  
im Studiengang *Bachelor of Science Elektro- und Informationstechnik*  
am Department Informations- und Elektrotechnik  
der Fakultät Technik und Informatik  
der Hochschule für Angewandte Wissenschaften Hamburg

Betreuender Prüfer: Prof. Dr. Marc Hensel  
Zweitgutachterin: Prof. Dr. Ulrike Herster

Eingereicht am: 07. September 2020

**Beke Romana Kühl**

**Thema der Arbeit**

Entwicklung eines Adapters mit externem Ultraschallmikrofon zur Detektion von Fledermausrufen auf mobilen Endgeräten

**Stichworte**

Ultraschall, Fledermaus, Mikrofon, Schalldetektion, mobile Endgeräte

**Kurzzusammenfassung**

Diese Arbeit behandelt die Entwicklung eines kostengünstigen Adapters mit einem externen Ultraschallmikrofon zur Anbindung an mobile Endgeräte mit Android-Betriebssystem. Dies soll eine Detektion von Fledermausrufen und Weiterverarbeitung durch eine App ermöglichen.

**Beke Romana Kühl**

**Title of Thesis**

Development of an adapter with an external ultrasound microphone for bat call detection on mobile devices.

**Keywords**

ultrasound, bat, microphone, sound detection, mobile devices

**Abstract**

This thesis includes the development of an inexpensive adapter with an external ultrasound microphone for the connection with a mobile device operating with Android system software. Bat call detection and the data processing by an app shall be provided.

# Inhaltsverzeichnis

<b>1</b>	<b>Einleitung</b>	<b>3</b>
1.1	Motivation . . . . .	3
1.2	Ziel . . . . .	4
1.3	Vorgehen und Gliederung . . . . .	5
<b>2</b>	<b>Grundlagen und Stand der Technik</b>	<b>6</b>
2.1	Fledermäuse . . . . .	6
2.2	Schallausbreitung im Medium Luft . . . . .	7
2.3	Doppler-Effekt . . . . .	9
2.4	Hör- und Sprachbereich des Menschen . . . . .	11
2.5	Mikrofone . . . . .	12
2.5.1	Elektret-Kondensatormikrofon . . . . .	14
2.5.2	MEMS-Mikrofon . . . . .	15
2.6	Ausgewählte Fledermausdetektoren . . . . .	16
2.7	Externe Schnittstellen mobiler Endgeräte . . . . .	18
2.7.1	Bluetooth . . . . .	18
2.7.2	Universal Serial Bus (USB) . . . . .	20
2.7.3	Wireless Local Area Network (WLAN) . . . . .	21
2.7.4	Klinkenbuchse . . . . .	22
2.8	Analoges Audiosignal . . . . .	23
2.9	Unterabtastung von Fledermausrufen . . . . .	24
2.9.1	Fledermausrufe . . . . .	24
2.9.2	Abtasttheorem . . . . .	26
2.9.3	Aliasing . . . . .	27
<b>3</b>	<b>Anforderungsanalyse</b>	<b>30</b>
3.1	Fachlicher Kontext . . . . .	30
3.2	Stakeholder . . . . .	31

3.3	Anwendungsfälle . . . . .	31
3.4	Aktivitätsdiagramm . . . . .	32
3.5	Funktionale und nicht-funktionale Anforderungen . . . . .	32
3.5.1	Funktionale Anforderungen an das System . . . . .	33
3.5.2	Nicht-funktionale Anforderungen . . . . .	34
<b>4</b>	<b>Konzeption</b>	<b>36</b>
4.1	3,5 mm Klinkeanschluss . . . . .	36
4.2	Bluetooth . . . . .	38
4.3	WLAN . . . . .	39
4.4	USB . . . . .	40
<b>5</b>	<b>Optionsanalyse, Entwicklung und Implementierung</b>	<b>42</b>
5.1	Auswahl des Mikrofons . . . . .	42
5.2	Eigenschaften des MEMS-1 . . . . .	46
5.3	Auslegung der Schaltung . . . . .	48
5.3.1	Hochpassfilter 2. Ordnung . . . . .	48
5.3.2	Invertierender Verstärker . . . . .	50
5.4	Auswahl des Operationsverstärkers . . . . .	53
5.5	U-Adapter Prototypen . . . . .	57
<b>6</b>	<b>Auswertung und Beurteilung</b>	<b>60</b>
6.1	Auswertung bezüglich der Anforderungen . . . . .	60
6.1.1	Auswertung und Beurteilung der funktionalen Anforderungen . . . . .	60
6.1.2	Auswertung und Beurteilung der nicht-funktionalen Anforderungen . . . . .	61
6.1.3	Kostenabschätzung . . . . .	62
6.2	Auswertung . . . . .	62
6.3	Beurteilung . . . . .	67
6.3.1	Störsignale . . . . .	67
6.3.2	Abmessungen und Gehäuse . . . . .	70
<b>7</b>	<b>Ausblick und Fazit</b>	<b>72</b>
	<b>Literaturverzeichnis</b>	<b>73</b>
	<b>Selbstständigkeitserklärung</b>	<b>79</b>

# Nomenklatur

## Abkürzungen

AD/DA-Wandler	Analog-Digital/Digital-Analog-Wandler
ASIC	engl.: application specific-integrated circuit, anwendungsspezifische integrierte Schaltung
AUX	analoger Eingang für Audiosignale
CTIA	verwendet als Bezeichnung für eine bestimmte Anschlussbelegung von Klinenstecker/Buchse
DIP	engl.: Dual in-line Package; bezeichnet bei elektronischen Bauteilen zwei Reihen Anschlusspins für die Durchsteckmontage
DisplayPort	Schnittstelle für die Übertragung von digitalen Bild- und Tonsignalen
ECM	engl.: electret-condenser-microphone, Elektret-Mikrofon
ELV	Unternehmensname eines Elektronik-Versandhauses und -verlages
FFT	engl.: Fast Fourier Transform, Schnelle Fouriertransformation
GND	engl.: Ground; elektrisches Massepotential
GBP	engl.: Gain-Bandwidth-Produkt, Verstärkungs-Bandbreite-Produkt
HDMI	engl.: High Definition Multimedia Interface; Schnittstelle für die Übertragung von digitalen Bild- und Tonsignalen
IEC	International Electrotechnical Commission; internationale Normungsorganisation im Bereich Elektronik und Elektrotechnik
IEEE	Institute of Electrical and Electronics Engineers; weltweiter Berufsverband von Ingenieuren, Gremienbildung für die Standardisierung von Techniken, Hardware und Software
ISM-Band	engl.: Industrial, Scientific and Medical Band; Frequenzband zur lizenz- und genehmigungsfreien Nutzung
IP-Schutzart	engl.: Ingress Protection/ International Protection;

	Klassifizierung von Gehäuseschutz elektrischer Betriebsmittel durch IP-Codes
MEMS	engl.: Micro-Electro-Mechanical System; Mikro-Elektronisch-Mechanisches System welches mikromechanische Strukturen mit elektrischen in einem Chip verbindet
OPV	Operationsverstärker
PC	engl.: Personal Computer; Desktop-PC bzw. Rechner
Pins	Anschlussstifte bei elektronischen Bauteilen zur Durchsteckmontage
RMS	engl.: root mean square; quadratisches Mittel, auch Bezeichnung als Effektivwert
SMD	engl.: surface mounted device, bezeichnet Bauelemente die mittels Oberflächenmontage verlötet werden
SOIC	engl.: small outline integrated circuit, spezielle Baugröße von SMD Bauteilen
SPL	engl.: Sound Pressure Level; Schalldruckpegel in Dezibel (dB)
TRRS	engl.: Tip-Ring-Ring-Sleeve; Bezeichnung eines 4-poligen Klinkensteckers
UML	engl.: Unified Modeling Language; grafische vereinheitlichte Modellierungssprache für Software
USB	engl.: Universal Serial Bus; serielle Schnittstelle

# 1 Einleitung

## 1.1 Motivation

Fledermäuse jagen und kommunizieren im Bereich von Ultraschallfrequenzen, die für das menschliche Gehör nicht wahrnehmbar sind. Fledermausdetektoren nehmen diese Frequenzen auf und verschieben die Laute in den für Menschen hörbaren Bereich. Über ganz Deutschland verteilt gibt es Einrichtungen, die Kindern unsere Natur und Umwelt sowie den Umgang mit dieser näher bringen. Unter anderem können Kinder Fledermäuse in ihrem natürlichen Lebensraum beobachten, als Beispiel sei das „Naturerlebnis Grabau“<sup>1</sup> genannt. Professionelle Geräte mit akustischer und visueller Anzeige, die bei der Detektion von Fledermausrufen zum Einsatz kommen, sind verhältnismäßig teuer. Die Kosten belaufen sich auf mehrere hundert Euro. Dies hat zur Folge, dass sich mehrere Kinder einer Gruppe ein Gerät teilen müssen, was des Öfteren zu Streitigkeiten führt. Die Aufmerksamkeit ist somit nicht auf die Umgebung und die Fledermäuse gerichtet (Abb.1.1a). Diese speziellen Geräte können unter anderem unterschiedliche Fledermaus-

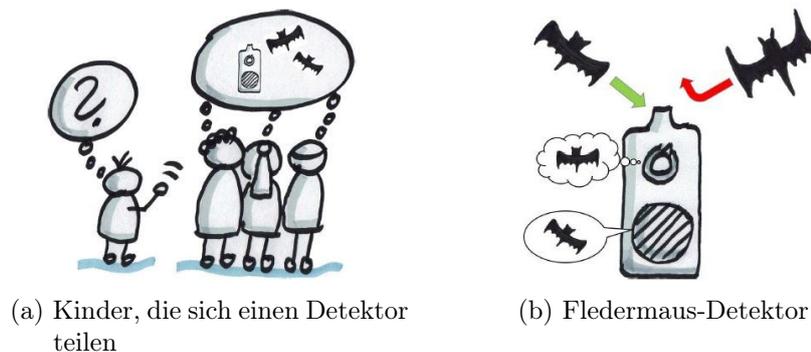


Abbildung 1.1: Problematik in Bildern [14]

arten erkennen, jedoch ist die Bedienung dieser Geräte nicht immer intuitiv. Andere rein

<sup>1</sup><https://www.naturerlebnis-grabau.de/> (abgerufen 2020-08-15)

elektronische Detektoren, mit ausschließlich akustischer Wiedergabe der Fledermausrufe, können nur einen begrenzten Frequenzbereich zur Zeit hörbar machen. Dies bedeutet, dass einige Fledermausarten unbemerkt bleiben (Abb.1.1b). Heutzutage besitzt nahezu jeder ein Smartphone. Die Anbindung eines externen Ultraschallmikrofons an ein Android-Smartphone soll der zuvor skizzierten Problematik Abhilfe schaffen. Eine kostenlose App soll die aufgenommenen Audiodaten des Mikrofons verarbeiten, visualisieren und die Fledermausrufe in den für Menschen akustisch wahrnehmbaren Bereich übersetzen. Damit würde die Situation entspannt und die Kinder könnten sich innerhalb der Gruppe unterstützen sowie gegenseitig auf Fledermäuse aufmerksam machen.

### 1.2 Ziel

Das Gesamtziel dieser Arbeit ist die Konzeption und Entwicklung eines kostengünstigen, selbst herstellbaren Ultraschalladapters für Kinder und Laien anzubieten, welcher mit einem mobilen Endgerät verbunden werden kann. Eine Android-App soll die übermittelten Daten verarbeiten und dem Nutzer akustisch und visuell vermitteln, ob eine Fledermaus in der unmittelbaren Umgebung ruft. Der Schwerpunkt dieser Arbeit liegt auf der Aus-



Abbildung 1.2: Smartphone mit Ultraschall-Mikrofon [14]

wahl eines geeigneten Ultraschallmikrofons und der Fragestellung, wie die Fledermausrufe auf das mobile Endgerät möglichst einfach und kostengünstig übertragen werden können, um anschließend von einer Android-App verarbeitet zu werden. Da die verbauten Mikrofone in Smartphones und Tablets nicht für Ultraschall geeignet sind, muss ein externes Ultraschallmikrofon genutzt werden. Das Ultraschallmikrofon soll möglichst klein und kostengünstig sein sowie einen ausreichenden Frequenzbereich abdecken um heimische Arten zu detektieren. Die Abtastung des Signals soll das Android-Smartphone

übernehmen. Jedoch hat das Smartphone Abtastraten, die das Nyquistkriterium von Ultraschallfrequenzen verletzen. Letzteres besagt, dass eine Frequenz immer mit mehr als der doppelten Signalfrequenz abgetastet werden muss, um das Signal fehlerfrei rekonstruieren zu können. Hier soll überprüft und getestet werden, inwieweit Aliasing, das durch die Unterabtastung des Ultraschallsignals entsteht, genutzt werden kann, um die Fledermausrufe verarbeiten zu können. Die App-Programmierung ist nicht Teil dieser Arbeit sondern läuft in paralleler Entwicklung durch Prof. Dr. Marc Hensel.

### 1.3 Vorgehen und Gliederung

Die vorliegende Arbeit ist in sieben Teile gegliedert. Nachdem im 1. Kapitel das Umfeld sowie die Aufgabenstellung dargestellt wurde, beschreibt das 2. Kapitel die physikalischen Grundlagen, welche für das Verständnis notwendig sind, sowie den derzeitigen Stand der Technik. Im folgenden 3. Kapitel werden die spezifischen Anforderungen an das Endprodukt beschrieben und Anwendungsfälle aufgezeigt. Anschließend werden im 4. Kapitel auf Grundlage der Anforderungsanalyse unterschiedliche Konzepte für Entwicklungsansätze vorgestellt und eine begründete Entscheidung getroffen. Das 5. Kapitel befasst sich eingehend mit der Entwicklung und Auslegung des Ultraschall-Adapters. Das 6. Kapitel wertet die Anforderungen aus und beurteilt die Umsetzung der einzelnen Anforderungspunkte aus Kapitel 3. Es wird zusätzlich weiterer Handlungsbedarf für ein finales Endprodukt diskutiert. Das abschließende 7. Kapitel fasst die Arbeit zusammen und gibt einen kurzen Ausblick auf weitere Entwicklungsmöglichkeiten.

## 2 Grundlagen und Stand der Technik

### 2.1 Fledermäuse

In Deutschland leben fünfundzwanzig Fledermausarten, von ungefähr tausend weltweit. Fledermäuse und Flughunde sind die einzigen Säugetiere, die aktiv fliegen können. Sie sind vorwiegend nachts unterwegs. Einige Arten, wie der Große oder Kleine Abendsegler, kommen schon in der Dämmerung hervor, um zu jagen. Die Nahrung dieser Säugetiere



Abbildung 2.1: Fledermauskarikatur

besteht in Deutschland zumeist aus kleineren Insekten und Spinnentieren. Im Gegensatz zu Eulen, die ihre Nahrung nachts auch optisch durch ihre sehr lichtempfindlichen Augen sehen können, nutzen Fledermäuse eine andere Kommunikations- und Jagdtechnik. Sie senden Ultraschallsignale, also Töne mit Frequenzen oberhalb des Hörbereichs des Menschen – definitionsgemäß ab 16 kHz – aus. Mit den im Verhältnis zum Körper großen Ohren fängt die Fledermaus die Reflexion ihres ausgesendeten Ultraschallsignals wieder ein und erkennt Hindernisse sowie kleine Beutetiere im Flug. Der Großteil der in Deutschland heimischen Arten sendet Frequenzen im Bereich zwischen 20 kHz und 60 kHz aus. Die Familie der Hufeisennasen liegt mit Frequenzen von 80-110 kHz darüber [41], [18].

## 2.2 Schallausbreitung im Medium Luft

Eine Schallquelle bringt die Luft, die sie umgibt, in Schwingungen. Die Schwingungen breiten sich aufgrund der Kompressibilität und Masse der Luft gleichmäßig als Welle um den Erreger aus. Die Amplitude der Welle nimmt aufgrund von Dämpfung (Dissipation) mit zunehmender Entfernung zur Schallquelle ab, bis sie nicht mehr wahrnehmbar ist. Die Schwingungen in der Luft setzen die Membran des Trommelfells im Ohr, oder auch die Mikrofonmembran, in Bewegung. Um einen Ton hören oder messen zu können, ist nicht nur der Schalldruck, sondern auch die Frequenz der Schwingungen relevant. Das Lautstärkeempfinden oder die ausgegebene Wechselspannung sind somit von mehreren Faktoren abhängig. Einflussfaktoren auf die Schallausbreitung sind die relative Position des Empfängers und des Senders zueinander, die Art der Schallquelle, die Richtung, die Entfernung und Umgebungsbedingungen, wie Temperatur, Windrichtung und Luftfeuchtigkeit [38] S. 1-8. Des Weiteren können Schallwellen, die auf Hindernisse treffen, teilweise absorbiert, reflektiert oder gebeugt werden, wodurch ein komplexes Schallfeld entstehen kann. Der Zusammenhang von der Schallquelle bis zum hörbaren Ton ist somit hochgradig nichtlinear. Als Beispiel klingt das in einer leeren Kirche gespielte Stück eines Chors anders, als in derselbigen mit zum Teil besetzten Bänken. Wenn die Art der Quelle und die „Lautstärke“ bekannt sind, kann die Schallausbreitung zumindest für den idealisierten Fall eines akustischen Freifelds abgeschätzt werden. Bei der Art der Schallquelle werden

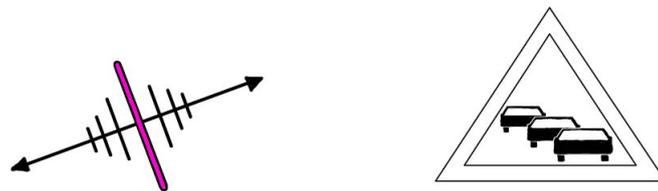


Abbildung 2.2: Voll befahrene Autobahn als Linien-schallquelle

meist näherungsweise Linien- oder Punktschallquellen angenommen. Ist beispielsweise eine Geräuschquelle überproportional in eine räumliche Richtung gestreckt, so wird häufig in erster Näherung von einer sogenannten Linienquelle ausgegangen, von der sich der Schall zylinderförmig entfernt. Ein prominentes Beispiel ist eine voll befahrene Autobahn, siehe Abbildung 2.2. Im gleichen Abstand entlang der Autobahn ist der Lautstärkepegel derselbe. Hier nimmt der Schalldruck um 3 dB, also um ein Viertel bei Verdopplung der Entfernung ab [24] S. 79.

Ist die Schallquelle im Vergleich zur Distanz des Empfängers klein oder breitet sich der Schall sphärisch um die Quelle aus, wird diese typischerweise als punktförmige Schallquelle betrachtet, wie es in Abbildung 2.3 dargestellt ist. Diese Art der Betrachtungsweise ist



Abbildung 2.3: Rasenmäher als Punktschallquelle

bei einer Fledermaus geeignet. Der Schalldruck nimmt bei punktförmigen Schallquellen um 6 dB bei Verdopplung der Entfernung ab [24] S. 78.

Zur Bezifferung der Schalldruckgröße wird anstatt des physikalischen Schalldrucks  $p$  national und international eine logarithmische Bezugsgröße, der sogenannte Schalldruckpegel, auch „Sound Pressure Level“ (SPL) genannt, eingesetzt [8].

$$(L) = SPL = 20 \cdot \log_{10} \left( \frac{p_{\text{RMS}}}{p_0} \right) \quad (2.1)$$

Als Bezugsgröße für den Schalldruck wird der Wert von  $p_0 = 2 \cdot 10^{-5} \frac{\text{N}}{\text{m}^2}$  ( $20 \mu\text{Pa}$ ) verwendet. Das ist die Hörschwelle des Menschen bei einer Frequenz von 1000 Hz und ist international standardisiert [4] S. 78. Wenn nicht anders vermerkt, ist unter dem Schalldruck  $p$  der Effektivwert  $p_{\text{RMS}}$  gemeint [8]

$$p_{\text{RMS}} = \sqrt{\frac{1}{T} \int_0^T p^2 dt}. \quad (2.2)$$

Die Gleichung zur Umrechnung von einem gemessenen Schalldruckpegel einer sphärisch emittierenden Quelle in einer anderen Entfernung lautet

$$L_{p2} = L_{p1} - 20 \cdot \log_{10} \frac{r_2}{r_1}. \quad (2.3)$$

Wobei  $L_{p1}$  und  $L_{p2}$  den Schalldruckpegel in dB darstellen und  $r_1$  und  $r_2$  die jeweilige Entfernung zu der Schallquelle bezeichnen (Abbildung 2.4). In dem Zeitschriftenbeitrag von M. Holderied [16] wird die Ruf-Intensität von Fledermäusen systematisch gemessen. Dabei kommen die meisten Arten bei 10 cm Entfernung auf einen Schalldruckpegel von

120-133 dB SPL. Die in Deutschland heimische Zwergfledermaus ruft mit einem maximalen Pegel von 128 dB SPL in einer Entfernung von 10 cm. Beispielsweise würde aus rein geometrischer Sicht die Erhöhung des Abstandes auf 20 m den Schalldruckpegel auf 81,98 dB SPL verringern

$$L_{p2} = 128 \text{ dB SPL} - 20 \cdot \log_{10} \left( \frac{20 \text{ m}}{0,1 \text{ m}} \right) \quad (2.4)$$

$$= 81,98 \text{ dB SPL.} \quad (2.5)$$

Zu dieser geometrischen Dämpfung sollte noch eine frequenzabhängige Dämpfung be-

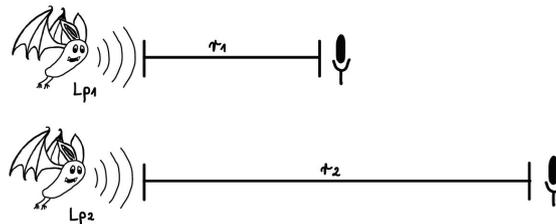


Abbildung 2.4: Abschwächung des Schallwechseldrucks aufgrund der Distanz von Sender und Empfänger

dacht werden, welche besonders bei hohen Frequenzen auftritt. Beispielhafte Werte für Luft sind ca. 0,5 dB/m und ca. 3 dB/m bei 20 kHz bzw. 80 kHz. Diese Werte hängen allerdings stark von der Luftfeuchtigkeit ab und gelten nur bei einer Temperatur von 20°C. Für weitere Informationen sei auf die Grafik von Bass, Sutherland et al. verwiesen [1]. Unter der Annahme, dass die Zwergfledermaus bei 20 kHz mit 128 dB rief, würde sich der Schalldruckpegel auf 71,98 dB in 20 m Entfernung verringern. Des Weiteren kommen noch Reflexion, Brechung, Dämpfung durch den Boden, Baumbewuchs und weitere nicht vollständig abbildbare Einflüsse hinzu.

## 2.3 Doppler-Effekt

Der Doppler-Effekt beschreibt das Phänomen von Laufzeitveränderungen eines Signals bei sich relativ zueinander bewegenden Sender und Empfänger.

Der wohl bekannteste, selbst erlebbare Doppler-Effekt, ist der an einem vorbei rasende Rettungswagen mit angeschalteter Sirene. Aus der Ferne hört sich der Ton der Sirene höher an, wenn der Wagen an einem vorbei gefahren ist, erscheint der Ton tiefer. Das

Signal wird durch Veränderung des Abstands zwischen Sender und Empfänger, wie in Abbildung 2.5 dargestellt, zeitlich gestaucht bzw. gedehnt, sodass sich die Signallaufzeit, die Frequenz, verändert [15].

Es ist zu erwarten, dass der Doppler-Effekt bei der Detektion von Fledermausrufen auftritt. Die Fluggeschwindigkeiten der Fledermäuse reichen von 20 km/h bis 160 km/h, wobei die schnellste Fledermaus Europas, die Langflügel-Fledermaus, Geschwindigkeiten bis zu 70 km/h erreicht [41]. Der Doppler-Effekt lässt drei Fallunterscheidungen zu: Die

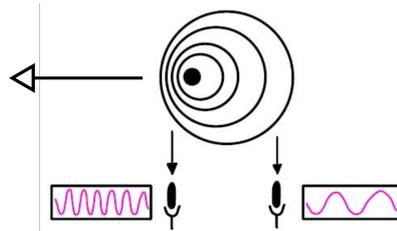


Abbildung 2.5: Bewegte Punktschallquelle zur Darstellung des Doppler-Effekts

Bewegung des Senders zum stillstehenden Beobachter, die Bewegung des Empfängers zum unbewegten Sender und die Bewegung von Sender und Empfänger. In dieser Arbeit ist nur der Fall relevant, bei dem sich die Schallquelle, also die Fledermaus, relativ zum Beobachter bewegt.

Angenommen eine Fledermaus sendet mit einer Frequenz von  $f_s = 38 \text{ kHz}$  und fliegt mit einer Geschwindigkeit von  $v_s = 54 \text{ km/h}$  unmittelbar auf den Beobachter zu, so ergibt sich auf Basis der Schallausbreitungsgeschwindigkeit in Luft von  $c \approx 343 \text{ m/s}$  bei  $20^\circ\text{C}$  folgende vom Sender abgegebene Wellenlänge

$$\lambda_s = \frac{c}{f_s} \quad (2.6)$$

$$= \frac{343 \text{ m/s}}{38 \text{ kHz}} \quad (2.7)$$

$$= 9,0263 \cdot 10^{-3} \text{ m}. \quad (2.8)$$

Der Beobachter nimmt die Frequenz  $f_b$  wahr

$$f_b = \frac{c}{\lambda_s - \frac{v_s}{f_s}}. \quad (2.9)$$

Gleichung 2.9 umgeformt und die Zahlenwerte eingesetzt, ergibt

$$f_b = \frac{f_s}{1 - \frac{v_s}{c}} \quad (2.10)$$

$$= \frac{38 \text{ kHz}}{1 - \frac{15 \text{ m/s}}{343 \text{ m/s}}} \quad (2.11)$$

$$= 39,74 \text{ kHz.} \quad (2.12)$$

Bewegt sich die Fledermaus vom Beobachter weg, ändert sich die Subtraktion unter dem Bruch in eine Addition [15] S. 428. Die skizzierte Situation oder auch die direkte Entfernung des Senders zum Empfänger, stellen jedoch nur Spezialfälle dar. In den meisten Fällen wird sich die Fledermaus in unterschiedlichen Winkeln zum Beobachter und dessen Ultraschallmikrofon bewegen. Eine allgemeinere Darstellung der Gleichung 2.10 lautet daher

$$f_b = \frac{f_s}{1 - \frac{\vec{v}_s \cdot \vec{e}_{\text{SB}}}{c}}, \quad (2.13)$$

wobei  $\vec{e}_{\text{SB}}$  den zeitabhängigen Einheitsvektor von der Signalquelle zum Beobachter beschreibt.

Die von dem Beobachter wahrgenommenen Frequenzen der Fledermausrufe ändern sich nicht gravierend, da die heimischen Fledermausarten Fluggeschwindigkeiten von 20 km/h bis ca. 60 km/h besitzen [41]. Bei der Berechnung unter Gleichung 2.10 mit einer Geschwindigkeit der Fledermaus von 54 km/h stellt sich nur eine Frequenzdifferenz von  $\Delta f = 1,74 \text{ kHz}$  ein.

$$\Delta f = |f_s - f_b| \quad (2.14)$$

$$= |38 \text{ kHz} - 39,74 \text{ kHz}| \quad (2.15)$$

$$= 1,74 \text{ kHz.} \quad (2.16)$$

## 2.4 Hör- und Sprachbereich des Menschen

Der Mensch kann Töne von 20 Hz bis ca. 16 kHz wahrnehmen. Kinder können sogar teilweise bis 20 kHz hören. Die Hörleistung nimmt jedoch mit dem Alter ab. Die Sprachwahrnehmbarkeit geht von 200 Hz bis 5 kHz. Ob der Mensch einen Ton hören kann und ob er ihn als laut oder leise empfindet, hängt von der Frequenz als auch vom Schall-

druck ab. Um tiefe Töne hören zu können, muss der Schalldruck für das menschliche Ohr wesentlich größer sein als bei Frequenzen zwischen 2 kHz und 5 kHz, die für den Sprachaustausch genutzt werden. In diesem Bereich ist das menschliche Ohr besonders empfindlich. Das zeigt auch die unten aufgeführte Grafik in Abbildung 2.6, [4] S. 19, [9] S. 117.

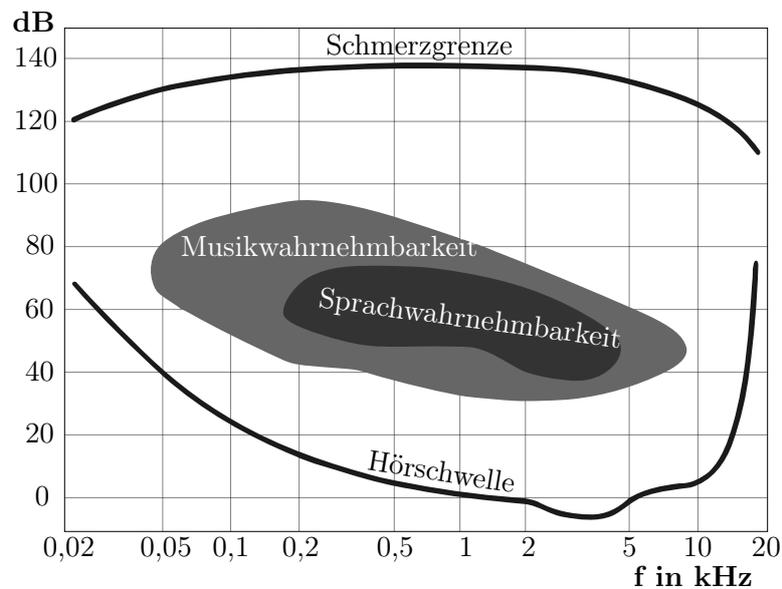


Abbildung 2.6: Hörfläche des Menschen [46]

## 2.5 Mikrofone

Töne und Geräusche werden durch Schallwechseldruck in der Luft übertragen. Damit sich Schallwellen ausbreiten können, brauchen sie ein Trägermedium, weshalb in einem Vakuum keine Schallausbreitung möglich ist.

Die in einem Mikrofon gelagerte Membran wird durch den Schallwechseldruck in Schwingungen versetzt. Ein angeschlossener Wandler übersetzt diese Membranschwingungen in ein elektrisches Wechselspannungssignal. Im Folgenden werden nur Mikrofone vorgestellt, die auch für den Ultraschallbereich erhältlich sind. Dazu gehört die Klasse der Kondensatormikrofone, welche grundsätzlich eine der am stärksten verbreiteten Mikrofontypen ist [48].

Bei dem Standard-Kondensatormikrofon, schematisch dargestellt in Abbildung 2.7, wirkt die bewegliche Membran wie eine Elektrode. Bewegt sich die Membran des Mikrofons,

bewirkt sie mit der fest installierten Gegenelektrode eine Kapazitätsänderung. Dabei hat das Kondensatormikrofon eine Hilfsspannung die bis zu 200 V betragen kann [12] S. 259.

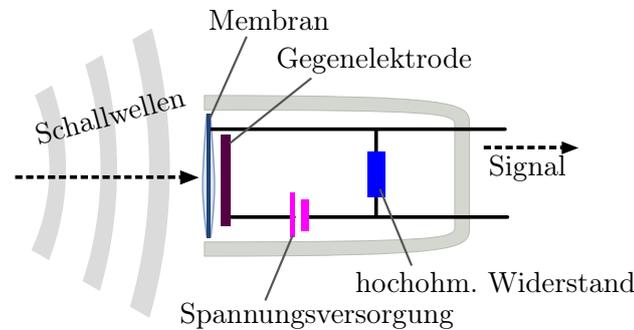


Abbildung 2.7: Schematischer Aufbau eines Kondensatormikrofons (Niederfrequenz-Schaltung, ohne Impedanzwandler) [17]

Durch die minimale Auslenkung der Membran überlagert sich der Gleichspannung eine minimale Wechselspannung. Mit einem Entkopplungskondensator und einem nachfolgenden Impedanzwandler kann diese Spannung abgegriffen werden (nicht in Abbildung 2.7 gezeigt). Um Ausgleichsströme zu verhindern muss das Kondensatormikrofon im „Quasi-Leerlauf“ betrieben werden. Dafür ist der hochohmige Widerstand von ca.  $10^8$  bis  $10^9 \Omega$  vorhanden [12] ab S. 260. Das hat zur Folge, dass die Ladung  $Q$  des Kondensators durch die hohe Zeitkonstante  $\tau$  quasi gleich bleibt

$$\tau = R \cdot C. \quad (2.17)$$

Der generelle Zusammenhang von der Kapazität  $C$  des Kondensators, der Ladung  $Q$ , der Versorgungsspannung  $U$ , dem „Plattenabstand“  $d$  und der Dielektrizitätskonstante  $\varepsilon = \varepsilon_0 \cdot \varepsilon_r$  ist durch die Gleichungen 2.18 bis 2.20 gegeben [4] S. 195.

$$C = \varepsilon_0 \cdot \varepsilon_r \cdot \frac{A}{d} \quad (2.18)$$

$$C = \varepsilon \cdot \frac{A}{d} \quad (2.19)$$

$$U = \frac{Q}{C} = \frac{Q \cdot d}{\varepsilon \cdot A} \quad (2.20)$$

Dabei ist die Permittivitätszahl des Mediums Luft  $\varepsilon_r = 1$ . Die elektrische Feldkonstante beträgt  $\varepsilon_0 = 8,8542 \cdot 10^{-12} \frac{A \cdot s}{V \cdot m}$ . Die Skizze eines Plattenkondensators in Abbildung

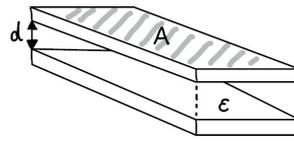


Abbildung 2.8: Plattenkondensator

2.8 stellt den Zusammenhang der Einflussfaktoren auf die Kondensatorspannung noch einmal bildlich dar. Durch diesen Zusammenhang ist die Mikrofonspannung  $\Delta U$  an einem nachfolgenden Verstärker nur von der durch den Schallwechseldruck hervorgerufenen Kapazitätsänderung abhängig. Allerdings kann es zu Verzerrungen bei zu hohem Schallwechseldruck kommen, da sich die Membran wölbt und sich nicht über die gesamte Fläche auf die Gegenelektrode zubewegt.

### 2.5.1 Elektret-Kondensatormikrofon

Elektret-Mikrofone gehören zu der Klasse der Kondensatormikrofone, sind aber etwas anders aufgebaut. Sie besitzen eine interne Vorspannung, das Elektret, und sind somit auf keine Hilfsspannung angewiesen. Das Elektret kann man sich ähnlich zu einem Dauermagneten vorstellen. In diesem Fall wird mit dem elektrostatischen Prinzip gearbeitet, wobei die elektrischen Dipole des Elektrets (Ionenverbindungen) „eingefroren“ werden. Der einfallende Schall ändert den Abstand  $d$  von der Elektretmembran und der Gegenelektrode. Die Kapazitätsänderung ist wieder nur von dem einfallenden Schallwechseldruck abhängig. Die Mikrofone sind in einer kompakten Bauweise erhältlich und finden sich in Telefonen, Headsets, Studiomikrofonen und anderen Messinstrumenten wieder [4] S. 198. Nichtsdestotrotz haben die meisten Elektretmikrofone einen Vorverstärker integriert, der eine geringe Gleichspannung von ca. 1,5 V benötigt. Das kann entweder durch eine eingebaute Mignonzelle oder durch eine externe Spannung erfolgen.

Dadurch, dass das Elektret schon länger auf dem Markt ist, gibt es diesbezüglich ein breiteres Produktportfolio bei den Herstellern, welches aber allmählich durch die wesentlich kleineren MEMS-Mikrofone verdrängt wird. Das Foto unter Abbildung 2.9 zeigt eindrücklich den Größenunterschied zwischen einem Ultraschall-Elektret-Mikrofon und einem auf eine Platine gelöteten goldfarbenen MEMS-Mikrofon. [44].

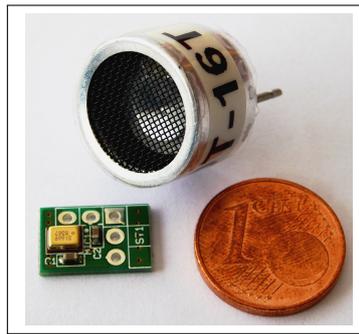


Abbildung 2.9: Größenvergleich von Elektret- zu MEMS-Mikrofon auf einer Platine

### 2.5.2 MEMS-Mikrofon

MEMS (engl.: Micro-Electro-Mechanical System), also ein Mikro-Elektronisch-Mechanisches System, beschreibt die Verbindung zwischen sehr kleinen mechanischen Strukturen im Nano-Maßstab mit elektronischen Komponenten. In mobilen Endgeräten ist diese Technik in Form von Neigungssensoren, Beschleunigungssensoren und auch Mikrofonen zu finden. Es gibt MEMS-Mikrofone in analoger und digitaler Form, wobei die meisten MEMS-Mikrofone Varianten des Kondensatormikrofons sind. Bei Schwingungen wird die Membran bewegt und eine Kapazitätsänderung tritt auf. Aus dem Schallsignal wird eine entsprechende analoge Ausgangswechselspannung generiert. In dem Gehäuse ist zusätzlich ein ASIC (engl.: application specific integrated circuit) mit verbaut. Je nach Einsatzgebiet beinhaltet dieser einen Vorverstärker oder auch einen integrierten Analog-Digital-Wandler bei digitalen MEMS-Mikrofonen [44]. Der Querschnitt eines MEMS-Mikrofons,

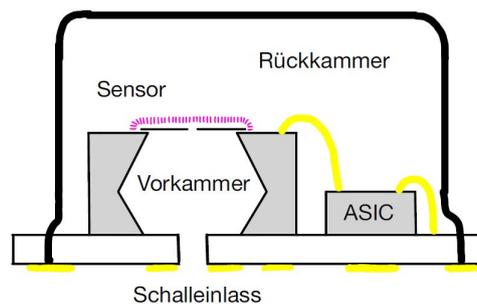


Abbildung 2.10: Skizze: Querschnitt eines MEMS-Mikrofons (Ref.: [21])

wie in Abbildung 2.10 gezeigt, besitzt, wie auch die anderen Mikrofone, eine Membran

und eine Gegenelektrode. Der Schalleinlass befindet sich in diesem Fall auf der Unterseite der Platine „bottom-hole“. Es gibt sie auch in der Ausführung „top-hole“, der Schalleinlass befindet sich dann auf der Oberseite im Gehäuse. Im Gegensatz zu Elektret-Mikrofonen benötigen die MEMS-Mikrofone eine Spannungsversorgung von ca. 1,5-3,6 V. Sie zeichnen sich durch einen hohen Signal-Rausch-Abstand, eine hohe Empfindlichkeit, eine winzige Einbaugröße und ein geringes Gewicht aus [22]. Nachteilig ist die oft unzuverlässige oder nicht gegebene Funktion in staubiger und feuchter Umgebung [44]. Hier bieten die Elektret-Mikrofone ein breiteres Sortiment und die Möglichkeit eine hohe IP-Schutzart zu bekommen [29].

## 2.6 Ausgewählte Fledermausdetektoren

Es existieren eine ganze Reihe von käuflich verfügbaren Fledermausdetektoren. Dabei variiert der Preis von 20 € für Laien, Kinder und Hobbybeobachter bis in die Tausende für eine professionelle Ausstattung. In der aufgeführten Tabelle 2.1 sind drei Modelle beschrieben, die für diese Arbeit als Vergleichsmodelle zur Verfügung standen.

Fledermaus-Detektor	Franzis Bat Detector Kit	ELV FMD1	SSF BAT 3
Preis [€]	19,95 Juli 2020	34,07 Juli 2020	289,00 Juli 2020
Abmessungen LxBxH [cm]	17 x 11 x 3	14 x 4 x 2	10 x 5,5 x 1,5
Handhabung	Zweihändig	Einhändig	Einhändig
Zusammenbau	Steckmechanismus	Löten, Schrauben	-
Frequenzbereich [kHz]	optimal bei 40	20-80	15-150
Gehäusedesign	Pappe	Kunststoff schwarz	Kunststoff (ähnlich Smartphone)
visuelle Anzeige	keine	LED ein, Batterie schwach	Display (Frequenzanzeige, Ausschläge etc.)
Schnittstellen	Benutzer	Benutzer	Benutzer, USB, Spannungsvers., Line-Out, Micro-SD

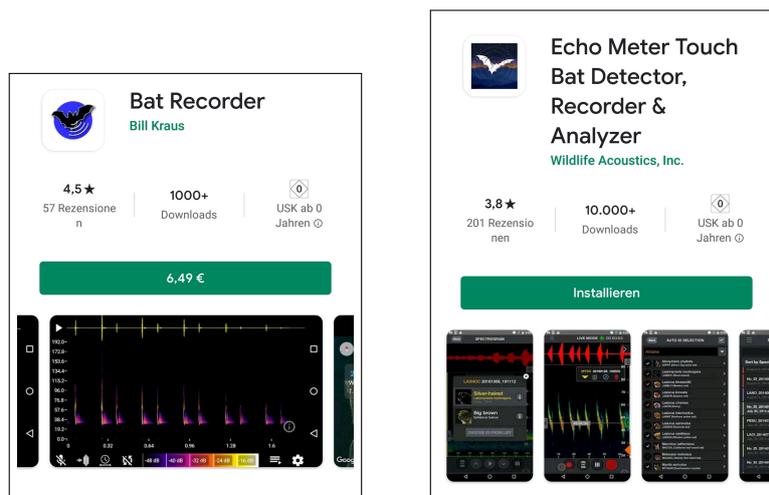
Tabelle 2.1: Fledermausdetektoren im Vergleich bezüglich relevanter technischer Daten



Abbildung 2.11: Fledermausdetektoren (von links): Franzis, ELV FMD1, SSF BAT 3

Bei den beiden günstigeren Geräten kann die Frequenz als auch die Lautstärke verstellt werden. Um eine Fledermaus detektieren zu können, muss der zu beobachtende Frequenzbereich händisch eingestellt werden. Das Modell von ELV ist einhändig bedienbar und fühlt sich durch das stabile Gehäuse sicher an. Die Verkleidung des Franzis-Gerätes besteht aus fester Pappe. Die Signalstärke der Modelle variiert durch den Einsatz von unterschiedlichen Mikrofontypen und ist bei dem ELV-Gerät, subjektiv wahrgenommen, etwas besser. Der SSF BAT 3 ist mit Abstand das beste Gerät und geht schon in den professionellen Bereich über (Abbildung 2.11). Dieser kostet das zeh- bis fünfzehnfache der einfacheren Geräte. Er bietet eine visuelle Anzeige der Fledermausrufe auf seinem Display und erkennt die stärkste Ruffrequenz. Außerdem hat er eine ausgezeichnete Signalstärke und detektiert die Fledermausrufe unabhängig von der Frequenz automatisch. Bei allen drei Geräten fällt ein ein Grundrauschen auf. Das Grundrauschen ist bei dem ELV-Gerät am stärksten. Der SSF BAT 3 bietet die Einstellung an die Tonausgabe automatisch auszuschalten, sobald keine Ultraschallfrequenzen mehr erkannt werden.

Schaut man auf einem mobilen Endgerät nach Apps für die Fledermausdetektion stößt man auf Apps wie den „BatRecorder“ (Kosten: 6,49 €, Stand: Juli 2020), Abbildung 2.12a. Dieser arbeitet mit professioneller, digitaler Ultraschallsensorik von Dodotronic zusammen um Fledermausrufe zu detektieren (Kosten: ab 200 €). Das amerikanische Unternehmen Wildlife Acoustics Inc. bietet eine kostenlose App (Abb.:2.12b) für ihre Fledermausdetektoren an, die über die Micro-USB Schnittstelle mit dem mobilen Endgerät



(a) BatRecorder App

(b) Echo Meter Touch App

Abbildung 2.12: Screenshots der kommerziellen Apps

verbunden werden können. Das günstigste „Touch-Hardware-Modul“ des Unternehmens kostet 179 \$ (Stand: Juli 2020).

## 2.7 Externe Schnittstellen mobiler Endgeräte

Schnittstellen, auch Interfaces genannt, verwalten die Kommunikation zwischen zwei Geräten. Dabei kann die Schnittstelle aus Software und/oder Hardware bestehen. Um externe Geräte wie Kopfhörer, Lautsprecher oder andere Peripheriegeräte mit einem mobilen Endgerät zu verbinden gibt es mehrere Möglichkeiten. Die Zeichnung in Abbildung 2.13 zeigt den stark vereinfachten Aufbau eines Mobiltelefons, in der die nachfolgend diskutierten Schnittstellen **magentafarben** hervorgehoben sind.

### 2.7.1 Bluetooth

Bluetooth ist ein kabelloser Verbindungsstandard zwischen zwei Geräten, der auf Funktechnik basiert und in den 1990er Jahren entwickelt wurde. Die Bluetooth Special-Interest-Group (SIG), die mittlerweile ein Zusammenschluss von mehr als 30.000 Unternehmen ist, hat die Spezifikationen für die Bluetooth-Protokollarchitektur entwickelt [40]. Beide Geräte müssen hardwareseitig Funkmodule besitzen, die eine Verbindung über

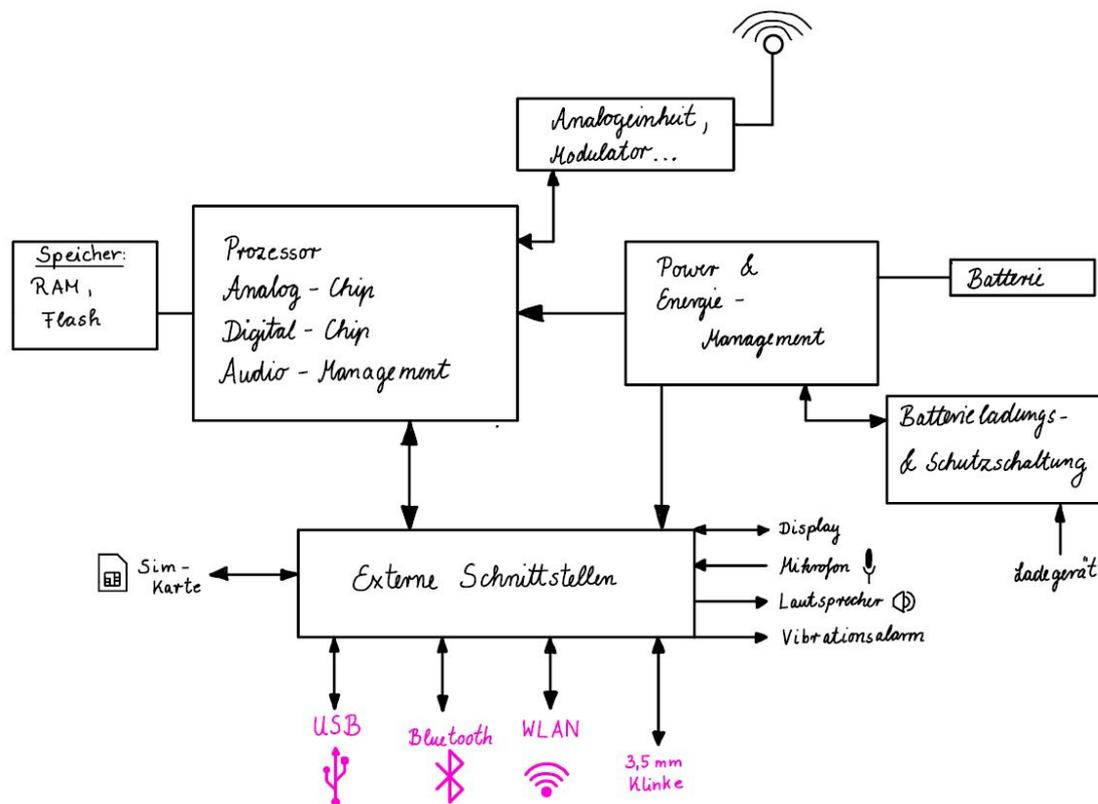


Abbildung 2.13: Grundsätzlicher vereinfachter Aufbau eines Mobiltelefons [32]

Bluetooth erlauben. Die aus der Spezifikation entstandenen Protokolle sind Softwarepakete, sogenannte Protokollstapel (gemeinsame Sprache). Diese ermöglichen die Verbindung der Funkmodule und erlauben Dienste und Anwendungen. Ein Bluetooth Headset, fordert z. B. einen Audiokanal an und steuert über zusätzliche Kanäle die Lautstärke-Einstellungen (Ref.: [32] ab S.423). Bluetooth ist nur für kurze Entfernungen von ca. 100 m gedacht, obwohl der neueste Standard Bluetooth 5.0 auch größere Reichweiten bzw. größere Datenpakete zulässt [34]. Bluetooth teilt sich das 2,4 GHz Frequenzband mit dem WLAN und sendet nicht auf einer festen Frequenz, sondern wechselt nach jedem Paket. Die Übertragungsraten variieren und sind abhängig von der Teilnehmerzahl und wie viel ein Teilnehmer sendet. Insgesamt müssen sich die Teilnehmer in den ersten Bluetooth-Versionen eine Datenrate von 780 kbit/s teilen [32], ab S.407. Bei Bluetooth 2.0 beträgt die Datenrate bereits 2,1 Mbit/s [43].

### 2.7.2 Universal Serial Bus (USB)

Universal Serial Bus (USB) ist ein serielles Bussystem zur Übertragung von Daten zwischen einem Computersystem und angeschlossenen Peripheriegeräten. Die Datenbits werden einzeln nacheinander übertragen, das Verfahren nennt sich „bit-seriell“ [42]. Dabei reichen die Spezifikationen von USB 1.0 aus dem Jahre 1996 bis mittlerweile USB4 (USB 4.0) im Jahre 2019. Vor allem die Datenübertragungsraten haben sich im Laufe der Jahre gesteigert. Um Geräte miteinander zu verbinden gibt es unterschiedliche Steckerformate von USB Typ A über Micro-USB bis hin zu Mini-USB und eine Vielzahl an Adaptern [2], [19]. Bei mobilen Endgeräten bzw. Smartphones wird die USB-Schnittstelle vornehmlich



Abbildung 2.14: Micro-USB (links) und USB Typ-A

zur Spannungsversorgung eingesetzt und um Daten zwischen Computer und Smartphone zu transferieren. Im Jahr 2016 wurde aufgrund der Vielfalt von Steckern und Buchsen die Norm EN62684:2010 eingeführt, die europaweit den einheitlichen Micro-USB-Stecker für Smartphones fordert. Smartphone-Hersteller wie Samsung, Huawei, Google, Sony und andere nutzten diese Hardware-Schnittstelle bisher. Das Technologieunternehmen Apple hat mit seiner „Lightning“ Schnittstelle bei den Smartphones seine eigene Lösung [2].

Mittlerweile gibt es für mobile Endgeräte einen neuen Steckertyp, den USB-C Stecker. Die 2014 fertiggestellte USB Typ-C Spezifikation, deren Pflege an die Non-Profit Organisation USB-Implementers Forum übergeben wurde, wurde 2016 von der International Electrotechnical Commission (IEC) als „IEC 62680-1-3“ angenommen. Die überwiegende Mehrheit der neuen Android-Smartphones besitzt diese Schnittstelle. Dieser Steckertyp unterstützt alle bisherigen USB Spezifikationen ab 2.0. Er ist allerdings auch nur mit entsprechendem Adapter an andere Buchsen anschließbar [20].

Der neue Steckertyp bedeutet allerdings noch nicht automatisch, dass auch das neueste USB Protokoll implementiert ist. Eine USB-C Buchse könnte unter Umständen nur mit USB Spezifikation 2.0 arbeiten und nicht viel mehr bieten als Strom und den standardisierten Austausch von Daten. Bild- und Audiosignale können dann nicht wie bei HDMI

oder DisplayPort übertragen werden. Ab der Version USB 3.1 gibt es wesentlich höhere Übertragungsraten von bis zu 10 Gbit/s (Verdopplung zu USB 3.0) und einen insgesamt größeren Funktionsumfang [19]. Um die neueren Spezifikationen vollumfänglich nutzen zu können, ist der USB Typ-C die zu verwendende Hardwareschnittstelle.

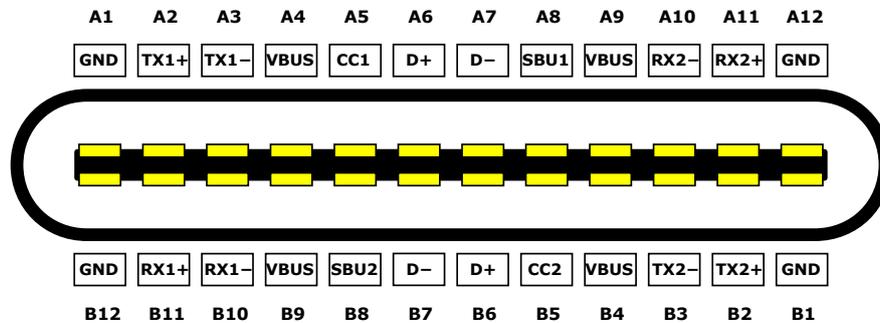


Abbildung 2.15: USB-C Buchsenbelegung [7]

Der USB-C Anschluss ist rotationssymmetrisch und bietet die Möglichkeit in beide Richtungen zu laden. Man ist so in der Lage mit einem Smartphone ein anderes aufzuladen oder externe Module mit Strom zu versorgen. Dadurch dass der Stecker 24-polig ist, soll er in der Lage sein die Steckervielfalt an PCs von HDMI, DisplayPort, über mannigfaltige USB-Typen zu ersetzen. Selbst Apple hat in einigen seiner MacBook-Modellen den USB-C Typ verbaut.

### 2.7.3 Wireless Local Area Network (WLAN)

Mit dem Begriff WLAN (engl.: Wireless Local Area Network) ist meist der Funkstandard der IEEE-802.11-Familie gemeint. Fast jeder, der eine Internetverbindung über WLAN verwendet, nutzt einen Router, der als Verbindung, Vermittler, Kontrolleur und Paketbote zwischen dem Internet und dem Heimnetzwerk fungiert. Die Funk-Frequenz liegt dabei zwischen 2400 und 5725 MHz, je nach verwendeter Technik.

Ein Router kann auch als Access Point fungieren, umgekehrt jedoch nicht [26]. Der Access Point ist, wie der Name impliziert, ein Zugangspunkt für Teilnehmer in einem Netz. Über diesen Zugangspunkt können Teilnehmer eines Netzes direkt miteinander kommunizieren. Für die Verbindung von z. B. externer Elektronik mit mobilen Endgeräten gibt es handliche WLAN-Module, wie das ESP-8266, die als Access Point verwendet werden

können. Diese Module sind insofern interessant, da diese mit einem weiteren Microcontroller (z. B. Arduino Uno) verbunden werden und Smartphones den Arduino über die WLAN-Verbindung ansteuern können. Das WLAN erlaubt größere Übertragungsraten als beispielsweise Bluetooth und eine große Bandbreite an Paketformaten die verschickt werden können. Die maximale Sendeleistung auf dem genutzten öffentlichen 2,4 GHz ISM-Band sind 100 mW. Die Geschwindigkeiten liegen je Ausführung bei 6-600 MBit/s, wobei die Auslegung des physikalischen Layers eine Rolle spielt. Auf diesem Band sendet auch Bluetooth [32] ab S.343, [3], [10].

### 2.7.4 Klinkenbuchse

Die Klinkenbuchse (3,5 mm Klinke bei mobilen Endgeräten), auch „headphone jack“ genannt, ist eine Schnittstelle zur Übertragung von analogen Audiosignalen. Die Klinke, die es auch in anderen Steckerausführungen gibt, wird unter anderem für Mischpulte in Tonstudios genutzt. Bei mobilen Endgeräten wird diese Schnittstelle zumeist für Kopfhörer und Headsets verwendet. Bei der Mehrheit der mobilen Endgeräte gibt es nur noch die CTIA-Belegung (siehe Abbildung 2.16) der 3,5 mm Klinke bzw. gar keine Klinkenbuchse mehr. Dieses Steckerformat wird auch TRRS (Tip-Ring-Ring-Sleeve) genannt.

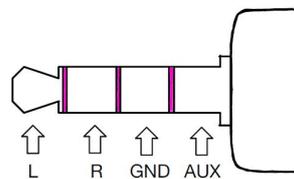


Abbildung 2.16: CTIA-Klinkensteckerbelegung

Der analoge Mikrofon-Eingang, der auf Line-Level (AUX) liegt, ist dabei der Sleeve. Einige Stecker haben nur drei voneinander getrennte Bereiche, das Mikrofonsignal wird dann bei Anschluss des Steckers auf Masse (GND) gezogen. Die Spracheingabe kann dann nicht verwendet werden. Hinter der Klinke befindet sich im mobilen Endgerät ein AD/DA-Wandler der das analoge elektrische Wechselspannungssignal des Mikrofons in ein digitales Signal übersetzt. Vom mobilen Endgerät abgespielte Musik wird von einem digitalen Format in ein analoges Spannungssignal für die Lautsprecher in den Kopfhörern umgewandelt. Das kann auch zweikanalig (Kopfhörer links (L)/ rechts (R)), im Stereo-Format geschehen, um ein räumliches Hören zu suggerieren. Der Mikrofon-Eingang ist nur einkanlig (mono) und kann somit nur von einer Audioquelle gespeist werden [45].

Die AUX Schnittstelle stellt eine Mikrofonvorspannung laut Android Spezifikation von 1,8-2,9 V bereit, da einige Mikrofonkapseln in Headsets diese benötigen [45].

Die Hersteller verzichten bei den neueren mobilen Endgeräten größtenteils aus Platzgründen auf die Klinkenbuchse und da dieser Standard schon sehr alt ist. Da viele Anwender weiterhin gerne die Klinkenbuchse nutzen, einfach aus Gewohnheit oder weil sie noch passende Kopfhörer besitzen, gibt es USB-C zu 3,5 mm Klinke-Adapter in denen ein AD/DA-Wandler integriert ist [33].

### 2.8 Analoges Audiosignal

Ein analoges Audiosignal ist eine kleine Wechselspannung, die im Mikrofon durch den Schallwechseldruck umgesetzt wird. Die beiden Begriffe „Line-Pegel“ und „Mic-Pegel“ sind vor allem in der Tontechnik relevant. Dabei beziehen sie sich auf den Spannungswert des analogen Audiosignals. Für den Line-Pegel, werden die Anschlüsse häufig als Line-In oder Line-Input oder auch AUX oder AUX-In bezeichnet. Für den Mikrofonsignalpegel wird meist das Kürzel Mic-Input oder Mic-In genutzt. Die analoge Wechselspannung bei Audiosignalen wird grundsätzlich als Effektivwert der Spannung oder als dBV-Wert angegeben. Die Umrechnung von einer effektiven Wechselspannungsgröße in dBV wird in Gleichung 2.21 beschrieben. Die Rückrechnung von dBV zu einer Wechselspannung in Volt ist in Gleichung 2.22 gezeigt. Die Bezugsspannung ist dabei  $U_0 = 1 \text{ V}$  [36].

$$L = 20 \cdot \log_{10} \left( \frac{U}{U_0} \right) \text{ dB} \quad (2.21)$$

$$U = U_0 \cdot 10^{\frac{L}{20 \text{ dB}}} \quad (2.22)$$

Ein Mikrofonsignal liegt im Bereich von Milli- oder auch Mikrovolt, und ist je nach Stärke der Schallquelle 100-1000 mal kleiner als Line-Signale. Ein Mikrofonverstärker muss ein Mic-Signal auf das bis zu 3000-fache verstärken um das Signal auf 100 mV bis zu mehreren Volt (Line-Pegel) zu bekommen. Ob und wie stark ein Audiosignal wahrgenommen oder abgespielt werden kann hängt von dem jeweiligen Equipment ab. Für MP3- und DVD-Player und die Heimaudioausrüstung ist meist ein nominales Level von -10 dBV, 0,316 V eff. angelegt. Es gibt aber auch Einstellungen die mit Pegeln von 1-2 V arbeiten [9] S. 356, [5] [36].

## 2.9 Unterabtastung von Fledermausrufen

### 2.9.1 Fledermausrufe

Um sich mit Fledermausforschern über Fledermausrufe unterhalten zu können, ist einiges an Vorwissen gefragt. Die Begrifflichkeiten beinhalten Kürzel wie cf-Rufe, qcf-, fm-qcf- und fm-Rufe. Für Fledermausforscher ist die Art des Rufes relevant, da sie anhand der

Fledermausart	Lateinischer Name	Jagdfrequenz	Sozialruf
Großer Abendsegler	Nyctalus noctula	qcf/fm-qcf: 20 - 25 kHz abwechselnd	32 - 17 kHz
Wasserfledermaus	Myotis daubentonii	fm: 45 - 25 kHz	
Zwergfledermaus	Pipistrellus pipistrellus	qcf: 42- 46 kHz	18 - 25 kHz
Zweifarbflodermäus	Vespertilio murinus	qcf: 24 -27 kHz	
Kleine Hufeisennase	Rhinolophus hipposiderus	cf: 100 -112 kHz	

Tabelle 2.2: Fledermausarten in und um Hamburg [18][41]

Abbildung der Ruffrequenz über der Zeit, die Fledermäuse und deren Sozialrufe, Werberufe und Jagdrufe sowie auch die Arten untereinander auseinander halten können. In Tabelle 2.2 sind beispielhaft die Rufsequenzen von fünf in Norddeutschland heimischen Arten aufgeführt. Die Frequenzdarstellung des Sozialrufes des Großen Abendseglers von 32 kHz bis 17 kHz zeigt dabei an, dass dieser Ruf typischerweise bei 32 kHz startet und im Verlauf bis auf 17 KHz abfällt.

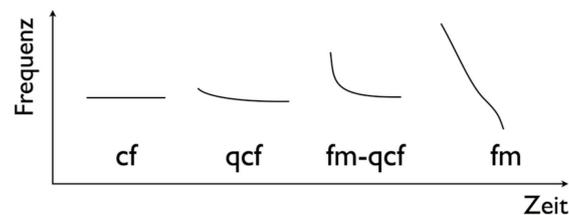


Abbildung 2.17: Mögliche Rufsequenzen von Fledermäusen [30]

Die in Abbildung 2.17 dargestellte Zeichnung zeigt skizzenhaft welche Verläufe die Rufsequenzen im Frequenzbereich über der Zeit haben können. Dabei sind cf-Rufe konstantfrequent, qcf-Rufe als quasi konstant frequent anzusehen und fm-Rufe sind frequenzmo-

dulierte Rufe. Am einfachsten nachzuvollziehen sind die konstant frequenten Rufe, da diese einer Sinusschwingung konstanter Frequenz entsprechen.

Die Abbildung 2.18 zeigt den Sozialruf des Großen Abendseglers (*Nyctalus noctula*). Die Aufnahme wurde in Deutschland von Guido Pfalzer gemacht und ist zusammen mit anderen WAV-Dateien von Fledermausrufen öffentlich zugänglich [25].

- Abtastrate: 250.000 Hz
- Anzahl der Werte: 618.436
- Aufnahmedauer: 2.4737 sec
- Bittiefe: 16

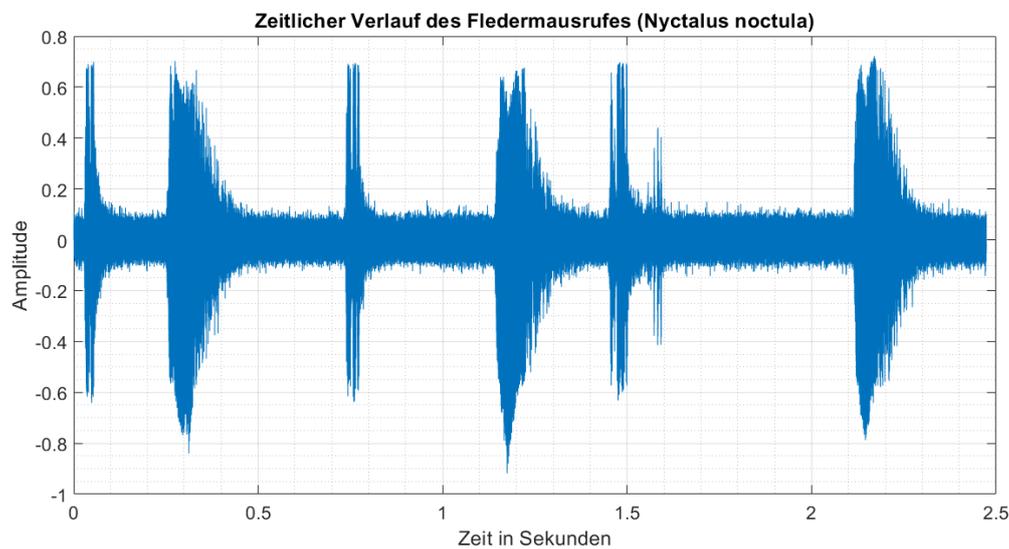


Abbildung 2.18: Sozialruf des Großen Abendseglers im Zeitbereich [25]

Der Ruf wurde mithilfe der Schnellen Fouriertransformation (FFT) in seine Frequenzanteile zerlegt. Das Frequenzspektrum in Abbildung 2.19 zeigt deutlich, dass die Fledermaus nicht auf einer festen Frequenz ruft sondern viele Frequenzanteile in dem Ruf enthalten sind. Die Amplituden haben bei beiden Aufnahmen keine Einheit, da von der WAV-Datei keine Rückschlüsse auf Spannungs- oder Schalldruckpegel gemacht werden können ohne genaue Kenntnis der Aufnahmeeinstellungen und des Equipments. Gut zu sehen ist, dass ein starker Anteil des Sozialrufes des Großen Abendseglers unter 20 kHz liegt. Personen mit gutem Gehör und Kinder können die Rufe dieser Fledermaus oftmals wahrnehmen.

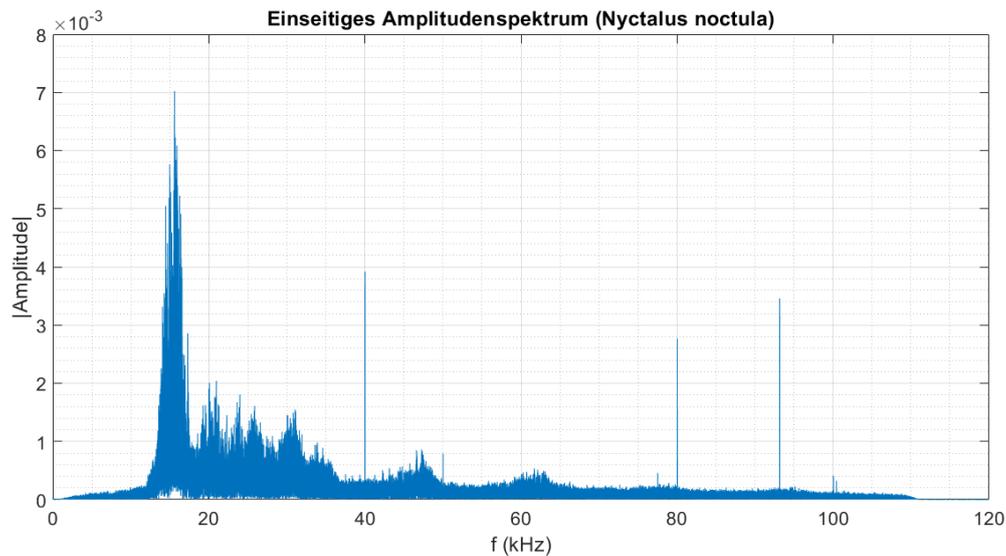


Abbildung 2.19: Abgetastetes Spektrum des Großen Abendseglers

### 2.9.2 Abtasttheorem

Das Nyquist-Shannon-Abtasttheorem besagt, dass jedes band-begrenzte Signal  $x(t)$  sich eindeutig mit Hilfe von Abtastwerten  $x_k = x(kT_a)$ ,  $k \in \mathbb{N}$  mit Abtastperiode  $T_a$  darstellen und verlustlos rekonstruieren lässt. Voraussetzung dafür ist, dass die Abtastfrequenz  $f_a$  mehr als doppelt so groß sein muss, wie die maximale Frequenz  $f_g$  des abzutastenden Signals.

$$f_a > 2 \cdot f_g \quad (2.23)$$

Alias-Effekte treten auf, wenn in dem abzutastenden Signal, größere Frequenzanteile als die für das Signal ausgelegte Grenzfrequenz  $f_g$  vorhanden sind und dadurch das Abtasttheorem verletzt wird. Die zu großen Frequenzanteile müssen durch die Bandbegrenzung des Signals vor der Digitalisierung heraus gefiltert werden. Dazu werden Tiefpassfilter mit einer bestimmten Grenzfrequenz  $f_{gT}$  verwendet. Diese Grenzfrequenz muss kleiner als die halbe Abtastfrequenz  $f_a$  gewählt werden. Dabei ist bei einer Auslegung zu beachten, dass die Filterflanken nie senkrecht (ideal) abfallen [27]. Die Filter dämpfen das Signal je nach Auslegung mit z. B. 20 dB/Dek oder höher. Ein idealer senkrechter Abfall bei der gewählten Grenzfrequenz wird aufgrund von physikalischen Gesetzmäßigkeiten

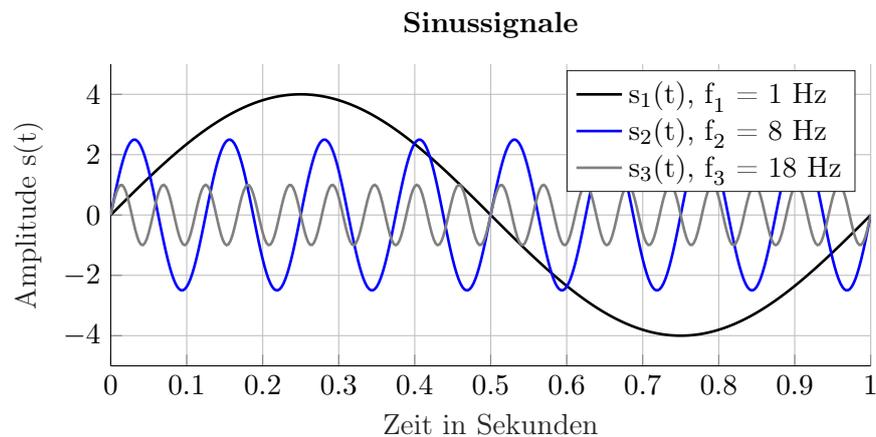


Abbildung 2.20: Sinussignale mit unterschiedlicher Frequenz

nicht möglich sein. Abbildung 2.21 zeigt was passiert, wenn das Abtasttheorem für die in Abbildung 2.20 dargestellten Signalanteile nicht eingehalten wird. Die höchste Frequenz des Signals liegt bei  $f_g = f_3 = 18 \text{ Hz}$ , abgetastet wird jedoch mit  $f_a = 20 \text{ Hz}$ . Der blaue Signalverlauf ist anders als das Originalsignal (magentafarben) und wird den Frequenzanteil von 18 Hz nicht mehr aufweisen.

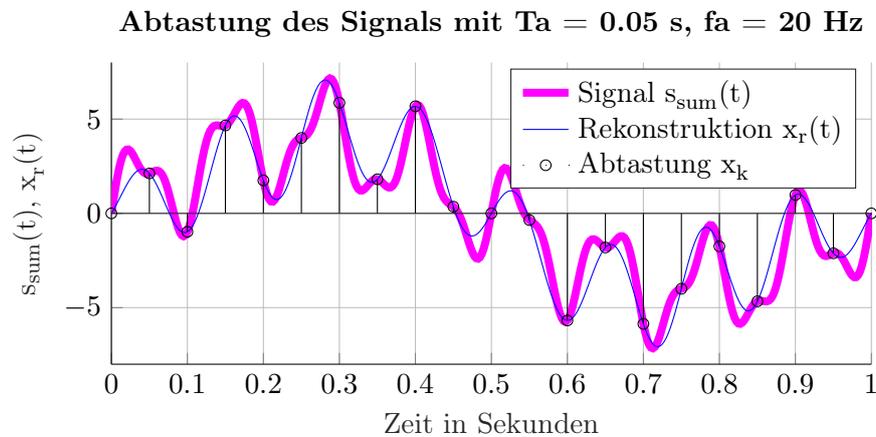
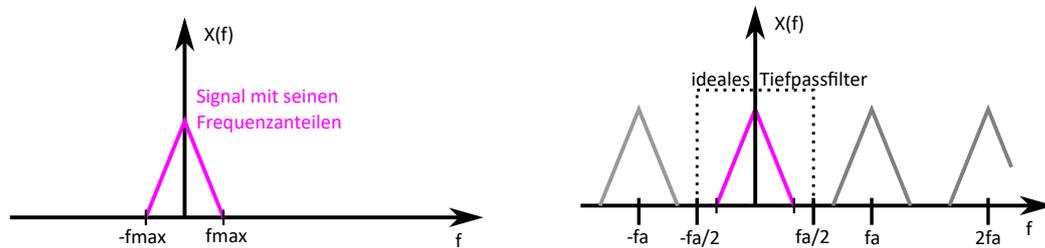


Abbildung 2.21: Unterabtastung des zusammengesetzten Sinussignals

### 2.9.3 Aliasing

Da die Abtastraten von mobilen Endgeräten das Abtasttheorem für Ultraschallfrequenzen verletzen, soll versucht werden die Alias-Effekte auszunutzen um Fledermausrufe

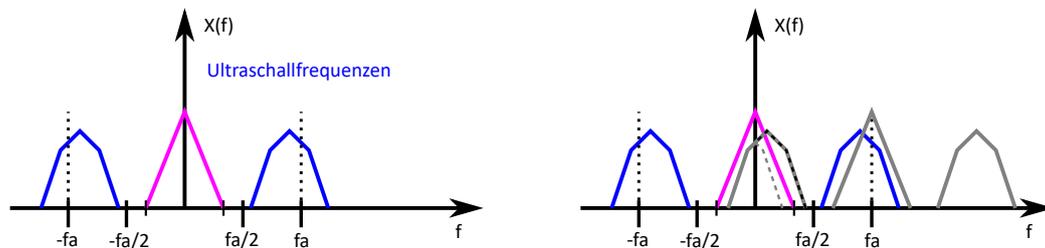
detektieren zu können. Die Android Spezifikation schreibt eine garantierte Abtastfrequenz von 44,1 kHz vor [11]. Im Folgenden wird die Idee exemplarisch veranschaulicht. Das Spektrum eines kontinuierlichen Signals sei bandbegrenzt von  $-f_{\max}$  bis  $f_{\max}$ . Das



(a) Frequenzanteile des kontinuierlichen Signals (b) Frequenzanteile des abgetasteten Signals

Abbildung 2.22: Darstellung eines bandbegrenzten Signals

Frequenzspektrum ist in Abbildung 2.22a graphisch dargestellt. Wird dieses Signal nun abgetastet, wiederholt sich das Frequenzspektrum des Signals periodisch bei den ganzzahligen Vielfachen der Abtastfrequenz  $f_a$ . Das Spektrum eines zeitdiskreten Signals wird periodisch fortgesetzt, wie in Abbildung 2.22b gezeigt. Diese Gesetzmäßigkeit würde durch die Abtastung des mobilen Endgerätes auftreten. Das zeitkontinuierliche Originalsignal kann bei Einhaltung des Abtasttheorems mit seinen Frequenzanteilen wieder reproduziert werden. [27], (Ref.: [6] ab S.493).



(a) Bandbegrenztes Originalsignal mit Ultraschallsignal (b) Verschiebung und Spiegelung der Frequenzanteile

Abbildung 2.23: Darstellung der Problematik mit zusätzlichem Ultraschallsignal

Treten nun Ultraschallfrequenzen auf, die das Abtasttheorem verletzen (Abbildung 2.23a), werden die Frequenzen oberhalb der halben Abtastrate  $f_{a/2}$  und zwischen  $f_a$  in das Basisband gespiegelt. Frequenzen oberhalb von der Abtastfrequenz  $f_a$  werden verschoben, siehe Abbildung 2.23b. Wird dann das digitale Filter darüber gelegt, behält man alle

gespiegelten und verschobenen Frequenzanteile. Die Amplituden der sich überlagernden Frequenzanteile summieren sich auf, wie in Abbildung 2.24b gezeigt. Werden zuerst die

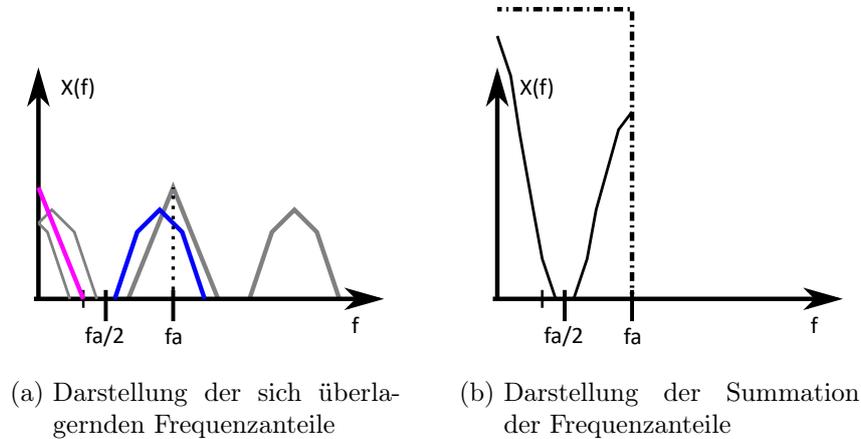


Abbildung 2.24: Frequenzanteile nach der Abtastung

unteren Frequenzanteile im analogen Signal herausgefiltert, z. B. bis 20 kHz, und wird dann eine Abtastfrequenz von  $f_a = 44,1$  kHz genutzt, würde es bei den Fledermausrufen zwar immer noch zur Überfaltung der Spektren kommen, aber es würden nur Frequenzen aus dem Ultraschallbereich ausgewertet werden (Abb.2.25a und 2.25b). Eine

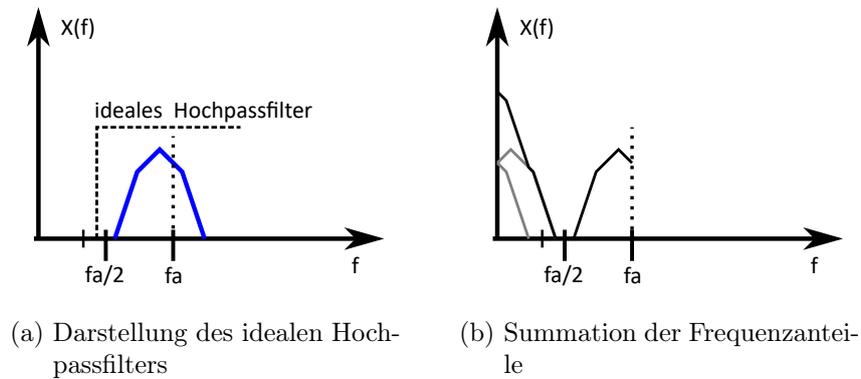


Abbildung 2.25: Frequenzanteile nach der Abtastung mit einem Hochpassfilter

Rekonstruierbarkeit des ursprünglichen Signals und eine Zuordnung zu einer bestimmten Fledermausart ist somit nach der Abtastung trotzdem nicht möglich. Eine Darstellung von den Frequenzanteilen der Fledermausrufe auf die Zeit, wie in Abbildung 2.17 gezeigt, ist somit nicht notwendig und auch nicht sinnvoll.

## 3 Anforderungsanalyse

Die Anforderungsanalyse beschreibt den fachlichen Kontext in dem das System steht, seine Anwendungsfälle und beinhaltet konkrete Forderungen an das System ohne jedoch explizite technische Lösungsansätze zu liefern. Die Hardware außerhalb des mobilen Endgerätes, welches das externe Ultraschallmikrofon und weitere Bauteile, wie Elektronik oder auch Kabel einschließt, wird des Weiteren nur noch als als **U-Adapter** bezeichnet.

### 3.1 Fachlicher Kontext

Der fachliche Kontext beschreibt das „Gesamtsystem“ als Blackbox mit seinen fachlichen Schnittstellen zu allen anderen Nachbarsystemen aus Nutzersicht, um einen ersten Überblick zu verschaffen.

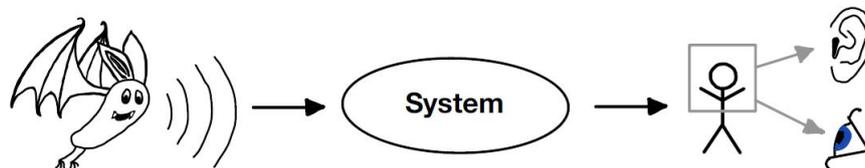


Abbildung 3.1: Systemdarstellung im fachlichen Kontext

Das Blockdiagramm dient zum Verständnis für den Signalfluss vom Ursprung bis zur Ausgabe auf dem mobilen Endgerät.



Abbildung 3.2: Signalfluss-Blockdiagramm

## 3.2 Stakeholder

Als Stakeholder eines Projektes, Vorhabens oder auch Unternehmens werden Interessengruppen bezeichnet. Sie haben ein Interesse an dem Verhalten des Systems oder sind direkt oder indirekt durch das Projekt betroffen. Stakeholdermanagement wird umso wichtiger, je mehr Unternehmen und Personengruppen beteiligt sind um z. B. ein Projekt zum Erfolg zu führen. Im Folgenden werden die Personengruppen aufgelistet, die ein Interesse bzw. Anforderungen an die Umsetzung und das Endergebnis dieser Arbeit stellen.

Rolle	Kontakt	Erwartungshaltung
Product Owner und Auftraggeber	Marc Hensel	Funktionsfähiges, wartbares Produkt; Produkt erfüllt Bedürfnisse der Anwender
Softwarearchitekt und Softwareentwickler	Marc Hensel	Softwareanforderungen und beschriebene Hardwareschnittstelle zum Endgerät sind vorhanden
Hardwareentwickler	Beke Kühl	Hardwareanforderungen an das Produkt sind definiert
Produkt Designer (Hardware)	Beke Kühl	Nutzerfreundlichkeit der Hardware wird beachtet
Anwender (User)	-	Einfach händelbar, leicht zu bedienen, Funktionalität gewährleistet, robustes Gehäuse

Tabelle 3.1: Stakeholder und deren Beziehung zum System

## 3.3 Anwendungsfälle

Die Anwendungsfälle beschreiben das von außen sichtbare Verhalten des Systems mit Akteuren wie Nutzern oder anderen Systemen. Dabei wird kein Fokus auf die Reihenfolge der Anwendungen gelegt.

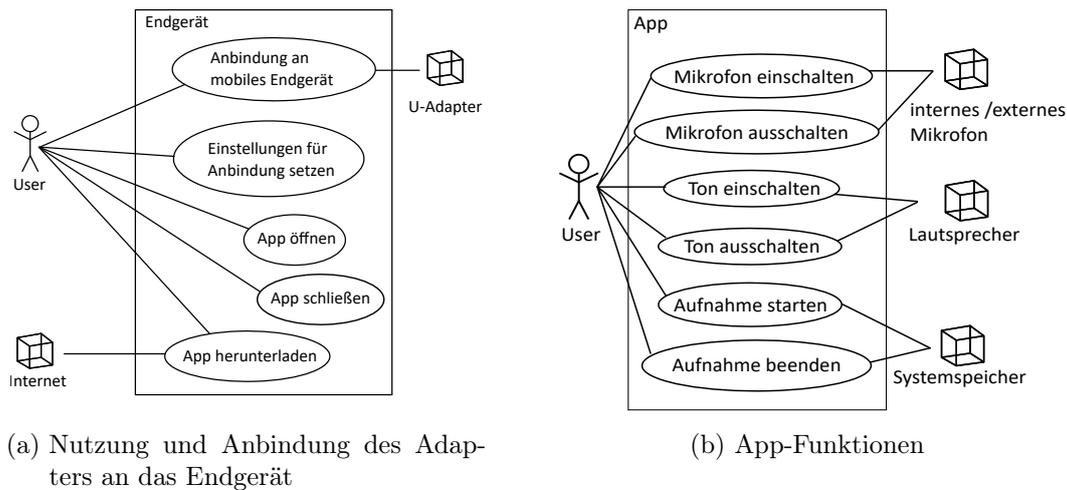


Abbildung 3.3: Anwendungsfälle

## 3.4 Aktivitätsdiagramm

Anwendungsdiagramme beschreiben nur die eigentliche Anwendung. Die zeitliche Abfolge von Handlungen des Anwenders werden dabei nicht betrachtet. Aussagekräftiger ist hier ein Aktivitätsdiagramm, in welchem die zeitliche Abfolge berücksichtigt wird. Die Art der Darstellung in Abbildung 3.4 weicht von der standardisierten UML-Notation (engl.: Unified Modeling Language) von Aktivitätsdiagrammen ab (Ref.: [13]). Das Aktivitätsdiagramm soll dem Nutzer verdeutlichen, welche Funktionalitäten für ihn aus der Nutzung des U-Adapters zusammen mit der App entstehen.

## 3.5 Funktionale und nicht-funktionale Anforderungen

Die für das System notwendigen funktionalen und nicht-funktionalen Anforderungen werden beschrieben, um die Entwicklungsziele für das System genau definieren zu können. Somit kann nachvollzogen werden, ob und in welchem Rahmen, die Umsetzung erfolgreich ist. Die Bedingungen für die App werden in der Anforderungsanalyse für das Gesamtsystem aufgenommen, auch wenn die eigentliche App-Entwicklung nicht Teil dieser Arbeit ist.

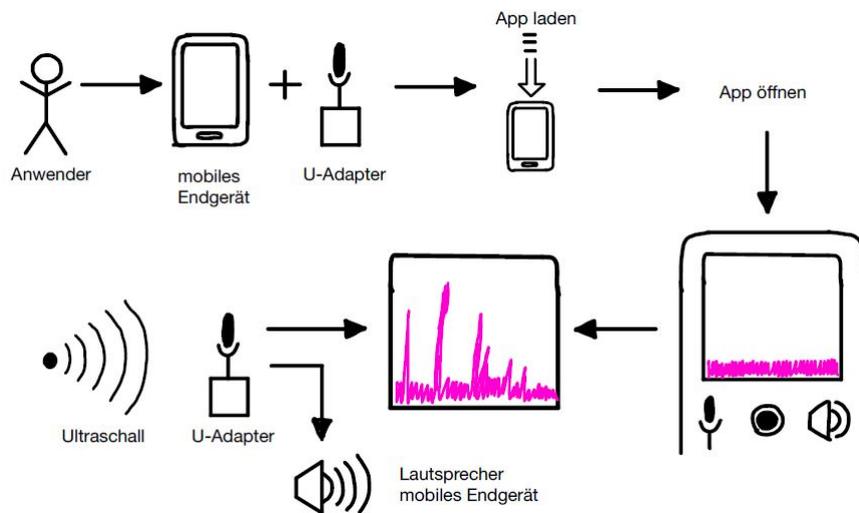


Abbildung 3.4: Anwendungseinsatz des U-Adapters mit mobilem Endgerät

### 3.5.1 Funktionale Anforderungen an das System

F1: Es muss Ultraschall von 20 kHz bis mindestens 60 kHz aufgenommen und in ein für Menschen hörbares Signal ausgegeben werden.

*Hinweis: Frequenzbereich des Großteils der heimischen Fledermäuse.*

F2: Das System muss robust und portabel sein, sodass die Ultraschalllaute der Fledermäuse in deren natürlichem Lebensraum aufgenommen und verarbeitet werden können.

*Hinweis: mindestens IP-Klasse 20*

F3: Fledermausrufe zwischen 20 und 60 kHz sollten unter normalen Witterungsbedingungen in einer Entfernung von bis zu 15 m noch „gut“ hörbar sein.

F4: Als Ultraschallempfänger soll ein externes ultraschallfähiges Mikrofon verwendet werden.

F5: Es muss von dem externen Ultraschallmikrofon eine Anbindung an mobile Endgeräte (typischerweise Smartphone) gewährleistet sein.

F6: Das mobile Endgerät soll mit einer App die Fledermausrufe auf dem Display visualisieren.

F7: Das mobile Endgerät soll mit einer App die Fledermausrufe für den Menschen hörbar machen.

*Hinweis: Die beste Hörleistung des Menschen liegt im Sprachbereich zwischen 2-5 kHz.*

#### 3.5.2 Nicht-funktionale Anforderungen

N1: Die zu entwickelnde Anwender-App soll auf dem Betriebssystem Android ab der Android-Version 8.0.0 laufen.

*Hinweis: Entwicklungsstand der Android-Versionen (Distribution dashboard)*

N2: Der U-Adapter muss handlich sein und sollte eine Größe von 14 x 6 x 4 cm (LxBxH) nicht überschreiten.

*Hinweis: Kinderhände ab 10 Jahre*

N3: Der U-Adapter sollte nicht schwerer als 200g sein.

*Hinweis: Das Gewicht der meisten Smartphones liegt zwischen 100g und 200g.*

N4: Mehrere Fledermausarten mit unterschiedlichen Frequenzen sollen gleichzeitig detektiert werden können.

N5: Die Materialkosten für die externen Bauteile sollen 30 € nicht überschreiten.

*Hinweis: Orientierung am Preis von Low-Cost Fledermausdetektoren vgl. Tab.:2.1.*

N6: Die externe Adapterkonstruktion muss in einer Umgebungstemperatur von 5 bis 30°C einwandfrei funktionieren.

*Hinweis: Beobachtung der Fledermäuse findet spät abends oder nachts im Sommer statt. Fledermäuse halten Winterschlaf.*

N7: Der U-Adapter soll farblich so konzipiert werden, dass dieser bei Verlust in der Dunkelheit/Dämmerung auf Waldboden oder Grasflächen wieder auffindbar ist.

N8: Der U-Adapter muss bei einem Fall aus 1m Höhe auf einen asphaltierten Untergrund funktionsfähig bleiben.

*Hinweis: Einsatz im Gelände, Nutzung durch Kinder*

N9: Elektronikbauteile sollen so ausgewählt und in den Eigenschaften dokumentiert werden, dass sie bei Abkündigung durch Bauteilhersteller ersetzt werden können.

N10: Die Verarbeitung der Daten und die folgende Anzeige auf dem Display mit Ausgabe eines Tons sollen so zügig erfolgen, dass die menschliche Wahrnehmung die Verzögerung nicht bemerkt. Die Latenzzeit vom Empfang bis zur Ausgabe sollte max. 100 ms betragen.

## 4 Konzeption

Die Signalabtastung und Verarbeitung soll möglichst über das mobile Endgerät laufen, um Kosten bei externer Elektronik einzusparen. Dabei können die Hersteller bei der Entwicklung mobiler Android-Endgeräte auf verschiedene Abtastraten laut Android Spezifikation zurückgreifen. Die Abtastrate, welche bei allen mobilen Endgeräten für die Audioverarbeitung garantiert werden kann, beträgt 44,1 kHz [11].

Die externen Ultraschallsensoren, die im unteren Preissegment zur Verfügung stehen, liefern alle ein analoges Ausgangssignal, dies wird mit berücksichtigt. Im Folgenden werden die verschiedenen Konzepte erläutert und evaluiert. Daraus entsteht schlussendlich die Entscheidung des zu verfolgenden Konzepts.

### 4.1 3,5 mm Klinkenanschluss

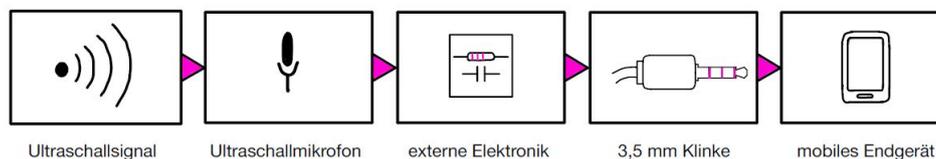


Abbildung 4.1: Blockdiagramm für 3,5 mm Klinken-Schnittstelle

Der AUX-Eingang von mobilen Endgeräten wird verwendet um analoge Audiosignale, zum Beispiel beim Telefonieren über ein kabelgebundenes Headset, zu verarbeiten. Das Ultraschallmikrofon gibt kleine Wechselspannungssignale im Mikro- bis unteren Millivoltbereich aus. Die AUX-Schnittstelle ist ein Line-In und benötigt somit einen höheren Spannungspegel als ein Mic-In. Nachgeschaltete Verstärkerstufen können ein Mikrofon-signal auf Line-Pegel anheben.

Der Klinkenanschluss bei mobilen Endgeräten bietet nach Android Spezifikation eine

Mikrofonvorspannung von 1,8-2,9 V [45]. Das Samsung Galaxy S7 liefert 1,8 V Gleichspannung zwischen AUX und GND.

Für die Spannungsversorgung externer Bauteile könnte auf die USB Schnittstelle des Smartphones oder auf eine externe Quelle, wie z. B. Batterien zurückgegriffen werden. Bei Anschluss eines Headsets an die Klinkenbuchse eines mobilen Endgerätes wird dieses automatisch durch das Betriebssystem erkannt. Softwareseitig sollte es daher möglich sein den AUX-Eingang als Audioeingang und die Lautsprecher des Smartphones als Audioausgang festzulegen. Sollte dies nicht funktionieren, könnte man einen Klinkensplitter, Abbildung 4.2, nutzen. Dabei werden Spracheingabe und Audioausgabe aufgeteilt. Ein



Abbildung 4.2: Klinkensplitter: **Mikrofon**, **Kopfhörer**

Anschluss eines kleinen externen Lautsprechers wäre so möglich.

Seit 2016 verzichten immer mehr Smartphone Hersteller auf den Klinkenanschluss. Die neueren Android-Smartphones besitzen zumeist nur noch den USB Typ-C Anschluss. Hierfür gibt es entsprechende Klinke zu USB-C Adapter in denen schon ein AD/DA-Wandler integriert ist, wie in Abbildung 4.3 gezeigt. Android-Smartphones, der älteren

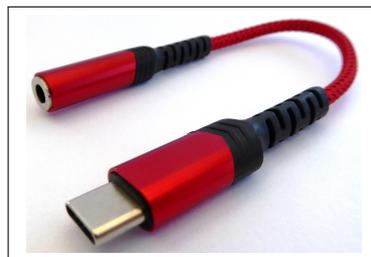


Abbildung 4.3: 3,5 mm Klinkenbuchse zu USB Typ-C Adapter

Generation und sogar noch einige neuere Modelle, wie das Samsung Galaxy S10, besitzen die 3,5 mm Klinkenbuchse. Der Anschluss an die Klinkenbuchse benötigt keine speziellen Berechtigungen oder Zertifikate. Die Anbindung eines Ultraschallmikrofons an diese

Schnittstelle würde geringe Kosten bezüglich der externen Elektronik verursachen und wäre zeitnah realisierbar, weshalb dieser Ansatz auch weiterverfolgt wird.

## 4.2 Bluetooth

Die Signalübertragung über Bluetooth wäre eine weitere Option, allerdings erhöht sich in diesem Fall der Anteil an externer Elektronik im Vergleich zum Klinkenanschluss. Beispielsweise braucht das Bluetooth-Modul eine Stromversorgung. Falls diese nicht über einen Anschluss des Smartphones läuft ist auch hier eine externe Quelle notwendig. Mittlerweile gibt es vorprogrammierte intelligente Bluetooth-Module zur Audioverarbeitung, welche bereits mit Ein- und Ausgang für den Line-Pegel ausgestattet sind.

Die Reichweite von nur maximal 10-20 m spielt eine geringe Rolle, da das Bluetooth-Modul zusammen mit dem Smartphone dicht am Körper gehalten wird. Es gibt nicht das „eine“ Bluetooth-Modul sondern Module mit unterschiedlichen Funktionalitäten. Davon sind ein paar in in der Tabelle 4.1 aufgeführt. Die HC-Module haben den geringsten

Bluetooth-Modul	Funktionsumfang	Preis
HC-05, HC-06	programmierbare Module ohne vor-eingestellte Funktionen	ca. 6-8 €
TSA-6015	Telefonieren, Audioübertragung, Line-In, Line-Out	ca. 11,95 €
F-6888	Stereo-Audio, AUX-In, Audioübertragung	ca. 3,95 €

Tabelle 4.1: Vergleich von Bluetooth-Modulen, Stand: Juli 2020

Funktionsumfang. Die Kommunikation muss bei diesen über die serielle Schnittstelle laufen, da es keine Analoge gibt. Hierzu würde ein weiterer Mikrocontroller benötigt, welcher die Informationen über das Bluetooth-Protokoll vermitteln kann. Das analoge Audiosignal würde mithilfe des Mikrocontrollers abgetastet werden. Wird ein Arduino bzw. ein vergleichbares Modell verwendet, liegen die Kosten zwischen 10 und 20 € (Stand: Juli 2020). Die eigentliche Signalverarbeitung und Abtastung des Signals würde dann außerhalb des mobilen Endgerätes stattfinden. Die externe Elektronik zur Aufbereitung des Mikrofonsignals käme noch hinzu. Die Kosten lägen somit schon bei ungefähr 30 €, ohne ein Gehäuse für die externen Bauteile. Außerdem ließe sich die Größe des externen Aufbaus nicht reduzieren.

Bei den intelligenteren Modulen, wäre zumindest ein genauerer Blick auf den F-6888 lohnenswert, da dieser im Datenblatt zwei AUX-Eingänge für rechts und links bietet und vergleichsweise günstig ist. Aufgrund der vorangegangenen Argumente wird sich gegen die

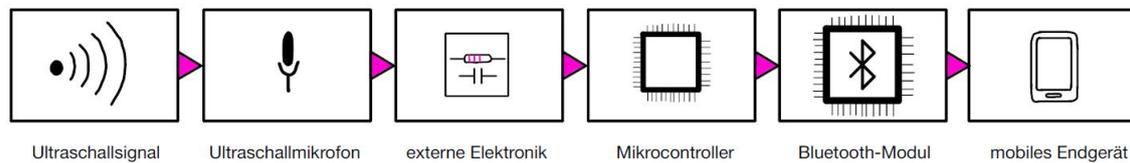


Abbildung 4.4: Blockdiagramm für Bluetooth-Schnittstelle

Bluetooth-Schnittstelle entschieden.

### 4.3 WLAN

Eine weitere Möglichkeit ist die Anbindung über WLAN-Funkmodule z. B. das ESP-8266. Der hardwareseitige Aufbau mit dem WLAN-Modul gestaltet sich ähnlich wie mit der Bluetooth Variante. Es wird ein weiterer Mikrocontroller benötigt um das analoge Audiosignal umzusetzen, welches dann über die serielle Schnittstelle verarbeitet und an das mobile Endgerät verschickt werden kann. Eine Spannungsversorgung ist sowohl für das Modul, als auch für den Mikrocontroller notwendig. Die Abtastung und Signalverarbeitung wäre auf den Mikrocontroller ausgelagert und fände nicht innerhalb des Smartphones statt. Die WLAN-Module sind etwas günstiger als die Bluetooth-Module und liegen bei 3-5 € das Stück (Stand: Juli 2020). Wird die WLAN Lösung weiter verfolgt

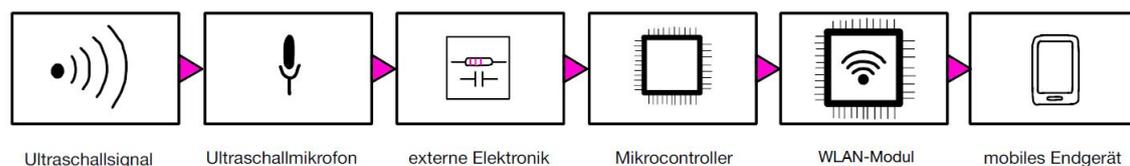


Abbildung 4.5: Blockdiagramm für WLAN-Schnittstelle

müssten Sicherheitsaspekte bezüglich Zugriffsberechtigungen und Sicherheitsschwachstellen beim Verbindungsaufbau mit WLAN Access-Points genauer beleuchtet werden. Zusätzlich müsste sichergestellt werden, dass nur genau das Smartphone die Datenpakete von dem Modul bekommt mit dem es auch „reden“ möchte, wenn man mehrere Module

nebeneinander betreibt. Die Fledermausrufe über WLAN zu übertragen, erscheint daher unangemessen aufwendig, sodass die Übertragung über die WLAN Schnittstelle nicht weiter verfolgt wird.

### 4.4 USB

Das Audiosignal eines externen Ultraschallmikrofons über die USB Schnittstelle des Smartphones zu übertragen, böte den offensichtlichen Vorteil einer Spannungsversorgung von externer Elektronik. Der Anschluss von externen USB Geräten lässt sich bei den Smartphones laut des Artikels der Heise Medien GmbH von 2018 [47] allerdings nur schwer vorab testen, da nicht alle Smartphones externe USB Geräte akzeptieren. Der Aufwand die Schnittstelle softwareseitig so zu konfigurieren, dass sie mit dem Großteil der Android Smartphones funktioniert, wäre möglicherweise ein Mehraufwand. Die Fledermausrufe über die Micro-USB Schnittstelle an das Android Smartphone weiter zu leiten scheint jedoch möglich, wie das Modul zur Detektion von Fledermausrufen von der Firma Wildlife Acoustics Inc.<sup>1</sup> zeigt. Derzeit gibt es noch viele Anwender, welche Smartphones mit Micro-USB Schnittstelle haben. Seit dem Jahr 2020 ändert sich das und die neueren Smartphones besitzen die 2014 veröffentlichte USB Typ-C Schnittstelle [2]. Ein Großteil der mobilen Endgeräte mit einem USB Typ-C Anschluss hat Protokollspezifikationen ab USB 3.0 implementiert. Diesbezüglich gibt es verschiedene Spezifikationen die von USB 3.0, 3.1 bis 3.2 reichen und von denen unterschiedliche Generationen vorhanden sind. Den Geräten ist dabei nicht direkt anzusehen welche Spezifikationen sie nutzen. Die Datenübertragung der neuesten USB4 Spezifikation liegt bei 40 Gbit/s und ist viermal schneller als USB 3.1. [19]. In einem Interview der Heise Medien GmbH wird berichtet, dass es derzeit noch Probleme und vor allem Verwirrung bezüglich der Kommunikation von externer Hardware, dem PC und dem Verbindungskabel gibt. Die externe Hardware muss mit einem PC, Tablet oder Smartphone mit USB Typ-C Schnittstelle kommunizieren, welche Funktionen es anbietet bzw. was die jeweils andere Seite zulässt. Viele Verbindungskabel besitzen mittlerweile eine begrenzte Intelligenz und haben kleine Chips integriert, welche beispielsweise nur eine Stromübertragung zulassen [19]. Das bedeutet, dass selbst wenn beide Endgeräte Bildsignale übertragen könnten, das Kabel diese Funktionalität nicht zulässt. Ein weiterer nicht irrelevanter Punkt ist die mögliche

---

<sup>1</sup><https://www.wildlifeacoustics.com/products/echo-meter-touch-2-android> (abgerufen 2020-08-21)

Authentifizierung von externer Hardware an der neuen USB Typ-C Schnittstelle. Anzuschließende Geräte müssten somit ein digitales Zertifikat besitzen, damit sie mit dem mobilen Endgerät kommunizieren dürfen [19].

Für die Nutzung der USB Typ-C Schnittstelle müsste recherchiert werden, ob ein entsprechender Hardware-Adapter kostengünstig entwickelt werden könnte. Der Stecker ist,

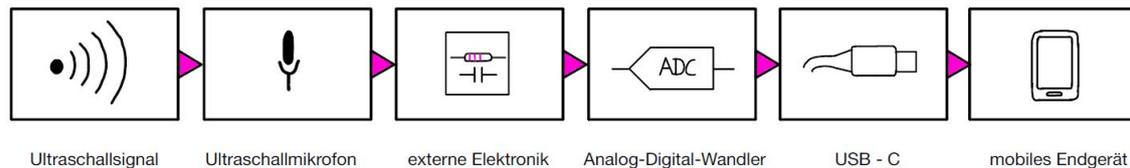


Abbildung 4.6: Blockdiagramm für USB Typ-C Schnittstelle

wie schon in Kapitel 2.7.2 beschrieben, verpolungssicher und die Stromspeisung bzw. Spannungsversorgung kann in beide Richtungen erfolgen. Der 24-polige Steckertyp soll zukünftig alle anderen Formate wie DisplayPort, HDMI, und 3,5 mm Klinke ersetzen und die aktuell existierende Menge an Hardwareschnittstellen reduzieren. [19]. Um derzeit ältere Peripheriegeräte mit USB Typ-C zu verbinden gibt es eine Reihe von Adapterlösungen. Diese Art der hardwareseitigen Verbindung wäre für den Nutzer sehr intuitiv und würde eine schnelle Datenverarbeitung sicherstellen. Eine Verwechslungsgefahr von externem Gerät und mobilem Endgerät wäre im Vergleich zu WLAN und Bluetooth kein Problem.

Zukünftig werden vermutlich alle neu entwickelten Android-Geräte auf die Hardwareschnittstelle USB Typ-C zurückgreifen [2]. Viele Anwender besitzen jedoch noch immer Smartphones mit Micro-USB Anschluss. Die neue Hardwareschnittstelle wird daher für die Anbindung eines externen Ultraschallmikrofons nicht betrachtet. Zusätzlich herrscht derzeit ein gewisses Chaos bezüglich Konfiguration und Kommunikation über die neue Schnittstelle. Trotzdem sollte die neue USB Typ-C Schnittstelle weiter beobachtet werden. Sie erscheint für eine zukünftige Entwicklung eines U-Adapters vielversprechend.

# 5 Optionsanalyse, Entwicklung und Implementierung

## 5.1 Auswahl des Mikrofons

Bei den typischerweise in Smartphones verbauten Mikrofonen handelt es sich um MEMS-Mikrofone, welche grundsätzlich den Frequenzbereich des menschlichen Hörvermögens abdecken. Analoge Ultraschall-Mikrofone liegen preislich im Bereich von 2 bis 5 €. Digitale Schaltungen mit integriertem Mikrofon im vergleichbaren Preissegment sind lediglich bis ca. 20 kHz ausgelegt. Nachfolgend werden drei aussichtsreiche Kandidaten vorgestellt wobei zwei der diskutierten Mikrofone in Abbildung 2.9 abfotografiert sind.

Das Produkt „MEMS-1“ von dem Elektronikversandhaus ELV beinhaltet dabei ein auf einer Platine vormontiertes Mikrofon des Herstellers Knowles mit zwei Kondensatoren und Anschlüssen für die Durchsteckmontage. Die Tabelle 5.1 vergleicht die Eigenschaften der zur Auswahl stehenden Mikrofone und bietet eine Entscheidungsgrundlage. Oft wird bei der Angabe der Sensitivität von Mikrofonen der Bezugsschallpegel von

$$94 \text{ dB SPL} \hat{=} 1 \text{ Pa} \longrightarrow 1000 \text{ mV/Pa} \hat{=} 0 \text{ dB} \quad (5.1)$$

genutzt. In älteren Datenblättern von Mikrofonen befindet sich in der Regel der Bezug zu 10 V/Pa auf Basis von 74 dB SPL [35]. Daher wird zum besseren Vergleich der Empfindlichkeiten in einer Zeile der Tabelle 5.1 die Sensitivität in mV/Pa angegeben. Im folgenden Versuchsaufbau unter Abbildung 5.1 wird die Signalstärke der Mikrofone getestet, um diese vergleichen zu können. Die Spannungsversorgung besteht aus zwei in Reihe geschalteten 1,5 V AA-Batterien. Falls ein Verstärker integriert ist benötigen die Elektret-Mikrofone eine geringe Vorspannung von ca. 1,5 V. Ein Vorwiderstand von jeweils 470 k $\Omega$  wird verwendet. Das MEMS-1 wird mit einem Vorwiderstand von 100  $\Omega$  an die 3 V Spannungsversorgung angeschlossen. Es hat im Gegensatz zu den Elektret-Mikrofonen drei

Bezeichnung	MA40-R	KPUS-40T-16R-K769	SPU0410LR5H-QB (MEMS-1 von ELV)
Hersteller/ Marke	TRU COMPONENTS	no name	Knowles (ELV)
Kosten [€] Juli 2020	5,76	1,76-3,07	4,83
Typ	Elektret	Elektret	MEMS
Abmessungen [mm]	Ø16; H: ca. 12; L: Pins 8	Ø16; H: ca. 12; L: Pins 8	LxBxH: 3,76 x 3,00 x 1,10
Montage	Pins	Pins	Weichlötverfahren für SMD
Nominale Frequenz [kHz]	40 +/- 1	40 +/- 1	Datenblatt (Abb.:5.3), bestes Verhalten zwischen 20 und 30
Versorgungsspannung [V]	keine	keine	1,5 - 3,6
Empfindlichkeit (Sensitivity)	-60 dB (0 dB=10 V/Pa)	≥ -67 dB bei 40 kHz (0 dB = 10 V/Pa)	Typ. -38 dBV/Pa, 94 dB SPL bei 1 kHz
Umrechnung der Empfindlichkeit [mV/Pa]	10 mV/Pa	4,47 mV/Pa	12,59 mV/Pa
Temperaturbereich [°C]	-20 bis +70	-30 bis +80	-40 bis +100

Tabelle 5.1: Mikrofone mit analogem Ausgangssignal im Vergleich

Kontakte: Spannungsversorgung, Signal und Masse. Um mögliche Wechselspannungseinflüsse aus der Versorgungsspannung des MEMS-1 zu filtern wird ein Kondensator mit Masse verbunden. Damit bei den Elektret-Mikrofonen nur der Wechselspannungsanteil abgegriffen wird, werden die beiden Signalkontakte mit einem Kondensator von jeweils 1,5 nF von der Versorgungsspannung entkoppelt. Um mögliche weitere Gleichspannungseinflüsse zu unterdrücken, wird die Einstellung AC für alle Kanäle am Oszilloskop gewählt. Der Spannungsverlauf der Mikrofone ist unter Abbildung 5.2 zu finden.

Der zur Tonerzeugung genutzte HC-SR04 wird normalerweise als Abstandssensor verwendet. Das Sensormodul sendet Ultraschall mit einer Frequenz von 40 kHz aus. Die Ansteuerung des Moduls erfolgt über einen Mikrocontroller vom Typ Arduino Uno R3, wie in Abbildung 5.1 gezeigt. Die Triggerung am Oszilloskop erfolgt auf das Signal des MA40-R, da bei Triggerung des MEMS-1 Signals die Wechselspannungsamplituden der Elektret-Mikrofone kaum sichtbar sind. Das zur Messung verwendete Oszilloskop ist ein „Rigol DS1054Z“. Die verwendeten Tastköpfe tragen die Bezeichnung „Rigol PVP2150“.

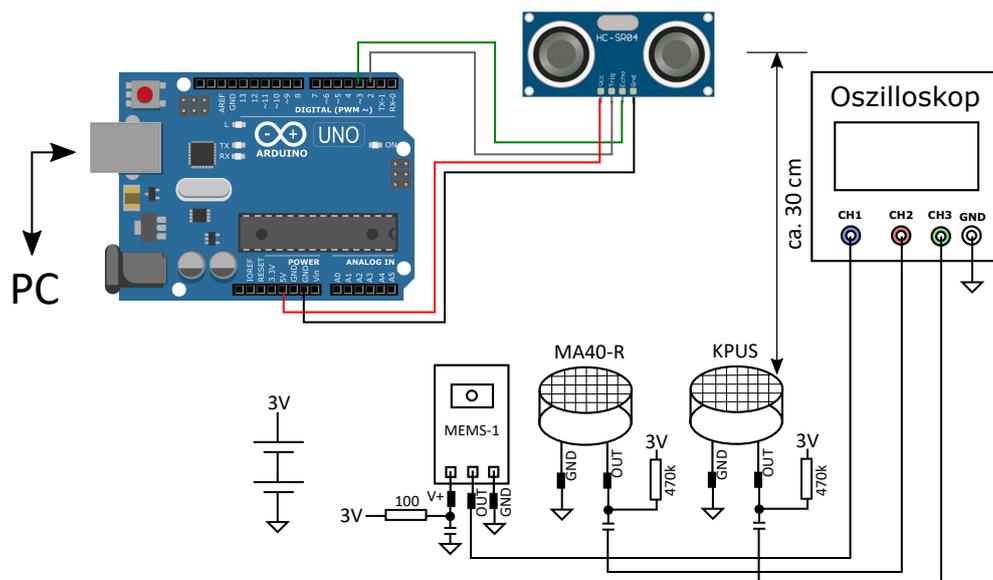


Abbildung 5.1: Messaufbau für Mikrofon-Signale

Beide Elektret-Mikrofone weisen im Vergleich zum MEMS-1, eine schwächere Wechselspannungsamplitude auf. Mit zunehmendem Abstand zum Ultraschalltransmitter nimmt die Signalstärke ab. Die Spannungsamplituden sind im Oszilloskopbild in Abbildung 5.2

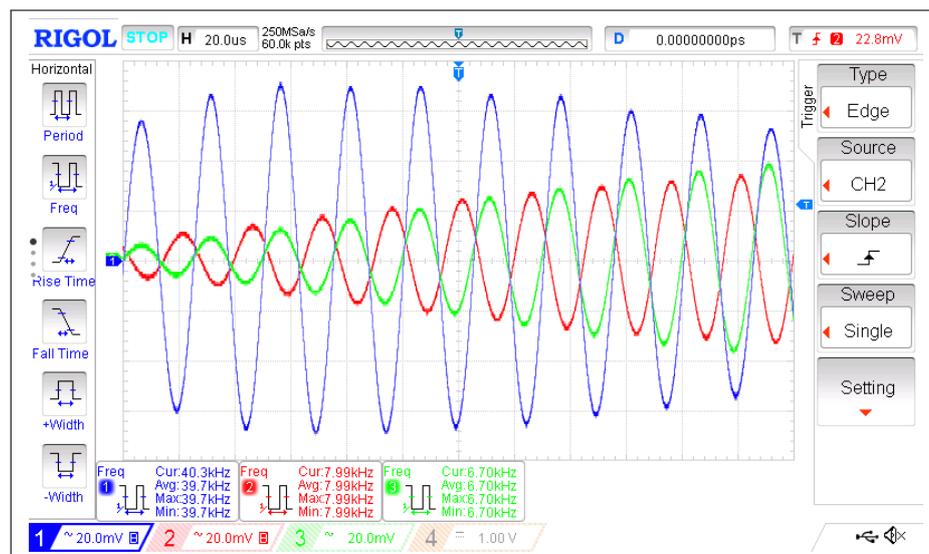


Abbildung 5.2: Wechselspannungssignale der Mikrofone: MEMS-1, MA40-R, KPUS

auf 20 mV/DIV eingestellt. Die Entscheidung fällt aufgrund der nachfolgend genannten Aspekte auf das MEMS-1 Mikrofon:

- Die Einbaugröße ist wesentlich geringer und bietet sich für SMD-Platinen an.
- Der Inhalt des Datenblatts ist ausführlicher und bietet somit eine bessere Grundlage für die Abschätzung des Funktionsumfangs. Für die Elektret-Mikrofone waren keine Daten zum Verhalten außerhalb von 40 kHz +/- 1 kHz aufzufinden.
- MEMS-Mikrofone ersetzen im Bereich der Konsumer-Elektronik die Elektret-Mikrofone. Eine baldige Abkündigung ist daher nicht zu befürchten.
- Die Wechselspannungsamplitude des MEMS-1 ist bei gleicher Entfernung des Ultraschall-Senders ausgeprägter.
- Das MEMS-1 besitzt eine schneller ansteigende Amplitude und eine schnellere Reaktionszeit auf das ausgesendete Signal des HC-SR04.

Eine Spannungsversorgung für eine Filterschaltung und/oder Verstärkerschaltung wird vorhanden sein müssen. An diese Spannung könnte dann auch das MEMS-1 angeschlossen werden. Ein Nachteil des MEMS-1 ist der etwas höhere Preis im Vergleich zum KPUS Elektret Empfänger. Grundsätzlich ist es möglich das MEMS-Mikrofon direkt beim Hersteller Knowles zu erwerben. Dies erscheint im ersten Moment kostengünstiger, jedoch

muss die Montage mit einem Weichlötverfahren für SMD-Bauteile erfolgen. Die Kontakte auf der Unterseite des Mikrofons per Hand anzulöten erscheint kaum möglich.

Da die Spannungsamplitude des MEMS-1 ein Mikrofonsignalpegel ist, wird probeweise ein direkter Test mit einem handelsüblichen, kabelgebundenen, ca. 3 Jahre alten Samsung-Headset durchgeführt. Das im Headset verbaute Mikrofon wird zunächst entfernt, um anschließend das MEMS-1-Mikrofon anzuschließen. Mithilfe einer standardmäßigen kostenfreien Diktierapp<sup>1</sup> wird eine Sprachaufnahme mit zusätzlichem aktivem Ultraschallsender getätigt. Die Wechspannung des Mikrofons wird an den AUX-Eingang des Smartphones (Samsung Galaxy S7) weitergeleitet. In der Aufnahme sind die 40 kHz neben dem gesprochenem Wort als leises, regelmäßiges Knacken zu hören. Die Distanz von den Sendern beträgt dabei maximal 50 cm zum Mikrofon.

### 5.2 Eigenschaften des MEMS-1

Das ausgewählte Mikrofon ist „omnidirektional“ und daher ein sogenanntes ungerichtetes Mikrofon, welches typischerweise auch als Kugelmikrofon bezeichnet wird. In diesem Zusammenhang bedeutet omnidirektional, dass die Ausrichtung des Mikrofons für den Empfang von Schallwechseldruck von allen Seiten erfolgen kann. Der Schalleinlass liegt wie in Abbildung 2.10 dargestellt auf der Unterseite des Mikrofons, (engl.: bottom hole) und ist bei dortigem Auftreffen des Schalls besonders sensitiv. Die Ausgangsimpedanz liegt bei  $400\ \Omega$  und ist auf 1 kHz bezogen.

---

<sup>1</sup><https://play.google.com/store/apps/details?id=vr.audio.voicerecorder&hl=de>  
(Stand Juni 2020)

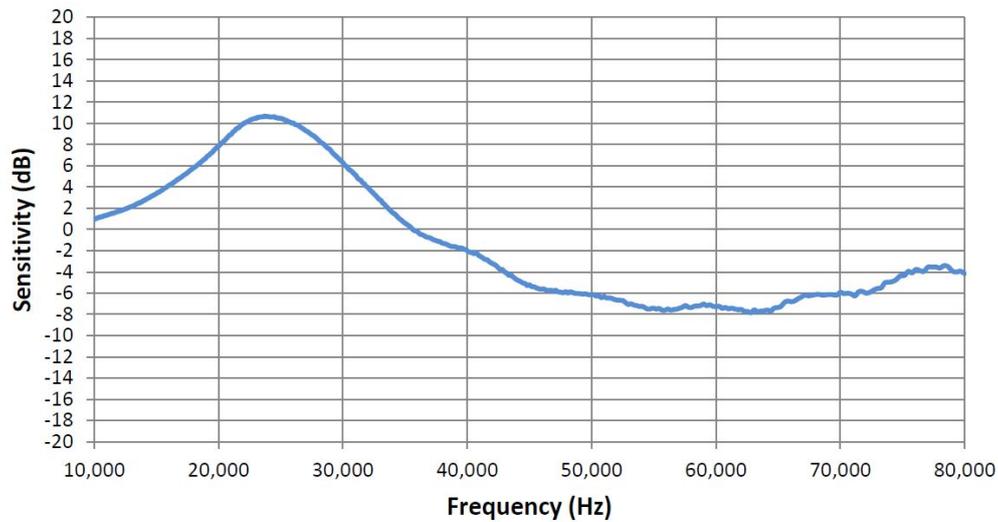


Abbildung 5.3: Freifeld Messung des MEMS-Mikrofons (SPU0410LR5H-QB) von 10 kHz bis 80 kHz

Die Kennlinie in Abbildung 5.3 beschreibt die Sensitivität des Mikrofons bei Frequenzen zwischen 10-80 kHz. Von 300 Hz bis ca. 10 kHz liegt die Kennlinie auf 0 dB (nicht abgebildet). Ab 10 kHz steigt sie an bis sie zwischen 20 kHz und 30 kHz wieder abfällt. Die Beschaltungshinweise in Abbildung 5.4 empfehlen an der Spannungsversorgung

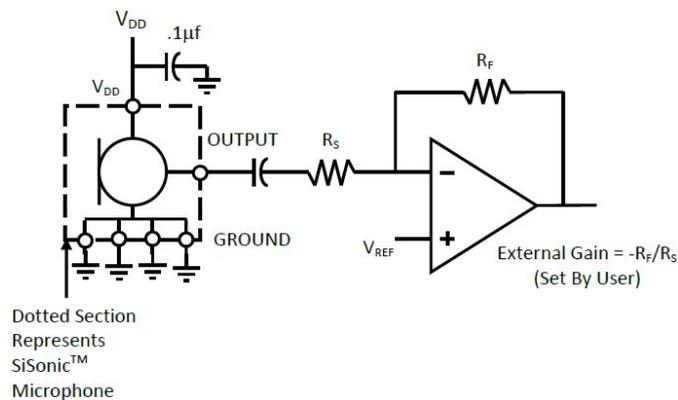


Abbildung 5.4: Beschaltungshinweis des Mikrofons (SPU0410LR5H-QB)

einen Kondensator gegen Masse zu legen, um Wechselspannungsanteile aus der Gleichspannungsversorgung herauszufiltern. Am Signalausgang wird ein Entkopplungskondensator verbaut. Die nachfolgende Verstärkerstufe ist durch einen invertierenden Verstärker realisiert. Es wird zusätzlich bei einer Schaltungsauslegung eine weitere Ableitung gegen

Masse empfohlen, da die Versorgungsspannung keine Störspannungen aufweisen darf [44]. Die verlöteten Kondensatoren auf der Platine des MEMS-1 betragen jeweils  $1\ \mu\text{F}$ .

## 5.3 Auslegung der Schaltung

Das MEMS-Mikrofon deckt laut der Kennlinie im Datenblatt einen Bereich von 100 Hz bis 80 kHz ab. Es sollten daher die unteren Frequenzen des hörbaren Bereichs heraus gefiltert werden. Eine mögliche Rückkopplung von Frequenzen bei der Ausgabe über die Lautsprecher des mobilen Endgerätes kann somit vermieden werden. Zusätzlich sollte das Mikrofonsignal verstärkt werden, da dieses zu gering ist, um über einen Line-Pegel verarbeitet zu werden. Es wird daher auf die Kombination einer Verstärkerstufe und eines Hochpassfilters zurückgegriffen.

### 5.3.1 Hochpassfilter 2. Ordnung

Es wird sich für aktive Filter entschieden, welche mit Operationsverstärkern realisiert werden. Eine zu entwickelnde Transistorverstärkerschaltung wäre aufgrund der höheren Anzahl an Bauelementen und den damit einhergehenden Bauteilkosten nicht zielführend.

Als Hochpassfilter eignet sich ein aktives Hochpassfilter 2. Ordnung mit Einfachmitkopplung, gemäß Abbildung 5.5 auch Sallen-Key Filter genannt.

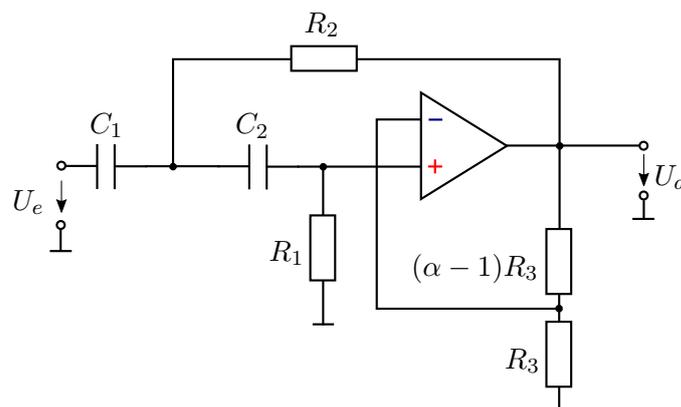


Abbildung 5.5: Aktives Hochpassfilter 2. Ordnung mit Einfachmitkopplung [39] S. 841

Die allgemeine Übertragungsfunktion eines Hochpassfilters lässt sich wie folgt beschreiben [39] S. 835:

$$A(s_n) = \frac{A_\infty}{\prod_i \left(1 + \frac{a_i}{s_n} + \frac{b_i}{s_n^2}\right)}. \quad (5.2)$$

Die Ordnung des Filters ist durch die höchste Potenz von  $s_n$  gegeben. Dazu wird der Nenner der quadratischen Produkte ausmultipliziert. Der Multiplikationsindex  $i$  läuft von 1 bis  $n/2$  wobei bei ungeraden Filterordnungen  $n$  der der Index  $i$  aufgerundet wird. Weitergehende Erläuterungen finden sich bei Tietze/Schenk [39]. Die Übertragungsfunktion eines Hochpassfilters 2. Ordnung lautet somit

$$A(s_n) = \frac{1}{1 + \frac{a_1}{s_n} + \frac{b_1}{s_n^2}}. \quad (5.3)$$

Die Koeffizienten  $a_1$  und  $b_1$  bestimmen dabei das Verhalten des Filters. Die Verstärkung  $\alpha$  (Abb. 5.5) bei der Einfachmitkopplung muss auf einen mit dem Widerstand  $R_3$  genau definierten Wert durch eine interne Gegenkopplung festgelegt werden. Bei falscher Auslegung beginnt der Filter möglicherweise zu schwingen. Die Mitkopplung erfolgt über den Widerstand  $R_2$ . Da die Berechnung des Filters und der Koeffizienten sehr schnell sehr aufwändig werden kann, wird meist auf Tabellen zurückgegriffen in denen die Koeffizienten  $a_1$ ,  $b_1$  und weitere vorgegeben sind. Zuerst wird daher der gewünschte Filtertyp und die gewählte Ordnung  $n$  des Filters bestimmt. Eine von Tietze und Schenk [39] empfohlene Spezialisierung setzt die Verstärkung  $\alpha$  auf 1. Somit entfällt der Widerstand  $R_3$ . Die Gefahr, dass die Schaltung aufgrund eines Auslegungsfehlers von  $R_3$  schwingt, besteht dann nicht mehr. Eine weitere Spezialisierung schlägt vor die Kondensatoren und Widerstände gleich groß zu wählen, sodass sich der Filtertyp direkt über  $\alpha$  einstellen lässt. Da keine Überschwinger erwünscht sind und um Instabilitäten aufgrund von Bauteiltoleranzen zu vermeiden, wird das Filter mit „kritischer Dämpfung“ ausgewählt und der Entfall des Widerstands  $R_3$  beibehalten. Die Koeffizienten des Filters mit kritischer Dämpfung  $a_1 = 1,2872$  und  $b_1 = 0,4142$  werden der Tabelle entnommen [39], siehe Tab. S. 828. Da Widerstandswerte in kleineren Abstufungen erhältlich sind, werden zuerst die Kondensatoren ausgelegt und darauf die Widerstände angepasst. Die Grenzfrequenz  $f_g$  wird aufgrund des menschlichen Hör- und Sprachbereichs sowie der Frequenzen der Fledermausrufe auf 20 kHz festgesetzt.

$$C_1 = C_2 = C = 470 \text{ pF} \quad (5.4)$$

Ein Koeffizientenvergleich liefert schlussendlich [39], S.841

$$R_1 = \frac{1}{\pi \cdot f_g \cdot C \cdot a_1} = \frac{1}{\pi \cdot 20 \text{ kHz} \cdot 470 \text{ pF} \cdot 1,2872} = 26,3 \text{ k}\Omega, \quad (5.5)$$

$$R_2 = \frac{a_1}{4\pi \cdot f_g \cdot C \cdot b_1} = \frac{1,2872}{4\pi \cdot 20 \text{ kHz} \cdot 470 \text{ pF} \cdot 0,4142} = 26,3 \text{ k}\Omega. \quad (5.6)$$

Die nächstkleinere bestellbare Widerstandsgröße in der Nähe von 26,3 k $\Omega$  befindet sich in der E48 Widerstandreihe bei 26,1 k $\Omega$ . Eine zur Verfügung stehende Widerstandsgröße aus der E6 Reihe liegt bei 22 k $\Omega$ . Dadurch verändert sich die Grenzfrequenz der Filterstufe auf 23,9 kHz. Mit der speziellen Schaltungsauslegung der Einfachmitkopplung von gleich großen Kondensatoren und Widerständen ist es möglich durch zwei zusätzlich eingebauten Potentiometern in Reihe zu  $R_1$  und  $R_2$  die Grenzfrequenz nach eigenem Bedarf zu verändern. Die eingestellten Widerstandswerte müssten dabei gleichgroß bleiben, um nur die Grenzfrequenz und nicht den Filtertyp zu verändern (Ref.: [23]).

### 5.3.2 Invertierender Verstärker

Im Datenblatt des Mikrofons wird ein invertierender Verstärker als Verstärkerstufe empfohlen. Die angegebene Empfindlichkeit des Mikrofons, sogenannte Sensitivität, von

$$[L_M] = S = -38 \text{ dBV/Pa} \quad (5.7)$$

wurde bei 94 dB SPL und 1 kHz gemessen. Die Beziehung zwischen dem Druck in Pa und dB SPL wurde in Gleichung 5.1 beschrieben. Die Mikrofonspannung des MEMS-1 Mikrofons bei einem Schalldruck von 1 Pa berechnet sich zu [35]

$$M = 10^{\frac{L_M}{20}} \cdot M_R \quad (5.8)$$

$$= 10^{\frac{-38 \text{ dBV/Pa}}{20}} \cdot 1 \text{ V/Pa} \quad (5.9)$$

$$= 12,59 \text{ mV} \quad (5.10)$$

Der Bezugswert ist  $M_R = 1 \text{ V/Pa}$  und  $L_M$  die im Datenblatt angegebene Sensitivität. Die Abschwächung des Schalldrucks aufgrund der Entfernung wurde bereits in Kapitel 2.2 behandelt.

Um eine Abschätzung der Verstärkung für die Mikrofonspannung zu treffen, wurde in der ersten Annahme von dem im Datenblatt angegebenen Wert von -38 dBV/Pa bzw.

12,58 mV bei 94 dB SPL ausgegangen. Als kurzes Beispiel wird die Rufstärke einer Bottas Fledermaus (*Eptesicus bottae*) aus 10 cm Entfernung mit 130 dB SPL angenommen [16]. Um 94 dB SPL zu erreichen, welcher als Referenzwert dient, müssen 36 dB SPL subtrahiert werden

$$130 \text{ dB SPL} - 6 \cdot 6 \text{ dB SPL} = 94 \text{ dB SPL.} \quad (5.11)$$

Die Entfernung zu der Fledermaus muss daher 6 mal verdoppelt werden

$$10 \text{ cm} \cdot 2^6 = 640 \text{ cm} = 6,4 \text{ m.} \quad (5.12)$$

Letzteres würde bedeuten, dass in 6,4 m Entfernung die Wechselspannung des Mikrofons noch bei 12,58 mV (ohne weitere Verluste) liegen sollte. Rechnet man diese Angabe auf einen Line-Pegel um, welcher ungefähr im Bereich von 150-770 mV liegt, ergäbe sich eine Verstärkung zwischen ca. 12-60. Jedoch liegt beim ELV Fledermausdetektor die Verstärkung laut Beschreibung bei 4356. Der maximale Spannungshub für die Operationsverstärker beträgt jedoch nur 0-3 V. Geht man von einer Grenzbetrachtung aus, in der die Schaltung des ELV Fledermausdetektors das Mikrofonsignal verstärkt ohne dabei den Aussteuerbereich des Operationsverstärkers zu überschreiten, dürfte der Spitze-Spitze Wert  $u_{ss}$  der Wechselspannung lediglich

$$u_{ss} = \frac{3 \text{ V}}{4356} \quad (5.13)$$

$$= 6,887 \cdot 10^{-4} \text{ V} \quad (5.14)$$

$$(5.15)$$

betragen. Somit würde von einer effektiven Mikrofonwechselspannung  $U$  ohne schaltungsbedingte Verluste von

$$U = \frac{u_{ss}}{\sqrt{2} \cdot 2} \quad (5.16)$$

$$= 243,5 \mu\text{V} \quad (5.17)$$

ausgegangen werden. Die Wahl der Verstärkung des ELV Fledermausdetektors beschreibt eher die Verstärkung, die in der Literatur von Mic- auf Line-Pegel genutzt wird.

Um einen Eindruck von der Signalspannung des Mikrofons zu bekommen, wird im Außenbereich ein Messaufbau mit dem MEMS-1 vorgenommen. Der Messaufbau entspricht in der Verdrahtung und dem Signalabgriff dem Aufbau in der Abbildung 5.1. Die Mess-

einrichtung und Bauteile sind dieselben. Es wurde der Spitze-Spitze-Wert der Mikrofonspannung betrachtet, da sich dieser am einfachsten nachvollziehen lässt und auch optisch auf dem Oszilloskopdisplay abgeschätzt werden kann. Der Verlauf der Mikrofonspannung

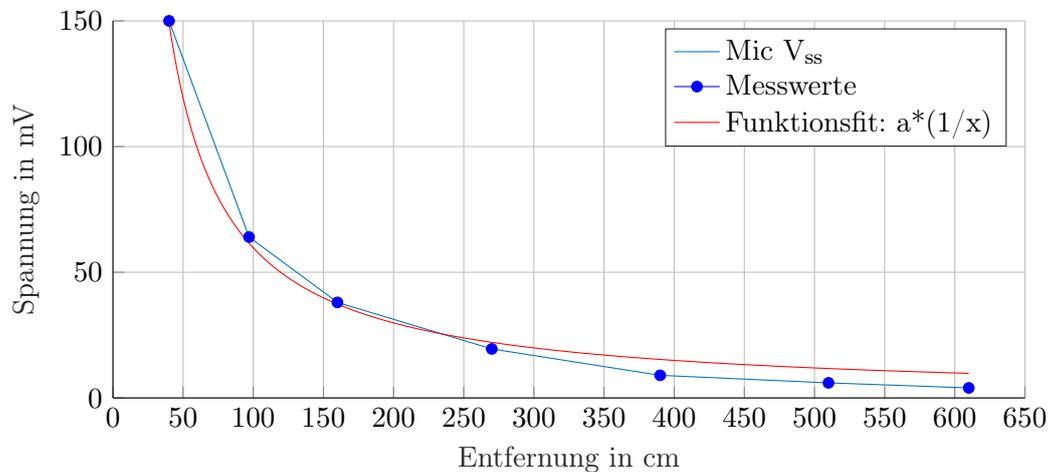


Abbildung 5.6: Messung der Mikrofonspannung mit dem Oszilloskop

hat einen ungefähren Verlauf von  $a \cdot (1/x)$ . In einer Entfernung von 610 cm ist noch eine Spannung von ca.  $u_{ss} = 4$  mV abzulesen also von  $U = 1,41$  mV. Da die Auflösung des Oszilloskops ihre Grenze erreicht hat, ist eine weitere Entfernung nicht aufnehmbar. Die Messung gibt nur eine grobe Tendenz wieder, wie stark die Mikrofonspannung mit der Entfernung absinkt. Aus den Datenblättern ist nicht ersichtlich mit welchem Schalldruckpegel das HC-SR04 Modul sendet und es stehen keine Messeinrichtungen im Ultraschallbereich zur Verfügung.

Aufgrund der mangelnden Datenlage und den bisher nicht vorhandenen Feldversuchen mit echten Fledermausrufen, wird sich an dem rein elektronischen Referenzmodell von ELV orientiert, welches eine Gesamtverstärkung des Mikrofonsignals von 4356 hat. Die Verstärkung wird pro Stufe somit auf 66 gesetzt. Für nur eine Verstärkerstufe reicht das Verstärkungs-Bandbreite-Produkt eines Operationsverstärkers nicht aus. Zusätzlich wird direkt an jeder Verstärkerstufe ein Potentiometer vor den Widerstand  $R_1$  platziert um die Verstärkung verringern zu können. Die Verstärkung die durch die äußeren Bauelemente bestimmt wird, berechnet sich zu

$$A = -\frac{R_2}{R_1}. \quad (5.18)$$

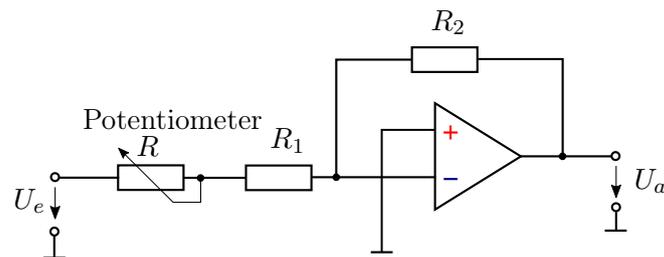


Abbildung 5.7: Invertierender Verstärker [39] S.841

Um auf eine Verstärkung von 66 zu kommen wird  $R_1 = 1,5 \text{ k}\Omega$  und  $R_2 = 100 \text{ k}\Omega$  gewählt.

$$A = -\frac{100 \text{ k}\Omega}{1,5 \text{ k}\Omega} = -66,67. \quad (5.19)$$

Das Potentiometer wird mit  $R = 5 \text{ k}\Omega$  eingebaut. So kann die Verstärkung auf den Faktor 15 pro Stufe reduziert werden.

## 5.4 Auswahl des Operationsverstärkers

Bei der Auswahl des Operationsverstärkers sollte auf folgende Eigenschaften geachtet werden:

- Rail-to-Rail, damit bei einer geringen Spannungsversorgung eine fast vollständige Aussteuerung des Operationsverstärkers (OPV) genutzt werden kann. Bei normalen OPVs ist die Aussteuergrenze 1-2V unter der Betriebsspannung. Ein Rail-to-Rail OPV lässt sich bis auf wenige Milli- bis Mikrovolt an die Grenzen der Versorgungsspannung aussteuern.
- Single-Supply, sodass der OPV auch nur über z. B. eine Batteriespannung versorgt werden kann.
- Das Verstärkungs-Bandbreite-Produkt des OPVs (Gain-Bandwidth-Product) sollte beachtet werden. Das GBP von TLV272 liegt bei 3 MHz das ist auch gleichzeitig die Transitfrequenz  $f_t$  bei der die Verstärkung bei 0 dB, also bei 1 liegt. Bei einer zu verstärkenden Frequenz von 20-80 kHz zählt die zu verstärkende Maximalfrequenz

von 80 kHz. Die noch sinnvolle maximale Verstärkung läge also bei

$$A = \frac{GBP}{f_{\max}} \quad (5.20)$$

$$= \frac{3 \text{ MHz}}{80 \text{ kHz}} \quad (5.21)$$

$$= 37,5. \quad (5.22)$$

- Die Anstiegsgeschwindigkeit (Slew-Rate) sollte beachtet werden, um Verzerrungen im Signalverlauf zu vermeiden. Der Wert von  $0,6 \text{ V}/\mu\text{s}$  gibt an, dass sich die Spannung in einer Mikrosekunde um  $0,6 \text{ V}$  ändern kann.

Es wurde zum einen der TLV272 von dem Hersteller „Texas Instruments“ ausgewählt, da dieser bei dem ELV Detektor verwendet wurde und sowohl als DIP, als auch als SMD-Bauteil (SOIC) verfügbar ist. Die DIP-Version vereinfacht den Prototypenentwurf auf einer Lochrasterplatine im ersten Schritt. Als weiterer Operationsverstärker ist der AD8092 von „Analog Devices“ in die Auswahl gekommen. Dieser hat laut Datenblatt wesentlich bessere Eigenschaften, wie eine schnellere Anstiegsgeschwindigkeit und ein größeres Verstärkungs-Bandbreite-Produkt (GBP), ist aber auch mit  $2,29 \text{ €}$  ca. doppelt so teuer.

Operationsverstärker	TLV272	AD8092
Aussteuerbereich	Rail-to-Rail	Rail-to-Rail
Versorgungsspannung [V]	2,7-16	3-12V
Verstärkungs-Bandbreite-Produkt [MHz]	3	110
Anstiegsgeschwindigkeit [ $\text{V}/\mu\text{s}$ ]	2,4	135
Preis [€]	1,174	2,29

Tabelle 5.2: Werte der Operationsverstärker (Stand: August 2020)

Der Schaltungsentwurf der kompletten Schaltung mit Filterung und Verstärkungsstufen ist in Abbildung 5.8 dargestellt.

Die eingefärbten Kondensatoren  $C_9$  und  $C_{10}$  sind nur bei der Schaltung mit dem Operationsverstärker AD8092 verbaut.

Es wurden mehrere Schaltungen skizziert und simuliert. Dabei hat sich heraus gestellt, dass für eine nötige Filterwirkung der Frequenzen im hörbaren Bereich ein Hochpassfilter nicht ausreichend ist. Danach wurden die Schaltungen auf Breadboards aufgebaut

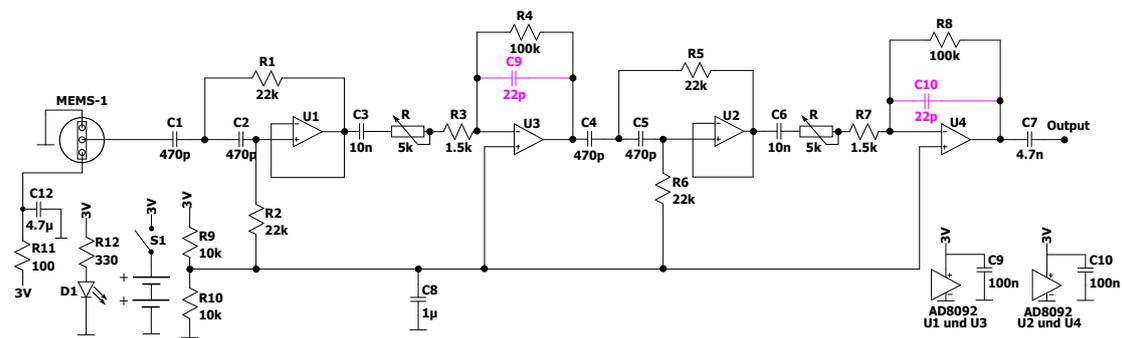


Abbildung 5.8: Schaltungsentwurf mit Filter- und Verstärkerstufen

und getestet. Im Ausgangssignal der Schaltung mit den Operationsverstärkern von Analog Devices zeigten sich dabei starke Eigenschwingungen, die das Signal überlagerten. Dadurch dass dieser Operationsverstärker nur in SMD Bauweise erhältlich ist, wurde dieser für einen Prototypenaufbau auf einen Sockel gelötet. Mit einem veränderten Aufbau auf dem Breadbord und zwei parallel geschalteten 20 pF Kondensatoren, in Abbildung 5.8 magentafarben markiert, ist es möglich die störenden Schwingungsanteile zu unterdrücken und die Operationsverstärker zu stabilisieren. Für den Breadboardaufbau wurden die Verbindungswege verkürzt und, abgesehen von der Zuführung der Versorgungsspannung, nur Steckbrücken verwendet. In der Luft stehende Kabel wurden entfernt. Die parallel geschalteten Kondensatoren wurden an die Pins der Widerstände gelötet. Die Kondensatoren  $C_9$  und  $C_{10}$  wurden dabei so klein gewählt, dass diese bei der höchsten Frequenz den Rückkopplungswiderstand  $R_2$ , siehe Abbildung 5.7, nicht komplett überbrücken. Trotzdem haben die Kondensatoren einen gewissen Einfluss auf den Frequenzgang und in Abbildung 5.10 flacht sich dieser bei ca. 30 kHz geringfügig ab. Die Leuchtdiode  $D_1$  inklusive Vorwiderstand  $R_{12} = 330 \Omega$  wurden nachträglich auf der Platine verlötet. Die Leuchtdiode signalisiert, ob der Schalter  $S_1$  zu den zwei in Reihe geschalteten 1,5 V Batterien geschlossen und eine Betriebsspannung vorhanden ist.  $D_1$  und  $R_{12}$  finden sich nicht im Platinenlayout unter Abbildung 5.11 wieder, da sie erst nachträglich dazu gefügt wurden. Es wurde die Demoversion eines kostenpflichtigen Layoutprogramms für Lochrasterplatinen verwendet, die Platinenentwürfe sind somit nur als Bildschirmfoto gespeichert.

Bei einem Vergleich der Frequenzgänge der Operationsverstärker schneidet der AD8092 gegenüber dem TLV272 besser ab. In dem Bode-Diagramm des TLV272 unter Abbildung 5.9 ist hinter 10 kHz ein deutlicher Abfall im Frequenzgang zu erkennen, was in einer Abschwächung der Verstärkung resultiert. Bei 70 kHz liegt der Frequenzgang noch bei

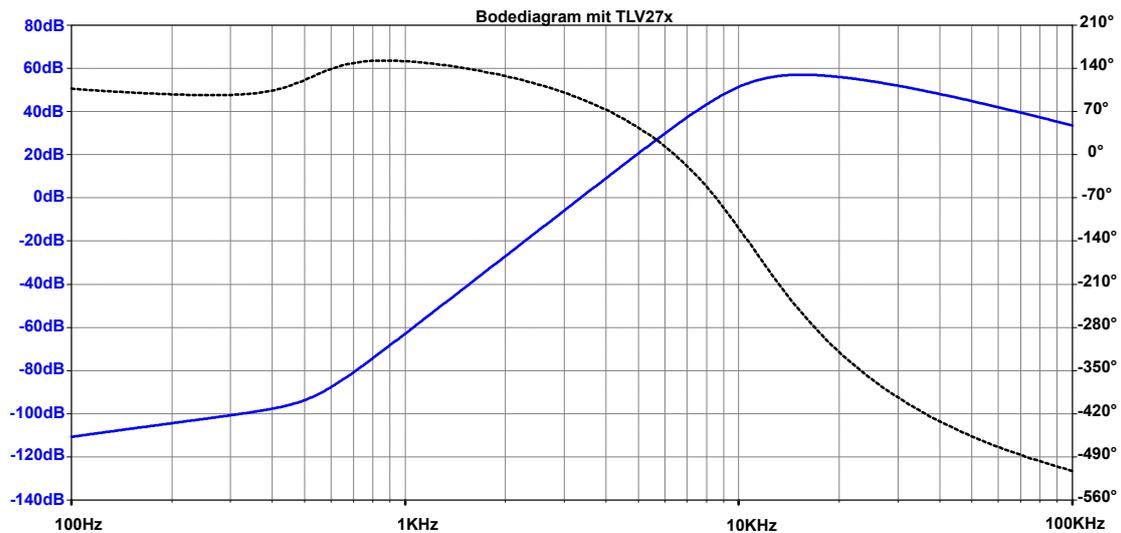


Abbildung 5.9: Bode-Diagramm der Schaltung mit den OPVs TLV27x, (Frequenzgang, Phasengang)

40 dB. Gleichung 5.20 beschreibt die maximal sinnvolle Verstärkung bei einer Frequenz von 80 kHz des TLV272. Das GBP wird bei einer Verstärkung von 66 nicht eingehalten bzw. ist der OPV nicht mehr in der Lage die oberen Frequenzen zu verstärken und wirkt daher wie ein Tiefpass. Der Frequenzgang der Schaltung mit dem AD8092 in Abbildung 5.10 weist wesentlich bessere Eigenschaften auf und liegt noch bei 100 kHz über 60 dB.

Die Koppelkondensatoren  $C_3$  und  $C_6$  müssen so groß gewählt sein, dass der kapazitive frequenzabhängige Blindwiderstand  $X_C$  des Kondensators bei der Grenzfrequenz kleiner ist als der Eingangswiderstand der nächsten Verstärkerstufe. Ist die Kapazität des Kondensators zu klein gewählt, kommt kaum ein Signal bei der nächsten Stufe an [4] S. 248. Es wird sich daher für 10 nF entschieden. Der Widerstand des Kondensator berechnet sich bei 20 kHz zu

$$X_C = \frac{1}{2\pi \cdot 20 \text{ kHz} \cdot 10 \text{ nF}} = 795,77 \Omega. \quad (5.23)$$

Der Eingangswiderstand der Verstärkerstufe ist von der äußeren Beschaltung des Operationsverstärkers abhängig:  $r_e = R_1$  bzw.  $r_e = R_1 + R$  (Potentiometer). Die minimalen 1,5 k $\Omega$  sind dabei noch größer als der kapazitive Widerstand von 10 nF bei 20 kHz.

In der Simulation wird festgestellt, dass über den beiden Hochpassfilterstufen die Signalstärke um ca. 18% bei 40 kHz reduziert wird. Mit Vergrößerung der Kapazität des

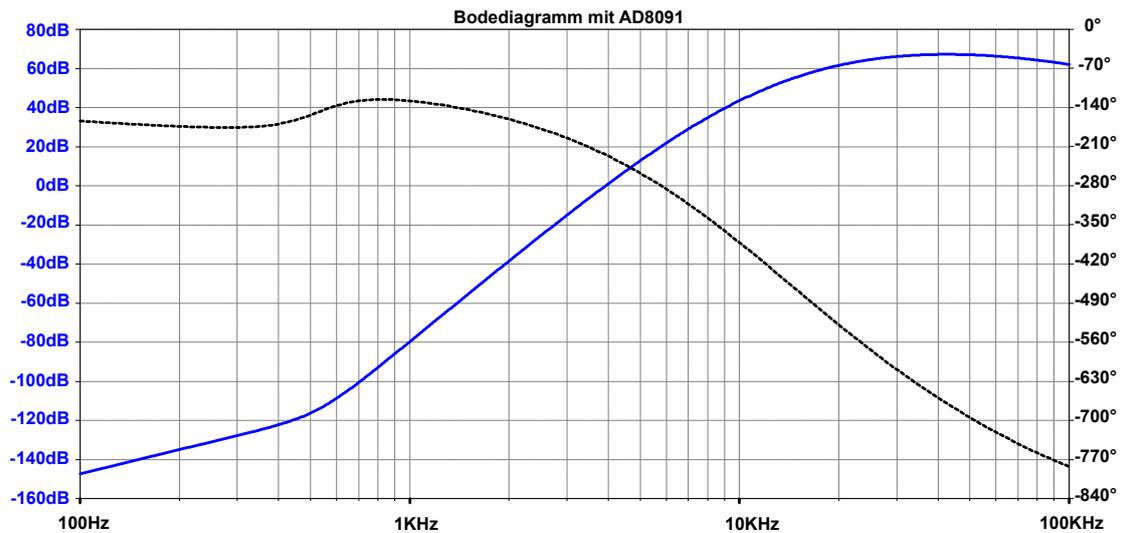


Abbildung 5.10: Bode-Diagramm der Schaltung mit den OPVs AD8091 und den zusätzlichen Kondensatoren C9 und C10, (Frequenzgang, Phasengang)

ersten Kondensators der Filterstufe ( $C_1$  und  $C_4$ ) lässt sich dies verändern, allerdings auf Kosten bezüglich der Auslegung der Grenzfrequenz. Die Widerstände und der zweite Kondensator müssten dann wieder neu angepasst werden, siehe Kapitel 5.3.1. Die Auslegung des Hochpasses wird daher so belassen, da die nachfolgenden Verstärkerstufen den Signalverlust kompensieren können.

## 5.5 U-Adapter Prototypen

Mit einer Demoversion eines Layoutprogramms wurde die Bestückung der Lochrasterplatten entworfen. Es ist nur der Entwurf mit dem TLV272 unter Abbildung 5.11 gezeigt. Für den Entwurf des AD8092 mussten aufgrund der verwendeten SMD-Sockel Anpassungen vorgenommen werden. Grundlage für beide Entwürfe ist der Schaltplan aus Abbildung 5.8.

Abbildung 5.12 zeigt die Prototypen des U-Adapters. Beide Prototypen werden mit zwei in Reihe geschalteten Batterien vom Typ AA mit je 1,5 V versorgt, die sich in der schwarzen, seitlich angeklebten Box zusammen mit dem Schiebeschalter  $S_1$  befinden. In den Gehäusen sind Bohrungen für die Kabeleinführungen der Spannungsversorgung und Signalausführung, zum Verstellen der Potentiometer und für den Mikrofoneinlass vorhanden. Eine Fixierung des Klinkenkabels wurde mit Kabelbindern gewährleistet.

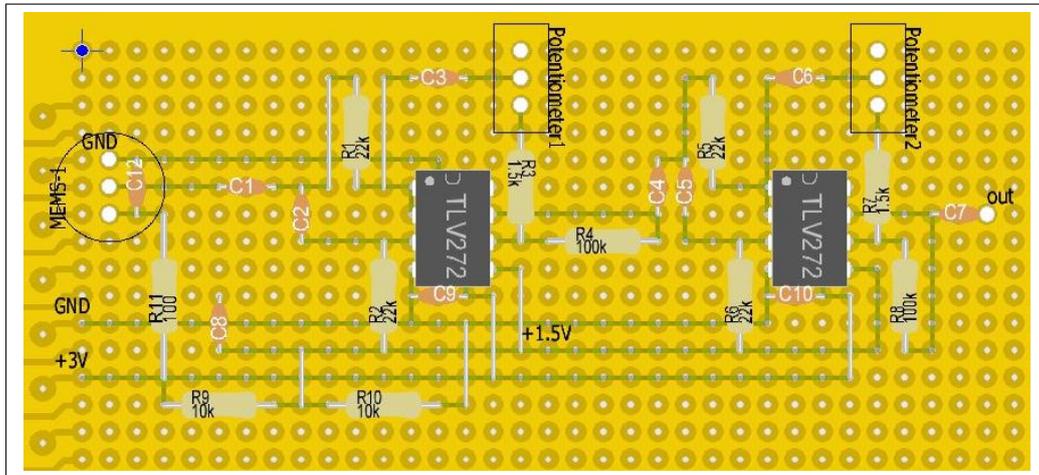


Abbildung 5.11: Platinenlayout Vorderseite mit dem TLV272

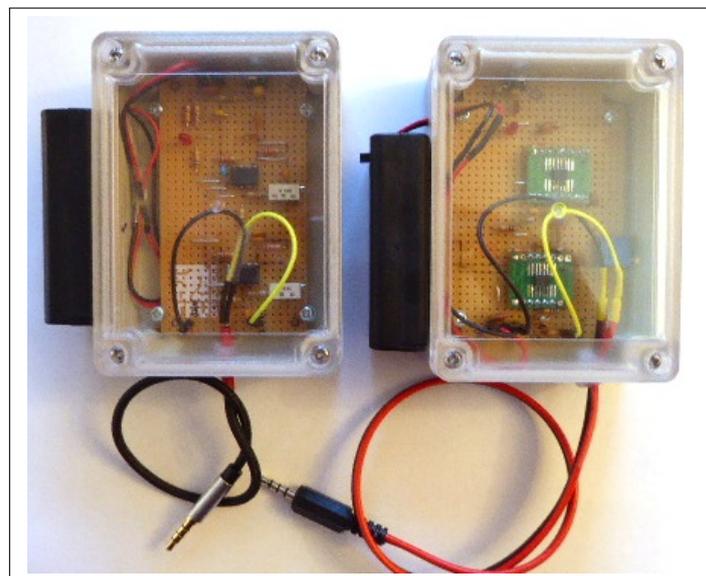


Abbildung 5.12: Adapter Prototypen mit TLV272 und AD8092

Die Kopfhöreranschlüsse des Klinkensteckers sind nicht verbunden. Die in Abbildung 5.12 gezeigte linke Box wiegt 194 g, die rechte 204 g. Die Abmessungen der verwendeten Boxen liegen bei LxBxH: 105 x 75 x 40 mm. In der Breite kommt noch das Batteriegehäuse mit zusätzlichen 20 mm hinzu.

# 6 Auswertung und Beurteilung

## 6.1 Auswertung bezüglich der Anforderungen

Um einen voll entwickelten U-Adapter für die Allgemeinheit und vor allem für Kinder verfügbar zu machen, müssen einige Punkte genauer beleuchtet werden. Es wird im Folgenden beurteilt welche Anforderungen der Anforderungsanalyse aus Kapitel 3 bereits erfüllt sind. Weiterhin werden Umsetzungsvorschläge für die nicht erfüllten Punkte vorgelegt und schaltungstechnische Maßnahmen diskutiert. Eine Liste der Bauteilkosten findet sich in Tabelle 6.1.

### 6.1.1 Auswertung und Beurteilung der funktionalen Anforderungen

- F1: Teilweise erfüllt: Es kann durch die Auswahl des Mikrofons von Knowles, bzw. MEMS-1 und einer Filterschaltung ein Bereich von 20 kHz bis 80 kHz gewährleistet werden. Die akustische Ausgabe ist derzeit nur begrenzt möglich.
- F2: Erfüllt: Mit einem weitestgehend geschlossenem Kunststoffgehäuse ist ein Schutz mit dem Prototypen nach IP 20 und eine gewisse Robustheit und Portabilität gewährleistet. Ein finales Gehäusedesign ist noch ausstehend.
- F3: Ausstehend: Um beurteilen zu können ob Fledermausrufe in 15 m Entfernung noch gut hörbar sind, müssen weitere Praxistests mit beiden Prototypen durchgeführt und beurteilt werden. Als Referenzmodell könnte der SFF BAT 3 dienen. Rudimentäre Tests mit dem MEMS-Mikrofon ohne Filterung und Verstärkung haben noch hörbare Sprachaufnahmen in einer Entfernung von 26 m ergeben.
- F4: Erfüllt: Als externes Ultraschallmikrofon wird das MEMS-1 verwendet.
- F5: Erfüllt: Eine Anbindung an ein mobiles Endgerät ist über den AUX-Eingang (3,5 mm Klinke) möglich.

- F6: Erfüllt: Die App visualisiert Signale im Ultraschallbereich als sichtbare Ausschläge auf dem Display, siehe Abbildung 6.1.
- F7: Ausstehend: Zurzeit sind nur Frequenzen, im unteren Bereich bzw. die durch die Abtastung in den hörbaren Bereich gespiegelt werden über die Lautsprecher des Smartphones wahrzunehmen.

### 6.1.2 Auswertung und Beurteilung der nicht-funktionalen Anforderungen

- N1: Erfüllt: Die App läuft auf dem Betriebssystem Android mit der Version 8.0.0 eines Samsung Galaxy S7.
- N2: Ausstehend: Der Prototypenaufbau überschreitet die vorgegeben Maße der Breite um 35 mm. Die Abmaße der Prototypen sind in Abschnitt 5.5 aufgeführt. Ein finales Gehäusedesign ist noch nicht erfolgt.
- N3: Teilweise erfüllt: Nur der U-Adapter Prototyp mit dem TLV272 überschreitet aufgrund der kleineren Platine und des leichteren Klinkenkabels mit 194 g nicht das Maximalgewicht von 200g.
- N4: Erfüllt: Durch Analyse im Frequenzbereich können mehrere Fledermausarten mit unterschiedlichen Frequenzen „gleichzeitig“ detektiert werden.
- N5: Erfüllt: Die derzeitigen Kosten der Bauteile ohne Gehäuse betragen ca. 20 €, eine Auflistung findet sich in Tabelle 6.1.
- N6: Erfüllt: Herstellerangaben für den Betriebstemperaturbereich sind bei den Keramik Kondensatoren und Widerständen nicht beigefügt. Für den Bereich der Konsumelektronik kann von Betriebstemperaturen von 0°C bis +70°C ausgegangen werden [28]. Der Betriebsbereich der Operationsverstärker und des MEMS-1 Mikrofons liegt ca. zwischen -40°C bis +85°C. Ein Betrieb der Elektronik wäre daher mit einer Außentemperatur von +5°C bis +30°C gewährleistet.
- N7: Ausstehend: Bisher existiert keine farblich auffällige Konzeption des U-Adapter Gehäuses.
- N8: Ausstehend: Die Gewährleistung der Funktionssicherheit bei einem Fall aus einem Meter Höhe ist bisher nicht getestet worden.

- N9: Erfüllt: Die verwendeten Keramikkondensatoren und Widerstände sind standardmäßig erhältlich. Die Eigenschaften der Operationsverstärker finden sich in Kapitel 5.4 wieder und könnten bei Abkündigung durch andere ersetzt werden. Ein schwieriger zu ersetzendes Bauteil wäre das bereits vormontierte Mikrofon von Knowles, welches als Komplettsatz mit dem Namen „MEMS-1“ durch das Elektronikversandhaus ELV erhältlich ist.
- N10: Ausstehend: Bei Ausstoß eines festgelegten kurzen Tons über eine Hundepfeife zeigt sich ein leicht verzögerter Ausschlag auf dem Display. Da der Mensch nicht in der Lage ist den ausgestoßenen Ton zu hören, sollte eine Verzögerung von Fledermausrufen, die bis ca. 100 ms gehen nicht weiter auffallen. Ob die 100 ms eingehalten werden, ist bisher nicht messbar überprüft worden.

### 6.1.3 Kostenabschätzung

In der Tabelle 6.1 werden die Bauteilkosten aufgelistet. Dabei wird der SMD-Sockel für den AD8092 nicht aufgeführt. Diese Sockel sind durch die meist nicht-industrielle Verwendung mit ca. 4 € pro Stück sehr kostspielig, fördern ungewollte Einstreuung und Übergangswiderstände und sollten in einem finalen Produkt vermieden werden. Die Keramikkondensatoren sowie die Kohleschichtwiderstände sind die kostengünstigsten Bauteile. Das 3,5 mm Klinkenkabel wurde aus praktischen als auch aus finanziellen Gesichtspunkten genommen. Qualitativ hochwertige Klinkenstecker zum eigenständigen löten kosten ca. 3-4 €. Günstiger bestellte Stecker wiesen Qualitätsmängel, wie eine deutlich sichtbare Krümmung und eine schlechte Verarbeitung auf. Die Leitung mit zwei Klinkensteckern an den Enden bietet weniger Arbeitsaufwand und einen Kostenvorteil, da das Kabel schon vorhanden ist und nicht extra bestellt werden muss. Der TLV272ID wurde mit aufgeführt um zu zeigen, dass SMD Bauteile kostengünstiger sind. Dies ist auch der Fall bei Kondensatoren und Widerständen in SMD Bauweise.

## 6.2 Auswertung

Prinzipiell funktioniert der U-Adapter mit der App. Im Praxistest bei der Beobachtung von Fledermäusen in der Abenddämmerung hat dieser Rufe erkannt und als Ausschläge auf dem Display des Smartphones (Samsung Galaxy S7) visualisiert. Die Abbildung 6.1 zeigt die App-Oberfläche. Das Mikrofon ist beim Öffnen der App eingeschaltet und

Bauteil	Preis pro Stück [€]	Packungsgröße	Einbauform	Anzahl
TLV272ID	0,96	5	SOIC	2
TLV272IP	1,174	5	DIP	2
AD8092ARZ	2,29	5	SOIC	2
Mikrofon MEMS-1	4,83	1	Pins	1
Kohleschichtwiderstände +/-5%	0,07796	1	Pins	12
Keramikkondensatoren +/-10%	0,08771	1	Pins	10 (12)
Potentiometer 5k $\Omega$	0,60	1	Pins	2
Tantal-Kondensator 4,7 $\mu$ F +/-10%	0,84	1	Pins	1
LED 3 mm	0,20	1	Pins	1
Lochraster Europlatine	3,98	1	-	0,5
Kabel $\varnothing$ 0,5 mm	0,44	1 m	-	0,5
3,5 mm Klinkenkabel 4 polig	1,41	50 cm	-	0,5
Gesamtkosten mit TLV272IP	13,95 €			
Gesamtkosten mit AD8092ARZ	16,35 €			

Tabelle 6.1: Kostenabschätzung (geklammerte Werte: AD8092ARZ)

greift auf das Interne des mobilen Endgerätes zurück, falls kein externes Mikrofon angeschlossen ist. Die Tonausgabe ist ausgeschaltet, da bei Nutzung des internen Mikrofons und Ausgabe über die Lautsprecher eine Rückkopplung stattfindet. Deutlich bemerkbar

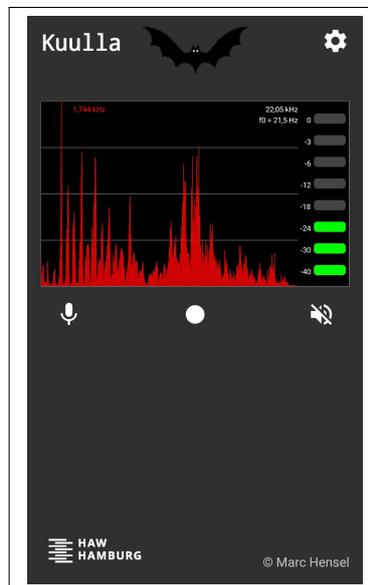


Abbildung 6.1: Screenshot der App-Oberfläche

ist, dass die Displayoberfläche auf das Ultraschallsignal reagiert, aber der Ton aus den Lautsprechern verzögert ankommt. Diese Diskrepanz ist durch den Anwender deutlich wahrnehmbar. Die Ausgabe von Bild und Ton sollte weitestgehend synchron erfolgen, sodass der Anwender eine Verzögerung nicht wahrnimmt.

Nachteilig zeigen sich verstärkte Signalanteile außerhalb des Nutzsignals, die als Ausschläge im oberen Spektralbereich ab 10 kHz deutlich sichtbar sind, siehe Abbildung 6.4. Diese Ausschläge treten bei beiden Schaltungen auf und sind dauerhaft vorhanden, auch ohne dass ein Ultraschallsignal detektiert wird. Bei Testaufnahmen von echten Fledermäusen ist dieser Fehler nicht aufgefallen. Fälschlicherweise waren bei dem U-Adapter Kondensatoren mit geringeren Kapazitäten eingelötet. Die Kapazität am Signalausgang lag bei dem U-Adapter bei 680 pF anstatt 4,7 nF und bei den Kopplungskondensatoren bei 2,2 nF anstelle von 10 nF. Die störenden Signalanteile wurden bei dem Realexperiment daher nicht wahrgenommen. Der frequenzabhängige Widerstand der Kondensatoren hat Teile des eigentlichen Signals und auch der Störungen unterdrückt. In der Abbildung 6.2 ist eine reale Testaufnahme von einer Fledermaus vom 27. Juli 2020 mit dem falsch ausgelegten U-Adapter abgebildet.

- Abtastrate: 44.100 Hz
- Anzahl der Werte: 1.961.984
- Aufnahmedauer: 44,48 sec
- Bittiefe: 16

In dem Spektrum in Abbildung 6.3 zeigt sich eine deutliche Verschiebung der Frequenzanteile nach links in den hörbaren Bereich. Während dieser Aufnahme waren zeitweise auch

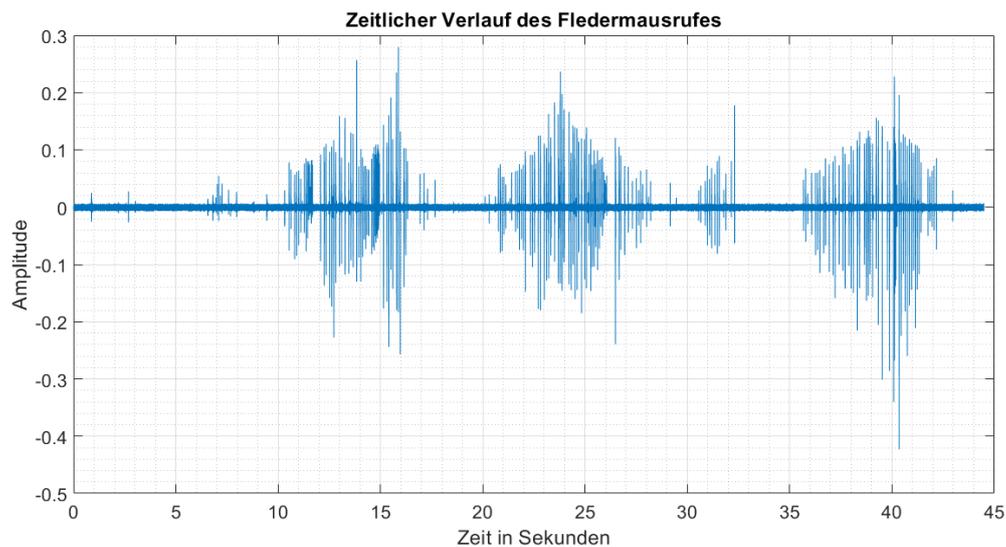


Abbildung 6.2: Zeitsignal der aufgenommenen Fledermaus

deutliche Ausschläge im rechten Bereich des Frequenzspektrums zu beobachten, diese traten jedoch sporadisch auf und spiegeln sich in dem Spektrum über die gesamte Signallaufzeit nicht sonderlich stark wieder. Als Abgleich zum U-Adapter war bei dem Realexperiment der Fledermausdetektor von ELV eingeschaltet. Die Ausschläge auf dem Display konnten so während der Tonaufnahme mit den wiedergebenden Geräuschen des Fledermausdetektors abgeglichen werden. Bei akustisch sehr leise wahrgenommenen Tönen des Fledermausdetektors waren keine Ausschläge auf dem Display zu erkennen. Die Vermutung liegt nahe, dass diese Signalanteile durch die geringe Kapazität zu schwach für den AUX-Eingang des Smartphones waren. Die in Abbildung 6.4 gezeigten Bildschirmfotos sind Aufnahmen bei denen jeweils ein U-Adapter an das Smartphone angeschlossen und eingeschaltet war. Bei der Aufnahme waren dabei keine Ultraschallgeräusche in der näheren Umgebung vorhanden. Die Signalstörung der Schaltung mit dem AD8092 zeigt

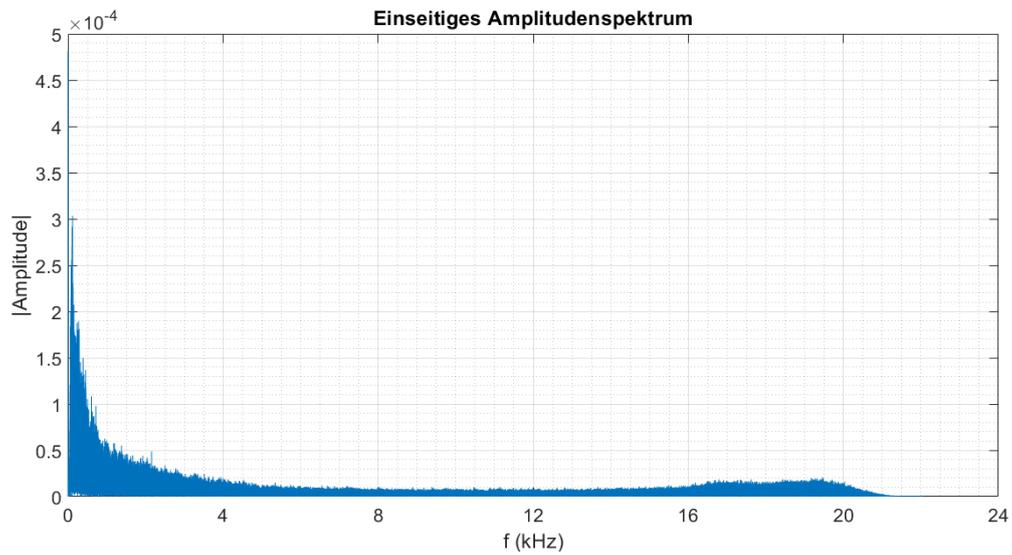
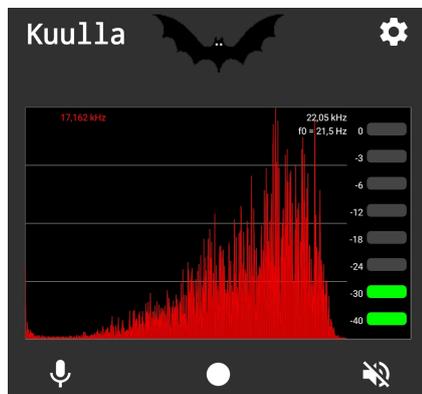
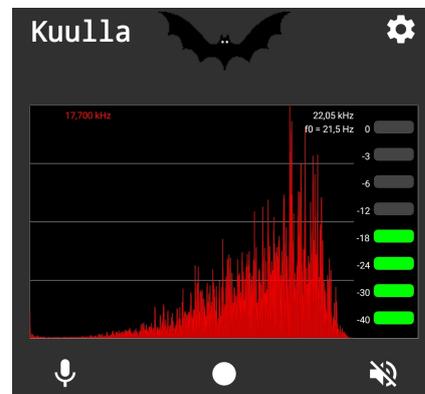


Abbildung 6.3: Angezeigtes Spektrum der Fledermaus nach der Abtastung



(a) Angeschlossener Adapter mit TLV272



(b) Angeschlossener Adapter mit AD8092

Abbildung 6.4: Verstärkte Störsignale

dabei eine höhere Signalstärke (grüne Balken) als die Schaltung mit dem TLV272. Bei der derzeitigen Tonausgabe kommt es zur Rückkopplung und es wird nach einer kurzen Laufzeit ein sehr hoher „Fiepton“ über die Lautsprecher wahrgenommen der schlussendlich in das Rauschen eines schlecht eingestellten alten Radios übergeht.

### 6.3 Beurteilung

#### Schaltungstechnische Hinweise

Da der U-Adapter mit Batterien betrieben wird, besteht derzeit bei einem Austausch letzterer die Gefahr der Verpolung und damit die Zerstörung der Operationsverstärker. Eine Möglichkeit bestünde darin eine Schottky-Diode mit einer Durchbruchspannung von ca. 0,2 V direkt hinter den Anschluss für die positive Versorgungsspannung zu setzen. Hierdurch würde die Aussteuerbarkeit der Operationsverstärker absinken und das Audiosignal geringer werden. Eine andere Möglichkeit, die ohne Fehler keinen Einfluss auf die Schaltung nimmt, wäre eine Schmelzsicherung und eine Sperrdiode.

Je nachdem wie problematisch sich der Spannungsabfall durch den Einsatz einer Diode oder einer anderen schaltungstechnischen Maßnahme gestaltet, könnte ein Hochsetzsteller eingebaut werden um die Spannung von dann 2,8 V auf etwas über 3 V hoch zusetzen. Diese Option ist mit einem weiteren Operationsverstärker und dem Einsatz einer Induktivität verbunden. Da die Spule ein Magnetfeld aufbaut, könnte diese zusätzliche Störungen im Audiosignal verursachen.

Eine andere Möglichkeit die Spannung hochzusetzen wäre die Verwendung einer zusätzlichen Batterie, sodass insgesamt 4,5 V vorliegen. Um Platz einzusparen, könnten die kleineren AAA Batterien genutzt werden. Lineare Spannungsregler, auch DC/DC-Wandler genannt, sind vergleichsweise kostengünstig und sind auch als SMD-Bauteile erhältlich. Die Spannung könnte so für die Versorgung des MEMS-Mikrofons auf 3 V runter geregelt werden zusätzlich wäre dadurch die Begrenzung des Signalpegels auf den AUX-Eingang des mobilen Endgerätes gewährleistet.

#### 6.3.1 Störsignale

Störsignale erweisen sich bei der digitalen Signalverarbeitung als problematisch (Abb.6.4) und sollten beseitigt bzw. stark reduziert werden. Eine Verringerung der Verstärkung

und die Filterung von Signalanteilen mithilfe von kleineren Kondensatoren wäre selbstverständlich möglich. Durch solch eine Maßnahme wäre vermutlich die Reichweite eingeschränkt und eine hörbare Signalstärke in 15 m Entfernung zur Ultraschallquelle kann möglicherweise nicht erzielt werden.

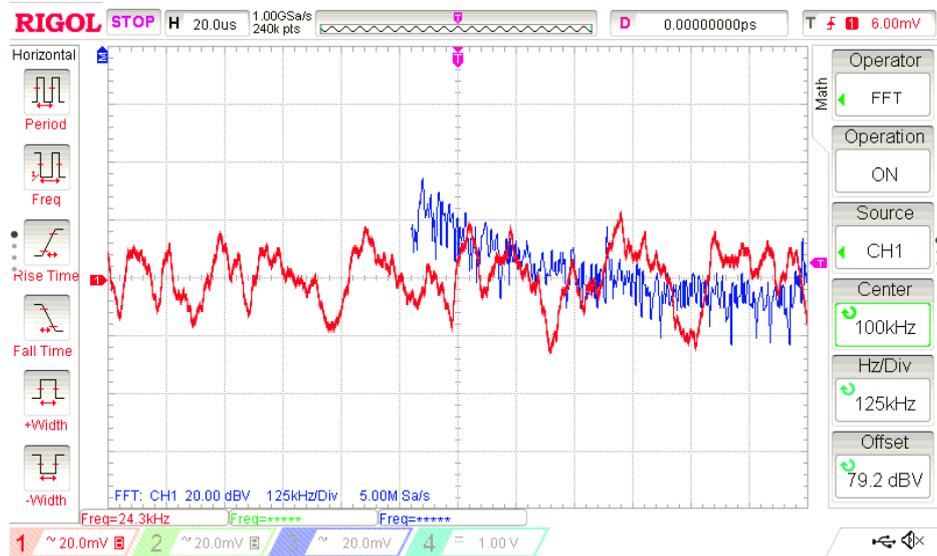
Ein Steckbrettaufbau der Schaltung mit dem TLV272 hat im Vergleich zur verlöteten Lochrasterplatten-Variante bei der FFT Analyse an dem Oszilloskop und bei Verbindung des Klinkensteckers mit dem Smartphone stärkere Störeinflüsse gezeigt. Die Vermutung liegt nahe, dass die Signalstörungen mit einem anderen Aufbau der Schaltung reduziert werden könnten. Für die Anbindung der Operationsverstärker gibt es in den Datenblättern explizite Hinweise, was bei einem Schaltungsdesign beachtet werden sollte. Die Auslegungshinweise in den Datenblättern der Operationsverstärker konnten bei dem Lochrasterplattenaufbau nur begrenzt umgesetzt werden. Aufbaubedingte Störungen lassen sich jedoch durch eine geeignete Gestaltung der Platine beherrschen [37].

Die beiden Oszilloskopbilder in Abbildung 6.5 zeigen jeweils in rot das Zeitsignal der Störung und in blau die FFT. Das Signal erreicht dabei einen Spitze-Spitze Wert von 40 mV bis ca. 60 mV. Bei Aufnahmen über die zugehörige App ist der Signalverlauf als Rauschen in der Aufnahme wahrnehmbar.

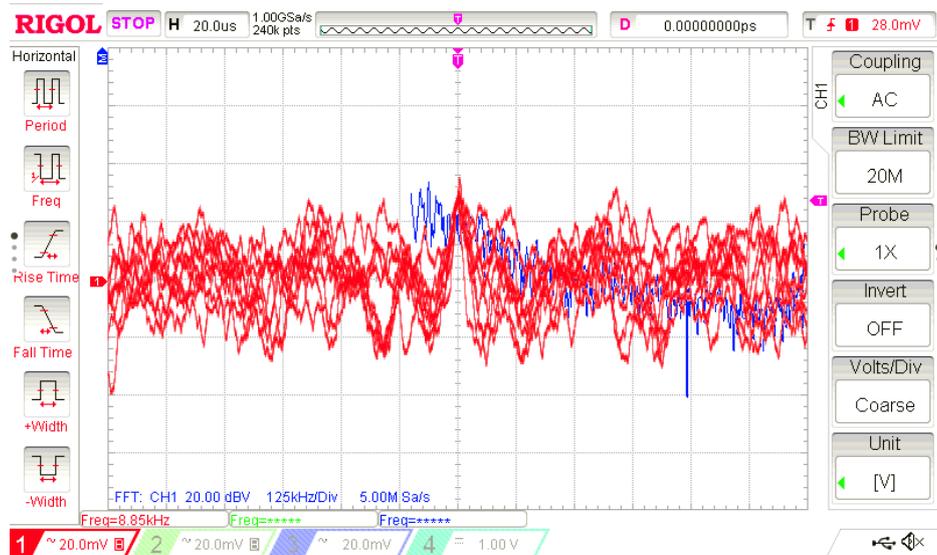
Die Einstellungen am Oszilloskop „Rigol DS1054Z“ sind

- Spannung: 20 mV/DIV
- Kopplung: AC
- Fensterung: Rechteck (alternativen sind z. B. Hanning, Hamming etc.)
- Frequenz: 125 kHz/DIV
- mittige Frequenz: 100 kHz.

Die Abbildung 6.6 zeigt eine getrennte Darstellung von Zeitsignal und FFT. Zwei Oszilloskopbilder sind dabei zu einem zusammengefügt worden. Ein optischer Abgleich zwischen dem Störsignal und dem auf Masse gezogenem Signal gestaltet sich einfacher, als bei zwei untereinander dargestellten Bildern. Die Einstellung „Rechteck“-Fensterung im Oszilloskop hat die beste Frequenzgenauigkeit, die schlechteste Amplitudengenauigkeit und wird für breites Rauschen empfohlen. Magentafarben in der Darstellung eingekreist, zeigt sich, dass die ausgeprägtesten Frequenzanteile in dem Bereich der zu verstärkenden Frequenzen der Fledermausrufe liegen.



(a) Einzelsignaltriggung



(b) Signal ohne Einzeltriggung

Abbildung 6.5: Störsignale des U-Adapters mit dem TLV272

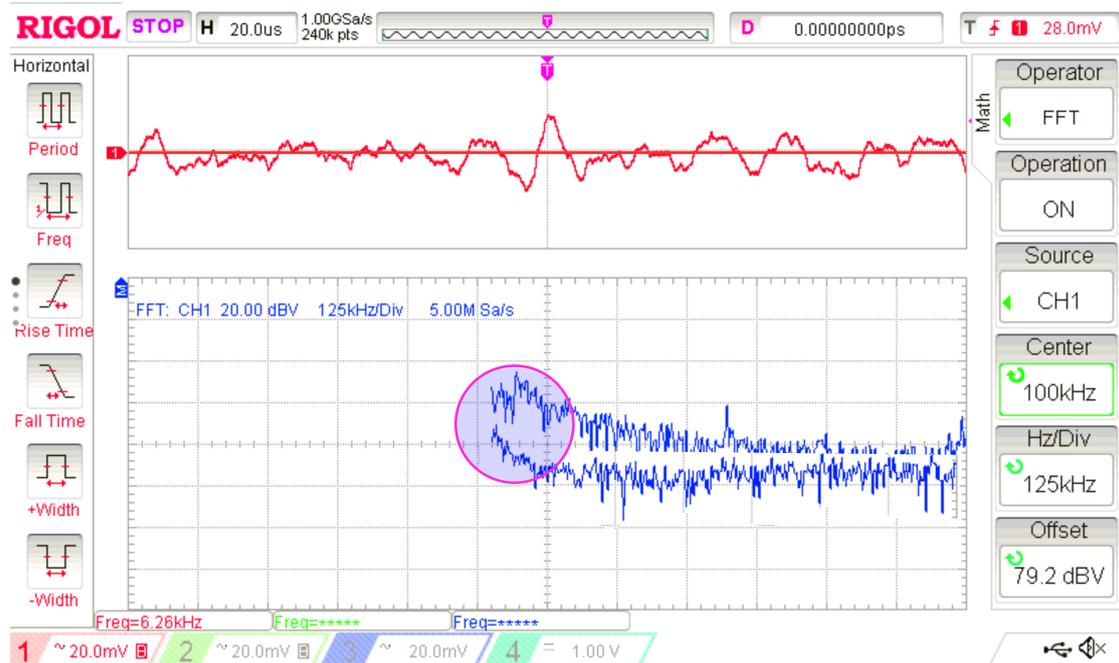


Abbildung 6.6: Störsignale des U-Adapters mit dem TLV272

Um Schaltungsmaßnahmen die in den Datenblättern und der einschlägigen Literatur zu Audio- und analoger Schaltungstechnik beschrieben werden, Folge leisten zu können, wird ein PCB (Printed Circuit Board) notwendig sein. Dieses bringt weitere Vorteile mit sich wie z. B. geringeres Gewicht, kleinere Einbaugröße und günstigere SMD-Bauteile.

### 6.3.2 Abmessungen und Gehäuse

Bei einer Verringerung der Platine durch ein PCB mit SMD-Bauteilen wäre auch die Gehäusegröße reduzierbar. Die derzeit genutzten Batterien wären dann ausschlaggebend für die Gehäusegröße und das Gewicht. Eine AA-Batterie wiegt zwischen 23,5 und 24 g. Die Anforderung einer auffälligen Farbwahl des U-Adapter Gehäuses ist derzeit noch nicht erfüllt. Ein 3D-Druck des Gehäuses böte Gestaltungsspielraum für die Form und die Auswahl von z. B. neonfarbenem Kunststoff. Zusätzlich könnten aufgeklebte Reflektorstreifen unterstützend wirken und die Anforderung von N7 erfüllen. Eine mögliche höhere IP-Schutzart des Gehäuses gegen das Eindringen von Wasser ist wahrscheinlich nicht kostengünstig und ohne Einschränkungen möglich. Im Gehäuse muss immer eine kleine Öffnung für den Schalleinlass vorhanden sein. Selbst wenn die Kabeleinlässe abgedichtet werden, könnte Flüssigkeit in den Mikrofoneinlass eindringen. Membranen, wie sie

z. B. bei Feuerwehrausrüstung eingesetzt werden, um die Kommunikation während eines Einsatzes sicher zu stellen, sind erfahrungsgemäß sehr teuer und erfordern Facherfahrung bei der Ausrichtung und Montage. Abschirmungen sind außerdem immer mit Nachteilen der Aufnahmequalität oder Reichweite verbunden [31]. Die Zeichnung in Abbildung 6.7 zeigt wie eine Halterung für verschiedene Smartphonegrößen aussehen könnte. In der Zeichnung befindet sich ein kleiner Schalter am Gehäuse der den U-Adapter einschaltet. Eine kleine Leuchtdiode bestätigt die Versorgung. Auf der Oberseite des Gehäuses befindet sich die Öffnung für den Schalleinlass. Gummibänder die an der Grundplatte befestigt sind verhindern ein Verrutschen nach unten und zu den Seiten. Über ein Rädchen können die stabilen Seitenhalter festgezogen und gelöst werden.

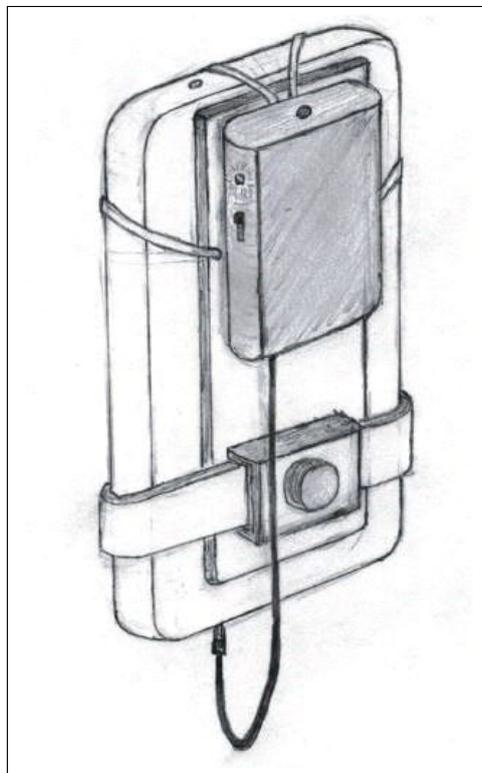


Abbildung 6.7: Smartphone-Halterung für einen U-Adapter

## 7 Ausblick und Fazit

Im Rahmen dieser Arbeit wurde ein externes Ultraschallmikrofon ausgewählt und an die AUX-Schnittstelle eines mobilen Endgerätes angebunden. Die Auswahl fiel aufgrund von mehreren vorteilhaften Eigenschaften auf ein MEMS-Mikrofon, welches die gewünschten Anforderungen erfüllt. Der entwickelte Adapter ist in der Lage Ultraschall zu detektieren und auf dem Display der App anzuzeigen. Die Tonausgabe über die Lautsprecher im Parallelbetrieb von Aufnahme und Ausgabe ist machbar. Durch die Ausnutzung von Aliasing ist es möglich mehrere Fledermausarten zu detektieren ohne explizit einen bestimmten Frequenzbereich auswählen zu müssen. Die derzeitigen Bauteilkosten ohne Gehäuse liegen bei ca. 15 € und entsprechen damit den gewünschten Vorgaben eines kostengünstigen Adapters.

Die Testaufnahmen mit dem Adapter im Realexperiment haben gezeigt, dass die Detektion einer Fledermaus möglich ist. Es sollte jedoch ein Entwurf auf einem Printed Circuit Board (PCB) angestrebt werden. Hier ist große Sorgfalt bei einem zukünftigen Platinenlayout notwendig. Durch die Empfindlichkeit der Schaltung entstehen Störungen im Signalpfad, welche sich in der Ausgabe auf dem Display widerspiegeln. Die Ausnutzung von Aliasing wird eine nachträgliche digitale Filterung von Störungen erschweren. Es kann nach der Abtastung nicht mehr unbedingt zwischen Störsignal und ankommendem Ultraschallsignal unterschieden werden. Bei einer nachträglichen Filterung würden daher auch Ultraschallfrequenzen und nicht nur Störsignale heraus gefiltert werden.

Ein weiterer Vorteil eines Layouts auf einem PCB wäre ein geringeres Gewicht, geringere Abmessungen und kostengünstigere SMD-Bauteile.

Da bei immer mehr mobilen Endgeräten die 3,5 mm Klinkenbuchse entfällt, könnte für eine zukünftige Entwicklung die neuere USB Typ-C Schnittstelle eine Alternative darstellen. Hierdurch könnte die derzeit genutzte externe Energieversorgung durch Batterien entfallen.

# Literaturverzeichnis

- [1] BASS, Henry E. ; SUTHERLAND, Louis C. ; ZUCKERWAR, Allen J. ; BLACKSTOCK, David T. ; HESTER, DM: Atmospheric absorption of sound: Further developments. In: *The Journal of the Acoustical Society of America* 97 (1995), Nr. 1, S. 680–683. – Acoustical Society of America
- [2] BAUMEISTER, M.: *Micro-USB, USB Typ C, Lightning und Co.: USB-Anschlüsse im Smartphone: Die wichtigsten Unterschiede*. 05 2020. – URL <https://handy.de/magazin/usb-anschluesse/>. – Zugriffsdatum: 2020-08-16. – Handy.de Telekommunikation GmbH
- [3] BERND, H.-J.: Steuern mit WLAN. . – URL <http://www.hjberndt.de/soft/ardesp8266.html>. – Zugriffsdatum: 2020-07-26
- [4] BERNSTEIN, H.: *Elektroakustik*. Springer Vieweg, 2019. – URL <https://doi.org/10.1007/978-3-658-25174-1>. – ISBN 978-3-658-25173-4
- [5] BOLLER, J.: Worin unterscheiden sich Line-Level und Mic-Level? (2017), 12. – URL <https://www.shure.com/de-DE/performance-production/louder/unterschied-line-mic-level>. – Zugriffsdatum: 2020-07-26. – Shure Inc.
- [6] BURGER, W. ; BURGE, M.J.: *Digitale Bildverarbeitung: Eine algorithmische Einführung mit Java*. Springer Berlin Heidelberg, 2015 (X.media.press). – URL <https://books.google.de/books?id=lm-SQAAACAAJ>. – ISBN 9783642046032
- [7] CHINDI.AP, CC BY-SA 4.0: *USB-C Buchsenbelegung in der Endansicht*. – URL <https://commons.wikimedia.org/w/index.php?curid=52579223>. – Zugriffsdatum: 2020-07-27. – Wikimedia Deutschland e.V.
- [8] Deutsche Gesellschaft für Akustik e.V. (Veranst.): *Akustische Wellen und Felder*. 03 2006. – URL [73](https://www.dega-akustik.de/fileadmin/dega-</a></li></ul></div><div data-bbox=)

- [akustik.de/publikationen/DEGA\\_Empfehlung\\_101.pdf](http://akustik.de/publikationen/DEGA_Empfehlung_101.pdf). – Zugriffsdatum: 2020-07-27
- [9] FRIESECKE, A.: *Die Audio-Enzyklopädie: Ein Nachschlagewerk für Tontechniker*. De Gruyter, 2014 (De Gruyter Reference). – URL <https://books.google.de/books?id=iqboBQAAQBAJ>. – ISBN 9783110340181
- [10] FRINGS, S.: ESP8266 und ESP8285 Module Anleitung. . – URL <http://stefanfrings.de/esp8266/index.html>. – Zugriffsdatum: 2020-07-26
- [11] Google LCC and others (Veranst.): *Audio Record*. 08 2020. – URL <https://developer.android.com/reference/android/media/AudioRecord#AudioRecord>. – Zugriffsdatum: 2020-08-17
- [12] GÖRNE, T.: *Tontechnik*. Hanser, 2011. – URL <https://books.google.de/books?id=p6VbSQAACAAJ>. – ISBN 9783446423954
- [13] HENSEL, M.: *Vorlesungsfolien: Software Engineering, 6.Activity Diagrams*. 05 2017. – Hochschule für Angewandte Wissenschaften Hamburg
- [14] HENSEL, M.: *Little Batman - Naturerlebnisse für Kinder*. 09 2019. – Hochschule für Angewandte Wissenschaften Hamburg
- [15] HERING, E. ; MARTIN, R. ; STOHRER, M.: *Physik für Ingenieure*. 12. Springer Vieweg, 1999 (Springer-Lehrbuch). – URL <https://books.google.de/books?id=4kiMPQAACAAJ>. – ISBN 9783540661351
- [16] HOLDERIED, M. W. ; KORINE, C. ; FENTON, M. B. ; PARSONS, S. ; ROBSON, S. ; JONES, G.: Echolocation call intensity in the aerial hawking bat *Eptesicus bottae* (Vespertilionidae) studied using stereo videogrammetry. In: *Journal of Experimental Biology* 208 (2005), Nr. 7, S. 1321–1327
- [17] KEVIN- OWN ILLUSTRATION, BASED ON IMAGE:MIC-CONDENSER.PNG BY BANCO, CC BY-SA 3.0: *Schematischer Aufbau eines Kondensatormikrofons (NF-Schaltung, ohne Impedanzwandler)*. – URL <https://commons.wikimedia.org/w/index.php?curid=1999841>. – Zugriffsdatum: 2020-07-30. – Wikimedia Deutschland e.V.
- [18] KRINER, E.: *Kleine Übersicht über die Rufe unserer Fledermäuse*. – URL <https://www.fledermaus-bayern.de/downloads.html>. – Zugriffsdatum: 2020-08-02. – V.i.S.d.P: Naturpark Bayerischer Wald e.V.

- [19] KUHLMANN, U.: USB-C: Der Alleskönner. (2019), 05. – URL <https://www.heise.de/ct/artikel/USB-C-Der-Alleskoenner-3836662.html>. – Zugriffsdatum: 2020-07-31. – Heise Medien GmbH und Co. KG
- [20] LEHMANN, H.: *USB-C-Format erklärt: Das müssen Sie wissen.* 01 2020. – URL <https://www.pc-magazin.de/ratgeber/usb-c-was-ist-das-usb-type-c-transferrate-hub-power-delivery-monitor-adapter-3200367.html>. – Zugriffsdatum: 2020-07-26. – WEKA MEDIA PUBLISHING GmbH
- [21] LIFSHITZ, R.: *STMicroelectronics and DSP brings intelligence to MEMS Microphones.* 03 2017. – URL <https://techtimes.com/news/2017/03/04/dsp-group-3/>. – Zugriffsdatum: 2020-07-30. – Techtimes Electronics and Technology News
- [22] LIPINSKI, K.: MEMS-Mikrofon. (2020). – URL <https://www.itwissen.info/MEMS-Mikrofon-MEMS-microphone.html>. – Zugriffsdatum: 2020-07-30. – DATACOM Buchverlag GmbH
- [23] MIETKE, D.: Aktive elektrische Filterschaltungen. . – URL <https://www.elektroniktutor.de/analogverstaerker/aktivflt.html>. – Zugriffsdatum: 2020-07-20. – Verfasser: Detlef Mietke
- [24] MÖSER, M.: *Technische Akustik.* 10. Springer Vieweg, 2015. – URL <https://doi.org/10.1007/978-3-662-47704-5>. – ISBN 978-3-662-47703-8
- [25] PFALZER, G.: *Social Calls, Distress Calls and Feeding Buzzes of European Bats.* 2013. – URL <http://www.batcalls.com/>. – Zugriffsdatum: 2020-08-02. – Avisoft Bioacoustics e.K.
- [26] PHIFER, L.: *Was ist der Unterschied zwischen Wireless Access Point und Wireless Router?* 2017. – URL <https://www.computerweekly.com/de/antwort/Was-ist-der-Unterschied-zwischen-Wireless-Access-Point-und-Wireless-Router>. – Zugriffsdatum: 2020-07-18. – ComputerWeekly.de ist Eigentum von TechTarget, Inc.
- [27] RAUSCHER-SCHEIBE, A.: *Vorlesungsskript: Signale und Systeme II.* 2017. – Hochschule für Angewandte Wissenschaften Hamburg
- [28] RINORTNER, K.: Wie man in acht Schritten Maximalwerte und Wärmewiderstände interpretiert. (2011). – URL <https://www.elektronikpraxis.vogel.de/wie-man-in-acht-schritten-maximalwerte-und->

- [waermewiderstaende-interpretiert-a-331111/?p=3](#). – Zugriffsdatum: 2020-08-05. – Vogel Communications Group GmbH & Co. KG
- [29] ROSE, B.: *MEMS oder ECM: Mikrofontechnologien im Vergleich*. 02 2019. – URL <https://www.digikey.de/de/articles/mems-vs-ecm-comparing-microphone-technologies>. – Zugriffsdatum: 2020-08-15. – CUI Inc. (Digi-Key Electronics)
- [30] RUNKEL, V.: *Begrifflichkeiten in der Rufanalyse*. 12 2013. – URL <https://fledermausrufe.de/blog/begrifflichkeiten-in-der-rufanalyse/>. – Zugriffsdatum: 2020-08-01. – Dr. Volker Runkel
- [31] RUNKEL, V.: *Wetterschutz für Mikrofone*. 06 2014. – URL <https://fledermausrufe.de/blog/wetterschutz-fur-mikrofone/>. – Zugriffsdatum: 2020-08-19. – Dr. Volker Runkel
- [32] SAUTER, M.: *Grundkurs Mobile Kommunikationssysteme: LTE-Advanced, UMTS, HSPA, GSM, GPRS, Wireless LAN und Bluetooth*. Springer Fachmedien Wiesbaden, 2018. – URL <https://books.google.de/books?id=N-xICAAAQBAJ>. – ISBN 9783658083427
- [33] SCHUH, F.: *Modernen Smartphones und Kopfhörern fehlt die Klinke*. 01 2019. – URL <https://www.fr.de/wissen/modernen-smartphones-kopfhoerern-fehlt-klinke-11013168.html>. – Zugriffsdatum: 2020-08-25. – Frankfurter Rundschau GmbH
- [34] SCHULZE, U.: *Kurz erklärt: Bluetooth 5 Zahn zugelegt*. 08 2017. – URL <https://www.heise.de/select/ix/2017/8/1501422145735759>. – Zugriffsdatum: 2020-08-15. – Heise Medien GmbH und Co. KG
- [35] SENGPIEL, E.: *Mikrofon-Empfindlichkeit Umrechnung*. 2014. – URL <http://www.sengpielaudio.com/Rechner-sensitivity.htm>. – Zugriffsdatum: 2020-08-10. – Forum des Dipl.-Ing. Eberhard Sengpiel
- [36] SENGPIEL, E.: *Umrechnung von Spannung in Spannungspegel*. 2014. – URL <http://www.sengpielaudio.com/Rechner-sensitivity.htm>. – Zugriffsdatum: 2020-08-10. – Forum des Dipl.-Ing. Eberhard Sengpiel
- [37] SKRITEK, P.: *Schirmungen in der Audio-Schaltungstechnik, Konstruktive und schaltungstechnische Maßnahmen zur Erhöhung der Störsicherheit*. Franzis Verlag GmbH, 1989. – ISBN 3-7723-7322-4

- [38] SMYREK, V.: *Tontechnik: für Veranstaltungstechniker in Ausbildung und Praxis*. Hirzel, S., Verlag, 2016. – URL [https://books.google.de/books?id=1\\_hjwEACAAJ](https://books.google.de/books?id=1_hjwEACAAJ). – ISBN 9783777624990
- [39] TIETZE, U. ; SCHENK, C.: *Halbleiterschaltungstechnik, 12.Auflage*. Springer-Verlag, 2002. – ISBN 3-540-42849-6
- [40] TRIGGS, R.: *A quick history of Bluetooth*. 03 2018. – URL <https://www.androidauthority.com/history-bluetooth-explained-846345/>. – Zugriffsdatum: 2020-08-16. – Android Authority
- [41] UNBEKANNT: Fledermausarten in Schleswig-Holstein. . – URL <https://schleswig-holstein.nabu.de/tiere-und-pflanzen/saeugetiere/fledermaeuse/arten-und-biologie/index.html>. – Zugriffsdatum: 2020-07-21. – Naturschutzbund (NABU) Schleswig-Holstein
- [42] UNBEKANNT: Die Technik hinter USB 2.0. (2015). – URL <https://www.pcwelt.de/downloads/Die-Technik-hinter-USB-2-0-1295257.html>. – Zugriffsdatum: 2020-07-26. – IDG Tech Media GmbH - Content Managem.: Inter Red
- [43] UNBEKANNT: *Bluetooth*. 09 2016. – URL <https://kompodium.infotip.de/bluetooth.html>. – Zugriffsdatum: 2020-08-15. – InfoTip Service GmbH
- [44] UNBEKANNT: Fachbeitrag: Feine Mikromechanik - MEMS-Mikrofon MEMS-1. In: *ELV Hörbar gemacht - Fledermausdetektor 4* (2017), 09. – ELV Elektronik AG
- [45] UNBEKANNT: *3.5 mm Headset Jack: Device Specification*. 01 2020. – URL <https://source.android.com/devices/accessories/headset/jack-headset-spec>. – Zugriffsdatum: 2020-07-31. – Google LCC and others
- [46] USER: TEHDOG: *Hörfläche des Menschen als Schalldruckpegel in Abhängigkeit der Frequenz*. Oktober 2012. – URL <https://commons.wikimedia.org/w/index.php?curid=21894080>. – Zugriffsdatum: 2020-07-08. – Wikimedia Deutschland e.V.
- [47] WIRTGEN, J.: USB-Geräte an Android-Smartphones. (2018). – URL <https://www.heise.de/select/ct/2018/25/1543747738838386>. – Zugriffsdatum: 2020-08-21. – Heise Medien GmbH und Co. KG

- [48] ZAWAWI, Siti A. ; HAMZAH, Azrul A. ; MAJLIS, Burhanuddin Y. ; MOHD-YASIN, Faisal: A Review of MEMS Capacitive Microphones. In: *Micromachines* 11 (2020), Nr. 5, S. 484. – Multidisciplinary Digital Publishing Institute

## **Erklärung zur selbstständigen Bearbeitung einer Abschlussarbeit**

Hiermit versichere ich, dass ich die vorliegende Arbeit ohne fremde Hilfe selbständig verfasst und nur die angegebenen Hilfsmittel benutzt habe. Wörtlich oder dem Sinn nach aus anderen Werken entnommene Stellen sind unter Angabe der Quellen kenntlich gemacht.

---

Ort

Datum

Unterschrift im Original