



TECHNISCHE UNIVERSITÄT ILMENAU

Fakultät für Elektro- und Informationstechnik

Fachgebiet Theoretische Elektrotechnik

Entwurf einer kompakten, energieeffizienten, frei programmierbaren Hörgeräteplattform zur praxisnahen Erprobung audiologischer Algorithmen

Diplomarbeit

zur Erlangung des akademischen Grades

Diplomingenieur

vorgelegt von

Amelie Johanna Hintermaier

Verantwortliche Hochschullehrerin: Dr.-Ing. Sylvia Bräunig
Technische Universität Ilmenau



Wissenschaftlicher Betreuer: Dr.-Ing. Tamas Harczos
audifon GmbH & Co. KG



Fachmentor: Dipl.-Ing. Sebastian Uziel
IMMS GmbH



Vorgelegt am 17.11.2022

DOI: 10.22032/dbt.55694

URN: urn:nbn:de:gbv:ilm1-2022200283

Rechtliche Hinweise

Gender Hinweis

In dieser Arbeit wird aus Gründen der besseren Lesbarkeit auf die gleichzeitige Verwendung der Sprachformen männlich, weiblich und divers (m/w/d) verzichtet. Sämtliche Personenbezeichnungen und personenbezogene Hauptwörter gelten im Sinne der Gleichbehandlung grundsätzlich gleichermaßen für alle Geschlechter und beinhalten keine Wertung.

Distanzierung von der Entwicklung eines Medizinproduktes

Diese wissenschaftliche Arbeit verfolgt als Ziel die Entwicklung einer Forschungsplattform. Im Folgenden wird gelegentlich auch von einer Hörgeräteplattform gesprochen. Es wird jedoch ausdrücklich darauf hingewiesen, dass kein Produkt mit medizinischer Zweckbestimmung zur Anwendung beim Menschen entwickelt wird. Es wird versucht Hörgeräteeigenschaften für ein praxisnahes Forschungswerkzeug zu adaptieren, eine andauernde Verwendung ist allerdings nicht vorgesehen. Mit der Plattform wird die Intention verfolgt, Forschern und Entwicklern ein Hilfsmittel bereitzustellen und dient nicht als Ersatz für medizinisch geprüfte Hörsysteme.

Hyperlinks

Diese Arbeit beinhaltet elektronische Querverweise, welche als Annehmlichkeit für den Leser gedacht sind. Es wird keine Verantwortung für den Inhalt von den verlinkten Internetseiten, den erhaltenen Daten als auch den Zugang zu diesen übernommen. Auf die aktuelle und künftige Gestaltung der verlinkten Seiten hat der Autor keinen Einfluss. Der Leser übernimmt die Haftung.

Danksagung

Ich möchte mich herzlich bei allen bedanken, die mich unterstützt haben, dass diese Abschlussarbeit innerhalb eines halben Jahres entstehen konnte. Ich bin sehr froh, dass ich sie bei der Hörgerätefirma audifon GmbH & Co. KG, jedoch bei gleichzeitiger Betreuung und Unterstützung durch die Technische Universität Ilmenau, schreiben durfte.

Ich bedanke mich bei Herrn Prof. Dr. Hannes Töpfer für seinen Rat während des Studiums, auf den ich stets vertrauen konnte. Frau Dr. Sylvia Bräunig möchte ich danken, dass Sie die Rolle meiner betreuenden Hochschullehrerin übernommen hat und mir stets die Sicherheit gegeben hat, ihre Unterstützung zu erhalten. Bedanken möchte ich mich auch bei Sebastian Uziel, der mir jederzeit bei Fragen zum Schaltungs- und Leiterplattenentwurf weitergeholfen hat und vor der Fertigung der Platine, die Teil des Lösungsentwurfs in dieser Arbeit ist, das Layout begutachtet hat. Ebenso möchte ich meinem Kollegen bei audifon Dr. Iko Pieper für seine Hilfe und Unterstützung bei der elektroakustischen Charakterisierung des Systems danken. Ein ganz besonderer Dank gilt Herrn Dr. Tamas Harczos, meinem Betreuer bei audifon. Ich danke ihm für all seine Geduld und Zeit, die er bei jeder meiner Fragen aufgebracht hat, für sein Vertrauen in meine Fähigkeiten und die Hilfestellungen, wenn ich sie brauchte.

Abschließend möchte ich mich auch bei meiner Familie und ganz besonders bei meinen Eltern bedanken, auf die ich in jedem Moment meines Lebens zählen konnte und die mir das Studium in Ilmenau ermöglicht haben. Ich danke Ihnen für all die Liebe und Unterstützung, die sie mir gegeben haben, sowie all das, was sie mich gelehrt haben. Ohne sie würden die wichtigsten Grundpfeiler in meinem Leben fehlen, die mir stets Stabilität und Sicherheit gegeben haben.

Kurzfassung

Derzeit leidet rund 19% der Weltbevölkerung an Hörverlust [WHO21:1]. Dieser Anteil wird Prognosen zufolge in den nächsten Jahrzehnten weiter steigen. Die Beeinträchtigung des Hörvermögens geht zusätzlich mit gravierenden negativen Auswirkungen einher. Dazu zählen eine verringerte soziale Interaktion bis hin zur Isolation, Einfluss auf die psychische und sogar physische Gesundheit, der Zugang zu Bildung und eine dekrementierende Lebensqualität. Diese Folgeerscheinungen stellen einschneidende Belastungen für die Personen dar, aber auch für die Gesellschaft. Es bedarf daher einer Verbesserung der Versorgung von Hörverlust.

Vor diesem Hintergrund wird in dieser Arbeit eine portable Forschungs- und Entwicklungsplattform implementiert. Diese Plattform kann als Hilfsmittel für die Entwicklung und praxisnahe Erprobung von entsprechenden Audiosignalverarbeitungsalgorithmen genutzt werden. Die Hardware des Geräts wird in dieser Arbeit weitgehend herstellerunabhängig entworfen. Zu testende Algorithmen können in der Programmiersprache C geschrieben werden. Eine möglichst hohe Adaptabilität zwischen der Funktionsweise aber auch den Restriktionen sowie dem technischen Umfang in einer Hörhilfe wie einem Hörgerät und der Entwicklungsplattform wird sichergestellt. Damit wird die Übertragbarkeit von Erkenntnissen und Entwicklungsarbeiten auf zukünftige Hörhilfen, die bei einer Versorgung eingesetzt werden, gewährleistet.

Für die Implementierung einer solchen Plattform wird auf Basis eines Lastenhefts ein Systementwurf erstellt und konkretisiert, bevor ein Schaltplanentwurf sowie dessen Erprobung in Form eines funktionalen Tischaufbaus und ein Leiterplattendesign für eine portable, kosteneffiziente Lösung erfolgen. Ein erster Gehäuseentwurf ermöglicht die Implementierung einer Gesamtlösung, die in natürlicher Geräuschumgebung erprobt und genutzt werden kann. Der Prototyp wird geprüft, die korrekte Funktionsweise sichergestellt und das System mit ausgewählten elektrischen sowie elektroakustischen Eigenschaften charakterisiert.

Mit dieser Arbeit wird versucht einen Beitrag für diese gesellschaftliche Herausforderung zu leisten sowie die Lebensqualität der geschädigten Personen auf lange Sicht zu steigern, indem die Entwicklung fortschrittlicher Signalverarbeitung von Audiosignalen für die Versorgung von Hörverlust unterstützt wird. Wissenstransfer sowie interdisziplinäre Zusammenarbeit soll vereinfacht und die Akzeptanz von Hörhilfen durch technischen Fortschritt verbessert werden.

Abstract

These days, WHO estimates that 19% of the world's population suffers from hearing loss [WHO21:1]. According to forecasts, the number of affected people is expected to rise in the following decades. Furthermore, impaired hearing is associated with severe adverse side effects including reduced social interaction right up to isolation, restrained physical and mental health, access to education, and a decremented quality of life. These sequelae are heavy burdens and challenges for affected individuals as well as society. Consequently, taking care of hearing loss must be improved.

Against this background, a portable platform for research and development is designed and implemented in this thesis. The platform can be used as a tool for engineering and testing algorithms for audio signal processing algorithms in a realistic environment. A device is designed that is mostly independent of manufacturer-specific components. It features C-programmability of algorithms to be tested on the platform. There is a high adaptability between the functionality, the restrictions as well as the technical scope of a hearing device and the portable platform in this work. This ensures that findings and engineered algorithms can be transferred to future hearing aids.

The platform is implemented in several steps. First, a system design is conceived based on the requirement specification. This is followed by a schematic circuit diagram design, which is tested in form of a functional model, and the design of a printed board for a cost-efficient, portable device. In combination with a first enclosure concept, a complete solution, which can be used in a realistic acoustic environment, is implemented. This prototype is tested, correct functionality is ensured, and a system characterization with well-chosen electrical as well as electro-acoustic properties is created.

This work strives to contribute to those social challenges and to improve impaired persons' quality of life in the long term by supporting engineering of advanced audio signal processing algorithms for hearing loss care. Knowledge transfer as well as interdisciplinary cooperation is to be facilitated and the reputation of hearing aids can be enhanced thanks to technical progress.

Inhaltsverzeichnis

Rechtliche Hinweise	iii
Danksagung	v
Kurzfassung	vii
Abstract	ix
Inhaltsverzeichnis	xi
Abkürzungen und Akronyme	xiii
Mathematische Notation, Symbole und Einheiten	xv
1 Einleitung	1
1.1 Problemstellung und Motivation	1
1.2 Anforderungen und Zielstellung	3
1.3 Stand der Technik.....	5
2 Grundlagen	7
2.1 Hörverlust und technische Hörsysteme.....	7
2.1.1 Charakterisierung von Schall in der Audiologie und Audiosignalverarbeitung	7
2.1.2 Hörverlust	8
2.1.3 Hörversorgungsmittel der Ohrgesundheits.....	9
2.1.4 Technologie in einem Hörgerät.....	11
2.1.5 Formfaktoren von Hörgeräten.....	14
2.1.6 Funktionale Bewertung von Hörsystemen.....	15
2.2 Systemdesign und Leiterplattenentwurf.....	18
2.2.1 Systemdesign	19
2.2.2 Entwurfsprozess einer Leiterplatte.....	19
2.2.3 Leiterplattenlayout	21
3 Hörgeräteplattform	23
3.1 Entwurf.....	23
3.1.1 Blockschaltbild der Systemarchitektur	23
3.1.2 Bauteilrecherche	25
3.1.3 Abschätzung des Gesamtflächenbedarfs.....	33
3.1.4 Abschätzung des Stromverbrauchs	34
3.2 Schaltplanentwicklung	35
3.3 Funktionsmuster	44
3.3.1 Funktionaler Prototyp	45

3.3.2	Firmware und Programmierung der zentralen Steuer- und Recheneinheit	45
3.3.3	Verifizierung	47
3.3.4	Kalibrierung und hardwaretechnische Limitierung des Ausgangspegels.....	50
3.4	Leiterplatte.....	53
3.4.1	Leiterplattenkontur	53
3.4.2	Designrichtlinien	53
3.4.3	Leiterplattenentwurf.....	55
3.4.4	Kostenkalkulation und Bestellvorbereitung	57
3.5	Gehäusekonzept.....	57
3.6	Demonstrator	59
4	Inbetriebnahme und Test des Gesamtsystems	61
4.1	Sichtkontrolle.....	62
4.2	Funktionstest.....	62
4.2.1	Funktionale Blöcke	62
4.2.2	Elektrische und elektroakustische Eigenschaften.....	63
4.2.2.1	Stromverbrauch des Systems	64
4.2.2.2	Frequenzgänge	65
4.2.2.3	Begrenzung des Ausgangspegels	71
4.2.2.4	Eingangsbezogenes Eigenrauschen.....	71
4.2.2.5	Latenz durch die Hardware	72
5	Diskussion und Bewertung der Lösung	75
5.1	Diskussion und Zusammenfassung der Messergebnisse	75
5.2	Validierung des Gesamtsystems	76
6	Zusammenfassung und Ausblick	79
Anhang		81
A	Stückliste und Kostenkalkulation	81
B	Testung der entwickelten Hörerätetestplattform	83
C	Stromverbrauch der Testplattform.....	87
D	Kopie des Testberichts zur Werkskalibrierung der Messbox TBS25.....	89
E	Mikrofonfrequenzgang	90
	Stromlaufplan zum Projekt PrimeHA	93
Literaturverzeichnis		95
Abbildungsverzeichnis		107
Tabellenverzeichnis		111

Abkürzungen und Akronyme

ADC	Analog-Digital-Converter
Amp	Amplifier
BLE	Bluetooth Low Energy
BOM	Bill Of Materials
CAD	Computer-Aided Design
CDC	Centers for Disease Control and Prevention
CLK	Clock
CMSIS	Common Microcontroller Software Interface Standard
COTS	Commercial Off-The-Shelf
DAC	Digital-Analog-Converter
DK	Development Kit
EDA	Electronic Design Automation
EHIMA	European Hearing Industry Manufacturers Organization
ESD	Electrostatic Discharge
ESR	Equivalent Series Resistance
FAT	File Allocation Table
FDM	Fused Deposition Modeling
DFT	Fast Fourier Transform
FPU	Floating Point Unit
GND	Ground
GPIO	General Purpose Input/Output
HdO	Hinter-dem-Ohr (Hörgerät)
HFA	High Frequency Average
HL	Hearing Level
I ² C	Inter-Integrated Circuit
I ² S	Inter-IC Sound
IC	Integrated Circuit
IdO	In-dem-Ohr (Hörgerät)
IO	Input/Output
ISTS	International Speech Test Signal
LDO	Low-Dropout (Regler)
MEMS	Micro Electro Mechanical System

MISO	Master Input, Slave Output
MOSFET	Metal-Oxide Semiconductor Field-Effect Transistor, Feldeffekttransistor mit isolierter Steuerelektrode (Gate)
MOSI	Master Output, Slave Input
NFMI	Near Field Magnetic Induction
NVM	Non Volatile Memory
openMHA	Open Master Hearing Aid
OSHA	Occupational Safety and Health Administration
OSP	Open Speech Platform
PDM	Pulse Density Modulation
PLA	Polyactide
PMIC	Power Management IC
RAM	Random-Access Memory
RIC	Receiver-In-Channel
RITE	Receiver-In-The-Ear
RMS	Root Mean Square
RX	Receive
SCL	Serial Clock (Line)
SDA	Serial Data (Line)
SiP	System in Package
SLS	Selective Laser Sintering
SNR	Signal-to-Noise Ratio
SoC	System on Chip
SPI	Serial Peripheral Interface
SPL	Sound Pressure Level
SRAM	Static Random Access Memory
SWDCLK	Serial Wire Debug Clock
SWDIO	Serial Wire Debug Data Input/Output
THD	Total Harmonic Distortion
T-Spule	Telefonspule oder Induktionsspule
TX	Transmit
UART	Universal Asynchronous Receiver-Transmitter
Via	Vertical Interconnect Access
WHO	World Health Organization

Mathematische Notation, Symbole und Einheiten

A	Ampere
C	Kapazität
cc	Kubikzentimeter
dB	Dezibel
dB _A	Dezibel mit A-Bewertung
dB _c	Decibel (relative to) carrier
dB FS	Decibel (relative to) full scale
dB HL	Decibel (relative to normal) hearing level
dB SPL	Decibel of Sound Pressure Level
gf	Gram-force (Kraft auf 1 g Masse in einem Schwerkraftfeld mit Normalfallbeschleunigung)
Hz	Hertz
I	Strom
I _{chg}	Ladestrom
I _{detect}	Mindestladestrom für die Akkuzelle
kB	Kilobyte
ksps	kilo samples per second
mAh	Milliamperestunde
MB	Megabyte
Pa	Pascal
R	Widerstand
R _{Last}	Lastwiderstand
t	Zeit
U	Spannung
V	Volt
V _{bat}	Batteriespannung
V _{chg}	Ladespannung
V _{dd}	Betriebsspannung
V _{out}	Ausgangsspannung des Power Management IC (entspricht V _{dd})

1 Einleitung

Das Ziel dieser Arbeit ist die Entwicklung einer Testplattform für die Audiosignalverarbeitung in der Hörversorgung. Damit soll ein Beitrag zur Verbesserung der Hörfähigkeit mit Hörgeräten und einer effizienteren Forschung und Entwicklung geleistet werden. Sie entstand bei dem Hörgerätehersteller audifon GmbH & Co. KG mit Unterstützung durch die Technische Universität Ilmenau.

Die Untersuchungen und Entwicklungsbestrebungen gliedern sich in folgender Weise: In Kapitel 1 wird die Problemstellung und Motivation dieser Arbeit dargestellt, bevor für die spätere Umsetzung die Zielstellung und entsprechende Anforderungen formuliert werden. Das 1. Kapitel zeigt abschließend eine Analyse des aktuellen Stands der Technik sowie die Notwendigkeit dieser Arbeit auf. In Kapitel 2 werden theoretische Grundlagen für die in Kapitel 3 durchgeführte Implementierung einer Forschungsplattform geschaffen. Im 3. Kapitel wird ein Vorentwurf erstellt, gefolgt von einer Konkretisierung und einer Umsetzung der Problemlösung. Letztere lässt sich in eine Schaltplanentwicklung, welche in Form eines Funktionsmusters verifiziert wird, den Entwurf einer Leiterplatte, eines Gehäuses sowie die Präsentation eines Demonstrators unterteilen. In Kapitel 4 wird das Gesamtsystem getestet, dessen korrekte Funktionalität sichergestellt und anhand ausgewählter elektrischer als auch elektroakustischer Eigenschaften charakterisiert wird. Im 5. Kapitel wird diese Erprobung ausgewertet und analysiert, ob die Anforderungen aus Kapitel 1 erfüllt worden sind. Kapitel 6 präsentiert sowohl eine Zusammenfassung dieser Arbeit als auch einen Ausblick für Erweiterungen und auf dieser Arbeit aufbauende Forschungs- und Entwicklungsmaßnahmen.

1.1 Problemstellung und Motivation

Das Hören ist eine der Sinneswahrnehmungen, welche den Menschen dazu befähigt seine Umwelt bewusst wahrzunehmen und aktiv an verbaler Kommunikation innerhalb der Gesellschaft teilzunehmen. Damit leistet die Hörfähigkeit einen signifikanten Beitrag zur sozialen Interaktion, psychische und sogar physische Gesundheit, zum Zugang zu Bildung und zur Lebensqualität. [CBL+16; KB18:322; NRC+20; WHO21:44-48]

Eine verringerte Hörfähigkeit gehört derzeit jedoch zu den häufigsten Sinnesbeeinträchtigungen, von der weltweit 1,5 Milliarden Menschen aller Altersgruppen betroffen sind. Dies entspricht rund 19% der Weltbevölkerung. Eine Prognose der Weltgesundheitsorganisation WHO geht davon aus, dass die Zahl der Betroffenen bis 2050 auf über 2,5 Milliarden steigen wird. [NRC+20; WHO21:1-2:44-48:139]

Nachlassende und beeinträchtigte Hörfähigkeit können mit technischen Hörhilfen ausgeglichen werden, indem die akustischen Signale entsprechend der Ausprägung und Art des Defizits verändert und für die Personen wieder wahrnehmbar gemacht werden. Bei dem am häufigsten verwendeten Hörsystem handelt es sich um das konventionelle Hörgerät, welches in verschiedenen Bauformen

erhältlich ist und eine Kompensation von sowohl leichtem als auch schwerem Hörverlust bis 80 dB HL (siehe Abschnitt 2.1.1) bereitstellen kann. [Kom13:211-212]

Eine Versorgung des Hörverlusts auf adäquate Weise ist von essenzieller Bedeutung. Obwohl festgestellt werden konnte, dass die beeinträchtigten Personen einen erheblichen Nutzen durch die Verwendung entsprechender Hörhilfen erfahren [VSS+17; VTD16], müsste zusätzlich die Akzeptanz von Hörgeräten und anderer Hörhilfen sowie die damit einhergehende Versorgungsrate gesteigert werden. Die Notwendigkeit dessen basiert auf dem sogenannten Hörgeräteeffekt. Dieser beschreibt, dass eine Person, die eine Hörhilfe trägt, mit negativen Eigenschaften assoziiert wird, auch wenn diese Stigmatisierung sich über die vergangenen Jahre Studien zufolge gebessert hat [CP01; EG02; JDGK05; RP14]. Nichtsdestotrotz zeigt sich, dass ein Großteil der befragten, versorgten Personen die Hörhilfe lediglich sporadisch oder überhaupt nicht nutzen [DDBM20]. Zu den Faktoren, die eine geringe Nutzung der Hörsysteme nach sich ziehen, gehören unter anderem die scheinbar geringen Vorteile und beschränkte Klangqualität bei der Verwendung eines Hörgeräts [BLME18; BSZ+09; DDBM20; MF13]. Somit gilt es neben kosmetischen Aspekten, wie einer kleinen Bauform und Tragekomfort, eine verbesserte Kompensation des Hörverlusts sowie höhere Sprachverständlichkeit mithilfe von neuen Entwicklungen im Bereich der Audiosignalverarbeitung bereitzustellen.

Neben wertvollen Aspekten wie gesteigerte Lebensqualität für die Betroffenen profitiert die Gesellschaft von geringeren zu tragenden zusätzlichen Kosten, die durch unbehandelten Hörverlust entstehen. So kommt es laut WHO weltweit jährlich zu zusätzlichen Ausgaben von rund 980 Milliarden US Dollar. Ursachen für diese sind unter anderem geringere Produktivität, ein erschwerter Zugang zu Bildung und Kosten für die durch unbehandelten Hörverlust entstehende Gesundheitsversorgung. [WHO21:49-50]

Eine kosteneffiziente Behandlung kann durch eine kontinuierliche Nutzung von Hörgeräten begleitet von einer audiologischen Rehabilitation erfolgen [WHO17:28]. Obwohl Schätzungen zufolge rund 90 – 95% der von Hörverlust betroffenen Personen mit einem Hörgerät geholfen werden könnte, gibt es in allen Altersgruppen eine Vielzahl an Geschädigten, die auf eine technologische Hilfe verzichten oder erst Jahre später eine Versorgung in Anspruch nehmen. Die Marktdurchdringung ist dementsprechend ausbaufähig. Insbesondere die bis heute anhaltende Stigmatisierung der Nutzung von Hörgeräten trägt zu dieser zeitlichen Diskrepanz deutlich bei, welche Einfluss auf die bereits erwähnten negativen Folgen von unbehandeltem Hörverlust wie soziale Isolation, verringerte Arbeitsleistung und gesundheitliche Beeinträchtigung hat. Mehr Aufklärung über die Möglichkeiten das Gehör zu schützen und das Kommunizieren sowie Informieren über Arten und Anzeichen von Hörverlust können zu einer größeren Akzeptanz von Hörhilfen innerhalb der Bevölkerung führen sowie die Kompensation der Beeinträchtigung verbessern. Dasselbe Potenzial haben neue und fortschrittlichere Hörtechnologien, wodurch sie einen wichtigen Beitrag leisten und damit von großem Nutzen für die Gesellschaft sein können. [KB18:321-324; WHO21:246-250]

Hörgeräte weisen eine hochspezielle, auf Audiosignalverarbeitung optimierte und miniaturisierte Hardware auf [OS22]. Die Implementierung von neuen und die Verbesserung bereits vorhandener Algorithmen in den heute vorwiegend digitalen Hörsystemen wird durch den Mangel an

nutzerfreundlichen Möglichkeiten zur Fehlersuche erschwert [Kat08:1]. Des Weiteren ist die Architektur verwendeter Signalprozessoren auf die gebräuchlichsten Algorithmen zur Signalverarbeitung in Hörgeräten optimiert [GPB21]. Dies beeinträchtigt beispielsweise die Arbeit an noch unzureichend gelösten Herausforderungen wie dem Cocktailparty-Effekt (siehe [UH17:159]).

Um Verbesserungen im Hörgesundheitssektor erzielen zu können, bedarf es Forschung und Entwicklung. Zur Unterstützung und Beschleunigung dessen wird eine geeignete Hörgeräteplattform benötigt. Diese soll auch das Testen von bereits vorhandenen Forschungsarbeiten sowie den Transfer von Wissen ermöglichen und Barrieren entsprechend verringern, damit die Kommunikationsfähigkeit, soziale Teilnahme und Lebensqualität von Hörgeschädigten gesteigert werden können.

1.2 Anforderungen und Zielstellung

Hörverlust und die Behandlung dessen ist ein weltweites Problem. Forschung und Entwicklung daran sollte über Hersteller und Institute hinweg als gemeinschaftliche Herausforderung wahrgenommen werden und möglichst unabhängig von Hardware, welche für einzelne Hörgerätehersteller spezifisch ist, stattfinden. Ziel ist es eine Testplattform mit funktioneller Ähnlichkeit zu einem Hörgerät zu entwickeln, die eine nutzerfreundliche Möglichkeit darstellt in der Programmiersprache C geschriebene Audioverarbeitungsalgorithmen zu implementieren und damit Flexibilität bei der Entwicklung zu ermöglichen. Des Weiteren muss die Plattform portabel sein, um praxisnahe Erprobungen in realitätsechten, akustisch teilweise herausfordernden Situationen und Umgebungen durchzuführen und den Nutzen sowie die Ergebnisse evaluieren zu können.

Moderne digitale Hörgeräte sind zunehmend Teil der vernetzten Welt, indem ein Informations- und Datenaustausch zwischen diesen und anderen Kommunikationsgeräten stattfinden kann. Beispielsweise kann kabellos Musik von einem Mobiltelefon auf die Hörhilfen übertragen oder im Sinne einer Fernbedienung Einstellungen wie die Lautstärke verändert werden. Des Weiteren kann eine Kommunikation zwischen den beiden Geräten und angepasste Signalverarbeitung bei bilateraler Versorgung stattfinden. Insgesamt haben diese drahtlosen Möglichkeiten das Potenzial die Akzeptanz von Hörgeräten und die Sprachverständlichkeit hörgeschädigter Personen zu steigern. Eine drahtlose Kommunikation soll daher mit der Testplattform möglich sein und bei der Forschung und Entwicklung von Verbesserungen in der Hörversorgung berücksichtigt werden können. [Dil12:19]

Die Ressourcen eines Hörgerätes sind hinsichtlich Energieversorgung, Rechen- und Speicherkapazität begrenzt (siehe Kapitel 2.1.4). Dies muss im Entwicklungsprozess und bei der Durchführung als auch Evaluierung von Feldstudien berücksichtigt werden, weshalb die Plattform diese Restriktionen widerspiegeln soll. Auf Flexibilität, welche bei einer auf einzelne Algorithmen spezialisierte Hardware nicht gegeben ist, soll bei der Implementierung von akustischen Algorithmen nicht verzichtet werden.

Für die Forschung und Entwicklung soll ein kompaktes, sowohl Hardware als auch Software umfassendes, tragbares Hilfsmittel implementiert werden, das für die Audiosignalverarbeitung

geeignet ist. Ziel ist es des Weiteren mit dem Testgerät praxisnahe Erprobungen und Feldstudien in Alltagssituationen über mehrere Stunden trotz begrenzter Energieversorgung durchzuführen, weshalb es einer Plattform mit geringem Energieverbrauch bedarf. Da es sich bei dem hinter dem Ohr tragbaren Hörgerät, um das in Deutschland am häufigsten angepasste und für die meisten Arten von Hörverlust verwendbare Hörversorgungsmittel handelt (siehe Kapitel 2.1.5) soll die Testplattform für praxisnahe Versuche hinter dem Ohr platzierbar sein.

Um das Verletzungsrisiko der Nutzer zu senken und deren Gehör zu schützen, müssen Sicherheitsmechanismen eingebaut werden. Akustische Signale dürfen die Schmerzgrenze der Nutzer nicht überschreiten. Normalhörende Menschen sollen während der Entwicklung und Testung von Algorithmen ebenfalls Hörversuche durchführen können, ohne ein Verletzungsrisiko einzugehen.

Die bisher gebräuchlichste Form der Energieversorgung von Hörgeräten erfolgt durch Zink-Luft-Batterien aufgrund der mit ihnen verbundenen geringen Kosten, ökologischen Unbedenklichkeit, hohen Energiedichte und Ressourcenverfügbarkeit [LR02:288-289]. Die Weltgesundheitsorganisation WHO betont die Dringlichkeit eines weltweiten Zugangs zu Hörversorgung. Dies kann sowohl durch Verbesserungen in der Dienstbereitstellung als auch durch technische Entwicklungen erfolgen. Zum einen werden bei letzterem neue Hörgerätetechnologien als auch selbstanpassbare Hörgeräte erwähnt, zum anderen wird ebenfalls die Verwendung von wiederaufladbaren Akkumulatoren statt einmal verwendbarer Batterie-Knopfzellen aufgeführt. Diese sollen die während der Nutzung der Hörhilfen anfallenden Kosten reduzieren. Akkumulatoren haben entscheidend zur Entwicklung von portablen elektronischen Geräten wie Mobiltelefonen und tragbaren Rechnern beigetragen. Die Verwendung von Akkumulatoren statt der in der Hörversorgung weit verbreiteten Zink-Luft Batterien wird zunehmend berücksichtigt (siehe [Amp22; Oti22a; Pho22a; Sig22a; Sta22; Wid22]). Die zu entwerfende Entwicklungsplattform soll daher ebenfalls mit wiederaufladbaren Batterien betrieben werden. [WHO21:105-107]

Es wird vorgegeben, dass ein Beschleunigungssensor im Aufbau enthalten sein soll. Dadurch können frühere bei der audifon GmbH & Co. KG geschriebene Abschlussarbeiten, die sich mit tasterloser Steuerung des Gerätes und Szenenklassifizierung unter Verwendung eines Beschleunigungssensors beschäftigt haben, praxisnah getestet und weiter verbessert werden (siehe [Ale20; Zve22]). Des Weiteren kann der Einfluss von Bewegung auf Audioverarbeitungsalgorithmen untersucht und berücksichtigt werden.

Des Weiteren soll ein microSD-Kartenanschluss integriert werden, um während der Erprobung von Algorithmen Daten komfortabel speichern und auslesen zu können.

Damit ergibt sich insgesamt folgendes Lastenheft:

1. Weitgehende Unabhängigkeit von herstellerepezifischer Hardware

Verwendung einer „commercial off-the-shelf“ (COTS) Hardware mit den Mindestleistungsmerkmalen: ARM Cortex M4f, 256 kB Random-Access Memory (RAM), 1 MB Non-Volatile Memory (NVM), drahtlose Kommunikationsfähigkeit zur Fernbedienung.

2. Eignung für Audiosignalverarbeitung

Anschlüsse für mindestens zwei Mikrofone und Audioausgang mit jeweils mindestens 16 Bit Auflösung und 20 ksps Abtastrate.

3. Programmierbarkeit in C

Flexibilität bei der Entwicklung von Algorithmen durch C-Programmierbarkeit.

4. Portabel sowie hinter dem Ohr platzierbar

Keine kabelgebundenen Erweiterungen an der Testplattform.

5. Strikt limitierter Ausgangspegel

Harte Begrenzung des Ausgangspegels durch die Hardware zur Sicherstellung der Sicherheit für Forscher, Entwickler und Probanden.

6. Energieeffiziente, zukunftssträchtige Energieversorgung

Verwendung von wiederaufladbaren Batterien, die eine Mindestlaufzeit von drei Stunden mit einer Akkuladung bereitstellen.

7. Anbindung eines Beschleunigungssensors mit mindestens drei Messachsen**8. microSD-Kartenanschluss für die Anbindung eines Massendatenspeichers**

1.3 Stand der Technik

Sowohl in der Vergangenheit als auch aktuell gibt es Bestrebungen Testplattformen für die Forschung und Entwicklung im Bereich Audiosignalverarbeitung und für die Verbesserung der Sprachverständlichkeit zu implementieren. Ziel und Umsetzung der bereits vorhandenen Entwicklungswerkzeuge unterscheiden sich jedoch von den Anforderungen, Zielstellungen und dem Fokus dieser Arbeit in vielerlei Hinsicht, auch wenn die Intention häufig Similarität aufweist.

Im Folgenden wird der Fokus auf Plattformen mit einer tragbaren Komponente gelegt, die für den Bereich Hörversorgung, insbesondere Audiosignalverarbeitung, gedacht sind. Die von einzelnen Hörgeräteherstellern intern implementierten Entwicklungshilfsmittel werden hier nicht berücksichtigt, da diese meist eine herstellereigenspezifische Hard- und Software besitzen, welche das Ziel der flexiblen Programmierung und des möglichst barrierefreien Wissenstransfers nicht unterstützen.

Eine käuflich zu erwerbende, quelloffene Audio-Plattform stellt „Tympan“ dar. Sie basiert auf dem Mikrocontroller – Entwicklungssystem Teensy, das in einem rechteckförmigen Gehäuse der Größe 40,5 mm × 74 mm angebracht ist (eine Angabe der Höhe ist leider nicht möglich, da hierzu zum Zeitpunkt der Recherche keine Informationen verfügbar waren). Die Tonausgabe erfolgt über einen an einer Klinkenbuchse anschließbaren Kopfhörer. [Tym22]

Bei dem Projekt „openMHA“ (open Master Hearing Aid) der Hörzentrum Oldenburg gGmbH handelt es sich um eine vorwiegend quelloffene Plattform für Echtzeit-Hörgerätesoftwareentwicklung. Der Fokus liegt hier auf einer hardwareunabhängigen, softwarebasierten Entwicklungsumgebung zur Simulation eines Hörgerätes. Eine separat angefertigte Hardware basiert auf einem BeagleBone

Black Einplatinencomputer mit Linux Betriebssystem, welcher um eine Mehrkanal-Audiokarte erweitert wird. Die Aufnahme der Signale sowie deren Ausgabe erfolgt für jedes Ohr über zwei Mikrofone und einen Hörer, welche im Gehäuse eines HdO-Gerätes angebracht sind. Bei einem Hörer handelt es sich in der Versorgung von Hörverlust um einen kleinen Lautsprecher. Die im Gehäuse befindlichen Komponenten sind jeweils über ein Kabel mit der tragbaren Hardware zur Signalverarbeitung (90 mm × 58 mm × 30 mm) verbunden. [HO22; KHM+21]

Eine Forschungsplattform der University of Texas at Dallas verfolgt das Ziel Sprachverständlichkeit und die Unterdrückung von Hintergrundgeräuschen unabhängig von den beschränkten Ressourcen in einem Hörgerät, mit teils rechenintensiven Signalverarbeitungsalgorithmen zu verbessern und eine entsprechende Möglichkeit zu finden die dafür notwendige Rechen- und Speicherkapazität bereitzustellen. Die vorgestellte Lösung besteht aus der Auslagerung der Signalverarbeitung auf den Prozessor eines Smartphones, welches mit den Bluetooth-fähigen Hörgeräten kabellos verbunden ist. [KP17]

Mitarbeiter der University of California San Diego haben Arbeiten an einer quelloffenen Soft- und Hardware umfassenden Forschungsplattform mit dem Namen „Open Speech Platform“ (OSP) veröffentlicht. Die Signalaufnahme und -ausgabe erfolgt ähnlich wie bei der Hardware von openMHA, indem sich in einer Gehäuseschale, welche wie ein konventionelles HdO-Gerät getragen wird, entsprechende Komponenten befinden. Im Gehäuse befindet sich laut der aktuellsten Veröffentlichung aus 2020 ein Mikrofon, eine Verstärkerschaltung und ein Hörer [SBZ+20:5]. Die Verarbeitung der Daten erfolgt auf einer externen und tragbaren Plattform (73 mm × 55 mm × 20 mm), welche über Kabel mit den Komponenten in den Gehäuseschalen verbunden sind. Über einen Embedded Web Server lässt sich die Software über jedes webfähige Gerät steuern. [PHS+18; PWZ+19; SBZ+20]

In Arbeiten, bei denen die Hardware ein Teil der Forschungsbestrebungen ist, wird vorwiegend auf ein Hardwaredesign mit FPGA zurückgegriffen [GAH22; SPB+15].

Die vorgestellten Arbeiten zeigen die Intention ein Hilfsmittel zur Entwicklung von Algorithmen für Hörgeräte zu implementieren, allerdings spiegeln sie die bei einem Hörgerät in der Praxis vorhandenen Restriktionen und Designbeschränkungen nicht wider. Anders als in dieser Arbeit werden bewusst rechenstarke Testplattformen bereitgestellt. Dadurch fehlt die direkte Adaptabilität zwischen Entwicklungsplattform und realistischem Endprodukt. Statt einer portablen Box oder dieser in Kombination mit zur Audioaufnahme verwendeten Hörgeräten ist die Umsetzung der Problemlösung in Form eines hinter dem Ohr tragbaren Hörgeräts hier essenziell. Die Forschungsergebnisse der Datenverarbeitung und die an die Hardware angepassten Algorithmen können für weitere Untersuchungen, Feldstudien und eigene Verbesserungen genutzt werden.

2 Grundlagen

Diese Arbeit verfolgt das Ziel, eine portable Testplattform für die Entwicklung von Audiosignalverarbeitungsalgorithmen in der Hörversorgung zu implementieren und dabei eine möglichst hohe Adaptabilität von Ressourcen und Funktionsweise zwischen einem in der Praxis verwendbaren Hörgerät und Entwicklungshilfsmittel aufzuweisen. Für die Erarbeitung einer Problemlösung bedarf es vorab der Darstellung von einigen theoretischen Grundlagen. Daher wird im Folgenden eine Auswahl von Kenntnissen zu Hörgeräten und zur Leiterplattenfertigung zusammengefasst.

2.1 Hörverlust und technische Hörsysteme

Wie bereits aus Kapitel 1 hervorgeht, steigt die Anzahl an von Hörverlust betroffenen Personen. Darüber hinaus ist die Hörversorgung sowohl für die Geschädigten als auch die Gesellschaft von essenzieller Bedeutung. Dies geht insbesondere aus dem Weltbericht über das Hören hervor. Es wird dringend empfohlen sowohl auf den Bedarf als auch die Mittel für die Versorgung der Ohr-gesundheit hinzuweisen. [WHO21:250]

Dies soll im Folgenden mit Fokus auf Kompensationsmöglichkeiten mittels eines Hörgeräts erfolgen. Dabei wird sowohl über Formen des Hörverlusts, Möglichkeiten zur Kompensation und Ausführungen der Hörhilfen, technische Details und Optionen zur funktionalen Bewertung von Hörsystemen informiert.

2.1.1 Charakterisierung von Schall in der Audiologie und Audiosignalverarbeitung

Die Sinneswahrnehmung des Hörens wird dem Menschen durch das auditorische System ermöglicht. Akustische Signale weisen physikalische Eigenschaften auf, die für eine auditive Wahrnehmung der darin enthaltenen Information interpretiert werden. Wird ein Objekt in Schwingung versetzt, entsteht ein *wahrnehmbarer Ton*, welcher sich als Schallwelle ohne beeinflussende Umgebung ungehindert kugelförmig um den Ursprung des Klangs mit einer bestimmten Geschwindigkeit abhängig vom Medium ausbreitet. Diese Weiterleitung entsteht durch die bei der Schwingung in Bewegung versetzten Moleküle, welche repetitiv auf einem lokal begrenzten Raum um deren Ruheposition gegen die benachbarten Moleküle stoßen. Dadurch entstehen abwechselnd verdichtete und verdünnte Bereiche, welche sich als Druckschwankungen im Medium ausbreiten und die Stärke des Schalls kennzeichnen. [KB18:20-22]

Akustische Signale lassen sich mithilfe der *Fourier Analyse* in einzelne sinusförmige Schwingungen mit einer bestimmten Frequenz, sogenannte reine Töne, zerlegen. Die Frequenz beschreibt bei akustischen Wellen, wie häufig ein Wechsel zwischen verdichtetem, verdünntem und erneut verdichtetem Bereich in der Luftmasse pro Sekunde stattfindet. Darüber hinaus beeinflusst sie die

wahrnehmbare *Tonhöhe* und ist daher eine wichtige Größe für die Audiologie. Weitere audiologisch relevante Parameter zur Beschreibung von sinusförmigen Schwingungen sind zum einen die Phase, die einen entscheidenden Einfluss auf das Zusammenspiel von unterschiedlichen Klängen hat. Zum anderen die Amplitude, welche hier die Differenz zwischen maximalem und minimalem Luftdruck während der Schwingung beschreibt und das Lautstärkeempfinden eines Tons bestimmt. [Dil12:8; KB18:21-29; Kom13:13-17]

Der mit der Amplitude beschriebene *Schalldruck* gibt die Kraft an, welche auf eine Flächeneinheit, durch die sich ausbreitende Welle ausgeübt wird. Er nimmt umgekehrt proportional zur zurückgelegten Distanz zwischen zwei Punkten ab und wird in Pascal (Pa) angegeben. Der Schalldruck wird meist auf einer logarithmischen Skala in Form von Pegeln und dementsprechend in dB vermittelt. Es werden keine absoluten Werte aufgeführt, vielmehr wird der Schalldruck auf eine Referenz bezogen. Handelt es sich hierbei um den minimalen Schalldruck, der durchschnittlich von jungen Erwachsenen zur Wahrnehmung eines 1 kHz Tones benötigt wird, was ungefähr 20 μ Pa entspricht, erhält die dB-Angabe den Zusatz *SPL* (Sound Pressure Level). Als Bezugswert ebenfalls gebräuchlich ist der zur Wahrnehmung notwendige frequenzabhängige Schalldruck eines normal hörenden, jungen Erwachsenen, die sogenannte Hörschwelle. Die Angabe erfolgt dann in *dB HL* (Hearing Level). Wird die Einheit *dBA* verwendet, ist der Schallpegel für die Nachbildung des frequenzabhängigen Hörempfindens mit einem sogenannten A-Bewertungsfilter gemessen worden, sodass Frequenzen unter 700 Hz und über 9 kHz abgeschwächt werden. Neben der A-Bewertung gibt es weitere aber in der Hörversorgung weniger gebräuchliche Bewertungsfilter wie beispielsweise B, C oder D. [Dil12:8; KB18:30-31, 172; Kom13:19-22]

In der Digitaltechnik sind Angaben in *dB FS* (decibel relative to full scale) gebräuchlich, da Analog-Digital-Wandler wie auch Digital-Analog-Wandler in der Darstellbarkeit von Zahlenbereichen, welche von der Auflösung des Wandlers abhängen, beschränkt sind. Bei der Angabe eines digitalen Wertes in dB FS wird dieser daher auf den höchsten darstellbaren Wert, den sogenannte Skalenendwert, bezogen, bevor eine logarithmische Darstellung dieses Pegels erfolgt. [RS22:30]

Über die *Lautheit* eines Tons sei an dieser Stelle lediglich gesagt, dass sie vom Schallpegel abhängig ist. Es bedarf jedoch für dieselbe subjektiv empfundene Lautheit über die für einen normal hörenden Menschen wahrnehmbaren Frequenzen zwischen 20 Hz und 20 kHz unterschiedlicher Schalldruckwerte. Hohe und tiefe Töne werden unterschiedlich laut empfunden. [BH03; KB18:50-51; PS19:496-497]

Für mehr Informationen zur Lautheitswahrnehmung wird auf [Kol97] verwiesen.

2.1.2 Hörverlust

Es gibt verschiedene Typen von Hörverlust, welche kombiniert auftreten können. Die Fähigkeit des Hörens geht mit einer fehlerfreien Schallübertragung und Interpretation der im Schall enthaltenen Informationen in Form von physikalischen Charakteristika wie Frequenz, Schallintensität und Phase einher [WU19:25]. Diese können als Fehler in der Schallübertragung bezeichnet und abhängig vom Ort der Beeinträchtigung klassifiziert werden [UH17:120].

Schallleitungsschwerhörigkeit tritt in Form einer behinderten Weiterleitung von Schall zwischen äußerem Ohr und Innenohr auf. Sind Störungen bei der Umwandlung von Schall in elektrische Signale sowie deren anschließender Weiterleitung vorhanden, handelt es sich um *Schallempfindungsschwerhörigkeit*. Der letzte Grundtyp des Hörverlusts beschreibt Beeinträchtigungen bei der Wahrnehmung des Schalls. Kommt es zu *zentralen Hörstörungen*, bedeutet das, dass die Verarbeitung des in elektrische Signale gewandelten Schalls im Zentralnervensystem geschädigt ist. [Kom13:71; UH17:120-130]

Zur Überprüfung und Dokumentation des Hörvermögens werden *audiologische Messungen* durchgeführt. Werden diese grafisch aufbereitet, bezeichnet man sie als Audiogramme, welche essenziell für audiologische Untersuchungen und die letztliche Beurteilung des Hörvermögens sind. [Kom13:37]

Hörverlust kann von mild bis zu einer schwerwiegenden Beeinträchtigung reichen. Damit äußert sich die Spannweite der Störung von nicht hörbaren Geräuschen einzelner weicher Töne bis hin zu laut gesprochener Sprache. Des Weiteren geht Hörverlust mit mehreren Aspekten einher, welche sich als Behinderung im alltäglichen Leben zeigen. Es entsteht ein erschwertes Sprachverstehen, da manche Töne entweder überhaupt nicht oder falsch wahrgenommen werden. Zudem kann es zu einer Verringerung des Dynamikbereichs, der Spannweite zwischen Hörbarkeits- und Unbehaglichkeitsschwelle oder der Schwierigkeit, Töne unterschiedlicher Frequenzen zu unterscheiden, kommen. Die frequenzabhängige Unbehaglichkeitsschwelle stellt den Schallpegel dar, ab welchem die Testperson Töne und Geräusche als zu laut empfindet. Wahrnehmungsstörungen der zeitlichen Auflösung von Signalen erschweren die Erfassung von Informationen schwacher Signale bei gleichzeitigem Vorhandensein von Hintergrundgeräuschen zusätzlich. Hörgeschädigte Personen benötigen in der Regel für die Erfassung von Wörtern in Sprache ein höheres Signal zu Rausch Verhältnis (Signal to Noise Ratio – SNR) als Normalhörende. In diesem Kontext stellt das zuvor erwähnte informationsbehaftete Signal das Signal und die Hintergrundgeräusche das Rauschen dar. Kombinationen dieser Aspekte ziehen eine geringere Erfassung des Gesagten in einer Kommunikation nach sich. [Dil12:2-8]

2.1.3 Hörversorgungsmittel der Ohrgesundheits

Die Versorgung eines Hörverlusts ist heutzutage mit technischen Hilfsmitteln möglich, wobei es hierbei zwei Hauptkategorien gibt. Einer Schätzung zufolge kann rund 90 – 95% der Betroffenen mit einem Hörsystem in Form eines Hörgerätes mit großem Nutzen für den Personen geholfen werden. Damit nimmt das Hörgerät die wichtigste Rolle in der Hörversorgung ein. Ist der Hörverlust zu stark oder ist die Nutzung eines Hörgerätes nicht möglich, kann eine Hilfe in Form eines teil- oder vollimplantierten Hörsystems erfolgen. [KB18:320-326; VTD16:352]

Hörgeräte

Hörhilfen haben ihren Ursprung in Gesten wie eine Hand hinter das Ohr zu legen und Werkzeugen wie einer Ohrtrumpete. Die Möglichkeiten waren mit diesen Formen zur Unterstützung des Gehörs beschränkt. Heutzutage befinden wir uns in einem digitalen Zeitalter, das zudem zunehmend kabellos wird. Die zum Einsatz kommenden Hörgeräte haben sich von analogen in volldigitale Hörsysteme gewandelt. Nicht nur die Größe und das Aussehen haben sich massiv geändert, sondern auch die Möglichkeiten und die Qualität der Hörversorgung, was zu einer Steigerung der Lebensqualität beigetragen hat. [Dil12:18-19; Tay21:269-270]

Damit stellen Hörgeräte technische Hörhilfen in Form eines elektronischen Gerätes dar, die insbesondere für Personen mit einem Hörverlust im Hauptsprachbereich, dem Frequenzbereich zwischen 500 Hz und 4 kHz, ein wertvolles Hilfsmittel sind. Diese Schwerhörigkeit kann von mild mit ungefähr 30 dB HL bis stark mit rund 80 dB HL reichen. Beeinträchtigungen können sich in Form von Schwierigkeiten beim Verfolgen von Gesprächen bei gleichzeitigen Hintergrundgeräuschen bis hin zu permanenten Problemen beim Sprachverstehen im Alltag und selbst in ruhiger Umgebung zeigen. [Hum19:12-13; Kom13:211-212]

Unterschiedliche Bauformen von Hörgeräten bringen verschiedene Vorteile mit sich, welche bei der individuellen Hörversorgung neben der Anpassung des Gerätes entsprechend den Bedürfnissen der Personen durch einen Hörgeräteakustiker eine Rolle spielen können (siehe 2.1.5).

Die Funktionsweise eines digitalen Hörgerätes beruht darauf, Schall so zu verändern, dass er für die geschädigte Person wieder wahrnehmbar ist und lässt sich in folgende, elementare Schritte unterteilen: Akustische Signale in Form von einfallendem Schall werden von Mikrofonen erfasst, in elektrische Signale gewandelt, welche wiederum verarbeitet und entsprechend dem auszugleichenden Hörverlust verstärkt werden. Abschließend werden diese wieder in akustische Signale gewandelt und über einen Hörer ausgegeben. [Kom13:212; Sou09:1817; UH17:776]

Von elementarer Bedeutung für die individuelle Behandlung der Beeinträchtigung ist die Signalverarbeitung. Diese kann durch die Programmierung eines digitalen Hörgerätes in Form von einer Vielzahl veränderbarer Parameter für die Hörgeräteeinstellung beeinflusst werden [KB18:338].

Ziel ist es, den Verstärkungsbedarf unter Berücksichtigung der Unbehaglichkeitsschwelle bereitzustellen, das Sprachverstehen zu verbessern sowie Komfort und Nutzen durch das Gerät bei gleichzeitiger Akzeptanz der das Hörsystem tragenden Person beispielsweise durch bevorzugte Klangeindrücke sicherzustellen. [KB18:326; Kom13:222; UH17:1099-1102]

Moderne Hörgeräte weisen eine fortschrittliche Signalverarbeitung auf, indem die Möglichkeiten durch die Digitalisierung genutzt und immer weiter verbessert werden. Insgesamt lassen sich vier Hauptziele in der Hörversorgung nennen: Eine angenehme Lautstärke bei gleichzeitiger Hörbarkeit und Verständlichkeit, adäquates Hören bei Hintergrundgeräuschen, Sprachverständlichkeit bei Hintergrundgeräuschen und ein gesteigerter Komfort sowie Benutzerfreundlichkeit. [Dil12:18-19; Tay21:312-314]

Implantierbare Hörhilfen

Wenn der Hörverlust sehr stark ist oder es einer speziellen Art der Versorgung aufgrund von anatomischen Gegebenheiten oder Entzündungen im Gehörgang beispielsweise bedarf, können implantierbare Hörhilfen eingesetzt werden. Diese werden jeweils für unterschiedliche Arten von Hörverlust und Bedürfnisse verwendet. Sie lassen sich in teil- und vollimplantierbare Hörgeräte sowie Cochlea Implantate und Hirnimplantate aufteilen. Sie stimulieren das auditorische System und können damit selbst Gehörlosen wieder Höreindrücke verschaffen. [KB18:326:349; UH17:791; WU19:255]

2.1.4 Technologie in einem Hörgerät

Die Signalverstärkung und -verarbeitung erfolgt in den heutzutage verwendeten Hörhilfen digital, weshalb diese als (voll-) digitale Hörgeräte bezeichnet werden. Die Audiosignale müssen für die Verarbeitung werte- und zeitdiskret sein. Dabei entstehen Signallaufzeiten zwischen Eingangs- und Ausgangssignal, welche kleiner als fünf Millisekunden sein sollten, damit keine Probleme bei der Anpassung auftreten (siehe Latenz in Kapitel 2.1.6). Digitale Hörsysteme bringen einige Vorteile mit sich, was die individuelle akustische Anpassung, Möglichkeiten der Signalverarbeitung, Nutzerkomfort als auch verringerte Größe und Energiebedarf betreffen. Eine Vielzahl von Parametern kann verändert werden, Hörsituationen können erfasst und die Parameter entsprechend eingestellt werden, Störschall und akustische Rückkopplungen werden reduziert und die Audiosignalverarbeitung wird zunehmend fortschrittlicher. Die Komplexität der implementierten Algorithmen wird von der bereitstellbaren Energie und hinsichtlich der verfügbaren Fläche begrenzten Ressourcen innerhalb des Hörgerätes beschränkt. [Dil12:18; UH17:782-783]

Innerhalb des hautverträglichen Gehäuses befindet sich die Hardware bestehend aus Wandlern, Elektronik und elektromechanischen Baugruppen [UH17:801]. In Abbildung 2.1 wird eine schematische Darstellung zur Technologie in einem Hörgerät gezeigt, deren Elemente erläutert werden.

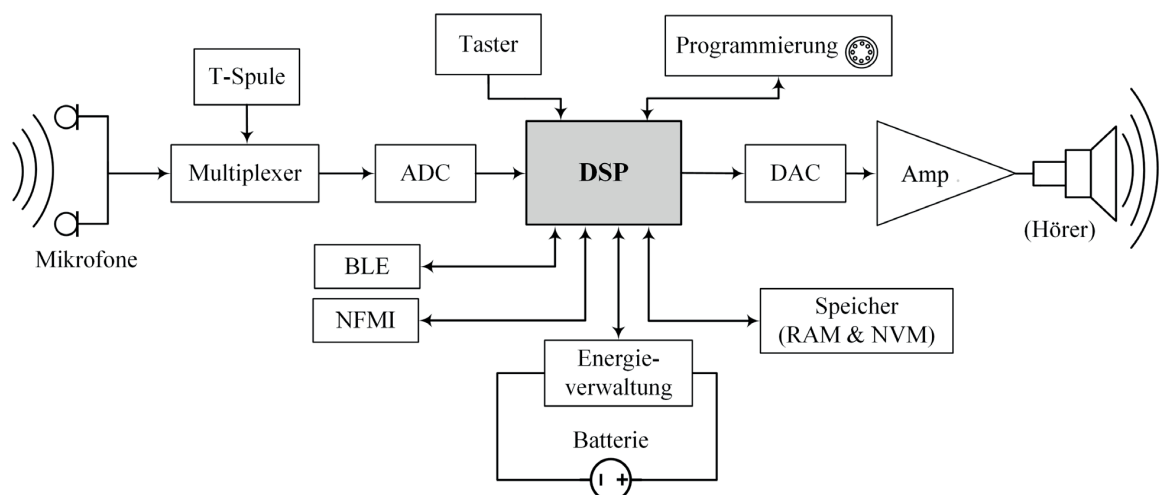


Abbildung 2.1: Technologie in einem Hörgerät.

Die grundsätzliche Funktionsweise eines Hörgerätes ist bereits in 2.1.3 beschrieben worden. Hier wird den skizzierten Prozessschritten folgend auf die dabei beteiligten Komponenten als auch deren Beteiligung bei der Kompensation eines Hörverlusts eingegangen.

Audiosignale werden mithilfe von Mikrofonen erfasst und in elektrische Signale gewandelt. Es handelt sich um Elektret-Kondensatormikrofone oder mikro-elektromechanische (MEMS) Mikrofone. Letztere werden zunehmend in modernen Hörgeräten verwendet, da sie kleiner als auch zuverlässiger sind und vorhersagbarer arbeiten. Des Weiteren zeigen sie bei der Herstellung einige Vorteile. Bei der Erfassung von Schallwellen können Verunreinigungen des Signals durch Eigenrauschen oder Vibrationen entstehen. Wind- und Störgeräusche können ebenfalls aufgenommen werden, die relevanten Signalkomponenten verdecken und ein gutes Sprachverstehen erschweren. Die Positionierung des Mikrofons beziehungsweise der Mikrofone und des Lautsprechers, auf den später noch eingegangen wird, muss wohlüberlegt erfolgen, damit es zu keiner Rückkopplung kommt. Derzeit werden meist zwei Mikrofone für jedes Hörgerät verwendet. Dadurch können sie als Richtmikrofone dienen und anders als omnidirektionale Mikrofone, welche aus allen Richtungen Signale gleichwertig aufnehmen, frontal einfallende Geräusche mit einer höheren Empfindlichkeit erfassen. Ein besseres Sprachverstehen während einer Kommunikation bei gleichzeitig vorhandenen störenden Hintergrundgeräuschen kann auf diese Weise erreicht werden. Abhängig von der Hörsituation kann zwischen omnidirektionaler Charakteristik und Richtcharakteristik gewechselt werden. [Dil12:20-28; UH17:804-805]

Trägt eine hörgeschädigte Person sowohl links als auch rechts ein Hörgerät, können diese drahtlos verbunden sein. Sie werden als binaurale Hörgeräte bezeichnet und bringen weitere Vorteile mit sich. Das Hören mit beiden Ohren ermöglicht einer Person ohne Hörbeeinträchtigung ein räumliches Hören. Schallquellen können lokalisiert werden und eine hohe Sprachverständlichkeit trotz herausfordernder Hintergrundgeräusche wird sichergestellt, indem beispielsweise das relevante Sprachsignal und maskierende Geräusche räumlich getrennt werden. Dafür werden die von beiden Ohren erfassten Informationen verglichen und sowohl Laufzeit- als auch Pegelunterschiede ermittelt. Moderne Hörgeräte sind verbunden, um die Informationen aller Mikrofone für komplexe Signalverarbeitungsalgorithmen zu nutzen. Eine Trennung zwischen Stör- und Nutzsignal wird erleichtert und räumliche Hinweise für die Lokalisierung von Geräuschen als auch die Orientierung im Raum können für den Hörgeräteträger bewahrt werden. Es zeigt sich, dass die Versorgung mit bilateralen Hörgeräten zu einer höheren Akzeptanz und Nutzungsdauer des Hörsystems beim Nutzer führt. [BR17; BSZ+09; CLE+181-2; UH17:151-153]

Die von Mikrofonen erfassten und in elektrische Spannung gewandelten Signale müssen von Analog-zu-Digital Wandlern in eine sowohl zeit- als auch wertdiskrete Darstellung gebracht werden [Dil12:31-32]. Eine Signalverarbeitung wird durch einen Signalprozessor, dem zentralen Element des Hörgeräts, durchgeführt. Digitale Signalprozessoren für Hörgeräte sind auf Audioverarbeitung spezialisiert. Sie müssen Einschränkungen wie dem stark beschränkten Platzbedarf und Erfordernissen wie geringem Leistungsverbrauch, Echtzeitfähigkeit und Rechenkapazität entgegenkommen und gleichzeitig Flexibilität bei der Programmierung bieten. [GPB21:1-12]

Bevor die Person von der digitalen Signalverarbeitung profitieren kann, muss das digitale Signal in ein analoges gewandelt werden. Dies erfolgt durch einen Digital-Analog-Wandler. Bei digitalen Hörgeräten kann auch ein anderes Vorgehen gewählt werden. Ähnlich wie bei einem digitalen Verstärker werden die von mehreren Bits dargestellten Abtastwerte in ein sich schnell änderndes, einzelnes Bit gewandelt, welches vom Hörer geglättet und für den Höreräteträger als für ihn angepasstes akustisches Signal ausgegeben wird. [Dil12:36]

Der Hörer erzeugt das akustische Signal. Neben elektromagnetischen Ausführungen kommen zunehmend MEMS-Hörer zum Einsatz. Das ausgegebene, hörbare Signal kann durch die Frequenzantwort des Hörers ungleichmäßig verstärkt sein. Diese Unebenheiten müssen berücksichtigt werden. Besonders auffällig sind hierbei die als Spitzen in der Frequenzantwort erkennbaren Resonanzfrequenzen. [BRSE20; Dil12:41-43; UH17:806]

Hörgeräte enthalten neben der Signalerfassung über Mikrofone die Möglichkeit kabellos Signalübertragungen durchzuführen. Historisch bekannt ist vor allem die Telefonspule (T-Spule). Hier können Signale induktiv übertragen werden, indem elektromagnetische Felder von der Spule erfasst werden und eine entsprechende Spannung erzeugt wird. [Dil12:43-44; UH17:806]

Relevante Funkstandards für den Nahbereich zur Datenübertragung bei Hörgeräten sind Near Field Magnetic Induction (NFMI) und Bluetooth Low Energy (BLE). [UH17:883-886]

Der Nutzer kann mit dem Gerät über elektromechanische Elemente wie Taster interagieren. Diese können beispielsweise für eine Lautstärkeregelung oder als Ein-/Ausschaltknopf dienen [KB18:327; Kom13:212]. In den letzten Jahren hat sich durch die kabellosen Verbindungen des Weiteren zunehmend die Möglichkeit, die Bedienung der Hörhilfe ferngesteuert vorzunehmen, wie beispielsweise über Applikationen auf einem Mobiltelefon, etabliert. Technologien zur Fernsteuerung eines Hörgerätes arbeiten häufig mit Ultraschall und BLE. Insbesondere die zunehmende Miniaturisierung der Geräte erfordert für eine umfassende Bedienung der Hörhilfe durch die Personen selbst eine Alternative zur Gerätekontrolle über elektromechanische Elemente am Gehäuse. [Dil12:44-45]

Eine Batterie oder ein Akkumulator versorgen das Gerät mit der nötigen Energie. Insbesondere bei der Verwendung von Batterie-Knopfzellen ist es von essenzieller Bedeutung, dass die Hörgeräte einen geringen Leistungsbedarf haben, um eine möglichst lange Nutzung ohne Wechsel der Energiequelle zu ermöglichen. Die für Hörgeräte am häufigsten verwendeten Batterien sind Zink-Luft-Knopfzellen, da sie eine vorwiegend waagerechte Entladecharakteristik aufweisen. Hörhilfen, welche mit wiederaufladbaren Batterien betrieben werden, sind zunehmend erhältlich. Sie werden zum Beispiel über Nacht in einer Ladestation aufgeladen. Die maximal mögliche Nutzungsdauer mit einer neuen Batterie oder einem Akku-Ladezyklus wird von der Kapazität und vom Strombedarf bestimmt, welcher von der Systemaktivität, Tragezeit und von akustischen Parametern abhängt. [Dil12:46-49; KB18:327; UH17:817-818]

Die Programmierung der Hörhilfen findet über eine Programmierschnittstelle statt, um die Kommunikation zwischen diesem und einem Computer herzustellen. Der Akustiker kann die einstellbaren Parameter in einer Anpasssoftware für die Person individuell entsprechend dem

Befund seiner audiologischen Untersuchungen verändern. Hörgerätehersteller bieten den Hörgeräteakustikern meist eine eigene Anpassplattform an (siehe [aud19; Ber22; Oti22b; Phi22; Pho22b]). [UH17:1194]

Abschließend sei erwähnt, dass in den letzten Jahren zunehmend sehr rechenintensive Algorithmen entwickelt worden sind. Dies betrifft insbesondere Algorithmen kombiniert mit Deep Learning oder für binaurales Hören (siehe [CGP+19; LCY20; MPK11; OYZ+19]).

2.1.5 Formfaktoren von Hörgeräten

Es gibt verschiedene Bauformen von Hörgeräten, um den Bedürfnissen der Personen entgegenzukommen. Diese gehen mit unterschiedlichen Vor- und Nachteilen einher und werden abhängig von der Trageposition bezeichnet. Die beiden wichtigsten Bauformen sind in dem Ohr (IdO) und hinter dem Ohr (HdO) tragbare Hörsysteme. Speziellere Bauformen sind ein Dauertragegerät und eine Hörbrille, eine ältere Ausführung stellt das Taschengerät dar.

Im Rahmen dieser Arbeit sind vorwiegend die HdO-Geräte relevant, da im Lastenheft die Forderung nach einer portablen und hinter dem Ohr tragbaren Plattform gestellt worden ist (siehe Kapitel 1.2). Für weitere Informationen siehe [Dil12:11-13; KB18:332-337; Kom13:213-214; UH17:777-780].

Die Elektronik muss nicht in einem individuellen Ohrpassstück platziert werden, sondern in einem hautverträglichen Gehäuse. Bedienelemente sind leicht erreichbar und meist sind zusätzliche Funktionen implementiert, da mehr Platz zur Verfügung steht als bei IdO-Geräten. Bei HdO-Geräten handelt es sich um die am häufigsten angepassten Hörhilfen. Des Weiteren kann diese Bauform nicht nur für leichten und mittelschweren Hörverlust verwendet werden, wie IdOs, sondern auch für eine schwere Beeinträchtigung. [Kom13:213-214; UH17:778]



Abbildung 2.2: HdO-Geräte mit Schallschlauch (links) und mit RIC-Modul (rechts).

Innerhalb der Klasse HdO-Geräte gibt es zwei Ausführungen (siehe Abbildung 2.2). Der Hörer kann im Gehäuse platziert oder wie heute üblicher in den Gehörgang ausgelagert sein. Bei Ersterem wird der verstärkte und bearbeitete Schall über einen Tragehaken beziehungsweise einen Winkel und einen Schallschlauch zu einer Otoplastik (Ohrpassstück) geführt. Unauffälliger ist die zweite Variante, welche als Ex-Hörer-Gerät (Receiver-In-The-Ear – RITE oder Receiver-In-Channel – RIC) bezeichnet wird. Der Schallschlauch kann hierbei durch eine dünne Kabelleitung ersetzt werden, indem der Hörer im Gehörgang gelagert und von einem Silikonschirmchen gehalten wird.

Abhängig vom Grad des Hörverlusts können verschiedene Leistungsvarianten zum Einsatz kommen. [Dil12:11-12; UH17:778]

2.1.6 Funktionale Bewertung von Hörsystemen

Die Funktionalität und insbesondere die vorhandene Verstärkung am Ausgang von Hörgeräten müssen überprüft werden. Neben Messungen, die eine korrekte Anpassung des Systems an die Bedürfnisse der Personen sicherstellen, muss ein Hörgerät zur Beurteilung der Funktion sowie zur technischen Kontrolle getestet werden, bevor es zur Anwendung kommt. Dafür gibt es verschiedene Methoden und Hilfsmittel, um aussagekräftige Messungen durchführen zu können. Im Folgenden wird eine Auswahl an relevanten Verfahren dargestellt.

Messbox

Zur wiederholbaren Erfassung von akustischen Daten ohne eine Person wird zur Sicherstellung einer kontrollierten Umgebung häufig eine Messbox wie in Abbildung 2.3 verwendet.



Abbildung 2.3: Messbox TBS25 von Interacoustics mit Messmikrofon und Kuppler.

Sie stellt im Wesentlichen einen akustischen Messraum dar, der Umgebungsgeräusche dämpft und die Reflexionen innerhalb des Raums verringert. Diese bildet, ergänzt um Signalgenerator, Lautsprecher, Messmikrofone und Schallpegelmesseinrichtungen, ein Messsystem. Des Weiteren werden Kuppler benötigt, um die Hörer des zu testenden Systems mit kalibrierten Messmikrofonen und anschließend mit dem Schallpegelmesser verbinden zu können. Beispielhaft wird nachfolgend in Abbildung 2.4 ein 2cc Kuppler von Brüel & Kjær mit Adapter für im Ohr getragene Hörhilfen und Schallschlauch, sodass HdO-Geräte mit RIC ebenfalls befestigt werden können, gezeigt [BK16].

Es handelt sich um einen metallenen Hohlraum, welcher ein kleines Luftvolumen einschließt und den Hörer belastet, um das reale Ohr approximativ nachzubilden. Es gibt verschiedene Ausführungen, am relevantesten in der Hörakustik ist die Variante mit einem Volumen von 2 cm^3 (2 cc) zur approximativen Nachbildung des Gehörgangs eines Erwachsenen. Wird ein HdO-Gerät vermessen, so wird der Kuppler mit einem Schallschlauch verbunden. Die Impedanz des Kupplers weist ebenfalls eine Frequenzabhängigkeit auf und entspricht approximativ der eines durchschnittlichen Erwachsenen. Ein Kontroll- beziehungsweise Referenzmikrofon erfasst den dargebotenen

Schalldruckpegel. Für eine Messung mit der Messbox werden von einem Signalgenerator Testsignale erzeugt und über einen Lautsprecher innerhalb dieser ausgegeben. Das zu testende Hörsystem erfasst diese Signale und gibt sie aus, nachdem sie verarbeitet und verstärkt worden sind. Da die Hörhilfe über einen Kuppler mit dem Messsystem verbunden ist, erfasst das Messmikrofon diese wiederum. [Dil12:82-86; UH17:1019-1024]



Abbildung 24: 2 cc Kuppler von Brüel & Kjær mit Adapter für IdO sowie HdO mit RIC.

Messsignale

In der messtechnischen Analyse kommen verschiedene Messsignale zum Einsatz. Die üblichsten Messungen werden mit Reintönen, beispielsweise Sinussignale, unterschiedlicher Frequenz im Bereich zwischen 125 Hz und 8 kHz gemacht. Bei einer realitätsnäheren Vorgehensweise werden Breitbandsignale verwendet, die mehrere Frequenzen gleichzeitig bereitstellen, um alltägliche Geräuschkulissen nachzubilden. Es können auch Rauschsignale, welche zeitlich zufällige Signalschwankungen aufweisen, als Messsignal dienen. Für aussagekräftige Kontrollen komplexer Algorithmen und der Verstärkung durch ein Hörsystem bedarf es sprachähnlicher standardisierter Testsignale. Dafür muss das Signal eine Reihe an charakteristischen Merkmalen von Sprachsignalen aufweisen. [Dil12:87-88; UH17:1037-1039]

Ein Beispiel für ein international standardisiertes Sprachsignal ist das International Speech Test Signal (ISTS) der European Hearing Industry Manufacturers Organization (EHIMA), welches Teil des Hörgerätstandards IEC 60118-15 ist. Dieser Standard beschäftigt sich mit Möglichkeiten zur Überprüfung der Signalverarbeitung in Hörsystemen. [HFVK10]

Messverfahren

In einer Messbox werden mit den Parametern Eingangs- und Ausgangspegel sowie Frequenz zwei Standard-Messungen durchgeführt. Es handelt sich hierbei um die Bestimmung des Frequenzgangs und der statischen Dynamikkennlinie.

Zur Auswertung der Messsignale werden für gewöhnlich das RMS- (Root Mean Square – Effektivwert) oder DFT-Verfahren (Discrete Fourier Transform – Diskrete Fourier Transformation) verwendet. Ersteres wird bei Messungen mit Reintönen eingesetzt. Für aussagekräftige Werte sollte die Messdauer abhängig von der Frequenz und der Fluktuation des Signals gewählt werden, um mindestens eine Schwingungsdauer sowie ausreichend Signalschwankungen zu berücksichtigen.

Es sollte mindestens eine Schwingungsdauer berücksichtigt und bei starken Fluktuationen ein größeres Zeitfenster gewählt werden. Die Wahl des Zeitfensters ist bei dem DFT-Verfahren ebenso relevant. Hier wird das Signal in den Frequenzbereich transformiert und die Amplituden der enthaltenen Frequenzen ermittelt. Die Verstärkung des Hörsystems kann berechnet werden, indem sowohl für das Mess- als auch das Referenzmikrofon eine DFT berechnet und die Ergebnisse subtrahiert werden. [UH17:1035-1037]

Bei der Ermittlung des Frequenzgangs wird der Ausgangspegel gemessen, während der Eingangspegel konstant gehalten und die Frequenz variiert wird. Die Messkurve wird als Übertragungsfunktion bezeichnet. Da die Verstärkung aus der Differenz von Aus- und Eingangspegel berechnet wird, lässt sich hier auch die Verstärkung über die Frequenz als Variable auftragen. Es werden die Messkurven mit mehreren konstanten Eingangspegeln in einem Diagramm eingezeichnet. Die Dynamikkennlinie kann aufgezeichnet werden, indem bei einer festen Frequenz oder für ein Breitbandsignal der Ausgangspegel für variierende Eingangspegel notiert wird. Auch hier kann statt des Ausgangspegels die entsprechende Verstärkung aufgezeichnet werden. [Dil12:88-92; UH17:1026-1029]

Harmonische Gesamtverzerrung

Verzerrungen sind in der Signalverarbeitung unerwünscht, da das informationstragende Signal verändert und die Qualität eines akustischen Signals negativ beeinflusst wird. Eine Veränderung der Signalform führt zu der Entstehung von Verzerrungsprodukten, indem Signalenergie bei Frequenzen, welche nicht im ursprünglichen Signal enthalten sind, auftaucht. Passiert dies bei Reintönen, spricht man von harmonischen Verzerrungen, da Vielfache der Grundfrequenz entstehen. Indem die Signalenergie der unerwünschten Verzerrungen mit der Gesamtsignalenergie in Relation gesetzt wird, lässt sich die harmonische Gesamtverzerrung (Total Harmonic Distortion – THD) in Prozent oder dB angeben. In den nachfolgenden Formeln (2-1) und (2-2) beschreibt p_n den Schalldruck der n -ten Harmonischen. Die erste Oberschwingung p_1 ist das unverzerrte Grundsignal.

$$\text{THD}_{\%} = 100 \sqrt{\frac{p_2^2 + p_3^2 + p_4^2 + \dots}{p_1^2 + p_2^2 + p_3^2 + p_4^2 + \dots}} \% \quad (2-1)$$

$$\text{THD}_{\text{dB}} = 10 \log_{10} \left(\frac{p_2^2 + p_3^2 + p_4^2 + \dots}{p_1^2 + p_2^2 + p_3^2 + p_4^2 + \dots} \right) \text{ dB} \quad (2-2)$$

[Dil12:92-93]

Eigenrauschen

Das Eigenrauschen eines Hörsystems wird vorwiegend vom Verstärker und den Mikrofonen erzeugt und äußert sich als elektrisches Störgeräusch. Die Stärke dessen wird häufig als äquivalentes Eigenrauschen angegeben. Dies entspricht dem Rauschen, das bei einem rauschfreien Gerät mit derselben Übertragungsfunktion angelegt werden muss, um am Ausgang dasselbe Rauschen zu

erhalten. Für eine messtechnische Erfassung wird meist mit Frequenzbändern gearbeitet. Das Ausgangssignal muss dafür durch Filterung in mehrere Bänder zerlegt werden, bevor für jedes Band der Ausgangspegel und die Verstärkung der Mittenfrequenz in dB bestimmt werden. Eine Differenz dieser Werte ergibt das äquivalente Eingangsrauschen für jedes Frequenzband. [Dil12:93-94]

Latenz

Der Ausgang des Hörgerätes ist gegenüber dem Eingang verzögert. Diese Verzögerung ist bedingt durch die Hardware als auch die Signalverarbeitung. Audiosignale müssen erfasst, verarbeitet und wieder hörbar gemacht werden. Diese Verzögerungszeiten werden auch Latenz genannt und können frequenzabhängig sein. [Dil12:35-36]

Abhängig vom Hörverlust und von der Dauer der Verzögerung kann die Latenz für die Person störend sein. In Studien von Stone, Moore und Kollegen ist die störende Wirkung unterschiedlicher Latenzen untersucht worden. Die Ergebnisse weisen darauf hin, dass sich bei einem mittleren Hörverlust Verzögerungen von 20 ms bis 30 ms bereits sehr störend auswirken. Bei einem leichten bis schweren Hörverlust im Tieftonbereich haben Probanden eine geringere Störung durch die Verzögerungszeit empfunden. Ist die Latenz größer als 30 ms, wird das eigene Sprechen zusätzlich erschwert. Es lässt sich festhalten, dass in Abhängigkeit des Hörverlusts eine störende Wirkung der Latenz auftritt. In der Literatur wird auf eine akzeptable Verzögerung von 10 ms hingewiesen, Stone und dessen Kollegen stufen Latenzen von 5 ms bis 6 ms als akzeptabel ein. [Dil12:36; SM02; SM03; SM05; SM99; SMM+08]

2.2 Systemdesign und Leiterplattenentwurf

Elektronische Systeme spielen in unserer modernen Welt und im digitalen Zeitalter eine zentrale Rolle, da sie ein wichtiger Teil unseres Alltags geworden sind. Eine Vielzahl von elektronischen und teilweise mechanischen Komponenten müssen dafür elektrisch verbunden werden, um eine funktionsfähige Baugruppe bilden zu können. Die Leiterplatte (PCB – Printed Circuit Board) stellt seit ihrer Erfindung Anfang des 20. Jahrhunderts eine der bekanntesten und gebräuchlichsten Realisierungsmöglichkeit dar, indem sie als räumlich begrenzter Träger von Bauteilen als auch Stromführungen fungiert. Über die vergangenen Jahrzehnte hinweg hat sich die Leiterplatte weiterentwickelt und kann komplexe Schaltungen realisieren, indem bis zu 48 Ebenen zur Verdrahtung genutzt werden können. [EW89:35; HEG21:96-100]

Im Folgenden wird auf detaillierte Grundlagen der Leiterplattentechnologie zur Herstellung und zu Charakteristika verzichtet. Es wird hierfür auf [JK03; Zic18] verwiesen. Vielmehr werden Aspekte in der Entwicklung eines elektronischen Systems aufgezeigt und der Entstehungsprozess vom Schaltplan auf Papier zu den Fertigungsdaten einer Leiterplatte skizziert. Außerdem wird auf Richtlinien und einige Aspekte hinsichtlich der elektromagnetischen Verträglichkeit eingegangen, die beim Layout einer Platine bedacht werden sollten.

2.2.1 Systemdesign

Elektronische Systeme durchlaufen während ihres Entwicklungsprozesses verschiedene Stadien, welche mit einer technischen Dokumentation, die alle notwendigen Informationen zur Produktion enthält, abgeschlossen werden. Der Entwicklungsprozess eines Systems wird gefolgt vom Marketing und Verkauf [LB17:5].

Bis es zu einem vermarktbar Produkt kommt, muss während der Ausarbeitungsphase die Planung eines Produktes erfolgen, gefolgt von Design und Entwicklung sowie dem Bau eines ersten Prototyps zur Erprobung. Während der Planung werden Ideen gesammelt sowie das Entwicklungsvorhaben, die Machbarkeit sichergestellt und eine entsprechende Systemspezifikation definiert. Hierbei werden in einem Lastenheft die Anforderungen an das System durch den Auftragsteller aufgeführt, wobei auch Zielvorgaben hinsichtlich Funktionsumfang und Kosten enthalten sein können, bevor ein für die Entwicklung relevantes Pflichtenheft mit einer detaillierten Beschreibung der Aufgabe und einem Lösungsweg erstellt wird. Dafür werden Informationen zu den Anforderungen gesammelt, um die Aufgabenstellung zu analysieren und mit Details innerhalb dieser Spezifikation wie beispielsweise Definitionen der Schnittstellen sowie Ein- und Ausgangssignalpegel, Funktionen des Systems oder Abmessungen der Baugruppe aufzuführen. Anhand dessen wird ein Konzept zur Lösung der Aufgabenstellung auf Grundlage der technischen Ausführungen erarbeitet. Das Konzept wird konkretisiert, ein Systementwurf erstellt und die Kosten kalkuliert. Technologische, aber auch wirtschaftliche Einschränkungen müssen berücksichtigt und Einzelheiten zur Herstellung und Nutzung festgehalten werden. Es hat sich bewährt, am Ende der Entwicklungsphase einen Prototyp zu implementieren und ausführlich zu testen. Abschließend erfolgt eine umfassende Dokumentation der Überlegungen sowie der Lösung, um Transparenz und Nachvollziehbarkeit von Entscheidungen innerhalb des Entwicklungsprozesses zu gewährleisten und eine Übersicht aller Informationen für die Fertigung bereitzustellen. Technische Zeichnungen müssen angefertigt werden und Informationen beispielsweise zur Geometrie oder zu Dimensionen und Material vermerkt werden. Für elektrische Schaltkreise gilt es Stromlaufpläne anzufertigen, welche die mechanischen als auch elektronischen Komponenten und deren Verbindungen sowie Funktionen übersichtlich darstellen. Das daraus erstellte Layout für einen integrierten Schaltkreis oder ein Leiterplattendesign während der Entwicklung sind ebenfalls Teil der Dokumentation. [HEG21:629-631; LB17:5-24]

Auf die Vorgehensweise, um von einem Schaltplan zu einem Leiterplattenlayout zu gelangen, wird im nächsten Unterkapitel eingegangen.

2.2.2 Entwurfsprozess einer Leiterplatte

Der Entwurfsprozess eines Schaltungsträgers kann Teil des Systemdesigns sein, um Bauelemente zu fixieren sowie zu schützen und elektrische Verbindungen zu realisieren. Die meistverwendete Technologie hierfür stellt die Leiterplatte dar.

Wie schon beim Design des Gesamtsystems erarbeitet der Elektrokonstrukteur auf Basis der zu realisierenden Funktion ein Pflichtenheft zur Implementierung der Forderungen. Es müssen

Randbedingungen wie Normen und Aspekte der Produzierbarkeit berücksichtigt werden. Der Entwurf einer Leiterplatte erfolgt heutzutage rechnerunterstützt mit CAD-Systemen, was eine standardisierte, normgerechte Darstellung der Konstruktion begünstigt. Drei Hauptaufgaben werden umgesetzt: Die Eingabe eines Stromlaufplans, Erstellung eines entsprechenden Layouts und die Erzeugung der für die Produktion des Entwurfs benötigten Daten. [Zic18:13-25]

Als erster Schritt zur Realisierung des Pflichtenheftes wird eine Recherche zu den Bauteilen und Komponenten betrieben, welche nach Vorgabe in das System integriert werden sollen oder zur Realisierung verwendet werden könnten [BT19:90]. Nach der abgeschlossenen Bauteilrecherche wird ein Stromlaufplan erstellt, in dem die verwendeten Bauteile mit Schaltzeichen und deren Verdrahtung miteinander dokumentiert wird. Ein erheblicher Vorteil von Layoutsystemen sind die Bibliotheken, welche Informationen zu den Bauteilen enthalten und für die Zeichnung eines Schaltplans die entsprechenden Symbole zur Visualisierung der elektrischen Funktion von Bauteilen wie auch Footprints für das Leiterplattendesign bereitstellen können. Letztere beinhalten Informationen zu Abmessungen der Bauteile und Anordnungen als auch Umriss von dessen Anschlüssen. [Zic18:27-43]

Da der Entwurf einer Leiterplatte ein iterativer Prozess ist, der schrittweise detaillierter wird und dabei stets geprüft werden muss, kann bei kleineren Schaltungen neben Simulationen der Aufbau von Versuchsschaltungen zur Überprüfung einzelner Teilfunktionen auf einer Lochrasterplatte als Vorstufe der Leiterplatte vor dessen Fertigung von Vorteil sein [BEO18:359; Zic18:13].

Anhand des erstellten Stromlaufplans wird eine Stückliste (Bill of Materials – BOM) angefertigt [BT19:82]. Es handelt sich hierbei um eine übersichtliche Darstellung aller notwendigen Informationen zu den verwendeten und im Schaltplan notierten Bauteilen in Form eines genormten Verzeichnisses. Es werden sowohl Referenzkennzeichnung als auch Anzahl, Bezeichnung und zusätzliche organisatorische sowie technische Daten vermerkt. [Hän06:158; Zic18:53]

Unter Berücksichtigung von Designrichtlinien und den gestellten Anforderungen durch den Auftraggeber, sowohl Funktion, Qualität, Störsicherheit als auch Preis betreffend, kann ein Leiterplatten-Layout erstellt werden. Dafür werden die Konturen festgelegt, den Ebenen werden Funktionen zugewiesen, Footprints werden angeordnet und ein Leiterbild erstellt (Routing). Die Platzierung der Bauelemente sollte sorgfältig erfolgen, da sie maßgeblich die Qualität und den Aufwand für die Erstellung des Leiterbildes beeinflusst. Für die Fertigung werden weitere Informationen wie beispielsweise für den Beschriftungsaufdruck im Layout benötigt. [Zic18:85-91]

Der Hersteller benötigt zur Fertigung der Platine die entsprechenden Produktionsdaten. Diese enthalten neben Informationen wie beispielsweise zu Bauteilen und Kupferstrukturierungen auch Steuerungsdaten für zum Einsatz kommende Geräte. Zur Übermittlung des Leiterplattenlayouts kann das gebräuchliche Gerber-Datenformat verwendet werden, welches ursprünglich entwickelt worden ist, um Fotoplotter zur Strukturierung des gewünschten Leiterbildes anzusteuern. Hierzu zählen die Informationen zum Leiterbild, für welche sich das Format ursprünglich etabliert hat, aber auch für Serviceaufdruck, Lötmaske und Lotpastendruck. Darüber hinaus müssen Bestückungs-

und Bohrdaten bereitgestellt werden. Letztere können auch in Form von Gerber-Daten übermittelt werden. [Hän06:139-152; Zic18:129-140]

2.2.3 Leiterplattenlayout

Leiterplatten haben sich, seit deren Erfindung, zu Trägern von hochkomplexen Schaltungen entwickelt, indem diese über eine Vielzahl von Leiterbahnebenen implementiert werden können. Das Layout hat einen relevanten Einfluss auf die Qualität, Zuverlässigkeit und Erfüllung der geforderten Funktionalität. Die Designmöglichkeiten werden zudem durch Vorgaben und Richtlinien durch den Hersteller der Platine beschränkt.

Im Folgenden werden lediglich einige der zu berücksichtigenden Aspekte präsentiert, welche im Hinblick auf elektromagnetische Verträglichkeit, Zuverlässigkeit und Herstellung relevant sind. Je höher die gestellten Anforderungen an die Leiterplatte sind, desto bedachter muss das Layout erstellt werden. Insbesondere bei hohen Frequenzen und Taktraten müssen Aspekte der elektromagnetischen Verträglichkeit berücksichtigt werden [Zic18:106]. Leiter müssen als Bauelemente mit einer Impedanz betrachtet werden, eine gute Signalintegrität sowie Entkopplung müssen sichergestellt und ungewollte, wechselseitige Beeinflussungen von elektronischen Bauelementen und Baugruppen müssen verringert werden [SK11:424]. Für einen tieferen Einblick sei auf weiterführende Literatur wie [Hän06; Sch17; SK11; Sto21] verwiesen.

Hersteller von Leiterplatten geben in ihren Designrichtlinien ein Mindestmaß für Parameter wie Leiterbahnbreite, Abstände und Bohrungen an, wobei die erforderlichen Maße neben der Produzierbarkeit auch die Kosten beeinflussen (siehe [AIS21; Eur20; MCB21; Wür22a]).

Einflussfaktoren für die minimal verwendete Leiterbahnbreite sind neben den Kosten und der vom Hersteller verwendeten Technologie zur Leiterplattenfertigung die maximale Stromstärke, die vom Leiter geführt werden muss, die verwendete Schichtdicke des Kupfers bei der Fertigung und die vorgegebene Impedanz, falls die Notwendigkeit einer kontrollierten Leitungsimpedanz im Layout zur Gewährleistung von Signalintegrität besteht [Zic18:90]. Die maximale Stromstärke ist relevant, da bei der Stromführung durch Leiterbahnen Verluste verursacht werden, die in einer Temperaturerhöhung resultieren, welche wiederum in einem zulässigen Maß liegen muss [Hän06:77].

Bei einem für Signale im GHz Bereich vorgesehenem Design sollte darauf geachtet werden, dass keine rechtwinkligen Leiterbahnen gezeichnet werden, da es andernfalls zu elektromagnetischen Störungen kommen kann. Aus Sicht der Herstellbarkeit ist dies jedoch aufgrund von neuen PCB-Herstellungstechnologien nicht mehr zwingend notwendig. Im Allgemeinen sollten Signalleiter so kurz wie möglich gehalten werden. [Alt18; Zic18:109].

Bei voneinander unabhängigen Signalleitungen, die über eine größere Distanz parallel geführt werden, besteht die Gefahr, dass es zum Übersprechen kommt. Dieses Phänomen kann verhindert oder zumindest vermindert werden, indem die Leiter mit Abstand zueinander angeordnet werden, lediglich über kurze Strecken Parallelität aufweisen, eine Schirmleiterbahn zwischen den beiden Leitern

eingefügt wird oder Flankensteilheit und Taktfrequenz auf ein Minimum reduziert werden. [SK11:433-438]

Um Schwankungen sowohl bei der Versorgung und als auch beim Bezugspotenzial und damit Signaländerungen zu vermeiden, sollten insbesondere bei der Spannungsversorgung und Schaltungsmasse Leiterbahnen kurz und breit sein, damit diese niederimpedant sind. Eine zusätzliche Maßnahme können Stützkondensatoren sein, die als Ladungsreservoir fungieren, wenn es zu schnellen Schaltvorgängen kommt. Vor allem bei dem Design einer digitalen Schaltung, wenn mit steilen Flanken zu rechnen ist, sollte dies berücksichtigt werden. Die Platzierung der Stützkondensatoren sollte niederimpedant und möglichst nah am Bauelement erfolgen, um kurze Wege für die bereitgestellten Ausgleichsströme zu gewährleisten. [SK11:426-430; Zic18:109]

Wie bereits erwähnt sollte auch das Bezugspotenzial beziehungsweise die Massefläche, welche als Leiter für Rückströme dient, möglichst niederimpedant bereitgestellt werden, um Störungen abzublocken. Da eine Vielzahl von Komponenten auf einer Leiterplatte einen Masseanschluss benötigen, lässt sich dies in Form eines flächigen Aufbaus erreichen. Gleiches gilt für die Versorgungsspannung. Zur Realisierung dessen bei einer hohen Packungs- und Leiterbahndichte zeigt sich das Potenzial von einem Mehrlagenaufbau. Bei einer vierlagigen Leiterplatte beispielsweise lassen sich die beiden Außenlagen zur Bestückung und für Signalleitungen nutzen, während die Innenlagen jeweils als eine Masse- und Versorgungsfläche vorgesehen werden können. [SK11:422-425; Sto21:226]

3 Hörgeräteplattform

Die Aufgabenstellung für diese Arbeit ist bereits im Unterkapitel 1.2 in Form eines Lastenheftes hinsichtlich Anforderungen und Funktionsumfang konkretisiert worden. Nachfolgend wird basierend darauf schrittweise ein Lösungskonzept mit dem Namen Prime Hearing Aid (PrimeHA) und dessen Konkretisierung zur Umsetzung der Forderungen bis hin zur Aufbereitung der für die Fertigung benötigten Daten erarbeitet. Nach einem ersten Lösungsentwurf (Kapitel 3.1) stellen die Entwicklung eines Schaltplans (Kapitel 3.2) einschließlich der praktischen Überprüfung dessen (Kapitel 3.3), ein Leiterplattenentwurf (Kapitel 3.4) und ein Gehäusekonzept (Kapitel 3.5) die drei Hauptkomponenten für die Erarbeitung einer Lösung dar, welche nachfolgend getrennt behandelt werden. Abschließend wird ein funktionsfähiger Demonstrator präsentiert (Kapitel 3.6). Die für ein Systemdesign erforderliche Dokumentation aller Überlegungen und Ergebnisse erfolgt in Form dieser wissenschaftlichen Arbeit.

3.1 Entwurf

Vor der Erstellung eines Schaltplans ist vom Autor die Machbarkeit einer Forschungsplattform für die Audiosignalverarbeitung in der Hörversorgung mit den gestellten Anforderungen analysiert worden. Dafür ist ein Vorentwurf angefertigt worden, der eine mögliche Systemarchitektur, eine Instanziierung dessen mit Bauteilen und eine Abschätzung des entsprechenden Flächen- als auch des Strombedarfs umfasst. Die Ergebnisse stellen die Grundlage für die Weiterentwicklung einer Gesamtlösung dar.

3.1.1 Blockschaltbild der Systemarchitektur

Aus den Anforderungen an das System ist eine Systemarchitektur abgeleitet worden, wie nachfolgend in Abbildung 3.1 gezeigt wird. Diese zeigt einen Überblick über die zusammenwirkenden Komponenten und ist um die vorgesehenen Schnittstellen ergänzt worden. Sie bildet die Grundlage des Pflichtenheftes und einen ersten Entwurf für eine Lösung der Problemstellung unter Berücksichtigung des Lastenheftes.

Da eine Adaptabilität zwischen der Forschungsplattform, einem Hilfsmittel zur Entwicklung von Algorithmen der Audiosignalverarbeitung, und der Endanwendung, dem Hörgerät, vorhanden sein soll, muss der elektronische Aufbau ebenfalls Ähnlichkeiten zu diesem aufweisen. Gleichzeitig muss sichergestellt werden, dass das System portabel und kompakt implementiert werden kann, damit es hinter dem Ohr platzierbar ist.

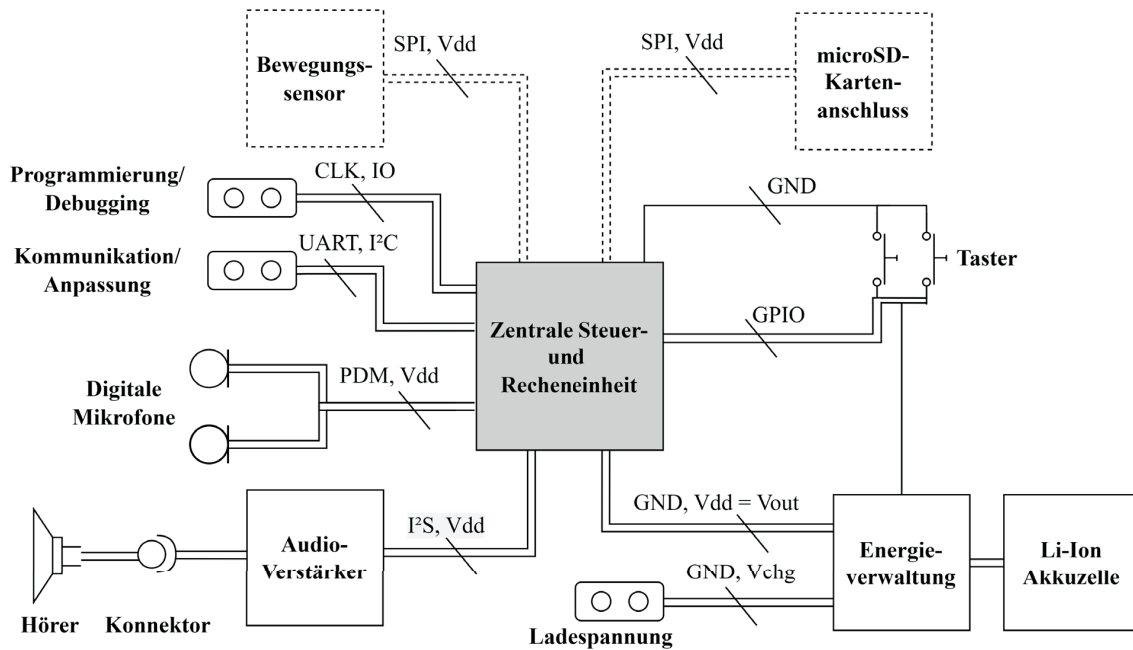


Abbildung 3.1: Systemarchitektur.

Die Erfassung von Schallwellen erfolgt mit zwei digitalen Mikrofonen, welche einen Vorverstärker und einen Analog-Digital-Wandler bereits integriert haben [Lew13], um die Audio-Signale als pulsdichtemoduliertes Signal (PDM) an die zentrale Steuer- und Recheneinheit, wie beispielsweise einem Mikrocontroller zur Signalverarbeitung, weiterzugeben. PDM Schnittstellen werden zunehmend für tragbare Audio-Anwendungen verwendet, da die reine digitale Übertragung der Audio-Daten weniger anfällig für Signalbeeinträchtigungen ist und der Systementwickler dadurch eine höhere Freiheit bei der Platzierung der Mikrofone hat [Lew12:3]. Des Weiteren werden lediglich eine Takt- und Datenleitung für die Übertragung der Daten von zwei Mikrofonen benötigt. Das durch die zentrale Steuer- und Recheneinheit veränderte Signal wird an einen I²S-Audioverstärker weitergegeben, welcher das Signal verstärkt, aber auch über einen Digital-Analog-Wandler in ein analoges Signal umformt. Ein Hörer sorgt für die akustische Ausgabe. Da Hörgerätehersteller zunehmend ihre Produkte mit Akkumulatoren betreiben und um eine zukunftsträchtige Energieversorgung zu implementieren, dient eine wiederaufladbare Lithium-Ionen-Zelle zur Stromversorgung. Um diese korrekt mit einer Ladespannung V_{chg} zu laden und einen stabil geregelte Ausgangsspannung für das System (V_{dd}) zu erhalten, bedarf es einer Energieverwaltung beziehungsweise eines Power-Management ICs (PMIC) mit integriertem Linearregler für Lithium-Ionen-Akkumulatoren. Als Betriebsspannung für das System wird eine Versorgung mit 3,3 V gewählt, da es empirische Evidenz dafür gibt, dass viele Bauteile damit arbeiten können und, wie im Abschnitt zur Energieversorgung im nachfolgenden Kapitel erwähnt, eine zuverlässige Arbeitsweise von microSD-Karten erst mit $V_{\text{dd}} \geq 3 \text{ V}$ gegeben ist (siehe Energieverwaltung in Kapitel 3.1.2).

Zwei Taster dienen zur Mensch-Maschine-Interaktion. Diese soll zum einen in Abhängigkeit der Druckdauer eine Veränderung der Ausgabesignale umfassen (beispielsweise Lautstärke oder Parameter der Signalverarbeitung), welche in der Firmware festgelegt wird, und zum anderen das Ein-

und Ausschalten des Systems ermöglichen. Die Realisierung dessen wird bei der Schaltplanentwicklung (Kapitel 3.2) besprochen.

Als Erweiterung des Systems ist wie in den Anforderungen vermerkt ein Bewegungssensor angebunden. Des Weiteren ist zur Nutzung eines Massendatenspeichers eine Anbindung für eine microSD Karte vorgesehen. Beide Komponenten werden über ein Serial Peripheral Interface (SPI) mit der zentralen Rechen- und Steuereinheit verbunden.

Die Programmierung der zentralen Steuer- und Recheneinheit erfolgt primär über eine Takt- (Clock – CLK) und eine Datenleitung (Input/Output – IO). Alternativ kann über diese Leitungen ein Debugging des Codes durchgeführt werden. Darüber hinaus wird mit zwei weiteren Leitungen eine Kommunikation oder Anpassung über das Protokoll UART (Universal Asynchronous Receiver Transmitter) oder I²C (Inter-Integrated Circuit) ermöglicht. Der Nutzer kann auf diese Leitungen über von außen erreichbare Pins zugreifen. Die Bereitstellung der Ladespannung erfolgt ebenfalls über zugängliche Pins (GND, V_{chg}).

3.1.2 Bauteilrecherche

Um die Systemarchitektur zu konkretisieren und die Erfüllung der Mindestanforderungen in der Aufgabenstellung sicherzustellen, sind die Systemkomponenten basierend auf einer Bauteilrecherche für die Spezifikation gewählt worden. Die Auswahl der Bauteile bestimmt maßgeblich sowohl den Funktionsumfang, die Qualität, die Erfüllung der Aufgabenstellung, den Energie- und Flächenbedarf als auch die Kosten. Daher sollte eine Auswahl der Komponenten sorgfältig erfolgen.

Bei der Recherche müssen mehrere Aspekte beachtet werden. Dazu zählen die Eignung für das Anwendungsziel und die Umsetzung des Lastenheftes, der Umfang und die Qualität der Spezifikationen, die gewählte Betriebsspannung $V_{dd} > 3\text{ V}$ sowie die Marktverfügbarkeit. Letztere hat aufgrund der Halbleiterknappheit im Erstellungsjahr dieser Arbeit eine wichtige Rolle gespielt (siehe [Köl22]).

In Abschnitten, die einen Bauteilvergleich enthalten, wird zusammenfassend ein tabellarischer Vergleich gezeigt (siehe Tabelle 3.1 – Tabelle 3.4).

Zentrale Steuer- und Recheneinheit

Die zentrale Steuer- und Recheneinheit ist das Herzstück des Systems, da hier die gesammelten Daten der Programmierung entsprechend verarbeitet, Berechnungen durchgeführt und Abläufe koordiniert werden. Als Mindestmerkmal ist im Lastenheft für den Prozessor ein ARM Cortex M4 mit einer Floating Point Unit beziehungsweise einer Gleitkommaeinheit (FPU) [Arm22] vermerkt. Diese Anforderung dient als Ausgangspunkt für die nachfolgende Recherche nach möglichen Bauteilen. Des Weiteren soll der Speicher mindestens 256 kB RAM, 1 MB NVM umfassen und die Möglichkeit einer drahtlosen Kommunikation zur Fernbedienung muss gegeben sein.

Dank des geforderten Prozessors wird eine leistungsstarke Signalverarbeitung bei gleichzeitiger Energieeffizienz der arithmetisch-logischen Einheit ermöglicht. Darüber hinaus gibt es für diesen

Prozessor eine Implementation der ARM CMSIS (Cortex Microcontroller Software Interface Standard) DSP-Softwarebibliothek, welche optimierte Signalverarbeitungs- und mathematische Funktionen enthält, wodurch eine effizientere Implementierung der Algorithmen möglich ist. [NS21a:19]

Für die zentrale Steuer- und Recheneinheit wird ein Mikrocontroller oder ein System on Chip (SoC) vorgesehen. Diese Systeme enthalten neben einem Prozessor Peripherien, Schnittstellen, Speichermöglichkeiten, haben geringe Abmessungen und sind meist sehr energieeffizient [Hai03:a15]. Diese Faktoren spielen eine wichtige Rolle bei der Entwicklung eines portablen, energieeffizienten und kompakten Systems.

Da die Entwicklungsplattform ebenfalls für Audiosignalverarbeitung geeignet sein muss, Algorithmen flexibel als auch komfortabel in C implementierbar sein sollen und die verfügbaren Schnittstellen einen wichtigen Beitrag bei der Effizienz der zu implementierenden Signalkette haben, wird die Auswahl der Komponente stark eingeschränkt. Des Weiteren muss eine ausreichend große Anzahl an GPIOs (General Purpose Input/Output) zur Konnektierung aller genannter Systemkomponenten vorhanden sein bei gleichzeitiger Begrenzung der Abmessungen.

Im Zuge der Bauteilrecherche werden drei Mikrocontroller und SoCs betrachtet. Von Maxim Integrated die Reihe MAX32650-32652 [MI20], von NXP Semiconductor die Serie S32K1 [NXP21] und von Nordic Semiconductor die nRF52-Reihe, mit Fokus auf den nRF52840 Chip [NS22a]. Alle drei enthalten einen ARM Cortex M4 mit FPU und weisen das geforderte Minimum von 256 kB RAM sowie 1 MB NVM auf.

Da der Mikrocontroller von NXP Semiconductor weder den gewünschten Umfang an Audio-Schnittstellen noch drahtlose Kommunikation unterstützt und die Verfügbarkeit derzeit beschränkt ist, kommt dieser Chip nicht infrage.

Die Mikrocontroller-Reihe von Maxim Integrated ist gut dokumentiert, verfügbar und bietet 3 MB Flash sowie 1 MB SRAM Speicher. Darüber hinaus gibt es eine I²S Schnittstelle für 16 Bit Audioübertragung. Die Anforderung von 20 ksps Abtastrate des Audioanschlusses wird ebenso erfüllt. Diese Chips weisen jedoch kein PDM-Modul und keine drahtlose Kommunikationsfähigkeit auf.

Das System on Chip nRF52840 von Nordic Semiconductor [NS21a; NS22a] erfüllt alle Anforderungen. Es besitzt für Anwendungen mit Audioverarbeitung sowohl eine I²S Schnittstelle mit 8, 16 und 24 Bit Auflösung als auch ein PDM-Modul mit mindestens 20 ksps Abtastrate, sodass mit digitalen Mikrofonen gearbeitet werden kann [ND16]. Eine Vielzahl von Peripherien wird bereitgestellt. Bluetooth Anwendungen sind ebenso möglich, indem Bluetooth Low Energie Protokolle unterstützt werden.

Der Chip ist sehr gut dokumentiert, Beispielprogramme, auf denen aufgebaut werden kann, werden bereitgestellt und aufgrund eines Lizenzabkommens zwischen Nordic Semiconductor und der SEGGER Microcontroller GmbH kann die Softwareentwicklung kostenlos, komfortabel und flexibel in SEGGER Embedded Studio [SMSG17] erfolgen.

All diese Faktoren tragen zu der Begründung für die Verwendung eines nRF52840 Chips bei. Um den Flächenbedarf und die Komplexität des PCB-Routings weiter zu reduzieren als auch ein zuverlässiges Gesamtsystem und ein kompaktes Design sicherzustellen, wird ein Modul oder System in Package (SiP) verwendet, das auf dem Nordic Chip basiert. Hierfür werden von Würth Elektronik das Modul Proteus-III [Wür21] und von Insight SIP das System in Package ISP1807 [IS22a] verglichen.

Beide Produkte sind gut dokumentiert und integrieren innerhalb des Moduls eine Vielzahl von Bauelementen, die für die Nutzung des gewählten Chips zusätzlich notwendig sind. Für die Verwendung der Antenne bei Proteus-III müssen je nach Zielstellung vom Entwickler eine oder drei zusätzliche Kapazitäten im Gesamtsystem vorgesehen werden. Beide integrieren eine Antenne für die Möglichkeit zur drahtlosen Konnektivität, die der nRF52840 Chip bietet. Des Weiteren werden ein Anpassnetzwerk, ein Oszillator und Kapazitäten beispielsweise zur Entkopplung eingebunden. Ein deutlicher Unterschied zeigt sich bei der Anzahl an verwendbaren GPIO-Pins. Das Modul von Würth Elektronik hat neben zwei Pins für eine UART-Verbindung lediglich sechs konfigurierbare GPIOs. Der ISP1807 im Gegensatz dazu weist 46 solcher GPIOs auf. Um diese große Anzahl Pads auf kleinem Raum zu platzieren, können diese nicht wie bei Proteus-III am Rand zugänglich gemacht werden, sondern sollten nach Empfehlung des Herstellers über Via-in-Pads geroutet werden. Der ISP1807 weist die Maße $8\text{ mm} \times 8\text{ mm} \times 1\text{ mm}$ auf, während Proteus-III die Abmessungen $12\text{ mm} \times 8\text{ mm} \times 2\text{ mm}$ besitzt. Um den benötigten Platz einschätzen zu können, muss der Bereich, welcher für die fehlerfreie Funktionalität der Antenne von Kupfer frei gelassen werden soll und dadurch nicht weiter für Bauteile oder Leiterbahnen verwendet werden kann, ebenfalls berücksichtigt werden. Es handelt sich hierbei zum einen um Fläche unter dem Modul, zum anderen um einen Bereich um das Modul herum. Der kupferfreie Bereich, der zum Flächenbedarf durch das Modul zusätzlich hinzukommt, ist bei Proteus-III wesentlich größer als beim ISP1807. Die Verfügbarkeit beider Elemente ist zur Erstellungszeit dieser Arbeit nicht optimal, jedoch besteht die Möglichkeit beide über den Hersteller selbst zu erwerben.

Tabelle 3.1: Bauteilvergleich für die Systemkomponente zentrale Steuer- und Recheneinheit.

Mikrocontroller/SoC	MAX32650-3252	S32K1	nRF52-Reihe
ARM Cortex M4f	✓	✓	✓
Mindestanforderungen Speicher*	✓	✓	✓
$V_{dd} = 3,3\text{ V}$ möglich	✓	✓	✓
Drahtlose Kommunikation	✗	✗	✓
Dokumentation	+	+	++
Verfügbarkeit	✓	✗	✓
Benutzerfreundlichkeit	+	+	+++
PDM und PPS	✗✓	✗✗	✓✓

* Mindestanforderung an den Speicher: 256 kB RAM; 1 MB NVM.

In einer Verhaltensstudie zur präklinischen Wiederherstellung des Hörvermögens mit optischen Cochlea-Implantaten wird ein nRF52832, der Vorgänger des nRF52840 SoCs, eingesetzt. In einem miniaturisierten Aufbau eines optischen Cochlea-Implantats fungiert der Chip von Nordic Semiconductor als digitaler Signalprozessor. Eine Kommunikation mit dem über Batterie betriebenen Testaufbau ist über eine UART-Verbindung als auch drahtlos möglich. Der mit PDM-Mikrofonen aufgenommene Schall wird in Echtzeit verarbeitet und Elektroden oder lichtemittierende Dioden angesteuert. [JHW+20]

Aus diesen Überlegungen heraus und unter Berücksichtigung des erfolgreichen Einsatzes eines digitalen Signalprozessors aus der nRF52-Reihe in einer Studie mit ähnlichen Randbedingungen wird der ISP1807 mit dem enthaltenen nRF52840 Chip als zentrale Rechen- und Steuereinheit für das Gesamtsystem verwendet.

Mikrofone

Wie bereits bei der Beschreibung des Blockschaltbildes erwähnt, soll die Erfassung von akustischen Signalen mit digitalen Mikrofonen erfolgen. Damit sind sie die wichtigste Datenquelle für die Hörgeräteplattform. Hierfür werden MEMS-Mikrofone vorgesehen, welche derzeit vorwiegend in Smartphones verwendet werden und ein PDM-Signal am Ausgang für die weitere Verarbeitung liefern.

Die Auswahl eines Mikrofons wird vom Frequenzgang, dem Eigenrauschen und weiteren Mikrofoneigenschaften bestimmt. Ausschlaggebend sind Parameter wie beispielsweise ihre geringe Größe, ein hohes SNR, die Mikrofonempfindlichkeit, der Energieverbrauch, ihre Richtcharakteristik und die auftretenden Frequenzverzerrungen. Infolgedessen werden zwei Mikrofone aufgrund ihrer Spezifikation näher betrachtet und verglichen.

Es handelt sich um die Mikrofone ICS-41351 von InvenSense [TIS20] und SPG08P4HM4H-1 von Knowles [KC19]. Beide besitzen eine omnidirektionale Richtcharakteristik, benötigen eine Versorgungsspannung zwischen 1,65 V und 3,6 V, besitzen die drei Modi normal, stromsparend sowie Ruhemodus, haben eine Empfindlichkeit von $-26 \text{ dB FS} \pm 1 \text{ dB}$, sind gut dokumentiert und sind zur Erstellungszeit dieser Arbeit verfügbar. Aus dem Datenblatt ist herauszulesen, dass das Mikrofon von InvenSense bei gleicher Versorgungsspannung eine geringere Stromaufnahme hat und damit eine höhere Energieeffizienz besitzt. Die Frequenzantwort beider Mikrofone weist hohe Ähnlichkeit und im Bereich zwischen 150 Hz und 3 kHz eine flache Kurve auf. Das Mikrofon von Knowles besitzt eine größere Länge als das von InvenSense, welches im Gegensatz dazu breiter ist. Der Flächenbedarf des ersteren ist mit 8 mm^2 geringer als das von InvenSense mit rund $9,3 \text{ mm}^2$. Andere Parameter wie das SNR oder THD können aufgrund leicht unterschiedlicher Messbedingungen nicht exakt verglichen werden, zeigen jedoch ebenso sehr hohe Ähnlichkeit.

Um eine Wahl zwischen den Mikrofonen zu treffen, werden neben einem Vergleich der Parameter akustische Testmessungen berücksichtigt. Die Beeinflussung des Audiosignals durch das Eigenrauschen hat sich als entscheidend herausgestellt. Aufgrund dessen wird für die Hörgerätetestplattform das SPG08P4HM4H-1 von Knowles verwendet.

Tabelle 3.2: Bauteilvergleich für die Systemkomponenten digitale Mikrofone.

Mikrofon	ICS-41351	SPG08P4HM4H-1
PDM	✓	✓
Omnidirektionale Richtcharakteristik	✓	✓
$V_{dd} = 3,3\text{ V}$ möglich	✓	✓
Empfindlichkeit	-26 dB FS \pm 1 dB	-26 dB FS \pm 1 dB
Dokumentation	++	+
Verfügbarkeit	✓	✓
Flächenbedarf	9,3 mm ²	8 mm ²
Klang*	+	++

* Akustische Experimente sowie Beurteilung des Klangbildes im Hinblick auf die störende Wirkung durch das Eigenrauschen des Mikrofons.

Audioverstärker

In diesem Systemaufbau ist der Audioverstärker die Endstufe. Die bis dahin digitalen Daten werden zu analogen Daten gewandelt, verstärkt und können einem Lautsprecher zugeführt werden.

Als Schnittstelle ist I²S vorgesehen, da der nRF52840 diese als Sound-Interface zwischen ICs vorsieht. Die Bereitstellung der Daten kann durch einen I²S fähigen DAC wie dem UDA1334ATS von NXP Semiconductors [UDA00] mit nachfolgendem Verstärker erfolgen. Es gibt diese beiden Komponenten jedoch ebenso zusammen in einem einzigen IC, sodass lediglich eine geringe Anzahl an passiven Komponenten zusätzlich nötig sind. Beispiele hierfür sind der Audioverstärker SSM2518 von Analog Devices [ADI18] oder der Verstärker MAX98357A von Maxim Integrated [MI19].

Beide sind in einer kleinen Bauform verfügbar, bei Elektronikhändlern auf Lager, benötigen eine Spannungsversorgung zwischen 2,5 V und 5,5 V und enthalten einen Kurzschlusschutz sowie thermischen Schutz. Der SSM2518 ist anders als der MAX98357A über I²C von der zentralen Rechen- und Steuereinheit programmierbar, um beispielsweise die Lautstärke über die Verstärkung situationsabhängig zwischen +24 dB und -71,25 dB in 0,375 dB Schritten einzustellen, und es sind zwei Lautsprecher statt einem wie beim MAX98357A ansteuerbar. Eine wählbare Verstärkung von letzterem lässt sich über die feste Verdrahtung dessen auf 3, 6, 9, 12 oder 15 dB einstellen.

In Anbetracht dessen, dass für die Plattform lediglich ein Lautsprecher benötigt wird, die Programmierung des ICs nicht erforderlich ist und für den SSM2518 drei GPIOs der Steuereinheit mehr benötigt werden, wird auf die zusätzlichen Möglichkeiten des Produktes von Analog Devices verzichtet. Es wird der zur Erstellungszeit dieser Arbeit wesentlich günstigere Audioverstärker MAX98357A gewählt.

Tabelle 3.3: Bauteilvergleich für die Systemkomponente Audioverstärker.

Bauteil	SSM2518	MAX98357A
PS	✓	✓
Schutzmechanismen	✓	✓
$V_{dd} = 3,3\text{ V}$ möglich	✓	✓
Einstellbarkeit der Verstärkung	Programmierbar	Feste Verdrahtung
Dokumentation	+	+
Verfügbarkeit	✓	✓
Anzahl benötigter GPIOs	7	4
Preis	6,81 €	2,69 €

MicroSD-Kartenanschluss

Ein microSD-Kartenanschluss kann einen beträchtlichen Flächenbedarf haben, wenn die gesamte Karte oder ein Großteil von ihr im Slot Platz haben soll. Um dies zu vermeiden, wird ein Konnektor gewählt, bei dem lediglich der Bereich der Karte mit den zu verbindenden Anschlusspins eingeführt werden muss. Ein exemplarischer Vergleich erhältlicher Speicherkartenverbinder, die unterschiedlich viel Platz auf einer Platine einnehmen, ist in Abbildung 3.2 dargestellt. Im Falle von Platzmangel auf der Platine besteht hierdurch die Möglichkeit, die Halterung und die Karte so zu positionieren, dass lediglich ein Teil auf der Platine und der Rest gut zugänglich für den Nutzer über den Rand der Platine hinaus verfügbar ist. Um die Platine später in einem Gehäuse schützen zu können und dieses nicht für das Platzieren der Speicherkarte im Slot öffnen zu müssen, bedarf es eines Kartenanschlusses mit einem Push-Pull-Mechanismus für das Einschieben und Entnehmen. Der microSD Header 1051620001 von Molex [Mol09] erfüllt diese Anforderungen.



Abbildung 3.2: Exemplarischer Vergleich des Platzbedarfs zweier microSD-Kartenanschlüsse. Von links: Vorder- und Rückseite des Speicherkartenverbinders 693072010801 von Würth Elektronik sowie Vorder- und Rückseite des 1051620001 von Molex.

Bewegungssensor

An den Bewegungssensor wird die Anforderung gestellt mindestens drei Messachsen aufzuweisen. Im Lastenheft werden keine weiteren Anforderungen gestellt. Es wird ein sehr energieeffizienter, kompakter und gut dokumentierter Sensor gewählt, der außerdem einen Temperatursensor beinhaltet.

Üblicherweise sind für diese Sensoren entweder ein I²C oder SPI-Kommunikationsprotokoll vorgesehen. Wie bereits in 3.1.1 beschrieben, wird die schnellere SPI-Anbindung zur zentralen Steuer- und Recheneinheit beabsichtigt. [Lee09:12-13]

In einer früheren Masterarbeit bei audifon von Herrn Aleshin sind Bewegungsdaten zur Klassifizierung von Nutzeraktivitäten genutzt worden [Ale20]. Um diese Arbeit auf der Plattform zu testen sowie von dokumentierten Erkenntnissen zu profitieren, wird für die Hörgerätestestplattform der gleiche Beschleunigungssensor ADXL362 von Analog Devices [ADI19] vorgesehen. Er weist alle oben genannten Charakteristika auf und ist in einem kompakten Gehäuse mit den Maßen 3 mm × 3,25 mm × 1,06 mm erhältlich.

Energiequelle

Die Energieversorgung soll mittels eines Akkus erfolgen. Dieser sollte eine Gleichspannung von $\geq 3,0$ V liefern können, um alle Bauteile zuverlässig mit der benötigten Versorgungsspannung zu betreiben. Das Laden der Energieversorgung soll mit einer 5 V USB-Spannung möglich sein. Entscheidend ist hier ein Kompromiss zwischen Kapazität und Größe des Akkus. Die Plattform sollte mit einem Ladezyklus über eine Zeitspanne T von mindestens einigen Stunden ($T \geq 3$ h) betrieben werden können, um bei der Erprobung und Nutzung aussagekräftige Versuchsreihen durchführen zu können. Gleichzeitig muss ein kompaktes Design des Gesamtsystems möglich sein. Des Weiteren sollte die Energiequelle lötlbar sein, um diese auf dem PCB anbringen zu können.

Es wird die Lithium-Ionen Akkuzelle CP1254 A4 von Varta mit Lötflanschen [Var21; Var22:38] und einer Kapazität von 77 mAh gewählt. Der Durchmesser von rund 12,1 mm und die Höhe von rund 5,4 mm machen die Zelle zu einer kompakten Energiequelle mit einem Gewicht von lediglich 1,8 g.

Energieverwaltung

Um die Akkuzelle sicher aufzuladen, bedarf es einer Ladeeinheit, welche dies für Lithium-Ionen-Akkumulatoren kontrolliert und unter ständiger Überwachung des Ladestatus bewerkstelligt. Um eine stabile und konstante Energiequelle für das System über den gesamten Nutzungszeitraum bereitzustellen, muss die von der Batterie gelieferte Spannung auf mindestens 3,0 V geregelt werden. Spezielle Batteriemanagementsysteme haben diese beiden Anforderungen in einem IC integriert. In dieser Arbeit werden der nPM1100 von Nordic Semiconductor [NS21b] und der LTC4063 von Analog Devices (früher Linear Technology Corporation) [LTC10] näher betrachtet.

Beide sind für das Laden einer Lithium-Ionen Akkuzelle geeignet und liefern eine geregelte, konstante Versorgungsspannung. Für den Ladevorgang kann die 5 V-Schiene eines USB-Anschlusses genutzt werden, beide Bauteile sind sehr gut dokumentiert, die Verfügbarkeit der Komponenten bei verschiedenen Elektronikhandelsunternehmen hat im Erstellungszeitraum dieser Arbeit stark variiert.

Als Ausgangsspannung liefert der LTC4063 zwischen 1,2 V und 4,2 V, der nPM1100 entweder 1,8 V, 2,1 V, 2,7 V oder 3,0 V. Auf Grundlage empirischer Evidenz bedarf es für einen

zuverlässigen Betrieb einer microSD-Karte einer Versorgungsspannung $\geq 3,0$ V, obwohl nach Spezifikation eine Versorgungsspannung im Bereich 2,7 V – 3,6 V möglich sein sollte [SDA22].

Beide Bauelemente haben ein sehr kompaktes Design. Das Produkt von Analog Devices ist in einem $3\text{ mm} \times 3\text{ mm}$ Format erhältlich, das von Nordic Semiconductor mit den Maßen $2,075\text{ mm} \times 2,075\text{ mm}$. Letzteres bringt aufgrund von 25 Pins auf dieser geringen Fläche höhere Anforderung beim PCB-Design und Routing mit sich. Des Weiteren ist die Verwendung des nPM1100 in einem Versuchsaufbau, welcher mit den zu verwendenden Bauteilen vor der Produktion eines Entwurfs von einer Platine implementiert und getestet werden sollte, mit größeren Herausforderungen verknüpft. Die zu kontaktierenden Pins des LTC4063 befinden sich mit Ausnahme eines größeren Anschlusses für Masse am Rand des Bauteils und sind somit gut zugänglich.

Entsprechend dieser Ausführungen ist für dieses Projekt der LTC4063 von Analog Devices vorgezogen.

Tabelle 3.4: Bauteilvergleich für die Systemkomponente Energieverwaltung.

Power Management IC	nPM1100	LTC4063
V_{out} (System-Betriebsspannung)	$\leq 3\text{ V}$	$\leq 4.2\text{ V}$
V_{chg} * über USB	✓	✓
Pinanzahl	25	10
Einfache Handhabung	+	++
Dokumentation	++	++
Verfügbarkeit	Für beide stark variierend	

Taster

Die Taster werden häufig betätigt und somit mechanisch stark beansprucht. In Anbetracht dessen, dass eine HdO-Testplattform implementiert wird, sollten Taster gewählt werden, welche seitlich betätigt werden können. Der Footprint der Bauteile sollte möglichst wenig Platz in Anspruch nehmen. Darüber hinaus sollten die mechanischen Bauteile auf der Platine gut fixiert sein und nur ein moderater Kraftaufwand zur Bestätigung des Tasters notwendig sein. Dies soll sicherstellen, dass das Risiko einer Beschädigung der Bauteile verringert wird.

Die Mikroschalter Serie PTS841 von C&K [CKS22] bietet eine Reihe an seitlich zu betätigende Taster, mit der Option eines ESD-Pins (Electrostatic Discharge) und damit einer Erdung des Bauteils, als auch einer zusätzlichen mechanischen Befestigung in Form von miniaturisierten Kunststoffdübeln, welche in Bohrungen auf der Platine befestigt werden. Außerdem sind die Taster mit einem Kraftaufwand zur Betätigung von 250 gf und 180 gf erhältlich und weisen einen kleinen Footprint auf.

Entsprechend der Ausführungen von oben wird die Variante mit ESD-Pin, Dübeln zur Befestigung und einer Betätigungskraft von 180 gf gewählt. Damit handelt es sich um den Taster mit der Bezeichnung PTS841 ESD GMP SMTR LFS.

Externe Anschlüsse

Für die Testplattform bedarf es einiger externer Anschlüsse, wie in Kapitel 3.1.1 dargestellt worden ist. Es handelt sich um sechs notwendige Anschlussmöglichkeiten für eine UART- oder I²C-Verbindung, Masse, eine Ladespannung und Programmierung/Debugging der zentralen Steuer- und Recheneinheit. Optional können Anschlüsse für einen Reset des Systems und eine externe Bereitstellung von Energie für das System, falls die Spannungsversorgung nicht durch die dafür vorgesehene Akkuzelle erfolgen kann, hilfreich sein.

Um die externen Anschlüsse kompakt zu integrieren, wird eine zweireihige Buchse für Stiftleisten mit jeweils vier Anschlüssen und einem Rastermaß von 1,27 mm vorgesehen. Mithilfe einer passenden Stiftleiste kann eine komfortable Kontaktierung erfolgen. In diesem Projekt wird der SMT Dual Socket Header 62300821021 von Würth Elektronik [Wür22b] verwendet.

Hörer

Die Hörgerätestestplattform soll ähnlich wie ein HdO-Hörgerät hinter dem Ohr platzierbar sein. Außerdem muss eine Adaptabilität zwischen Plattform und einem Hörgerät vorliegen, um aussagekräftige und praxisnahe Versuche für die Forschung und Entwicklung durchführen zu können. Aufgrund dessen muss hier auf ein für Hörgeräte verwendetes System zurückgegriffen werden. Es wird jedoch darauf geachtet, dass es sich hierbei nicht um ein von einem einzigen Hörhilfen-Hersteller spezifisches Produkt handelt. Es wird ein Hörer wie bei einem RIC HdO verwendet. Aufgrund des dadurch höheren Abstandes zwischen den Mikrofonen und dem Lautsprecher wird die Gefahr von Rückkopplung verringert.

Nachfolgend kommt das von einigen Hörgeräteherstellern verwendete RIC-4400 Modul [Son14] mit einem dazu passenden Konnektor CS88 von Sonion zum Einsatz. Es handelt sich dabei um den Hörer mit der geringsten Verstärkung, einer DC-Impedanz von 218 Ω und einer Impedanz bei 1 kHz von 320 Ω . Näheres zu der Hörerauswahl wird im Abschnitt 3.3.4 dargestellt.

3.1.3 Abschätzung des Gesamtflächenbedarfs

Eine Abschätzung des Gesamtflächenbedarfs dient der Einschätzung von Mindestmaßen der Plattform und kann nur approximativ erfolgen. Die Fläche, welche von den gewählten Bauteilen in Anspruch genommen wird, beträgt rund 3,8 cm².

Neben den in den obigen Ausführungen gewählten, wichtigsten Bauteilen, benötigen diese in der Anwendung zusätzliche passive Bauelemente wie Kondensatoren und Widerstände. Darüber hinaus musste bei der Schaltplanentwicklung zusätzlich ein Mechanismus zum An- und Ausschalten des Systems implementiert werden. Das Routing der Leiterbahnen und Durchkontaktierungen bei beidseitig bestückten Leiterplatten bedürfen ebenfalls zusätzlicher Fläche. Die anwendungsspezifische Platzierung der Bauteile und Berücksichtigung von empfohlenen Abständen zwischen Bauteilen können zu einer Erhöhung des Gesamtflächenbedarfs führen.

Insgesamt ist ungefähr der vierfache Bedarf der approximierten und durch die bisher spezifizierten Bauteile belegte Fläche erwartet worden. Bei einer Leiterplatte, deren Vorder- und Rückseite bestückbar ist, ergibt sich ein Flächenbedarf von rund 8,0 cm².

Dies entspricht weniger als 20% der Fläche eines BeagleBone Black Einplatinencomputer, welcher Hauptbestandteil der Hardware für das Projekt openMHA ist (siehe Kapitel 1.3) [HO22].

3.1.4 Abschätzung des Stromverbrauchs

Ausgehend von den zur Umsetzung der Systemarchitektur gewählten Bauteilen bei einer Spannungsversorgung von 3,3 V ist der Stromverbrauch der Hörgerätestestplattform abgeschätzt worden. Die approximierten Betriebsströme werden in Tabelle 3.5 präsentiert. Eine Vielzahl von Faktoren wie die optionale Nutzung von Bluetooth Low Energy, einer microSD-Karte oder der CPU-Auslastung beeinflussen diesen Bedarf erheblich.

Tabelle 3.5: Approximation des Betriebsstroms in Komponenten gegliedert.

Komponente		Betriebsstrom in mA
Audioverstärker	MAX98357A	2,6
Zentrale Steuer- und Recheneinheit	ISP1807 (nRF52840)	8,1
Zwei Mikrofone	SPG08P4HM4H-1	(2x) 0,6
Beschleunigungssensor	ADXL362	0,00195
Power-Management IC	LTC4063	0,1
Gesamtbetriebsstrom		≈ 12,00

Es ist von den nachfolgenden Randbedingungen ausgegangen worden, um den voraussichtlichen Mindestverbrauch der Plattform im Betrieb zu approximieren: Dem System wird kein Massendatenspeicher zur Verfügung gestellt, Möglichkeiten einer drahtlosen Verbindung werden nicht genutzt und die zentrale Recheneinheit ist im gesamten Szenario aktiv (keine Verwendung des Sleep Modus beim nRF52840 beispielsweise), auch wenn die CPU-Auslastung gering ist. Die Stromversorgung kann mit Low-Dropout-Reglern, im Allgemeinen auch als LDOs bezeichnet, oder mit DC/DC Reglern (Abwärtswandler) erfolgen. Im Datenblatt zum nRF52840 wird der Strombedarf bei der Verwendung der energieeffizienteren Abwärtswandler angegeben.

Der Strombedarf des Audioverstärkers MAX98357A ist messtechnisch ermittelt worden, da das Datenblatt für die Anwendung eine unzureichende Auskunft gibt. Ein MAX98357A auf einem Breakout Board von Adafruit [Ada16] ist von einem nRF52840 Development Kit (DK) [NS21c] angesteuert worden. In der Firmware ist ein 1 kHz Sinuston unterschiedlicher Lautstärke zwischen 0 dB FS und -36 dB FS im Abstand von 6 dB FS erzeugt und nach einer 6 dB Verstärkung durch den Audioverstärker über den vorgesehenen Hörer von Sonion ausgegeben worden. Der Stromverbrauch ist gemessen worden. Es zeigt sich bei der Ausgabe eines -36 dB FS Sinustons ein

Minimalwert von 2,36 mA, sowie ein Maximalwert von 8,95 mA bei 0 dB FS. In Kapitel 3.3.4 wird der Bauteilwert eines zwischen Verstärkerausgang und Hörer eingebauten Widerstandes auf 3 k Ω dimensioniert und die Überlegungen hierzu erläutert. Als Auswirkung für die Verbrauchswerte ist ein Minimalwert von 2,36 mA und ein Maximalwert von 2,87 mA gemessen worden. In der Approximation des Stromverbrauchs mit den beschriebenen Randbedingungen ist ein mittlerer Wert der beiden Extrema für den Audioverstärker berücksichtigt worden. Zusammenfassend ergibt sich ein Betriebsstrom der Hörgerätestestplattform von ungefähr 12 mA.

3.2 Schaltplanentwicklung

Im Folgenden wird die Systemarchitektur aus Kapitel 3.1.1 konkretisiert und schrittweise ein Schaltplan mit den ausgewählten Bauteilen aus 3.1.2 als erster Teil eines Lösungsentwurfs in der frei verfügbaren Electronic Design Automation (EDA) Software KiCad [KiC22] erarbeitet. Die funktionalen Blöcke werden einzeln betrachtet und zu einem Gesamtsystem im Schaltplanentwurf für die Forschungs- und Entwicklungsplattform zur Entwicklung und Testung von Algorithmen zur Audiosignalverarbeitung in der Hörversorgung zusammengestellt.

Um den Bezug zum Stromlaufplan des Gesamtsystems herzustellen, wird bei den Erläuterungen für die Schaltplanentwicklung innerhalb der funktionalen Blöcke auf die Bauteilbezeichnungen im Schaltplan des Gesamtsystems zurückgegriffen. Als letzte Seite des Anhangs kann der vollständige Schaltplan zum Projekt angesehen werden. Für die Erläuterungen der einzelnen funktionalen Einheiten im Nachfolgenden werden aus Gründen der Übersichtlichkeit und Nachvollziehbarkeit Ausschnitte des Schaltplans gezeigt.

Der Low aktive Pin $\overline{\text{LDOEN}}$ des Power Management ICs (siehe Abbildung 3.4) spielt in Erläuterungen mehrmals eine Rolle. Es sei darauf hingewiesen, dass in den Programmen KiCad und LTspice [ADI22], mit welchen der Schaltplan als auch der Platinen-Entwurf und die Simulation des Ein- und Ausschaltvorgangs erstellt worden sind, ein Strich über „LDOEN“, welcher den Low-aktiven Charakter anzeigt, nicht möglich ist. Nichtsdestotrotz wird das Potenzial dieses Pins mit $\overline{\text{LDOEN}}$ gekennzeichnet, wenn es möglich ist.

Zentrale Steuer- und Recheneinheit

Die zentrale Steuer- und Recheneinheit wird mit dem System in Package ISP1807 instanziiert, welches auf dem nRF52840 von Nordic Semiconductor basiert. Der entscheidende Vorteil bei der Wahl eines System in Package ist, dass die erforderliche Peripherie bereits integriert ist. Ebenso müssen weder zusätzliche Kondensatoren noch ein Kristall für eine präzise Taktung oder ein Antennen-Anpassnetzwerk vorgesehen werden (siehe Abbildung 3.3).

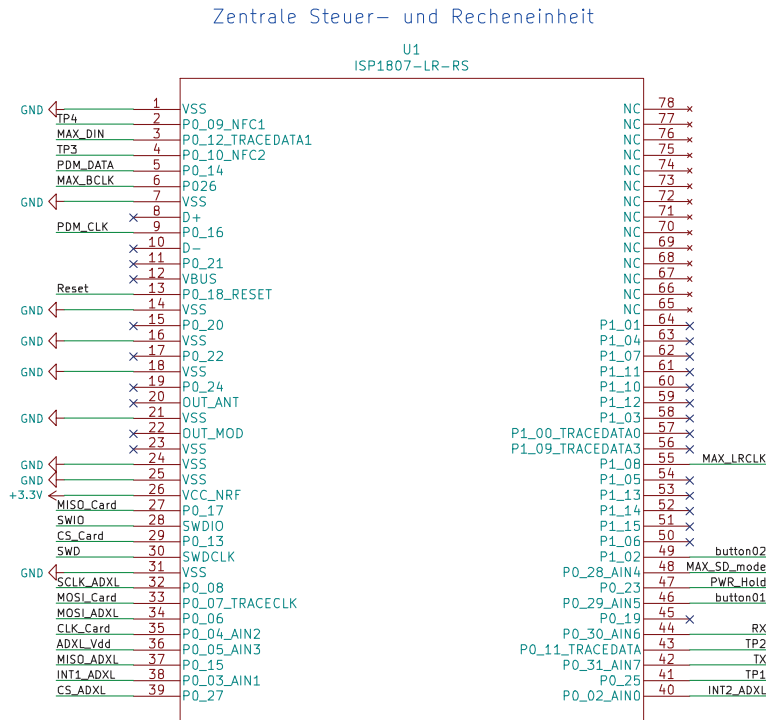


Abbildung 3.3: Zentrale Steuer- und Recheneinheit (Ausschnitt des Schaltplans zum Projekt PrimeHA).

Bei der Wahl der GPIO-Pins zur Konnektierung der funktionalen Blöcke muss deren Funktion berücksichtigt werden. Es sei darauf hingewiesen, dass in der Dokumentation vom nRF52840 bei den General Purpose Input/Output Pins zwischen nieder- und hochfrequenten Signalleitungen unterschieden wird. Dies als auch die Lage der möglichen Pins für ein geschicktes Routing im Leiterplattendesign sind bei der Auswahl der Pins berücksichtigt worden.

Stromversorgung und Energieverwaltung

Die Stromversorgung erfolgt durch eine Akkuzelle. Die Spannungsquelle wird mit einem Linearregler innerhalb des vorgesehenen PMICs LTC4063 [LTC10] geregelt, sodass eine konstante Betriebsspannung von 3,3 V bereitgestellt wird (siehe Abbildung 3.4).

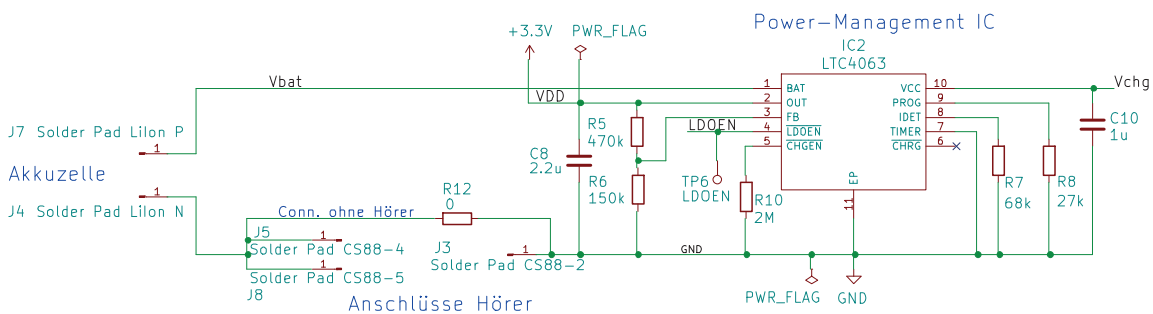


Abbildung 3.4: Energieverwaltung (Ausschnitt des Schaltplans zum Projekt PrimeHA).

Der zu regelnde Spannungswert wird mit einem Spannungsteiler (R_5 , R_6) eingestellt. Die Ausgangsspannung V_{out} berechnet sich gemäß dem Datenblatt zum LTC4063 und an die Bauteilbezeichnungen angepasst wie nachfolgend in (3-1) gezeigt. Für eine stabile Ausgangsspannung auch bei geringer Systemlast, wird empfohlen den Widerstand $R_6 \leq 160 \text{ k}\Omega$ zu wählen. Es werden die Widerstandswerte $R_5 = 470 \text{ k}\Omega$ und $R_6 = 150 \text{ k}\Omega$ gewählt.

$$\begin{aligned} V_{\text{out}} &= 800 \text{ mV} \left(1 + \frac{R_5}{R_6} \right) \\ &= 800 \text{ mV} \left(1 + \frac{470 \text{ k}\Omega}{150 \text{ k}\Omega} \right) \approx 3,307 \text{ V} \end{aligned} \quad (3-1)$$

Des Weiteren kann mit dem LTC4063 die Akkuzelle kontrolliert aufgeladen werden. Der Ladezyklus kann durch Festlegung der Ladezeit oder des Ladestroms beeinflusst werden. Für diese Anwendung wird der Modus, bei welchem der Ladestrom eingestellt wird gewählt, da diesem eine höhere Relevanz beigemessen wird als der für einen Ladezyklus benötigten Zeit. Der Ladestrom I_{chg} für einen Standard-Ladezyklus der verwendeten Akkuzelle entspricht 35 mA, für ein schnelles Aufladen 70 mA [Var21]. Entsprechend der im Datenblatt des LTC4063 vorgegebenen Berechnungsvorschrift (3-2), empfiehlt sich aufgrund von

$$\begin{aligned} R_8 &= \frac{1000 \text{ V}}{I_{\text{chg}}} \\ &= \frac{1000 \text{ V}}{35 \text{ mA}} \approx 28,6 \text{ k}\Omega \end{aligned} \quad (3-2)$$

ein Widerstandswert von rund 28 k Ω für R_8 . Aufgrund der Verfügbarkeit von Bauteilen bei dem Hersteller der Leiterplatte im Erstellungszeitraum der Arbeit, wird ein 27 k Ω Widerstand eingebaut. Der resultierende Ladestrom I_{chg} beträgt dadurch ungefähr 37 mA.

Mit R_7 kann dem System der vom Akkumulator vorgegebene Mindestladestrom I_{detect} vorgegeben werden, bevor ein Ladezyklus beendet wird. Da dieser 1,4 mA beträgt, sollte gemäß der im Datenblatt vermerkten Berechnungsvorschrift (3-3)

$$\begin{aligned} R_7 &= \frac{100 \text{ V}}{I_{\text{detect}}} \\ &= \frac{100 \text{ V}}{1,4 \text{ mA}} \approx 71,4 \text{ k}\Omega \end{aligned} \quad (3-3)$$

ein Widerstandswert von rund 71 k Ω gewählt werden. Es werden unter Berücksichtigung der Bauteilverfügbarkeit beim Leiterplattenhersteller 68 k Ω vorgesehen und damit ein Mindestladestrom von 1,47 mA akzeptiert.

Das Laden der Akkuzelle soll unabhängig von der zentralen Steuereinheit möglich sein. Daher wird die Ladeeinheit mit dem $2\text{ M}\Omega$ -Widerstand R_{10} gegen Masse standardmäßig in einen aktiven Zustand versetzt.

Gemäß den Vorgaben müssen des Weiteren die Kapazitäten C_8 und C_{10} eingeplant werden. Da bei C_8 berücksichtigt werden soll, dass es sich um eine Kapazität mit einem geringen ESR (Equivalent Series Resistance) handelt, werden Keramikkondensatoren verwendet.

In dem funktionalen Block Energieversorgung ist außerdem ein manueller Sicherheitsmechanismus zur Trennung der Akkuzelle vom System vorgesehen, indem der Hörer aus dessen Anschluss herausgezogen wird. Dies ist aufgrund der internen Verschaltung mehrerer Masse Pins im Hörer möglich, jedoch kann in dieser Arbeit auf diese betriebsinternen Details nicht eingegangen werden.

Die Löt pads J_3 , J_5 und J_8 werden neben den Audioausgangsleitungen zur Kontaktierung des Höreranschlusses benötigt. Um das System auch ohne Hörer betreiben zu können, kann die elektrische Trennung aufgehoben und eine dauerhafte Verbindung zwischen dem negativen Anschluss der Akkuzelle mit der Systemmasse durch einen $0\ \Omega$ Widerstand geschaffen werden.

Ein- und Ausschalten sowie Nutzereingabe

Zur Interaktion zwischen Nutzer und Entwicklungsplattform, damit beispielsweise die Lautstärke am Gerät geregelt werden kann, werden zwei Taster vorgesehen (siehe Abbildung 3.5). Ebenso sollen die Taster zum An- und Ausschalten des Systems genutzt werden können, um die Anzahl an Bauteilen zu minimieren. Eine Unterscheidung zwischen Nutzereingabe und An- beziehungsweise Ausschalten der Plattform erfolgt durch den Zustand des Systems, in welchem sich dieses zum Zeitpunkt der Aktion befindet, und der zeitlichen Dauer eines Knopfdrucks.

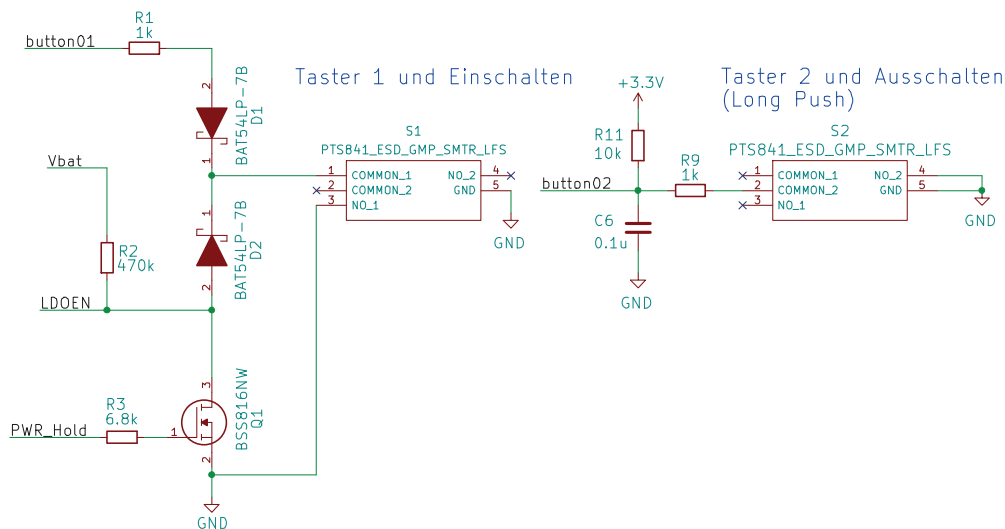


Abbildung 3.5: Nutzereingabe sowie Ein- und Ausschalten des Systems (Ausschnitt des Schaltplans zum Projekt PrimeHA).

Der An- und Auszustand des Systems kann über den Pin $\overline{\text{LDOEN}}$ von der Energieverwaltungseinheit LTC4063 (siehe Abbildung 3.4) kontrolliert werden. Damit der Linearregler innerhalb des ICs

eine Betriebsspannung bereitstellt, muss sich $\overline{\text{LDOEN}}$ in einem Low Zustand befinden. Die nachfolgende Abbildung 3.6 zeigt schematisch, wie der Schaltkreis im linken Teil von Abbildung 3.5 die Aufgabe erfüllt, das System einzuschalten und gleichzeitig während des Betriebs für Nutzereingaben zur Verfügung zu stehen.

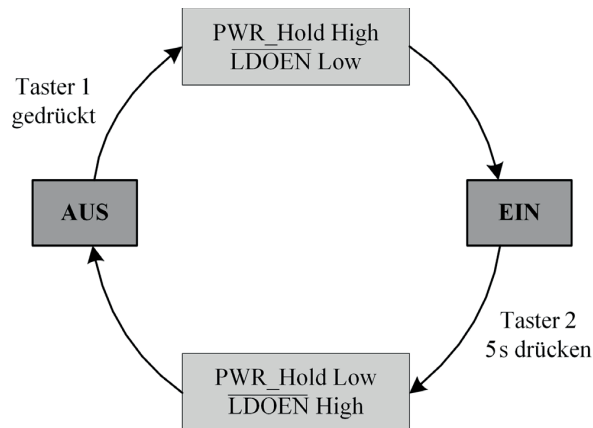


Abbildung 3.6: Funktionsweise des Ein- und Ausschaltens im System schematisch.

Es werden für das Potenzial am $\overline{\text{LDOEN}}$ Knoten zwei Wege für einen Stromfluss bereitgestellt. Zum einen über den Taster S_1 , zum anderen über einen n-Kanal MOSFET Q_1 . Wird der Taster betätigt, kann Strom über die Diode D_2 sowie den Taster fließen, aber dank der Diode D_1 nicht über den Knoten `button01`, welcher mit einem GPIO des Mikrocontrollers verbunden ist. $\overline{\text{LDOEN}}$ wird Low, das System erhält einen Betriebsstrom, die zentrale Steuer- und Recheneinheit wird aktiv und setzt wie in der Firmware festgelegt über einen GPIO das Potenzial `PWR_Hold` (Power Hold). Als Resultat wird der zweite mögliche Strompfad befähigt, da der n-Kanal MOSFET leitend wird und ein Stromfluss zwischen Drain und Source möglich ist. Der Taster kann losgelassen und erneut für Nutzereingaben betätigt werden ohne das Potenzial an $\overline{\text{LDOEN}}$ zu verändern.

Das System in einen Aus-Zustand zu versetzen, wird mit der Firmware umgesetzt. Der Mikrocontroller wechselt den Zustand des `PWR_Hold` GPIOs zu Low, woraufhin $\overline{\text{LDOEN}}$ in einen High Zustand wechselt und kein Stromfluss zur Masse möglich ist. Der Wunsch zu dieser Aktion kann der Nutzer der Steuereinheit beispielsweise über einen langen Tastendruck (beispielsweise 5 s) bei S_2 mitteilen. Ein kontrolliertes und von der Firmware gesteuertes Ausschalten kann ebenso erfolgen, wenn es zu einem Fehlerfall kommt, wie beispielsweise einer zu geringen Akkuspannung. Dies muss bei der Firmwareentwicklung bedacht werden.

Für die Implementierung der Schaltung werden Schottky Dioden eingeplant, da dieser Dioden-Typ eine kleinere Schwellenspannung hat. Bei den vorgesehenen Dioden handelt es sich um BAT54LP von Diodes Incorporated [DI19]. Statt eines Bipolartransistors wird ein n-Kanal MOSFET verwendet, damit der zur Ansteuerung des Bauteils benötigte Strom über `PWR_Hold` für einen leitenden Zustand geringgehalten und der Energieverbrauch minimiert wird. In dieser Applikation wird der MOSFET BSS816NW [ITA11], welcher geringe Abmessungen aufweist, eingesetzt. Die Widerstände R_2 und R_3 verringern den Stromfluss ebenfalls. R_1 darf nicht zu hoch gewählt werden, damit

eine deutliche Veränderung des Potentials bei button01 durch Betätigung des Tasters S_1 erreicht und vom Mikrocontroller erfasst wird.

In Abbildung 3.7 wird eine Simulation mit LTspice präsentiert, welche die Potenzialänderungen im System beim Einschalten zeigt. Nachfolgend wird auf diese näher eingegangen.

Veränderungen des PWR_Hold Potentials, die über die Firmware des nRF52840 Chips vorgegeben werden, können in der Simulation mit einer veränderlichen Spannungsquelle nachgeahmt werden. Die Betätigung eines Tasters für 0,6 s, wird durch zwei veränderliche und in Abhängigkeit der Simulationszeit definierter Widerstände R1_Taster und R2_Taster realisiert. Diese bilden im Zeitraum zwischen 1,5 s und 2,1 s einen Gesamtwiderstand von $0,2 \Omega$, ein gedrückter Taster wird simuliert. In der Zeit vor und nach der Aktion wird ein Leerlauf durch $100 \text{ G}\Omega$ approximiert. Die in Abbildung 3.6 beschriebenen Zustände können hier nachvollzogen werden. Das $\overline{\text{LDOEN}}$ Potential ist zu Beginn High (lila), das System ist ausgeschaltet. Sobald der Taster 1 betätigt wird, ist ein Stromfluss durch R1_Taster erkennbar (rot), $\overline{\text{LDOEN}}$ sinkt auf 0,5 V (Low) ab. Kurz bevor der Taster losgelassen wird, wird das PWR_Hold Potential High (blau), ein Stromfluss über den n-Kanal MOSFET ist möglich (gelb), wodurch das $\overline{\text{LDOEN}}$ weiter Low gehalten wird, das System ist eingeschaltet worden. Nach einer Zeitspanne von 2 s wird mit einem Low Zustand von PWR_Hold das Ausschalten des Systems imitiert und $\overline{\text{LDOEN}}$ wird wie zu Beginn High.

Dem System kann, wie bereits erwähnt, beispielsweise mit dem zweiten Taster S_2 über einen kurzen Tastendruck eine Nutzereingabe übermittelt oder bei einer zeitlich langen Betätigung und damit einer längeren Potenzialänderung vom Knoten button02, welche von einem GPIO des Mikrocontrollers erfasst wird, mitgeteilt werden, dass die Plattform ausgeschaltet werden soll. Die darauffolgende Aktion wird von der Firmware gesteuert, weshalb es über eine Entprellung des Tasters hinaus keines zusätzlichen Schaltungsaufwandes wie bei dem ersten Taster S_1 bedarf. Um das von der Steuereinheit erfasste Potential button02 eindeutig zu definieren, wird der Pull-Up Widerstand R_{11} eingebaut. Zusätzlich bilden R_{11} und C_6 einen Tiefpassfilter, sodass dies einen Lösungsansatz mit wenigen und günstigen Bauteilen darstellt, um ein Entprellen zu gewährleisten. Letztere kann auch beziehungsweise zusätzlich in der Firmware vorgenommen werden, jedoch erhöht sich dadurch die Komplexität der Firmware und der Stromverbrauch des nRF52840.

An dieser Stelle sei erwähnt, dass in dem Schaltplan, auf dem der Leiterplattenentwurf aufgebaut hat, noch eine unbemerkte Inkorrektheit enthalten war, welcher bei der Inbetriebnahme der Platinen identifiziert werden konnte. Anstatt von $\overline{\text{LDOEN}}$ über R_2 eine Verbindung zum Potential der Batteriespannung V_{bat} herzustellen, ist die Betriebsspannung V_{dd} konnektiert worden. Aufgrund dessen ist im High-Zustand von $\overline{\text{LDOEN}}$ eine Betriebsspannung von rund 0,9 V bereitgestellt worden und es hat sich eine Entladung des Energiespeichers im ausgeschalteten System gezeigt, obwohl ein Verbrauch von nur wenigen μA erwartet worden ist. Die Unrichtigkeit konnte händisch behoben werden und beeinflusst die Untersuchungen des gefertigten Systems in Kapitel 3.6 nicht.

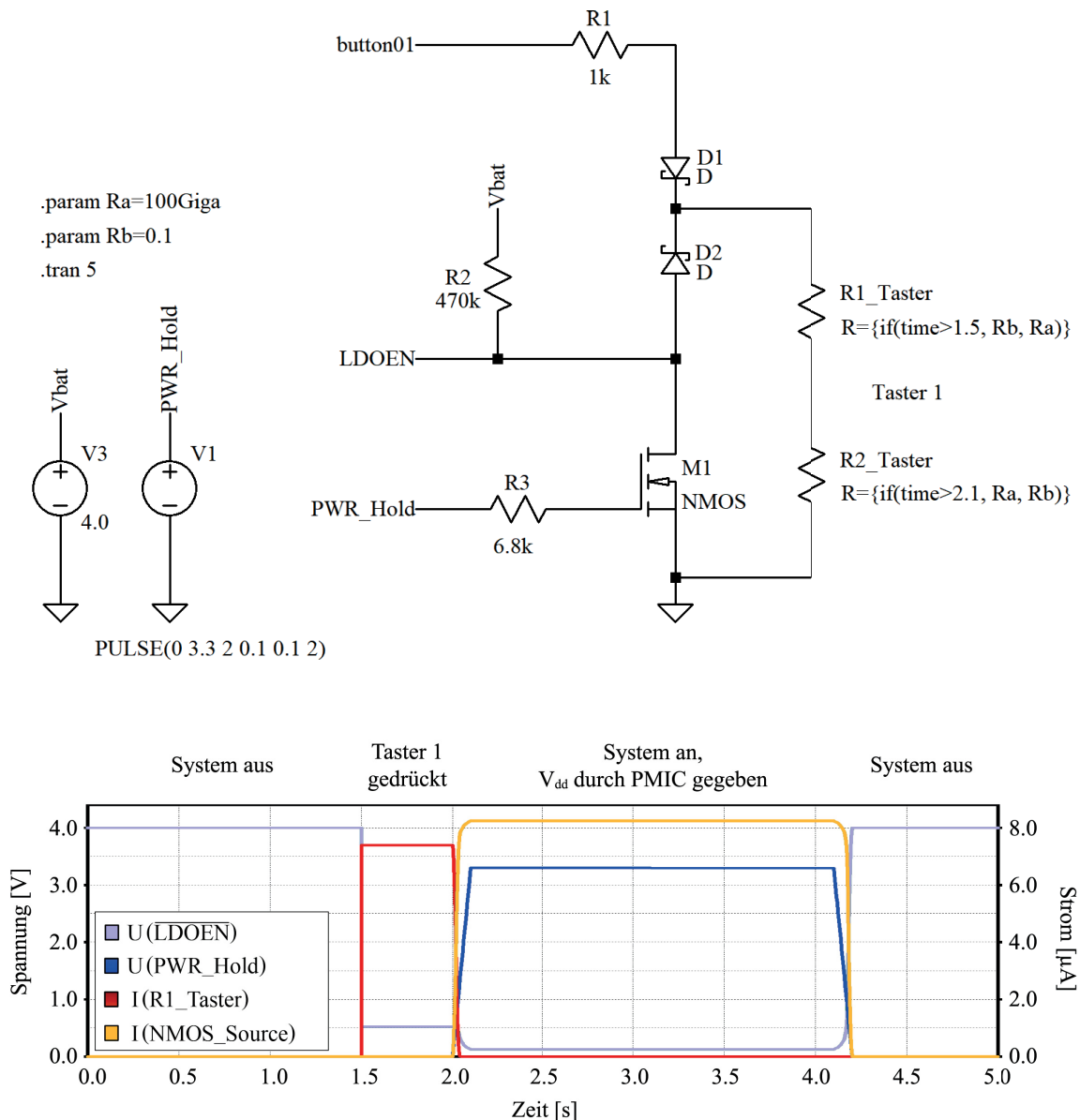


Abbildung 3.7: LTspice Simulation des Ein- und Ausschaltens des Systems mit Präsentation der Schaltung und Simulationsanweisungen (oben) sowie Darstellung der Simulation von relevanten Strömen und Spannungen (unten).

Audio Ein- und Ausgänge

Der Eingang der Audiodaten erfolgt durch die Erfassung von Schallwellen durch die miteinander verbundenen PDM-Mikrofone MK_1 und MK_2 (siehe Abbildung 3.8). Für die Übertragung des Stereokanals zum Mikrocontroller werden sowohl eine Leitung für das Taktsignal (PDM_CLK) als auch eine für Daten (PDM_DATA) benötigt. Abhängig von der Konnektierung des Select-Pins handelt es sich hier bei MK_1 um das vordere, bei MK_2 um das hintere Mikrofon. Zur Entkopplung der Versorgungsspannung werden C_3 und C_4 angebracht.

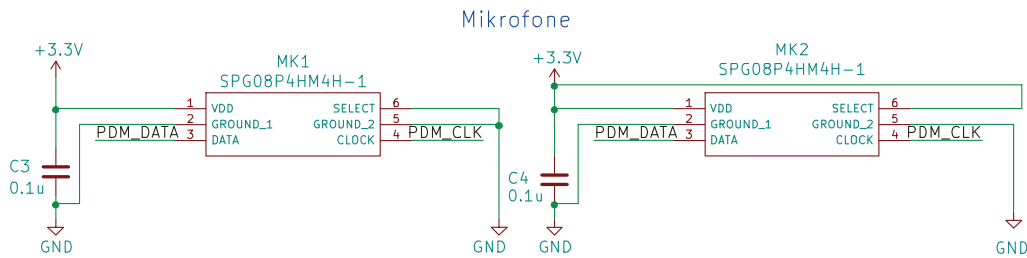


Abbildung 3.8: Audioeingang (Ausschnitt des Schaltplans zum Projekt PrimeHA).

Der Ausgang der Audiodaten, welche im Controller verarbeitet werden, erfolgt über den Audioverstärker IC₁ und die I²S Schnittstelle mit DIN, LRCLK und BCLK (siehe Abbildung 3.9). Mit $\overline{\text{SD_MODE}}$ kann der Verstärker durch den Mikrocontroller in einen Shutdown-Zustand versetzt und der gewünschte Datenkanal gewählt werden. Wie vom Hersteller empfohlen, werden am Pin für die Versorgung die Bypass-Kapazitäten C₁ und C₂ angebracht. Zur Kontaktierung des Anschlusses für den Hörer sind neben des Masseanschlusses die Audioausgänge OUTN und OUTP vorgesehen.

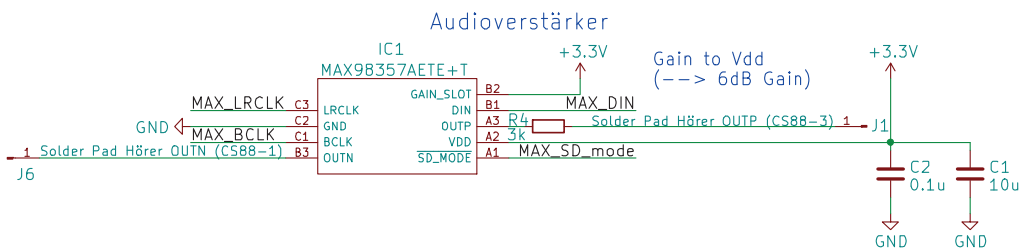


Abbildung 3.9: Audioausgang (Ausschnitt des Schaltplans zum Projekt PrimeHA).

Die wählbare Verstärkung des MAX98357A wird auf 6 dB festgelegt, indem der Pin mit der Bezeichnung GAIN_SLOT mit der Betriebsspannung verbunden wird. Des Weiteren wird mit R₄ ein 3 kΩ Widerstand zwischen Ausgang und Hörer geschaltet. Die Wahl der beiden Werte stellt sicher, dass der Ausgangspegel neben Maßnahmen wie beispielsweise eines Begrenzers für die Signale in der Firmware auch durch die Hardware bei einem 1 kHz-Sinuston einen Pegel von 96 dB SPL nicht überschreiten kann. Dies dient dem gesundheitlichen Schutz der Nutzer, da das System vornehmlich von Forschern und Entwickler ohne Hörbeeinträchtigung verwendet werden wird. Abhängig vom Schalldruckpegel, der Dauer der Exposition sowie dem betroffenen Individuum selbst kann es zu einem lärmbedingten Hörverlust kommen. Daher ist der Grenzwert von 96 dB SPL unter Berücksichtigung des OSHA-Lärmstandards (Occupational Safety and Health Administration) und der CDC-Empfehlungen (Centers for Disease Control and Prevention) unter der Annahme gewählt worden, dass die Plattform bei der höchsten Lautstärkeeinstellung nicht länger als eine halbe Stunde kontinuierlich verwendet wird [CDC16; DOL22]. Sowohl OSHA als auch CDC legen Grenzwerte für die Lärmbelastung am Arbeitsplatz fest. Die Werte konnten erst nach einer Kalibration des Funktionsmusters, welche im nächsten Unterabschnitt 3.3 erfolgt, festgelegt werden. Für die Messungen und deren Ergebnisse zur Bestimmung der Audioverstärkung durch den MAX98357A und den Widerstandswert von R₄ wird auf den Abschnitt 3.3.4 verwiesen.

Massendatenspeicher-Anbindung

Ähnlich wie der Bewegungssensor wird die microSD-Karte über SPI angebinden und die Versorgungsspannung mit dem Kondensator C₅ entkoppelt. Es gibt empirische Evidenz, dass durch eine Versorgungsspannung $\geq 3,0$ V sowie durch Pull-Up Widerstände (R₁₃ und R₁₄) bei Datenleitungen, welche nicht benötigt werden, eine zuverlässige Funktionsweise gegeben ist (siehe Abbildung 3.10).

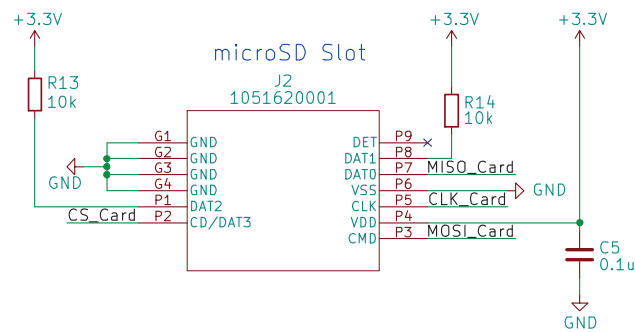


Abbildung 3.10: Massendatenspeicheranbindung (Ausschnitt des Schaltplans zum Projekt PrimeHA).

Bewegungssensor

Der Bewegungssensor ADXL362 ist über einen SPI-Bus (Serial Peripheral Interface) mit dem Mikrocontroller verbunden. Dieser umfasst die beiden Datenleitungen MISO (Master Input, Slave Output) und MOSI (Master Output, Slave Input), ein Taktsignal SCLK, sowie eine von der Steuereinheit kontrollierte, Low-aktive Chip Select Leitung \overline{CS} . Des Weiteren werden zwei Interrupt-Leitungen INT1 und INT2 mit GPIOs des Mikrocontrollers kontaktiert (siehe Abbildung 3.11).

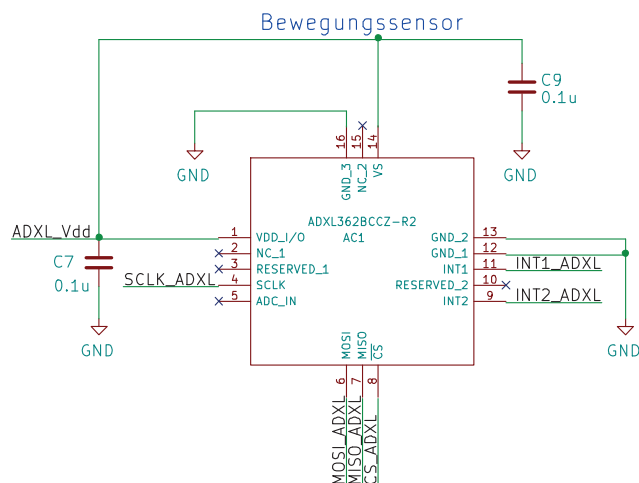


Abbildung 3.11: Bewegungssensor (Ausschnitt des Schaltplans zum Projekt PrimeHA).

Um auch hier die Stromversorgung zu entkoppeln, werden die im Datenblatt vorgeschlagenen keramischen Kondensatoren C₇ und C₉ vorgesehen. Zur Sicherstellung, dass der ADXL362 wie

vorgeschrieben immer von 0 V aus eingeschaltet wird, indem die Stromversorgungsanschlüsse und Kondensatoren zuvor entladen werden, wird V_{DDIO} mit einem GPIO des nRF52840 verbunden.

Externe Anschlüsse

Die primäre Programmierung des nRF52840 erfolgt über die Anschlusspins SWDIO (Serial Wire Debug Data Input/Output) und SWDCLK (Serial Wire Debug Clock) des ISP1807. Diese Pins können außerdem für Debugging genutzt werden, um dem Entwickler eine effiziente Fehlersuche und -analyse auf der Entwicklungs- und Testplattform bereitzustellen. Das UART Interface (Sendeleitung – TX, Empfangsleitung – RX) der zentralen Steuer- und Recheneinheit kann ebenfalls zur Kommunikation oder für Anpassungen genutzt werden. Alternativ kann ohne Veränderung der Hardware ein I²C-Protokoll verwendet werden. Die beiden GPIOs hierfür werden dafür nicht als Empfangs- und Sendeleitung, sondern als Takt- und Datenleitung (Serial Clock Line – SCL, Serial Data Line – SDA) genutzt. Für den nachfolgenden Schaltplanentwurf werden die Bezeichnungen für UART verwendet. Mit P0_18_RESET des ISP1807 kann ein Reset des Systems von außen erfolgen, indem der in der Systemfirmware entsprechend initialisierte Pin auf Masse gezogen wird. Des Weiteren muss eine Verbindungsmöglichkeit zur Ladeelektronik geschaffen werden, um die Akkuzelle über den LTC4063 laden zu können (Vchg, GND).

Die beiden UART GPIOs für RX und TX, die Programmierschnittstelle, Reset, Ladeanschluss sowie Masse und Betriebsspannung werden für einen externen Zugriff herausgeführt und können über eine 8-Pin-Anschlussbuchse kontaktiert werden.

Des Weiteren werden vier GPIOs der zentralen Steuer- und Recheneinheit, sowie zweimal Masse auf Testpunkte (TP1 – TP5, TP7) herausgeführt, um Möglichkeiten zur Überprüfung der Funktionalität, die Option zukünftig weitere Peripherien anzuschließen und Kommunikation zwischen Entwickler und System zu schaffen. Die nachfolgende Abbildung zeigt alle externen Anschlüsse.

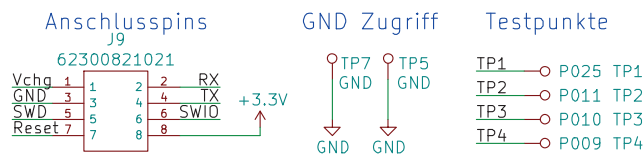


Abbildung 3.12: Externe Anschlüsse und Zugriffe auf die Entwicklungsplattform (Ausschnitt des Schaltplans zum Projekt PrimeHA).

3.3 Funktionsmuster

Bevor ein Leiterplattenentwurf im Rahmen dieser Arbeit erstellt worden ist, ist der Schaltplanentwurf und die Bauteilwahl in Form eines funktionalen Testaufbaus geprüft und der Erkenntnisse entsprechend gegebenenfalls angepasst worden. Mit Hilfe dessen ist die Verstärkung des Audioverstärkers sowie der Bauteilwert des vor dem Hörer eingebauten Widerstandes festgelegt worden.

Des Weiteren ist ein Lade- und Entladezyklus der Akkuzelle überwacht und dabei geprüft worden, ob die sicherheitstechnischen Anforderungen erfüllt werden.

3.3.1 Funktionaler Prototyp

Ein funktionaler Prototyp ist in Form eines Tischaufbaus implementiert worden, wie nachfolgend in Abbildung 3.13 gezeigt wird. Es sind die im Abschnitt 3.1.2 ausgewählten Bauteile verwendet und in Anlehnung an den Schaltplan aus Kapitel 3.2 auf einer Lochrasterplatine verdrahtet worden. Für die Bauteile MAX98357A und ADXL362 sind Breakoutboards von Adafruit verwendet worden, da diese bereits die erforderliche Peripherie integriert haben und die Realisierung eines Funktionsmusters dadurch vereinfacht werden konnte. Der Schaltplan dieser Breakoutboards ist mit der eigenen Implementation verglichen worden. Für die zentrale Steuer- und Recheneinheit ist das Test Board ISP1807-LR-TB [IS22b] zum ISP1807 verwendet und alle notwendigen Anschlüsse auf ein Breakoutboard herausgeführt worden. Für die passiven Komponenten mit Ausnahme der Schottky-Dioden sind Bauteile, die mittels Durchsteckmontage angebracht werden können, verwendet worden, wohingegen alle anderen Komponenten wie beispielsweise die Mikrofone auf SMD zu DIP-Adaptern montiert worden sind. Die Akkuzelle lässt sich für den Fall einer inkorrekten Funktionsweise der Implementation durch eine Steckverbindung leicht entfernen.

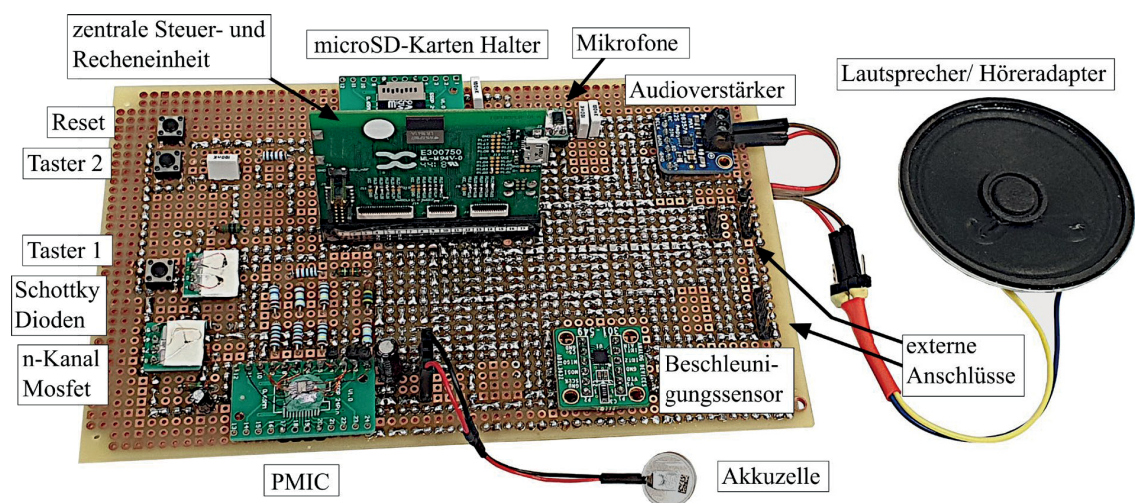


Abbildung 3.13: Beschrifteter funktionaler Tischaufbau mit Lautsprecher.

Die Abbildung zeigt die Implementation eines funktionalen Prototyps. Es können verschiedene Lautsprecher angeschlossen werden, inklusive des RIC-Moduls von Sonion mit dem entsprechenden Receiver. Zur komfortablen Kontaktierung sind für letzteren die Höreranschlüsse auf Pins herausgeführt worden.

3.3.2 Firmware und Programmierung der zentralen Steuer- und Recheneinheit

Die Programmierung der zentralen Steuer- und Recheneinheit sollte nicht Teil dieser wissenschaftlichen Arbeit sein. Daher ist die in C programmierte Firmware für die Verifizierung des Funktions-

musters von den Kollegen Herr Dr. Iko Pieper und Herr Dr. Tamas Harczos nach Besprechung der Anforderungen bereitgestellt worden. Neben Überprüfung der einzelnen funktionalen Blöcke ist sowohl festgelegt worden, welche Nutzereingaben durch kurze Betätigung der Taster möglich sein sollen, als auch die erforderliche Aktion zum Ein- und Ausschalten des Systems.

Die Anforderungen an eine erste Firmwareversion (Tabelle 3.6) für das Funktionsmuster sollten umgesetzt werden. Voraussetzung ist, dass alle Komponenten angebunden sind und die Stromversorgung über eine Akkuzelle erfolgt.

Tabelle 3.6: Anforderungen an die Firmware für eine grundlegende Funktionsweise der Hörgerätest-plattform und zur Kontrolle der Funktionalität einzelner Funktions-einheiten.

Funktionseinheit	Aktion des Nutzers	Ergebnis
Einschalten	Taster 1 wird gedrückt.	System wird eingeschaltet, Audiosignale sind über einen Lautsprecher vernehmbar. Power_Hold Potenzial ist High. $\overline{\text{LDOEN}}$ Potenzial ist Low.
Nutzereingabe Taster 1	Kurzer Tastendruck.	Potenzialänderung von button01. Lautstärke wird um 6 dB erhöht.
Taster 2	Kurzer Tastendruck.	Potenzialänderung von button02. Lautstärke wird um 6 dB verringert.
Ausschalten	Taster 2 wird lange ($t > 5$ s) gedrückt.	System wird ausgeschaltet, es gibt kein Ausgabesignal mehr. Power_Hold Potenzial ist Low. $\overline{\text{LDOEN}}$ Potenzial ist High.
Bewegungssensor	–	SPI-Kommunikation ist möglich. Das „Device ID Register“ des ADXL362 kann ausgelesen werden.
Massendatenspeicher-Anbindung	FAT12/FAT16/FAT32-formatierte microSD-Karte wird eingelegt.	Eine „Hello.txt“-Datei wird auf die Karte geschrieben. Bei einem Fehler wird die Firmware angehalten.
Audioein- und -ausgang Mikrofone Audioverstärker	Lautsprecher nahe den Mikrofonen platzieren. –	Es gibt eine hörbare Rückkopplung in Form eines Pfeifens. Aufnahmen beider Mikrofone oder ein im Chip selbst generiertes Signal sind über einen Lautsprecher vernehmbar.
Externe Anschlüsse	Einschalten des Systems.	Potenziale der Testpunkte TP1 – TP4 wechseln zehnmal zwischen High und Low nach dem Einschalten.
BLE	Einschalten des Systems.	BLE-fähiges Endgerät (Smartphone mit der App „nRF Toolbox“ [NS22b]) lässt sich mit dem System innerhalb der ersten Minute nach dem Einschalten verbinden.
Zentrale Steuer- und Recheneinheit	–	Ergebnisse von oben treten ein. In der Firmware lässt sich angeben, ob die Mikrofon-signale am Audioausgang ausgegeben werden sollen oder ein im nRF52840 generierter 1 kHz Sinuston.

Die Generierung und Ausgabe eines 1 kHz Sinustons neben den Aufnahmen durch die Mikrofone wird für Testmessungen, insbesondere die akustische Kalibrierung des Systems benötigt.

Die Programmierung des Mikrocontrollers erfolgt mit einem nRF52840 DK [NS21c] als Adapter zwischen Rechner und Funktionsmuster, da dieses über USB mit einem Computer verbunden und programmiert werden kann. Es befinden sich auf diesem dieselben benötigten Pins zur Programmierung. Indem SWDIO, SWDCLK sowie Vdd und GND zwischen Funktionsmuster und Development Kit verbunden werden, kann die Programmierung erfolgen. Die Stromversorgung erfolgt über das Development Kit. Eine Akkuzelle wird dafür nicht benötigt.

3.3.3 Verifizierung

Der Schaltplan als erster Teil eines Lösungskonzepts ist mit der in Abschnitt 3.3.2 beschriebenen Firmware und dem Funktionsmuster getestet und verifiziert worden. In den Anforderungen zur Firmware (3.3.2) sind bereits einige Aspekte für die Verifizierung behandelt worden, da diese bei der Programmierung des Mikrocontrollers berücksichtigt werden müssen und sind um drei von der Firmware unabhängige Faktoren zu erweitern:

1. Die Sicherstellung und Verifizierung einer korrekten Funktionsweise des Systems erforderte die Überprüfung der erwarteten und erfassbaren Ergebnisse aus Tabelle 3.6 nach definierten Aktionen des Nutzers.
2. Die Programmierbarkeit der Plattform muss gewährleistet sein.
3. Der PMIC muss zum einen im Betrieb eine stabile 3,3 V Spannungsversorgung bereitstellen, zum anderen die Akkuzelle mit einem festgelegten Ladestrom von 37 mA aufladen, sobald eine Ladespannung am dafür vorgesehenen Anschluss angelegt wird. Sobald dieser den Mindestladestrom von 1,47 mA (siehe Abschnitt 3.2) unterschritten hat, sollte der Ladezyklus automatisch beendet werden.
4. Es muss der Stromverbrauch geprüft werden. Zum einen soll festgestellt werden, ob die Approximation dessen aus Kapitel 3.1.4, welche unter festgelegten Randbedingungen erfolgt ist, mit den Messungen zum Gesamtverbrauch, aber auch zum Strombedarf der einzelnen Komponenten, ungefähr übereinstimmt. Ein weiterer Aspekt ist die Untersuchung der Auswirkungen von unterschiedlichen Einstellungen im nRF52840 auf dessen Strombedarf. Diese Erkenntnisse können für die Entwicklung der Firmware und insgesamt betrachtet für die Implementation eines energieeffizienten Systems genutzt werden. Es wird der Einfluss der Nutzung von BLE, unterschiedlicher CPU-Auslastungen und eines aktiven Sleep-Modus des nRF52840 betrachtet. Letzterer führt dazu, dass der Strombedarf des nRF52840 auf wenige Mikroampere in Zeiträumen, in denen keine Berechnungen durch die CPU erfolgen, gesenkt wird. Außerdem wird der Unterschied einer stabilen Stromversorgung mit Hilfe von DC/DC-Wandlern und Low-Dropout Reglern in Bezug auf den Strombedarf beleuchtet.

Funktionsweise der funktionalen Blöcke

Es lässt sich festhalten, dass die aus Tabelle 3.6 erwarteten Ergebnisse eingetreten sind. Nach erfolgreicher Programmierung des Mikrocontrollers sind die erforderlichen Aktionen schrittweise durchgeführt und das Eintreten der erwarteten Ergebnisse geprüft worden.

Die Verifizierung des Schaltungsentwurfes ist zusammenfassend erfolgreich gewesen und eine Kalibrierung, sowie akustische Charakterisierung konnte darauf aufbauend durchgeführt werden.

Programmierbarkeit

Die Programmierbarkeit des Systems lässt sich feststellen, indem auf Fehlermeldungen in der Entwicklungsumgebung, von der aus die Firmware-Implementation erfolgt, während des Programmiervorgangs geachtet wird.

Kontrolle der Energieverwaltung

Zur Verifikation eines Lade-/ Entladezyklus ist das verantwortliche Modul, der LTC4063, zunächst mit angeschlossener CP1254A4 Akkuzelle isoliert und über eine Last von 315Ω entladen worden, bevor eine vollständige Aufladung erfolgt ist. Neben der Ausgangsspannung beziehungsweise der vom LTC4063 bereitgestellten Betriebsspannung ist der Lade- und Entladestrom überwacht worden, indem der Spannungsabfall über einen Messwiderstand von $2,1 \Omega$ protokolliert worden ist. Die Erfassung der Potenziale über die Zeit ist mit einem Digital-Oszilloskop RTA4004 von Rohde & Schwarz [RS19] realisiert worden, indem das Oszilloskop über ein MATLAB-Programm [MW22] angesteuert und die sekundlich erfassten Daten in einer .mat-Datei gespeichert worden sind. Die Aufbereitung und Darstellung der Messergebnisse ist mit MATLAB durchgeführt worden und in Abbildung 3.14 dargestellt.

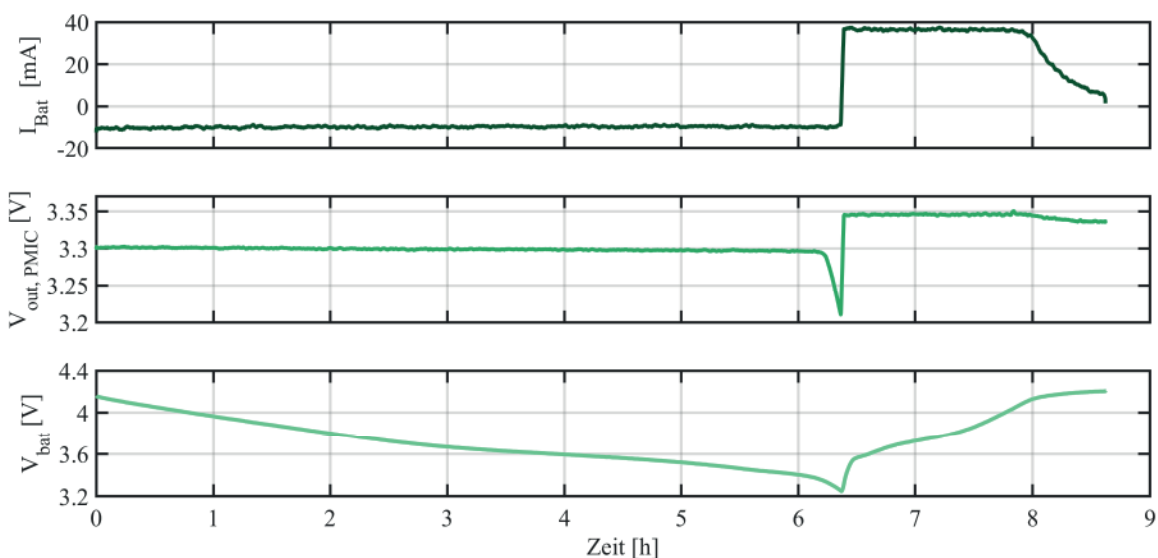


Abbildung 3.14: Test eines Entlade-/Ladezyklus mit dem PMIC LTC4063, einer CP1254A4 Akkuzelle und einer Last von 315Ω .

Das Laden der Akkuzelle erfolgt mit einem mittleren Ladestrom von etwa 36,5 mA über einen Zeitraum von rund 1,5 h. Der Ladezyklus wird nach etwa 2,2 h beendet, sobald der Mindestladestrom mit 1,42 mA unterschritten wird.

Über den gesamten Entladezeitraum von rund 6 h und 15 min wird eine Ausgangsspannung mit einem Mittelwert von 3,298 V, sowie maximal 3,31 V und mindestens 3,233 V am Ausgang der Entladeelektronik bereitgestellt. Damit weicht der Mittelwert um 0,06% vom Idealwert 3,3 V ab. Unter Berücksichtigung von Toleranzen bei der Widerstandsfertigung wird die Anforderung an die Ausgangsspannung erfüllt.

Der Mittelwert der Batteriespannung während des Entladens beträgt 3,7 V wie im Datenblatt zu der Akkuzelle angegeben. Wenn die Batteriespannung einen Wert von ungefähr 3,35 V erreicht, kann eine 3,3 V-Ausgangsspannung des PMICs nicht gehalten werden. Es folgt der Ladevorgang, welcher bei einer Batteriespannung von 4,2 V beendet wird.

Zusammenfassend ist die funktionale Verifikation des PMICs erfolgreich gewesen.

Stromverbrauch

Für die unter 4. aufgeführten Untersuchungen sind die Verbrauchswerte der zentralen Steuer- und Recheneinheit, der Mikrofone, des Audioverstärkers und der Gesamtverbrauch bei unterschiedlichen Programmierungen des nRF52840 gemessen worden. Die Ergebnisse sind in Abbildung 3.15 dargestellt. Die Verbrauchswerte bei der Verwendung einer microSD-Karte werden nicht zusätzlich aufgezeigt, da die Messwerte eine starke Schwankung aufweisen. Es sei jedoch erwähnt, dass der Gesamtverbrauchswert allein durch das Einstecken einer Speicherkarte steigt. Der Beschleunigungssensor ADXL362 benötigt einen Betriebsstrom weniger Mikroampere. Die Genauigkeit der zur Verfügung stehenden Messgeräte reicht nicht aus, um diesen Stromwert mit ausreichender Genauigkeit zu ermitteln.

Die Programmierung des nRF52840 hat sich in drei Aspekten unterschieden: Die Verwendung von DC/DC-Wandlern oder Abwärts-Regler für eine stabile Versorgung, Sleep-Modus aktiv oder inaktiv sowie Bluetooth Low Energy aktiv oder inaktiv. BLE ist in diesem Versuchsaufbau genutzt worden, indem eine Verbindung zwischen nRF52840 und einem Smartphone hergestellt und gehalten worden ist, während sekundlich eine Statusnachricht an das mobile Endgerät geschickt worden ist. Damit ergeben sich acht mögliche Kombinationen durch die drei Eigenschaften. Des Weiteren kann zwischen vier möglichen Auslastungen der CPU unterschieden werden: 3%; 36%; 51%; 78%.

Die Mikrofone und der Audioverstärker weisen anders als der ISP1807 einen von der CPU-Auslastung unabhängigen Verbrauchswert auf. Die Mikrofone zusammen weisen wie erwartet einen Strombedarf von 1,2 mA auf. Der Audioverstärker benötigt im Mittel 2,37 mA. Dies entspricht ungefähr dem im Abschnitt 3.1.4 gemessenen Mindestbedarf. Der Verbrauch des ISP1807 liegt zwischen 1,22 mA und 8,28 mA. Diese differierenden Werte spiegeln sich in den nachfolgenden und mit MATLAB erzeugten Diagrammen zum Gesamtstromverbrauch des funktionalen Tischaufbaus wider.

Unterscheiden sich zwei Kurven durch aktives oder inaktives Bluetooth Low Energy, sind sie in derselben Farbe gezeichnet, die Linie bei aktiviertem BLE ist jedoch gestrichelt. Die Diagramme zu den Messreihen, welche mit Low-Dropout Reglern aufgenommen worden sind, sind mit einem dunkleren blau als diejenigen mit DC/DC-Wandlern gezeichnet. Durch Marker wird eine Unterscheidung zwischen aktivem (x) und inaktivem (o) Sleep Modus gekennzeichnet.

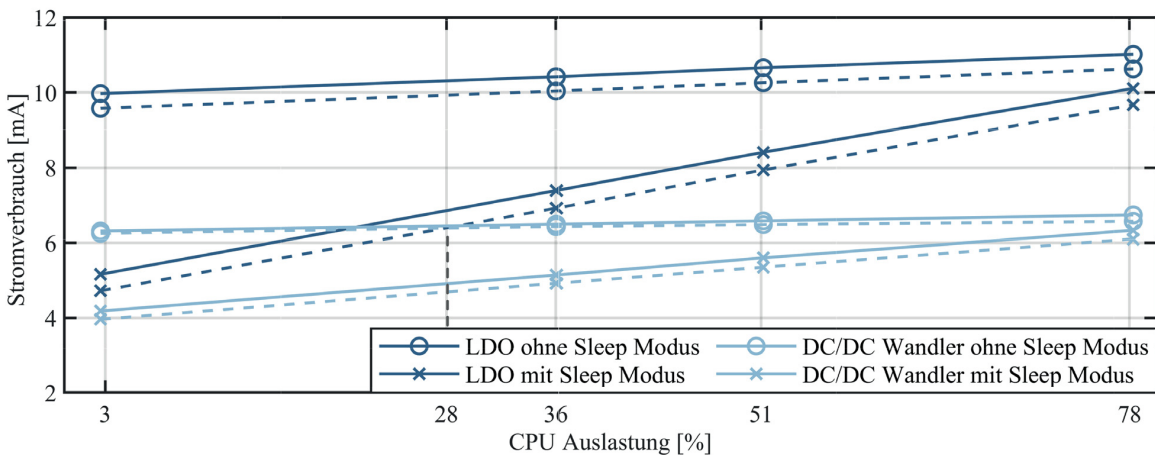


Abbildung 3.15: Stromverbrauch des funktionalen Testaufbaus in Abhängigkeit der CPU-Auslastung mit Unterscheidung energieintensiver Einstellungen in der Firmware.

Es lässt sich deutlich erkennen, dass die Nutzung von BLE einen nahezu konstanten Verbrauchsanstieg von weit weniger als ein Milliampere zur Folge hat. Die Verwendung von DC/DC-Wandlern senkt den Strombedarf im Vergleich zur Verwendung von Low-Dropout Reglern deutlich, wobei der absolute Unterschied ohne zusätzliche Nutzung des Sleep-Modus größer ist. Wird der LDO in Kombination mit Sleep Modus bei einer geringen CPU-Auslastung (ohne BLE < 28%) verwendet, ist der Strombedarf geringer als bei der Verwendung von DC/DC Wandlern ohne Sleep Modus.

Zusammenfassend entspricht der Strombedarf der Mikrofone und des Audioverstärkers, den erwarteten Werten. Die Approximation zur zentralen Steuer- und Recheneinheit aus Kapitel 3.1.4 geht von einer 100% - Auslastung der CPU, inaktivem Sleep-Modus und einer drahtlosen Kommunikation mit kontinuierlichem Datenaustausch aus. Dies begründet die messtechnisch erfassten, geringeren Verbrauchswerte. Für die Firmware-Entwicklung wird festgehalten, dass DC/DC-Wandler und Sleep-Modus, soweit dies möglich ist, eingesetzt werden sollten.

3.3.4 Kalibrierung und hardwaretechnische Limitierung des Ausgangspegels

Um den Träger der Entwicklungsplattform keinem gesundheitlichen Risiko auszusetzen, wird der Ausgangspegel des Systems auf ein Maximum von 96 dB SPL in Bezug auf ein 1 kHz Sinussignal begrenzt (siehe Audio Ein- und Ausgänge in Kapitel 3.2). Im Schaltkreis befindet sich hierfür ein Widerstand zwischen Ausgang des Audioverstärkers MAX98357A und Höreranschluss. Zum anderen ist eine sorgfältige Auswahl des Hörers unter Berücksichtigung der gewählten Verstärkung durch den Audioverstärker durchgeführt worden, da das beabsichtigte RIC-Modul von Sonion mit

drei verschiedenen Verstärkerstufen erhältlich ist. Abhängig vom verwendeten RIC-Modul erfolgt eine variierende Verstärkung über die Frequenzen.

Für die Hörerauswahl ist zunächst ohne zusätzlichen Widerstand ein 1 kHz Sinussignal mit einer auf der Firmware basierenden Lautstärke von -20 dB FS generiert worden. Ein 1 kHz Sinuston bei 94 dB SPL eines Schallkalibrators von Brüel & Kjaer Typ 4231 [BK22] ist mit einem Messmikrofon in dB FS (RMS) gemessen worden. Mit dieser Referenz können die Ausgangspegel von der Einheit dB FS (RMS) in der Digitaltechnik zu den Schalldruckpegelangaben in dB SPL wie in (3-4) umgerechnet werden:

$L_{\text{SPL},1\text{kHz}}^{\text{real}}$ Schalldruckpegel des 1 kHz-Testsignals in dB SPL.

$L_{\text{FS}}^{\text{Calib}}$ Aufgenommener Pegel des Schallkalibrators in dB FS
(1 kHz Kalibriersignal bei 94 dB SPL).

$L_{\text{FS},1\text{kHz}}$ Aufgenommener Pegel des 1 kHz-Testsignals in dB FS.

$$L_{\text{SPL},1\text{kHz}}^{\text{real}} = L_{\text{FS}}^{\text{Calib}} - L_{\text{FS},1\text{kHz}} + 94 \text{ dB SPL} \quad (3-4)$$

Die Hörer mit den drei verschiedenen und zur Verfügung stehenden RIC-Modulen sind am funktionalen Prototyp angeschlossen worden. Der Hörerausgang ist über einen Schallschlauch und einen 2 cc Kuppler nach IEC-118 an das Messmikrofon angeschlossen und die Aufnahmen in der Messbox TBS25 von Interacoustics [Int08] durchgeführt worden. Bei einer permanenten Festlegung der Verstärkung auf 6 dB durch den Audioverstärker sind die nachfolgenden Ausgangspegel in Tabelle 3.7 messtechnisch ermittelt worden. Die gemessenen dB FS-Werte sind bereits in dB SPL umgerechnet.

Tabelle 3.7: Bestimmung des Ausgangspegels bei 1 kHz in Abhängigkeit der Hörerwahl.

Signalquelle für 1 kHz Ton		Ausgangspegel in dB SPL	
	Schallkalibrator	94,0	
PrimeHA-Digitalpegel: -20 dB FS	[RIC S	95,3
		RIC M	103,3
		RIC P	109,9

Auf Grundlage der Messungen ist das RIC-Modul 4400 beziehungsweise das RIC-Modul S mit der geringsten Verstärkung gewählt worden.

Zur Ermittlung des erforderlichen Widerstands, sodass das ausgegebene Audiosignal 96 dB SPL (bei höchster Lautstärkeeinstellung in der Firmware) nicht überschreiten kann, sind verschiedene Widerstände zwischen Audioverstärker und Hörer eingebaut sowie ein Hörer mit dem ausgewählten RIC-Modul angeschlossen worden. Gleichzeitig ist überprüft worden, ob durch eine Verringerung der Last am Ausgang des Audioverstärkers stärkere Verzerrungen entstehen, da das Datenblatt des MAX98357A keine Auskunft zu diesem Fall gibt, oder der Betriebsstrom des

Systems steigt. Dafür ist, wie nachfolgend in Abbildung 3.16 aufgezeigt, ein zweiter Widerstand so eingebaut und dimensioniert worden, dass aus Sicht des Audioverstärkers der Wert der Gesamtlast (R_1 , R_2 , $R_{\text{Hörer}}$) gleich dem Wert des Innenwiderstands vom Hörer ($R_{\text{Hörer}}$) ist (siehe (3-5)).

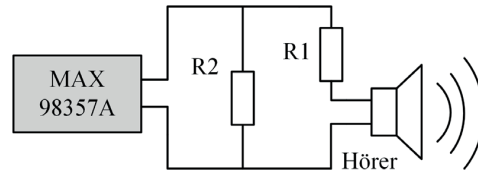


Abbildung 3.16: Platzierung zweier Widerstände zwischen Audioverstärker-Ausgang und Hörer.

$$R_{\text{Hörer}} = \frac{R_2 \cdot (R_1 + R_{\text{Hörer}})}{R_1 + R_2 + R_{\text{Hörer}}} \rightarrow R_2 = \frac{R_{\text{Hörer}} \cdot (R_1 + R_{\text{Hörer}})}{R_1} \quad (3-5)$$

Es ist wie bei dem Messaufbau zur Hörerauswahl nach einer Kalibration des Messmikrofons ein 1 kHz Sinuston abgespielt sowie das Ausgabesignal über einen Schallschlauch und 2 cc Kuppler nach IEC-118 in der Messbox TBS25 von Interacoustics erfasst worden [Int08]. Der Ton ist mit verschiedenen in der Firmware definierten Pegeln zwischen 0 dB FS und -30 dB FS abgespielt worden. Zusätzlich ist der Stromverbrauch durch Messung des erfassbaren maximalen sowie durchschnittlichen Betriebsstroms (I_{max} und I_{avg}) mit Hilfe einer programmierbaren Spannungsquelle, dem X-NUCLEO-LPM01A und dem dazugehörigen Softwaretool STM32CubeMonitor [STM17] überwacht worden. Zur Bewertung des Ausgabeaudiosignals ist die harmonische Gesamtverzerrung (THD) auf Basis der Messungen berechnet worden. Nachfolgend wird in Tabelle 3.8 ein Ausschnitt der Messergebnisse gezeigt.

Tabelle 3.8: Messergebnisse zur Limitierung des Ausgangspegels mit einem oder zwei Widerständen nach dem Audioverstärker nach festgelegter Hörerwahl.

$R_{\text{Hörer}}$		223,5 Ω				
Pegel in der Firmware in dB FS	R_1 in Ω	R_2 in Ω	I_{avg} in mA	I_{max} in mA	Ausgangspegel in dB SPL	THD in dBc
-30	2490	240	11,16	17,94	64,86	-26,10
-18	2490	240	12,21	19,32	77,62	-27,53
0	2490	240	21,79	33,00	96,78	-10,22
-30	2490	–	11,07	17,27	64,85	-25,94
-18	2490	–	11,10	17,55	77,63	-27,56
0	2490	–	11,61	18,13	96,77	-10,95
-30	2740	–	11,07	17,56	64,11	-15,614
-18	2740	–	11,11	17,52	77,11	-27,651
0	2740	–	11,56	18,14	95,99	-11,004

Es lassen sich zwei Ergebnisse festhalten.

1. Die Verwendung eines zweiten Widerstandes zur Verringerung der Last aus Sicht des Audioverstärkers bringt keine erkennbare Verbesserung der Audioqualität mit sich. Darüber hinaus zeigt sich ein geringerer Stromverbrauch, wenn kein zweiter Widerstand eingebaut wird.
2. Es wird mindestens ein $2,74\text{ k}\Omega$ Widerstand zwischen Ausgang des Audioverstärkers und Hörer benötigt, um das Ausgangssignal auf maximal 96 dB SPL bei einem 1 kHz Sinussignal zu begrenzen. Für die Applikation ist ein Bauteilwert von $3\text{ k}\Omega$ aufgrund der Verfügbarkeit und vorhandener Widerstandswerte gewählt worden, wie im Schaltplan ersichtlich wird.

3.4 Leiterplatte

Auf Grundlage der erfolgreichen Schaltungsverifizierung konnte der nächste Schritt zur Implementierung eines portablen und hinter dem Ohr platzierbaren Systems geringer Größe, ein Leiterplattenentwurf, eingeleitet werden. Aus Kostengründen und um das Potenzial zur Modifizierbarkeit zu erhalten, insbesondere da es sich um den Prototyp einer Entwicklungsplattform handelt, wird eine mehrlagige Standardleiterplatte, keine Sondertechniken wie beispielsweise ein flexibles PCB, vorgesehen. Der Entwurf erfolgt, wie die Entwicklung des Schaltplans in KiCad.

3.4.1 Leiterplattenkontur

Bevor eine Platzierung der Bauteile erfolgen kann, muss die Kontur der Platine definiert werden.

Um die Anforderung eines portablen Systems mit Adaptabilität zu einem HdO mit RIC bei akzeptablen Kosten zu erfüllen, spielt die Leiterplattenkontur eine tragende Rolle. Die Approximation des Gesamtflächenbedarfs in Abschnitt 3.1.3 hat bereits 8 cm^2 vorausgesagt. Die Größe für einen komfortabel tragbaren Prototypen ist jedoch begrenzt, weshalb kein zusätzlicher Platz für die ergonomischen Erfordernisse zum Platzieren der Plattform hinter dem Ohr verfügbar ist. Daher ist die Leiterplattenkontur so gewählt worden, dass alle notwendigen Formen, die ein Gehäuse bereitstellen muss, bereits berücksichtigt worden sind. Somit muss kein zusätzlicher Raum zur Formbildung entstehen. Die Platzierung einer Akkuzelle ist ebenso bedacht worden. Sie wird im unteren Teil des Systems angebracht, da hier mehr Platz bereitgestellt werden kann, aber auch für eine optimale Gewichtverteilung. Die maximale Breite beträgt 22 mm, die Gesamtlänge 57,5 mm.

Das Ergebnis dieser Vorüberlegungen zum Leiterplattenentwurf wird in Abbildung 3.17 ersichtlich.

3.4.2 Designrichtlinien

Vor dem Entwurf eines PCBs müssen die Designrichtlinien festgelegt werden. Eine Zusammenfassung der nachfolgenden Ausführungen ist in Tabelle 3.9 gezeigt. Damit wird sichergestellt, dass die

Fertigungstoleranzen des Leiterplattenherstellers eingehalten werden und alle Anforderungen für ein funktionsfähiges Ergebnis durch den Entwickler bedacht werden.

Da ein Großteil der Bauteile nicht handlötbar sind, musste ein Hersteller gewählt werden, bei dem die Bestückung der Platine ebenfalls beauftragt werden kann. Die Wahl ist auf das Unternehmen Eurocircuits [Eur22a] gefallen. Bei der Festlegung der Leiterbahnbreiten und Durchmesser von Bohrungen ist auf die Klassifizierungstabelle des Herstellers geachtet worden [Eur22b].

Für die Theorie hinter den nachfolgenden Ausführungen wird auf das Kapitel 2.2.3 verwiesen.

Es ist versucht worden die Leiterbahnen so breit zu wählen wie es die Löt pads erlauben, keine spitzen Winkel zu verwenden, so viel Abstand wie möglich zwischen ihnen bereitzustellen und gleichzeitig so kurz wie möglich zu halten. Für letzteres spielt die Platzierung der Elemente eine wichtige Rolle (siehe Abschnitt 3.4.3). Bei der Leiterbahnbreite ist die Strombelastbarkeit berücksichtigt worden. Es handelt sich jedoch um Stromstärken von wenigen Milliampere und nach einer rechnerischen Überprüfung können bei einer Kupferfolienstärke von 18 μm selbst die Mindestmaße der Leiterbahnbreite von 90 μm diese transportieren. Um die Bahnen so breit wie möglich zu gestalten, werden für die Stromversorgung Bahnen mit 400 μm und für das restliche Leiterbild 150 μm eingeplant. Die Größe der Bohrlöcher für Durchkontaktierungen werden maßgeblich durch die Löt pads des ISP1807 vorgegeben. Mit den Abmessungen 0,4 mm x 0,4 mm eines Pads und einem Abstand zwischen diesen von 0,25 mm darf der Endlochdurchmesser der Bohrungen bei einem Abstandsmaß von 150 μm zwischen Leiterbahnen und/oder Pads unter Berücksichtigung der Notwendigkeit innenliegende Anschlüsse weiterhin nach außen führen zu können, maximal 0,45 mm betragen.

Zum Routen der innenliegenden ISP1807-Anschlüsse müssen Vias (Vertical Interconnect Access) in die für die Bestückung vorgesehenen Pads gesetzt und die entstandenen Löcher gefüllt werden (Via-in-Pad Technologie). Die Fertigungskosten für die Platine werden dadurch deutlich erhöht, jedoch ist die Anwendung dieses Verfahrens unerlässlich.

Um die Leiterplatte so klein wie möglich, mit einer guten Masseanbindung und Schirmung, kurzen Erdungs- und Stromversorgungsverbindungen sowie einer verbesserten EMV zu implementieren, wird eine vierlagige Platine gewählt, wobei die Außenlagen zur Bestückung und für das Leiterbild, die beiden innenliegenden als Masse- und Versorgungsfläche definiert werden. Zusätzlich werden freie Flächen der Außenlagen mit Masse gefüllt und wenn nötig mit der innenliegenden Erdungsfläche verbunden, um nicht kontaktierte Bereiche zu vermeiden. Stütz- und Entkopplungskondensatoren werden so nah wie möglich an den Versorgungspins der zu unterstützenden Bauteile platziert.

Sofern vorhanden, ist für die Entwicklung eine Leiterplatte auf Footprints der Bauteilhersteller oder auf von Eurocircuits verifizierte zurückgegriffen worden. Zusätzlich ist ein Abgleich mit den Maßangaben in den Datenblättern der Bauteile und eine Anpassung, falls diese notwendig gewesen ist, durchgeführt worden.

Tabelle 39: Designrichtlinien für den Leiterplattenentwurf.

Designrichtlinien (Leiterplattenhersteller Eurocircuits)		
➤ Leiterbahnbreite für die Stromversorgung	400 μm	} Leiterbildklasse 7 Bohrklasse E
➤ Andere Leiterbahnen	150 μm	
➤ Endlochdurchmesser	0,45 mm	
➤ Mehrlagige Leiterplattentechnologie	4 Lagen	
➤ Innenlagen	Masse- und Versorgungsfläche	
➤ Via-in-Pad Technologie zu Kontaktierung innenliegender Pads vom ISP1807		
➤ Stütz- und Entkopplungskondensatoren so nah wie möglich an den Versorgungspins der Bauteile		
➤ Verwendung verifizierter Footprints		

3.4.3 Leiterplattenentwurf

Vor dem Routing der Platine musste eine wohlüberlegte Platzierung der Bauteile erfolgen. Neben den Aspekten im Unterkapitel zuvor, mussten folgende Faktoren berücksichtigt werden:

1. Zentrale Platzierung der Steuer- und Recheneinheit ISP1807. Kurze Verbindungen zwischen Mikrocontroller und den angesteuerten funktionalen Blöcken.
2. Kupferfreie Fläche von 5 mm \times 18 mm um die Antenne im ISP1807 herum nach [IS22a:15].
3. Vom Kopf des Nutzers beim Tragen der Plattform wegzeigende Antenne.
4. Beidseitig hinter dem Ohr tragbare Plattform durch entsprechende Bauteilplatzierung.
5. Mindestabstand von 15 mm zwischen den Mikrofonen für eine firmwarebasierte Implementation einer Richtcharakteristik.
6. Platzierung der Taster und Mikrofone am vom Ohr wegzeigenden Rand der Platine ohne gegenüberliegende Positionen bei Vorder- und Rückseite einzunehmen, sodass das Betätigen eines Tasters keine unangenehmen Geräusche durch die unmittelbare Nähe zu einem Mikrofon erzeugt.
7. Kurze Verbindungsdrähte zwischen Löt pads zur Kontaktierung eines Hörers und Hörermoduls unter Berücksichtigung von händischer Lötbarkeit. Platzierung des Audioverstärkers, welcher die an den Hörer zu übertragenden Signale liefert, nahe dieser Löt pads.
8. Platzierung der Löt pads zum Anschließen der Akkuzelle nahe des PMICs.
9. Anordnung der Testpunkte in Reihe in einem 1,27 mm Raster für eine gleichzeitige Erfassung mit einer 1,27 mm-Federkontaktleiste.
10. Externer Massezugriff in Form einer größeren Fläche von beispielsweise 2,5 mm \times 2,5 mm zur Erleichterung von Tests und Messungen an der Platine.
11. Zwei ausreichend große Bohrlöcher zur Befestigung der Platine in einem Gehäuse.

Da die Via-in-Pad Technologie eine erhöhte Wahrscheinlichkeit von Fehlern während der Produktion und erhöhte Kosten nach sich zieht, sollte die Anzahl an kontaktierten, innenliegenden Pads geringgehalten werden. Soweit möglich sind unter Berücksichtigung der benötigten Funktionalität, rückwirkend im Schaltplan GPIOs gewählt worden, deren Pads beim Bauteil außenliegend sind oder einfach nach außen geführt werden können.

In Abbildung 3.17 sind mehrere Bilder zum Endergebnis des Leiterentwurfs mit KiCad dargestellt. Es werden sowohl die Leiterplattenkontur, die Platzierung der Bauteile als auch das Routing der Leiterbahnen sowie ein 3D Modell der gefertigten Platine zur Veranschaulichung gezeigt.

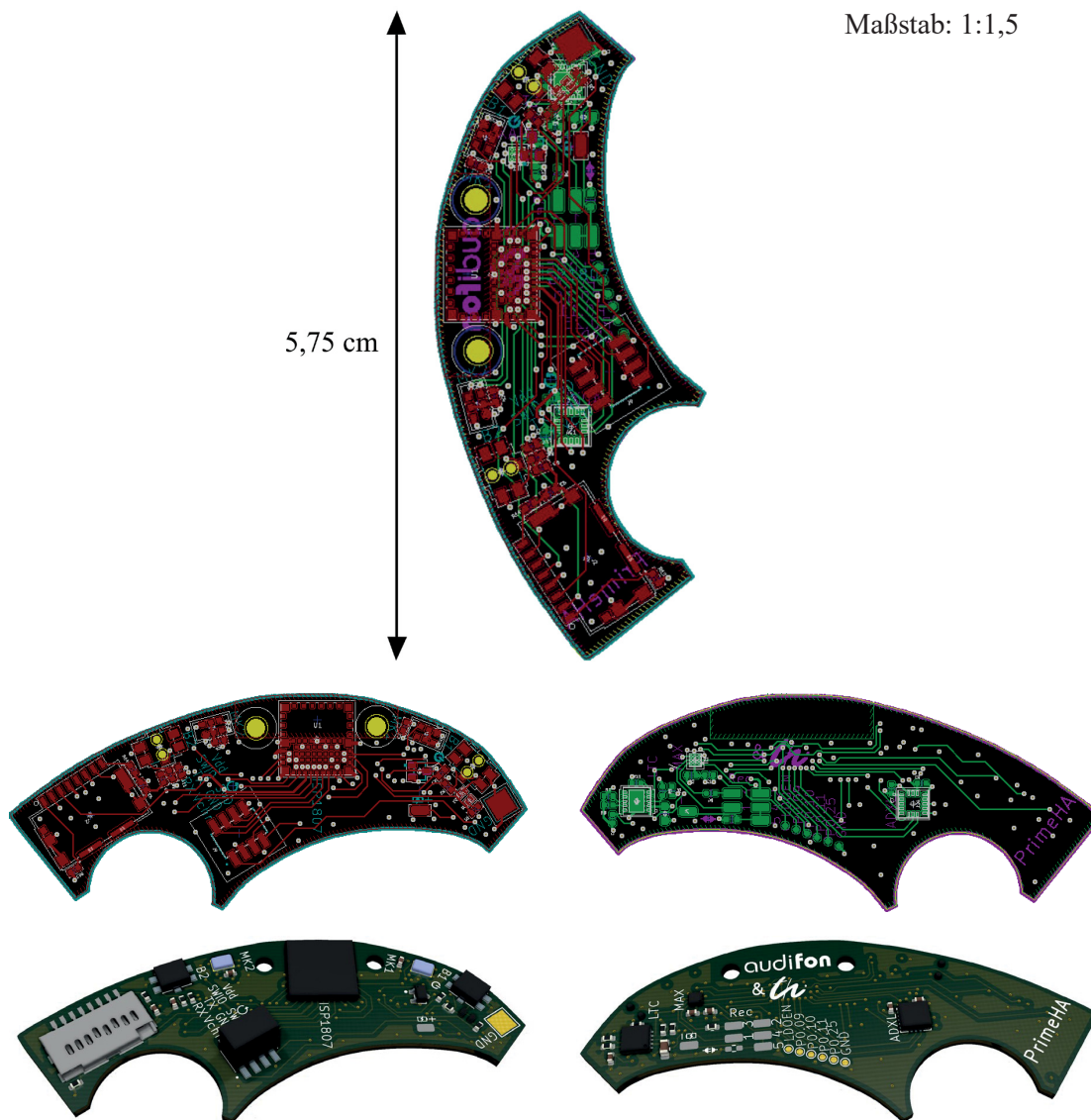


Abbildung 3.17: Entwurf der Leiterplatte zum Projekt PrimeHA in KiCad. Darstellung der Bauteilplatzierung, des Routings sowie 3D Modells der gefertigten Platine vorne (rot, links) und hinten (grün, rechts).

3.4.4 Kostenkalkulation und Bestellvorbereitung

Vor der Bestellung zur Fertigung als auch Bestückung der Platine mussten neben der Aufbereitung aller benötigten Daten die Kosten abgeschätzt werden. Es ist eine Stückliste erstellt worden, welche die Referenzkennzeichnung der Bauteile, eine kurze Beschreibung zu den Komponenten sowie die jeweilige Anzahl enthält. Diese ist zudem um die Einzel- und Gesamtkosten der Komponenten erweitert worden. Es musste mit dem Platinen-Hersteller geklärt werden, ob Bauteile, deren Verfügbarkeit zur Erstellungszeit dieser Arbeit begrenzt gewesen ist und daher frühzeitig besorgt worden sind, vom Kunden (audifon) bereitgestellt werden können. Üblicherweise werden bei einer Bestückung die erforderlichen Komponenten vom Hersteller der Platine erworben. Des Weiteren ist eine Analyse der Fertigungs- und Positionsdaten durch den Hersteller durchgeführt als auch ein Angebot angefordert worden.

Es sollten zehn bestückte Exemplare gefertigt werden. Die Akkuzellen sind für dieses Projekt vom Hersteller VARTA kostenlos bereitgestellt worden. Für den verwendeten Hörer und die dazugehörige Anschlussbuchse können keine Kosten angegeben und bei den Gesamtkosten berücksichtigt werden, da die Komponenten von audifon bereitgestellt worden sind und es sich hierbei um firmeninterne Informationen handelt.

Die gesamte Stückliste und Kostenkalkulation werden im Anhang in Tabelle A.1 gezeigt und teilt sich in den Betrag für die Komponenten, die Fertigung der Leiterplatten sowie die Bestückung auf. Insgesamt sind für die zehn bestückten Leiterplatten Kosten von etwa 1270 € entstanden, für eine einzelne Testplattform entsprechend 127 €.

3.5 Gehäusekonzept

Die Entwicklungsplattform, bestehend aus Platine, Akkuzelle, Höreranschluss sowie Hörer, kann in einem Gehäuse platziert werden. Tests und Messungen, die das Tragen des Moduls in natürlicher Geräuschumgebung erfordern, können dadurch durchgeführt werden.

Es sind folgende Anforderungen an das Gehäuse gestellt worden:

1. Befestigung der Platine im Gehäuse.
2. So klein und schmal wie möglich.
3. Abtrennung der Akkuzelle aus Sicherheitsgründen durch einen schmalen Steg.
4. Aussparungen für Taster, Mikrofone, microSD-Karte, Pin-Buchse und Höreranschluss.

Mit dem CAD Programm SOLIDWORKS [DS22], ist ein 3D Modell für ein Gehäuse erstellt worden. Dieses ist mittels 3D Druck in eine physische Form umgesetzt worden. Die Wanddicke beträgt 1 mm. Das nachfolgend beschriebene Gehäusekonzept und die Anordnung der Komponenten, sowie die Position der Aussparungen wird aus den 3D-Modellen in Abbildung 3.18 für den Gehäusedruck ersichtlich. Nummern und Pfeile verweisen auf die entsprechenden Stellen im 3D-Modell.

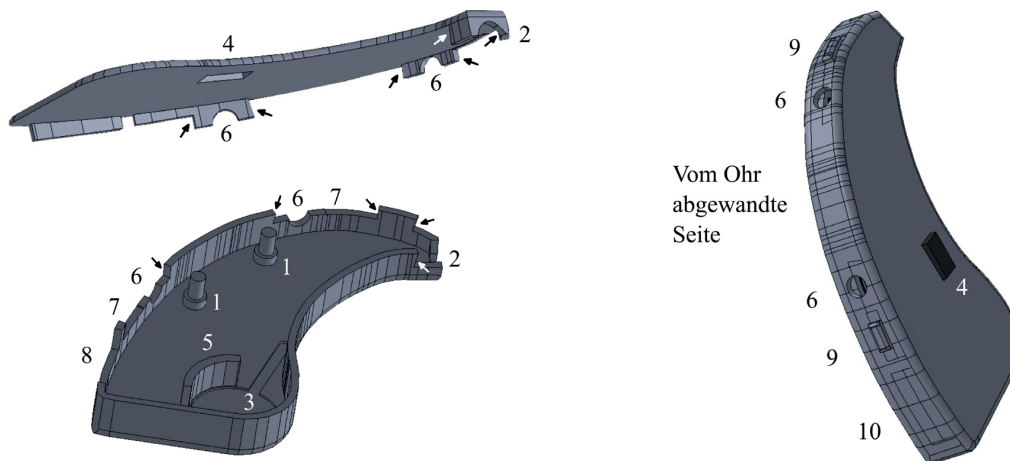


Abbildung 3.18: CAD-Modell des Gehäuses für PrimeHA mit Nummern, auf welche an den entsprechenden Textstellen verwiesen wird. Gehäusedeckel (oben links), Gehäuseschale (unten links) sowie geschlossenes Gehäuse mit eingesetzten Tastern und microSD-Karten-Abdeckung (rechts).

Die Platine kann passgenau in das Gehäuse eingesetzt werden und wird zusätzlich durch zwei Positionierungsstege (1), die an die zur Befestigung vorgesehenen Bohrlöcher auf der Platine, angepasst sind, fixiert.

Für die Gehäuseoberseite ist eine Formschräge von 2,5 Grad angewendet worden, um auf der Seite des Hörers (2) eine möglichst geringe Dicke zu erzeugen und gleichzeitig für die Akkuzelle auf der gegenüberliegenden Seite (3) ausreichend Raum zur Verfügung zu stellen. Zur Erfüllung der zweiten Anforderung ist weiterhin die 8-Pin-Buchse nicht vollständig innerhalb des Gehäuses. Über eine Aussparung im Deckel (4) ragt sie 0,5 mm – 1,0 mm hinaus.

Die Akkuzelle kann in einer 0,3 mm tiefen, passgenauen Absenkung der Auflagefläche (3) platziert werden. Sie wird durch einen an die Kontur der Zelle angepassten Steg (5) von der Platine getrennt. Für Schallaufnahme durch die Mikrofone sind auf der vom Ohr wegzeigenden Außenfläche auf Höhe der Mikrofone Löcher mit einem Durchmesser von 4 mm (6) vorgesehen. Auf der gleichen Gehäusesseite sind Aussparungen für die Taster (7) als auch für die microSD-Karte (8). Die Öffnung für den Höreranschluss (2) entspricht passgenau dessen Außenkontur.

Damit das Gehäuse geöffnet werden kann, besteht es aus einem Deckel und einer Schale, in der die Komponenten der Plattform angebracht werden. Die Trennlinie durch Deckel und Schale halbiert die seitlichen Aussparungen. An geeigneten Stellen sind bei den ineinandergreifenden Segmenten, welche, die vom Ohr wegzeigende und mit Aussparungen für die Taster, Mikrofone und microSD-Karte versehene Fläche bilden, Schrägen von 8 Grad (†) eingebaut, um den Zusammenhalt des geschlossenen Gehäuses zu vergrößern.

Um das Betätigen eines Tasters zu erleichtern sind 3D-gedruckte Erweiterungen für die Taster (9), die den Abmaßen der Aussparungen entsprechen und mit Flügelchen an der Innenwand gehalten werden, erstellt worden. Optional kann eine Abdeckung des microSD-Karten Slots (10) ebenso erfolgen, wenn kein Massendatenspeicher verwendet wird.

Vorteile der Gehäusefertigung mittels 3D Druck sind das geringe Gewicht und die akzeptablen Kosten bei der Anfertigung einer geringen Stückzahl von zehn Prototypen. Des Weiteren hat die Möglichkeit bestanden bei preiswerten Privatdruckern einen Probedruck mit dem Druckverfahren Fused Deposition Modeling (FDM) und dem Druckmaterial Polylactide (PLA) anzufertigen, bevor eine Fertigung in Auftrag gegeben worden ist.

Das Gehäusekonzept, die Anordnung der Komponenten sowie die Position der Aussparungen wird aus den 3D-Modellen in Abbildung 3.18 für den Gehäusedruck ersichtlich.

Als Druckverfahren sind zum Vergleich beim externen Auftragnehmer zwei verschiedene Druckarten angefordert worden. Zum einen Selective Laser Sintering (SLS) zum anderen FDM, wie in Abbildung 3.19 gezeigt wird.



Abbildung 3.19: Platine mit Gehäuse aus gedruckten Gehäuseteilen. Gehäuse, Taster sowie microSD-Karten Abdeckung mit SLS-Verfahren gedruckt (links), mit FDM-Verfahren gedrucktes halb offenes (mittig) und geschlossenes Gehäuse (rechts).

3.6 Demonstrator

Im Nachfolgenden wird der Demonstrator der voll funktionsfähigen und einsatzbereiten Entwicklungsplattform PrimeHA präsentiert. Der Zusammenbau ist ohne Beschädigung der Einzelkomponenten erfolgt. Die Platine lässt sich im Gehäuse passgenau einsetzen und hat einen sehr guten Halt. Dank der gewählten Kontur und aufgrund des Gewichts von 10 g, einer Diagonale von 6 cm (ohne RIC-Modul), maximalen Breite auf Höhe der Akkuzelle von 2,6 cm, Länge von 4,8 cm sowie Dicke zwischen 0,6 cm und 0,8 cm lässt sich die Plattform bequem hinter dem Ohr platzieren (siehe Abbildung 3.20). Durch die gedruckten Taster-Erweiterungen lassen sich die Taster einfach bedienen. Der Hörer lässt sich ohne Beschädigung des Demonstrators entfernen, was für ein Ausschalten des Geräts sorgt. Der geplante manuelle Sicherheitsmechanismus, welcher durch das Entfernen des Hörers die Akkuzelle vom System trennt, ist somit funktionsfähig.

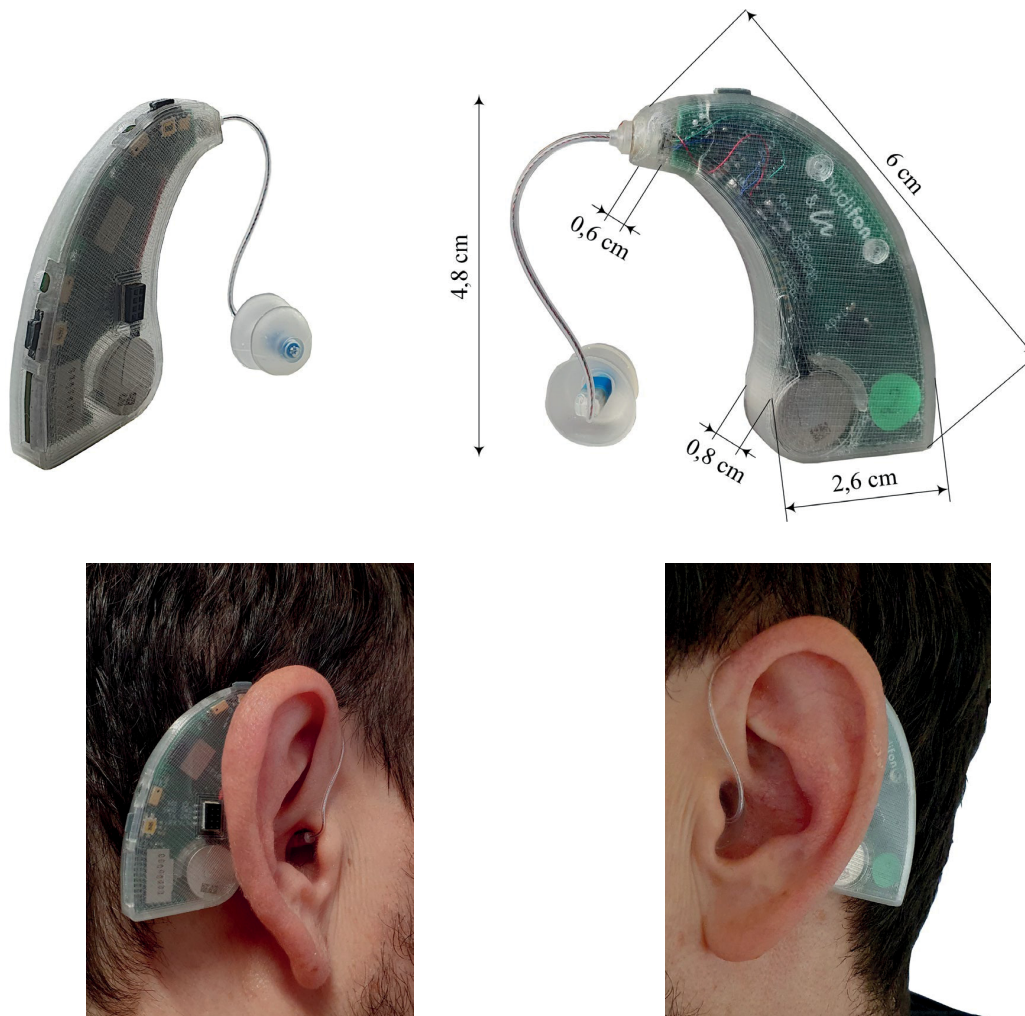


Abbildung 3.20: Demonstrator des Prototyps, von vorne und hinten (oben) und von einem erwachsenen Mann hinter dem Ohr getragen (unten).

4 Inbetriebnahme und Test des Gesamtsystems

Die zehn gefertigten Platinen, eine davon exemplarisch in Abbildung 4.1 gezeigt, müssen auf Fehler oder Beeinträchtigungen getestet und ihre Funktionsweise sowie elektrische und elektroakustische Charakteristik verifiziert werden. Die Inbetriebnahme und Kontrolle der Prototypen sind systematisch in mehreren Schritten nach einem zuvor definierten Testplan durchgeführt worden. Dieser wird zusammen mit einer Kurznotation der Ergebnisse im Anhang präsentiert (siehe Tabelle B.1).



Abbildung 4.1: Gefertigte und bestückte Leiterplatte vorne und hinten mit 1 € Stück als Größenvergleich.

Das Unternehmen Eurocircuits, welches die Leiterplatten gefertigt und bestückt hat, führt selbst einige Kontrollen zur Qualitätssicherung durch. Diese werden aus Gründen der Vollständigkeit ebenfalls im Testplan (Tabelle B.1) mit aufgeführt. Die Angaben basieren auf dem vom Hersteller bereitgestellten Protokoll zur Fertigung der Leiterplatten.

Als erstes wird eine Sichtkontrolle durchgeführt, die erkennbare Fehler bei der Fertigung und Bestückung der Leiterplatten, welche eine Beeinträchtigung der Funktion verursachen könnten, detektiert oder ausschließt.

Die Verifizierung der Funktionalität teilt sich auf in eine Untersuchung der funktionalen Blöcke sowie ausgewählter elektrischer und elektroakustischer Eigenschaften. Erstere soll eine korrekte und vollständige Arbeitsweise der Hardware entsprechend den Erwartungen im Systementwurf (Kapitel 3.1) sicherstellen. Eine Betrachtung der elektrischen und elektroakustischen Eigenschaften ist für eine Charakterisierung des Systems, welches das Zusammenwirken der einzeln ausgewählten Komponenten darstellt, relevant. Die Ergebnisse können zum einen Aufschluss darüber geben, ob durch das Zusammenspiel unerwartete und potenziell unerwünschte Eigenschaften entstehen oder ob ein Fehler, der auf der Schaltung basiert, aber die Funktionalität der Platinen nicht beeinflusst, vorliegt. Sie können somit Ausgangspunkt für Verbesserungen des Projektes PrimeHA sein. Zum anderen stellen die Messungen wichtige Informationen sowie identifizierte Anforderungen für die Signalverarbeitung der akustischen Daten und die Entwicklung entsprechender Algorithmen in der Firmware dar.

Die angewandten Verfahren sollen zerstörungsfrei und mit zur Verfügung stehenden Hilfsmitteln umsetzbar sein.

Für die Untersuchungen der zehn Prototypen sind die Leiterplatten nummeriert worden. Auf diese Nummerierung wird im Nachfolgenden zur Unterscheidung der Platinen Bezug genommen. Die Durchführung und Ergebnisse der Sichtkontrolle sowie des Funktionstests werden in den beiden nachfolgenden Unterkapiteln behandelt.

4.1 Sichtkontrolle

Die Sichtkontrolle ist mit einem Olympus SD30 Mikroskop durchgeführt worden. Die Fehlerarten, welche geprüft worden sind, sind großteils unter Zuhilfenahme des Buches „Test- und Prüfverfahren in der Elektronikfertigung“ ausgewählt worden [Ber12:43-52].

Die Fertigung der Platinen ist durch eine Bewertung des Erscheinungsbildes von den Leiterplattenoberflächen geprüft worden. Dafür ist nach Kratzern, Verunreinigungen und Ablagerungen gesucht und gleichzeitig die Verteilung des Lötstopplacks und der partiell aufgetragenen, chemischen Nickel-Gold Oberfläche evaluiert worden. Der Beschriftungsdruck ist mit den Vorgaben im Leiterplattenentwurf abgeglichen und die Lesbarkeit beurteilt worden.

Neben einer Begutachtung der Bauteile ist zur Evaluierung der Bestückung deren Übereinstimmung und Präzision bei der Anbringung der Komponenten mit den Vorgaben überprüft worden, indem die Orientierung, Positionierung, Vollständigkeit und Richtigkeit der Komponenten kontrolliert worden sind.

Im Rahmen der Möglichkeiten ist abschließend die Qualität der sichtbaren Lötstellen untersucht worden. Einige werden von den Bauteilen selbst verdeckt und können ohne technische Hilfsmittel wie beispielsweise einer Röntgeninspektion nicht betrachtet werden.

Es sind keine Auffälligkeiten detektiert worden. Alle zehn Leiterplatten haben die Sichtkontrolle erfolgreich bestanden.

4.2 Funktionstest

Nach erfolgreicher Absolvierung der Sichtkontrolle muss durch einen anschließenden Funktionstest die Funktionalität, der vom äußeren Erscheinungsbild her fehlerfreien Leiterplatten, untersucht und sichergestellt werden.

4.2.1 Funktionale Blöcke

Die Funktionsweise der funktionalen Blöcke ist im Entwurf definiert worden (siehe Kapitel 3.1). Wie bei der Verifizierung des Funktionsmusters wird diese mit Hilfe einer dafür erstellten Firmware getestet (siehe Kapitel 3.3.2 und 3.3.3). Die notwendigen Aktionen des Nutzers und die erwarteten

Systemreaktionen entsprechen denen in Tabelle 3.6 und werden hier sowie im Testplan der Tabelle B.1 nicht erneut aufgeführt.

Eine Leiterplatte (Board 3 in Tabelle B.1) hat bei der Erprobung Beeinträchtigungen gezeigt. Da vom Bauteilgehäuse des ISP1807 verdeckte Lötstellen bei der Sichtkontrolle nicht überprüft werden konnten, sind für die Erklärung der Auffälligkeiten während der Funktionstests nur Vermutungen möglich.

Die Programmierung des nRF52840 erfolgt ohne eine Fehler implizierende Rückmeldung. Das Potenzial PWR_Hold, welches eine essenzielle Rolle dabei spielt den PMIC zu aktivieren, eine Stromversorgung zu ermöglichen und damit das System einzuschalten, zeigt nicht die von der Firmware vorgegebenen Ausgangssignale. Ein inaktiver Zustand des PMICs zeigt sich wie bereits beschrieben durch ein High beim Pin $\overline{\text{LDOEN}}$, dessen Potenzial von einem Testpunkt widergespiegelt wird und so messtechnisch erfasst werden kann. Ein Firmwarefehler konnte ausgeschlossen werden. Die Instanz lässt sich daher nur mit einer direkten Stromversorgung über den V_{dd} -Zugang bei der Pin-Buchse nutzen. Die Testsignale der Testpunkte TP1 und TP2 lassen sich bei dieser Leiterplatte ebenso messtechnisch nicht erfassen.

Da die zu den GPIOs gehörenden Löt pads des ISP1807, welche die Potenziale bei TP1, TP2 und PWR_Hold kontrollieren, in einer Reihe liegen, wird vermutet, dass die Funktionsbeeinträchtigung durch einen vom Gehäuse verdeckten Lötfehler begründet wird. Es ist möglich, dass diese Pins mit einem naheliegenden Masseanschluss verbunden sind.

Die Funktion der anderen bestückten Leiterplatten ist uneingeschränkt gegeben.

4.2.2 Elektrische und elektroakustische Eigenschaften

Die nachfolgende Bestimmung ausgewählter elektrischer und elektroakustischer Eigenschaften ist nicht nur für die Funktionsverifikation bedeutend, sondern bildet vielmehr das Basiswissen zu der Charakteristik des Systems. Dieses ist für die praktische Anwendung von PrimeHA, wie sie in der Zielstellung (siehe Kapitel 1.2) formuliert worden ist, wichtig und sollte dem Forscher oder Entwickler bekannt sein. Die Bedeutung der einzelnen untersuchten Eigenschaften wird aufgezeigt, die Messungen erläutert und anschließend ausgewertet. Die Aufbereitung und Auswertung der Messdaten ist vorwiegend mit MATLAB erfolgt.

Für die Umrechnung von dB FS in dB SPL wird stets das 1 kHz Kalibriersignal bei 94 dB SPL eines Schallkalibrators (Klasse 1 Schallkalibrator – Typ 4231) von Brüel & Kjær [BK22] aufgenommen und als Referenz verwendet (siehe Abschnitt 3.3.4). Zur Erfassung von elektroakustischen Eigenschaften wird der Prototyp nachfolgend meistens in einer Messbox platziert. Es handelt sich hierbei um die Messbox TBS25 von Interacoustics [Int08]. Beide Aspekte werden in den Messungen dieses Abschnitts nicht erneut und explizit aufgeführt.

4.2.2.1 Stromverbrauch des Systems

Bei der Verifikation des funktionalen Tischaufbaus sind bereits die Verbrauchswerte der einzelnen Komponenten und des Systems ohne Nutzung der microSD-Karte bestimmt worden (siehe Abschnitt 3.3.3). Der Stromverbrauch der einzelnen Komponenten auf der Leiterplatte kann nicht gemessen werden, jedoch der Betriebsstrom für die gesamte Platine. Dies ist mit der gleichen Firmware, welche bereits für die Messungen aus Abschnitt 3.3.3 verwendet worden ist, und mit dem gleichen Messaufbau durchgeführt worden. Die Verbrauchswerte weisen eine sehr hohe Ähnlichkeit auf. Die Erkenntnisse zur Verwendung des Sleep-Modus und der Versorgung mit DC/DC-Wandlern gelten hier wie erwartet ebenso. Ein Vergleich der Messergebnisse von funktionalem Tischaufbau und Leiterplatte wird in Anhang C in Abbildung C.2 gezeigt. Für eine detaillierte Erklärung der Messkurven siehe Abschnitt 3.3.3. Insgesamt ist damit sichergestellt, dass die elektrische Charakteristik des funktionalen Tischaufbaus und des mit einer Leiterplatte implementierten Systems weitgehend identisch zueinander sind.

Zur Visualisierung der Auswirkungen vom Sleep Modus und unterschiedlicher CPU-Lastungen auf den Betriebsstrom werden im Anhang in Abbildung C.1 beispielhaft zwei Bilder, die mit einem DC Power Analyzer N6705B von Keysight Technologies [KT17] erstellt worden sind, gezeigt.

Des Weiteren ist ermittelt worden, bis zu welcher Mindestakkuspannung das System zuverlässig arbeitet. Der Versuchsaufbau ist nachfolgend (in Abbildung 4.2) schematisch dargestellt.

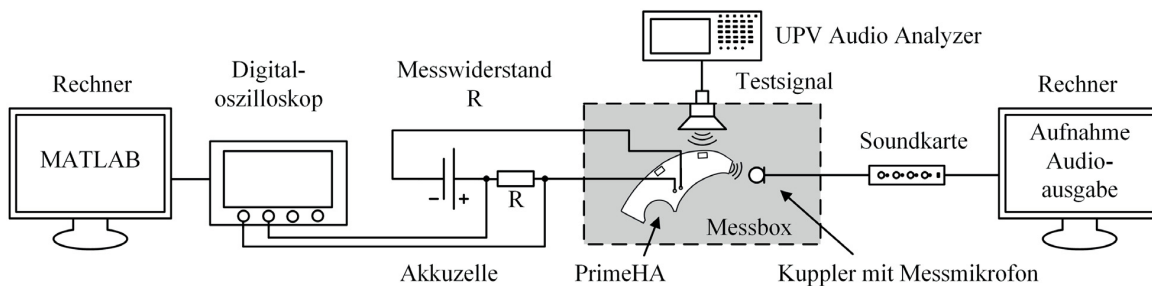


Abbildung 4.2: Versuchsaufbau zur Messung der Betriebsdauer.

Eine aufgeladene Akkuzelle ist angeschlossen worden. Das System ist in der Messbox platziert und das ISTS [EHI+22; HFVK10] in einer Dauerschleife über den in der Messbox eingebauten Lautsprecher abgespielt worden. Die verwendete Firmware verursacht eine Auslastung der CPU von rund 43 %. Diese Auslastung entspricht ungefähr der Erwarteten, wenn Algorithmen auf PrimeHA in einer natürlichen Geräuschumgebung erprobt werden. Die Ausgabesignale über das RIC-Modul sind mit einem Messmikrofon erfasst worden, um den Zeitpunkt zu protokollieren, ab welchem keine Signalausgabe mehr erfolgt. Die Akkuspannung als auch der Spannungsabfall über einen Messwiderstand sind mit dem über MATLAB gesteuerten Digital-Oszilloskop RTA4004 erfasst und jede Sekunde ein Messwert protokolliert worden. Auf diese Weise kann sowohl die Akkuspannung als auch der Betriebsstrom überwacht werden.

In der Firmware ist zum Schutz des Akkus festgelegt, dass unterhalb einer Akkuspannung von 2,7 V das Gerät ausgeschaltet wird. Bevor eine erneute Nutzung stattfindet, muss die Akkuzelle aufgeladen werden.

Die akustische Ausgabe der verarbeiteten Audiosignale durch die Testplattform wird ohne die optionale microSD-Karte wiederholter Messungen zufolge durchschnittlich nach rund 11 h 30 min beendet. Bei einer eingesteckten 2 GB microSD-Karte (SD-C02G) ist die Betriebsdauer aufgrund des geringfügig erhöhten Strombedarfs durchschnittlich um rund 25 min verringert. Wird auf die microSD-Karte jede Sekunde die aktuelle Akkuspannung in einer Textdatei dokumentiert, beträgt die durchschnittliche Betriebsdauer rund 10 h 30 min. Die Betriebsdauer wird somit von der Nutzung einer microSD-Karte beeinflusst.

Die Zeitspanne, in der das System für Experimente verwendet werden kann, wenn die Akkuzelle zu Beginn der Erprobung voll aufgeladen ist, erfüllt daher die Anforderung von mindestens drei Stunden aus dem Lastenheft in Kapitel 1.2.

4.2.2.2 Frequenzgänge

Für einen fortschrittlichen Ausgleich von frequenzabhängigem Hörverlust ist es von essenzieller Bedeutung, dass die Frequenzgänge sowohl von den Mikrofonen als auch vom RIC-Modul bekannt sind.

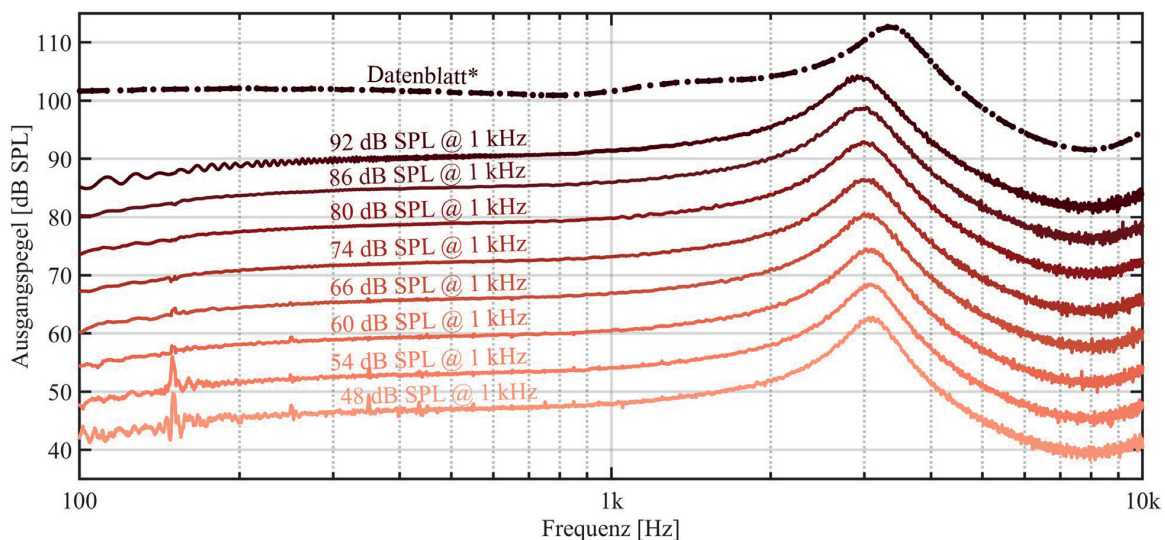
RIC-Modul

Zur Ermittlung des Frequenzgangs vom verwendeten RIC-Modul ist in der Firmware der Plattform ein Chirp-Signal erzeugt worden. Das für die Darstellung des ermittelten Frequenzgangs in Abbildung 4.4 verwendete Chirp-Signal hat einen linearen Frequenzanstieg von 100 Hz zu 10 kHz über eine Dauer von 7,9 s gehabt. Das Ausgangssignal ist in der Messbox mit Messmikrofonen und für verschiedene Lautstärkeinstellungen im Abstand von 6 dB FS erfasst worden. Die entsprechenden dB SPL-Werte in der Messbox bei 1 kHz sind in der Darstellung der Messergebnisse in Abbildung 4.4 angegeben. Zur Konnektierung des Hörers mit den Messmikrofonen ist ein 2cc Kuppler [BK16] verwendet worden. Der Frequenzgang aus dem Datenblatt zum Hörer ist jedoch mit einem IEC711 Kuppler erfasst worden. Die Verwendung eines identischen Kupplers ist aus Gründen der Verfügbarkeit nicht möglich gewesen. Des Weiteren hat der Hersteller des Hörers mit einer Spezialanfertigung das RIC-Modul und den Kuppler verbunden, sodass kein Schallschlauch zum Einsatz kommen muss, der Receiver des Moduls bündig zum Kuppler angeschlossen werden kann und dadurch zusätzliche Resonanzen verhindert werden. Dieser Adapter ist wie in Abbildung 4.3 ersichtlich, nachgebildet worden. Die Messung wird über einen Rechner gesteuert, der über das Audio Interface Fireface 800 von RME [RAI07], mit den Messmikrofonen verbunden ist.



Abbildung 4.3: Nachbildung einer Spezialanfertigung von Sonion zur Kontaktierung von Hörer und Kuppler.

Nach einer Fourier Transformation ergibt sich der Frequenzgang in Abbildung 4.4. Zum Vergleich ist der Frequenzgang des RIC-4400 Moduls aus dessen Datenblatt mit eingetragen.



* IEC711 Kuppler mit Sonderanfertigung zur bündigen Kontaktierung mit RIC-Modul

Abbildung 4.4: Frequenzgang des RIC-Moduls (eigene Messung).

Es ist zu erkennen, dass der Frequenzgang, der im Datenblatt angegeben ist, von der Messkurve nachgebildet wird. Die Stufen der Lautstärkeeinstellung zeigen sich in einem Versatz von rund 6 dB SPL.

Bei den tiefen Frequenzen zeigt sich zwischen 100 Hz und 300 Hz ein leichter Abfall der Pegel von rund 4,5 dB. Wird die Audioaufnahme mit einem veränderten Messaufbau wiederholt, bei dem die Messung mit einem UPV Audio Analyzer von Rohde & Schwarz [RS13] gemacht wird, anstatt diese vom Rechner über das Audio Interface Fireface 800 zu steuern, verändern sich die Messergebnisse bei tiefen Frequenzen. Es muss zusätzlich berücksichtigt werden, dass in der Messbox TBS25 [Int08] unterhalb 500 Hz keine Freifeldbedingungen herrschen. Daher wird davon ausgegangen, dass der Abfall im Bass-Bereich vorwiegend durch den Messaufbau bedingt ist.

Das Maximum ist im Vergleich zur Kurve aus dem Datenblatt um ungefähr 300 Hz zu den tieferen Frequenzen verschoben. Diese Verschiebung kann durch einen 2cc Kuppler im Messaufbau statt eines IEC711 Kupplers wie bei der Messung im Datenblatt begründet sein.

Mikrofone

Der Frequenzgang der Mikrofone zeigt auf, welche Schalldruckpegel für die einzelnen Frequenzen erfasst werden. Wie bereits der Frequenzgang des RIC-Moduls, so ist auch dies eine relevante Systemcharakteristik, die bei der Signalverarbeitung bedacht werden muss, um mit den Mikrofonen als Ausgangspunkt einen angenehmen Klang und gute Sprachverständlichkeit zu erzielen. Es wird der Mikrofonfrequenzgang sowohl ohne als auch mit Gehäuse ermittelt, um den Einfluss des Gehäuses herauszuarbeiten.

Für die Messung der Frequenzantwort sind die beiden Mikrofone einzeln untersucht worden. Die Platine alleine oder im Gehäuse ist in der Messbox jeweils so platziert worden, dass die Mikrofonöffnung des Gehäuses beziehungsweise die lange Seite des Mikrofons parallel zur Membran des Lautsprechers ausgerichtet. Des Weiteren ist der Normalenvektor auf die kreisförmige Mikrofon-aussparung parallel zur Schallausbreitungsrichtung gerichtet (siehe Abbildung 4.5).

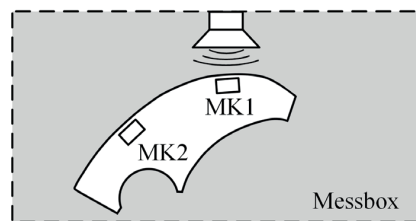
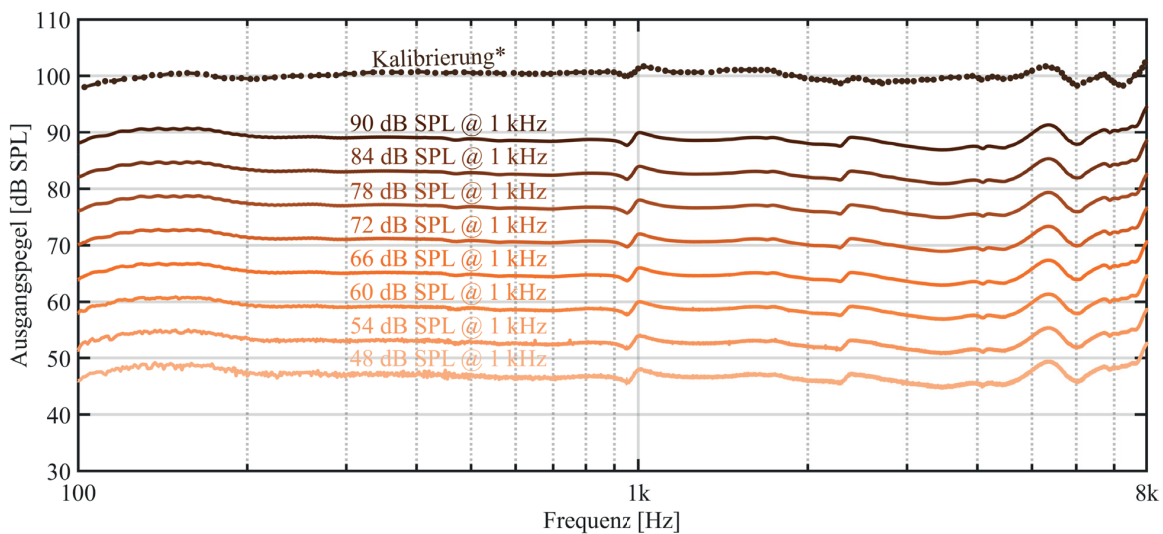


Abbildung 4.5: Positionierung der PrimeHA-Plattform in einer Messbox für die Ermittlung des Mikrofonfrequenzgangs des Mikrofons MK1.

Mit Hilfe eines UPV Analyzer von Rohde & Schwarz [RS13], der mit der Messbox verbunden ist, sind Testsignale über einen eingebauten Lautsprecher abgespielt worden. Letztere bestehen aus Chirp-Signalen unterschiedlicher Pegel im Abstand von 6 dB, um neben der Frequenzabhängigkeit eine mögliche Pegelabhängigkeit des Testobjekts zu berücksichtigen. Das für die Darstellung der Frequenzantwort in Abbildung 4.6 verwendete Chirp-Signal hat einen linearen Frequenzanstieg zwischen 100 Hz und 8 kHz über eine Dauer von 7,2 s gehabt. Eine Pegelabhängigkeit sollte im Idealfall nicht vorhanden sein. Die mit den PrimeHA-Mikrofonen erfassten Audiosignale werden auf der microSD-Karte zur Auswertung gespeichert.

Lautsprecherübertragungsfunktion der Messbox TBS25

Um den Einfluss der Lautsprecherübertragungsfunktion zu berücksichtigen, ist diese ebenso messtechnisch erfasst worden. Dasselbe Testsignal wie für die Ermittlung des Frequenzgangs der Mikrofone auf der Testplattform ist in der geschlossenen Messbox abgespielt und mit einem Messmikrofon erfasst worden. Das Messmikrofon wird so positioniert, dass der Schalleinfallswinkel gleich zu dem für die Gehäuseöffnungen auf Höhe der Mikrofone von PrimeHA ist (siehe Abbildung 4.5). Jede pegelabhängige Kurve ergibt sich aus der Mittelung der Absolutwerte von zehn Messungen. Der Kurvenverlauf der ermittelten Lautsprecher-Frequenzantwort wird mit dem Protokoll zur letzten Werkskalibrierung der Messbox verglichen (siehe Abbildung D.1) und ist in Abbildung 4.6 dargestellt.



* Aus dem Protokoll zur Werkskalibrierung der Messbox

Abbildung 4.6: Frequenzantwort des Lautsprechers einer TBS25 Messbox bei mehreren Pegeln im Abstand von 6 dB bei geschlossenem Zustand.

Die Messkurven, welche den Ausgangspegel über die Frequenzen zeigen, weisen eine sehr hohe Parallelität zueinander sowie Ähnlichkeit zur Kurve aus dem Messprotokoll der Werkskalibrierung auf. Im Bereich zwischen 7 kHz und 8 kHz fehlt bei den selbst aufgenommenen Messkurven im Vergleich zur Kurve der Werkskalibrierung die Absenkung um rund 2 dB SPL. Das Hoch bei ungefähr 5,5 kHz ist in der eigenen Messung rund 3 dB SPL höher. Die Kurven liegen wie die Lautstärkeeinstellungen 6 dB auseinander. Der Lautsprecher weist daher keine Pegelabhängigkeit auf.

Mikrofonfrequenzgang von PrimeHA ohne Gehäuse

Der Messaufbau für den PrimeHA-Mikrofonfrequenzgang ist, soweit möglich, im Vergleich zur Lautsprechermessung nicht verändert worden, indem die Testplattform so platziert worden ist, dass die Position des untersuchten Mikrofons (MK1 oder MK2) identisch zu der des Messmikrofons aus der Lautsprechermessung zuvor ist. Es wird, wie auch in Abbildung 4.6, der für Sprache vorwiegend relevante Bereich zwischen 100 Hz und 8 kHz betrachtet. Nachfolgend in Abbildung 4.7 wird der messtechnisch ermittelte Mikrofonfrequenzgang des oberen Mikrofons (MK1) gezeigt. Der Einfluss durch den Lautsprecher in der Messbox ist herausgerechnet worden. Zur Aufbereitung der messtechnisch ermittelten Frequenzantwort sind die erfassten Pegel in dB SPL angegeben. Diese Umrechnung und die Darstellung der Kurven erfolgen in Bezug auf die Frequenz 1 kHz. Die Kalibriersignale (94 dB SPL bei 1 kHz) der beiden Messreihen zum Lautsprecher der Messbox und der Mikrofone sind berücksichtigt worden. Im Anhang E wird die vollständige Rechnung zur Extraktion des Lautsprechereinflusses, zur Umrechnung der messtechnisch erfassten, digitalen Einheit dBFS in die physikalische Einheit dB SPL als auch zur Darstellung der Messkurven in Bezug auf die Pegel bei 1 kHz aufgezeigt (siehe Rechnung E.1).

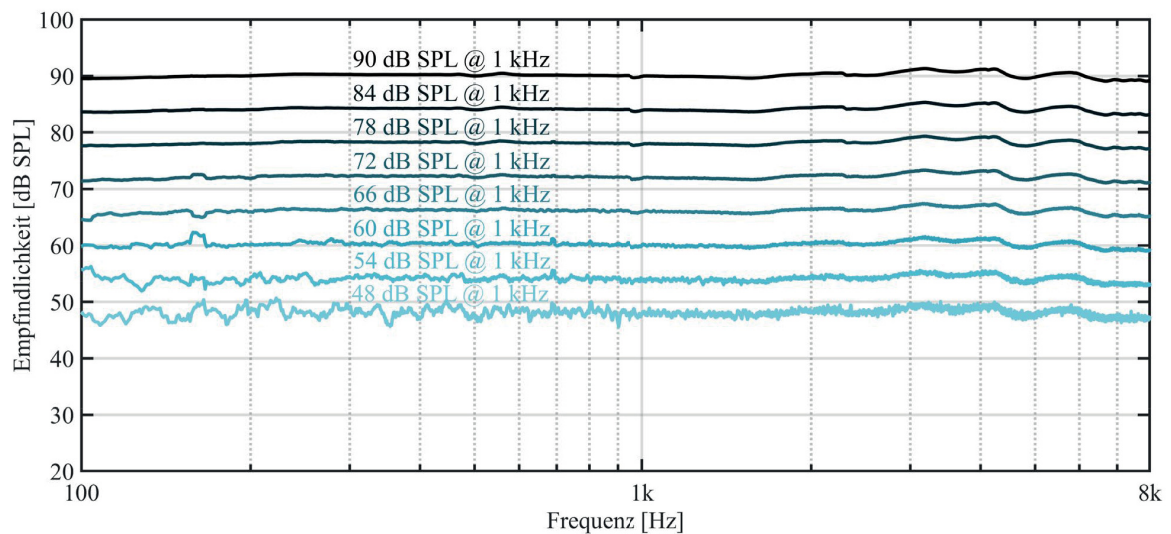


Abbildung 4.7: Frequenzgang des Mikrofons MK1 auf der PrimeHA-Testplattform bei mehreren Pegeln im Abstand von 6 dB ohne Beeinflussung durch den Lautsprecherfrequenzgang, der das Testsignal abspielt, und ohne Gehäuse.

Der Mikrofonfrequenzgang sollte flach sein. Gemäß des Datenblatts zum Mikrofon SPG08P4HM4H-1 weist der Frequenzgang zwischen 150 Hz und 3 kHz eine flache Charakteristik auf. Für Frequenzen kleiner 150 Hz fällt die Kurve zu niedrigeren Pegeln ab, für Frequenzen größer 3 kHz steigt die Kurve. [KC19:6]

Ein leichter Abfall bei kleinen Frequenzen ist in Abbildung 4.7 erkennbar. Zu höheren Frequenzen hin steigt die Kurve jedoch im betrachteten Frequenzbereich, anders als im Datenblatt vorausgesagt, nicht an, sondern bleibt im Mittel erfreulicherweise flach. Für die Welligkeit der Messkurven zwischen 2,5 kHz und 8 kHz können drei Begründungen angegeben werden. Zum einen zeigt auch die Messkurve im Datenblatt eine leichte Welligkeit für Frequenzen größer als 3 kHz. Die im Datenblatt dargestellte Frequenzantwort ist des Weiteren unter Freifeldbedingungen aufgenommen worden. Die verwendete Messbox TBS25 bildet diese für Frequenzen größer 500 Hz vorwiegend nach. Es zeigen sich jedoch im Datenblatt bei einem Vergleich von Messkurven, die unter Freifeldbedingungen und mit der Messbox aufgenommen worden sind, leichte Unterschiede bei den Messergebnissen für Frequenzen über 2,5 kHz [Int08:16-18]. Zum anderen spielt die Positionierung des Versuchsobjekts in der Messbox bei hohen Frequenzen eine entscheidende Rolle. Kleine Abweichungen zwischen der Positionierung des Messmikrofons für die Ermittlung des Lautsprecherfrequenzgangs und des PrimeHA-Mikrofons können einen Einfluss auf das Endergebnis, in dem beide Frequenzantworten berücksichtigt werden, haben. Diese Überlegung wird dadurch unterstützt, dass der Frequenzgang des zweiten Mikrofons (MK2) ab rund 6 kHz im Mittel einen leichten Anstieg aufweist. Aus Gründen der Vollständigkeit wird der Frequenzgang von MK2 im Anhang gezeigt (siehe Abbildung E.1).

Die pegelabhängigen Messkurven liegen 6 dB SPL auseinander, wie es dem Testsignal entsprechend sein sollte. Die Mikrofone auf der Testplattform zeigen keine Pegelabhängigkeit und haben

daher eine lineare Charakteristik. Letztere wird im Anhang in Abbildung E.2 durch eine Darstellung der Mikrofonpegel bei 1 kHz über den erfassten Lautsprecherpegeln bei 1 kHz gezeigt.

Mikrofonfrequenzgang von PrimeHA mit Gehäuse

Zur Gewährleistung von Vergleichbarkeit ist auch für diese Messungen der Versuchsaufbau wie bei der Ermittlung der Lautsprecher- und Mikrofonfrequenzgänge konzipiert und möglichst wenig verändert worden. Des Weiteren erfolgt die Auswertung wie für den Frequenzgang ohne Gehäuse. Die Messergebnisse für das obere Mikrofon MK1 werden nachfolgend in Abbildung 4.8 präsentiert.

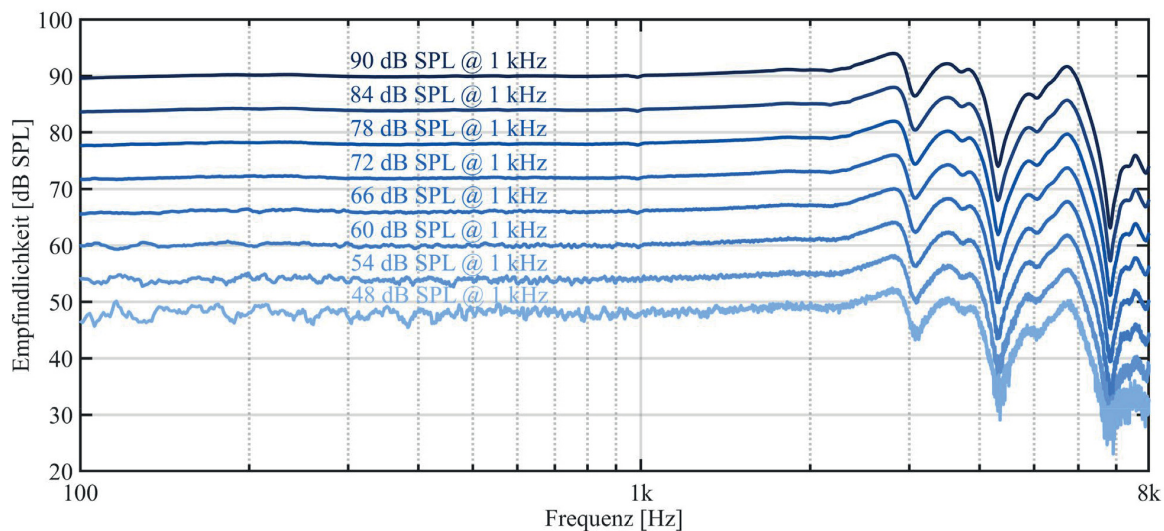


Abbildung 4.8: Frequenzgang des Mikrofons MK1 auf der sich im Gehäuse befindenden PrimeHA-Testplattform bei mehreren Pegeln im Abstand von 6 dB ohne Beeinflussung durch den Lautsprecherfrequenzgang, der das Testsignal abspielt.

Anders als beim Frequenzgang ohne Gehäuse (siehe Abbildung 4.7) zeigen sich hier vier lokale Minima und vier lokale Maxima zwischen 2,8 kHz und 8 kHz. Die Wellenlängen zu diesem Frequenzbereich liegen zwischen 4,3 cm und 12,3 cm. Unter Berücksichtigung der Demonstrator-Abmaße aus Kapitel 3.6 können diese Extrempunkte mit Reflexionen im Gehäuse sowie die einhergehenden konstruktiven als auch destruktiven Interferenzen erklärt werden. So entspricht das Viertel der Wellenlänge zum globalen Minimum bei 7 kHz etwa der Breite des Gehäuses auf Höhe des oberen Mikrofons. Diese Erklärung wird durch den Frequenzgang in Abbildung 4.9 unterstützt, der nach dem Auffüllen freien Volumens innerhalb des Gehäuses mit einem textilen Absorber, wie in der im Anhang dargestellten Abbildung E.3, ermittelt wird.

Die Extremstellen können zwar nicht vollständig verhindert, aber deutlich verringert und die Frequenzantwort verbessert werden. Diese Erkenntnis kann für eine Optimierung des ersten Prototyps genutzt werden. Im Anhang befinden sich die Frequenzgänge zu den Messungen mit dem unteren Mikrofon MK2 (siehe im Anhang Abbildung E.4 und Abbildung E.5).

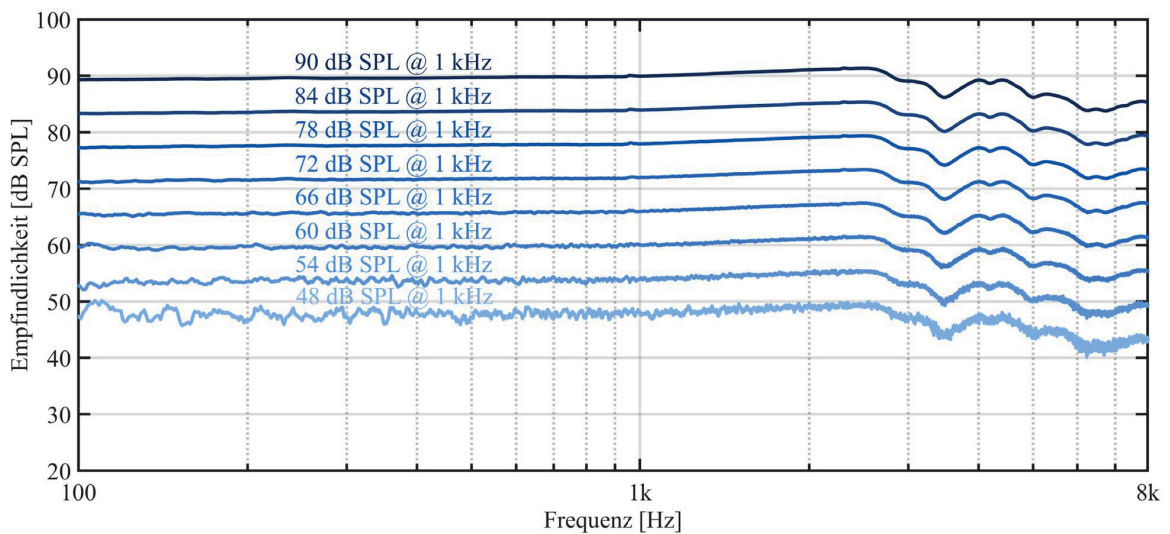


Abbildung 4.9: Frequenzgang des Mikrofons MK1 auf der sich im Gehäuse befinden PrimeHA-Testplattform bei mehreren Pegeln im Abstand von 6 dB ohne Beeinflussung durch den Lautsprecherfrequenzgang, der das Testsignal abspielt. Das Gehäuse ist zusätzlich mit Schall-absorbierendem Textil gefüllt.

4.2.2.3 Begrenzung des Ausgangspegels

Das Gehör von Testpersonen, Forschern und Entwicklern, die die Testplattform zur Erprobung von neuen Algorithmen nutzen, muss geschützt werden. Wie bereits dargestellt worden ist (siehe in Kapitel 3.2 Audio Ein- und Ausgänge und Kapitel 3.3.4), sind Maßnahmen hierfür getroffen worden. Der Ausgangspegel darf demnach einen Schalldruckpegel von 96 dB SPL bei einem 1 kHz Sinuston unter keinem Umstand überschreiten.

Zur messtechnischen Erfassung wird ein Sinussignal mit 0 dB FS, beziehungsweise in der digitalen Domäne maximaler Lautstärke, in der Firmware erzeugt und über den Hörer ausgegeben. Die Leiterplatte befindet sich in der Messbox, das Ausgabesignal wird mit einem Messmikrofon erfasst, das über einen 2cc Kuppler [BK16] mit dem Prototyp verbunden ist.

Zusammenfassend lässt sich festhalten, dass der gemessene Maximalwert umgerechnet in die Einheit dB SPL den gesetzten Grenzwert von 96 dB SPL mit durchschnittlich 95,2 dB SPL nicht überschreitet.

4.2.2.4 Eingangsbezogenes Eigenrauschen

Das Eigenrauschen sollte so gering wie möglich gehalten werden, damit die Sprachverständlichkeit nicht vermindert wird und der Nutzer dieses nicht als störend wahrnimmt.

Mit eingangsbezogenem Eigenrauschen wird das Geräusch bezeichnet, das durch die Mikrofone selbst erzeugt wird und nicht von einer äußeren Schallquelle stammt. Die Messung und die Auswertung sind so konzipiert worden, dass das Ergebnis mit den Angaben aus dem Datenblatt zu den

verwendeten SPG08P4HM4H-1-Mikrofonen [KC19] verglichen werden kann. Demnach sollte der Signal-zu-Rausch-Abstand (SNR) bei einem A-gewichteten 94 dB SPL 1 kHz Ton 64 dB betragen.

In der Messbox ist die Testplattform platziert und ein 1 kHz Testsignal abgespielt worden. Mit Hilfe wiederholter Messungen ist sichergestellt worden, dass beim PrimeHA ein Schalldruckpegel von 94 dB herrscht. Zwei Messungen sind mit dem PrimeHA-Modul gemacht worden. Sowohl das abgespielte Testsignal als auch Stille sind aufgenommen worden. Die gemessenen Daten sind über einen an der Anschlussbuchse kontaktierten J-Link Ultra Plus von der SEGGER Microcontroller GmbH an einen Rechner zur Auswertung übermittelt worden [SMSG22].

Mit den Audiodateien ist mittels eines MATLAB-Programms eine A-Bewertung durchgeführt worden. Ein Vergleich der erfassten Geräusche bei Stille und des 1 kHz Signals zeigt einen SNR-Wert von rund 64 dB mit einer Abweichung von ± 1 dB bei wiederholter Messung. Die Angabe aus dem Datenblatt der Mikrofone werden zusammenfassend erfüllt.

4.2.2.5 Latenz durch die Hardware

Eine geringe Latenzzeit geht mit Echtzeitfähigkeit einher und ist eine signifikante Eigenschaft für gute Sprachverständlichkeit, ein hochwertiges Klangbild und eine fließende Kommunikation wie in Kapitel 2.1.6 beschrieben ist. Die Latenzzeit t_L sollte ≤ 10 ms betragen, wobei $t_L \leq 6$ ms wünschenswert ist.

Zur Überprüfung dessen ist ein Testsignal in der Messbox über den eingebauten Lautsprecher abgespielt worden. Das Testsignal besteht aus Impulsen, Sinustönen im Frequenzbereich zwischen 50 Hz und 10 kHz als auch aus einem 2,5 s langen Ausschnitt des ISTS [EHI+22; HFVK10]. In der Messbox ist einer der PrimeHA-Prototypen, als auch ein Messmikrofon nebeneinander platziert worden, sodass die Schallaufnahme und der Schallweg möglichst identisch sind, wie in Abbildung 4.10 gezeigt ist.

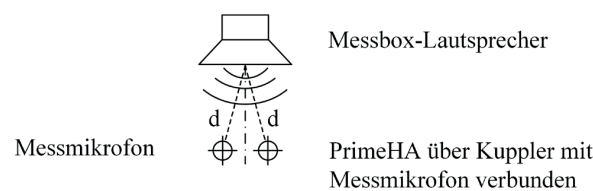


Abbildung 4.10: Positionierung der Mikrofone in der Messbox zur Ermittlung der hardwarebedingten Latenz.

Das Testsignal und die von der Entwicklungsplattform ausgegebenen Audiosignale sind jeweils von einem Messmikrofon erfasst worden. Letzteres ist über einen 2cc Kuppler und der in Abbildung 4.3 gezeigten Spezialanfertigung des Adapters zwischen Kuppler und Hörer angeschlossen worden [BK16].

Die Audiosignale, unverarbeitetes und verarbeitetes Testsignal, sind im Stereo-Modus (gleichzeitige Abtastung beider Kanäle) über das Audio Interface Fireface 800 [RAI07] aufgenommen worden. Zur Ermittlung der Latenz ist die Kreuzkorrelation der beiden Kanäle berechnet worden.

In dieser Arbeit ist vorwiegend die hardwarebedingte Latenz von Interesse. Diese ist mit einer speziellen Firmware geprüft worden. Es ist sichergestellt worden, dass die Audioschnittstellen PDM und I²S zum einen gleichzeitig gestartet werden und synchron laufen, zum anderen findet keine Signalverarbeitung statt.

Der zusätzliche Signalweg durch den Kuppler (≈ 2 cm) für die Aufnahme des PrimeHA-Audioausgangs kann vernachlässigt werden ($\Delta t \approx 0,05$ ms). Die ermittelte, hardwarebedingte Latenz beträgt rund 2,4 ms und liegt somit deutlich unter den oben angegebenen Grenzen. Durch die Signalverarbeitung in der Firmware ist zusammenfassend eine maximale zusätzliche Latenz von ungefähr 3,6 ms wünschenswert.

5 Diskussion und Bewertung der Lösung

Ein Lösungsentwurf ist vom Autor erstellt, ein Prototyp implementiert und getestet worden. Abschließend werden die Messergebnisse aus Kapitel 4.2.2 diskutiert und untersucht, ob die implementierte Lösung alle Anforderungen aus dem Lastenheft in Kapitel 1.2 einhält und die Aufgabenstellung erfüllt worden ist.

5.1 Diskussion und Zusammenfassung der Messergebnisse

Durch die messtechnische Ermittlung ausgewählter elektrischer und elektroakustischer Eigenschaften in Kapitel 4.2.2 wird dem Nutzer ein Handbuch zur grundlegenden Charakteristik von PrimeHA präsentiert. Die Messergebnisse zeigen zum einen, dass die erwartete Funktionsweise gegeben ist, zum anderen geben sie Hinweise für Optimierungsmöglichkeiten.

Der Betriebsstrom ist insgesamt kleiner als 12 mA, wenn keine microSD-Karte genutzt wird. Es wird geraten die microSD-Karte zu entfernen, wenn sie nicht für Tests genutzt wird, um die Betriebsdauer zu erhöhen. Der Zugriff auf die microSD-Karte zum Protokollieren von Messdaten verringert die Betriebsdauer deutlich. Unter Berücksichtigung der benötigten Betriebsdauer für Messungen muss festgelegt werden, wie häufig auf den Massendatenspeicher geschrieben beziehungsweise zugegriffen wird. Die Erwartungen an den Stromverbrauch aus Abschnitt 3.1.4 werden erfüllt. Es wird dazu geraten den Sleep Modus des nRF52840 zu aktivieren. Bei einer erhöhten CPU-Auslastung von >30% oder einem Betriebsstrom von über 6 mA wird des Weiteren empfohlen die Stromversorgung des Nordic-Chips mit DC/DC-Wandlern für mehr Energieeffizienz zu realisieren.

Die ein- und ausgangseitigen Frequenzgänge (RIC-Modul und PrimeHA-Mikrofone) weisen keine beunruhigenden Abweichungen zu den Angaben in den entsprechenden Datenblättern auf. Eine Nachbildung der Messbedingungen in den Datenblättern konnte nur approximativ erfolgen. Die sich daraus ergebenden Abweichungen im Vergleich zum Original sind bereits in Abschnitt 4.2.2.2 dargestellt worden. Weder das RIC-Modul noch die Mikrofone haben eine Pegelabhängigkeit gezeigt. Für die Mikrofone ist der für Sprachverständlichkeit vorwiegend relevante Frequenzbereich zwischen 100 Hz und 8 kHz untersucht worden. Der Frequenzgang weist im Mittel vorwiegend die gewünschte flache Charakteristik auf, welche jedoch bei Frequenzen $\geq 2,5$ kHz durch ein Gehäuse für die Platine nicht aufrechterhalten werden kann. Aufgrund von Reflexionen an den Gehäusewänden kommt es zu destruktiver als auch konstruktiver Interferenz, welche sich in lokalen Minima und Maxima im Frequenzgang äußern. Eine erhebliche Verbesserung sowie deutliche Verringerung der Extremstellen können durch Schall-absorbierendes Material im Gehäuse und um die Mikrofone herum erzielt werden. Die Verhinderung von Reflexion und entsprechende Auswirkung auf den Frequenzgang ist nur mit einem Material getestet worden. Bevor Anpassungen am Prototypen

erfolgen, sollten weitere Materialien getestet werden. Zusätzlich sollte eine weitere Entzerrung der Frequenzgänge in der Firmware anhand digitaler Filter niedriger Ordnung mit geringem Rechenaufwand möglich sein.

Der Ausgangspegel übersteigt, wie im Design-Prozess (Kapitel 3.2) festgelegt worden ist, für einen 1 kHz-Sinuston den Schalldruckpegel 96 dB SPL nicht. Bei der Untersuchung des eingangsseitigen Eigenrauschens konnte sichergestellt werden, dass das im Datenblatt der Mikrofone angegebene SNR-Verhältnis mit einer maximalen Abweichung von ± 1 dB messtechnisch ermittelt werden kann. Auch diese Erwartungen konnten daher durch praktische Tests verifiziert werden.

Dasselbe gilt für die Echtzeitfähigkeit der Plattform. Mit einer hardwarebedingten Latenz von rund 2,4 ms liegt diese deutlich unter dem erstrebten Maximum von 6 ms, wodurch ein Spielraum für die Signalverarbeitung gegeben ist. Zur Bewertung der Echtzeitfähigkeit, wenn die hard- als auch firmwarebedingte Latenz berücksichtigt wird, bedarf es weiterer Untersuchungen. Eine generelle Aussage wird jedoch nicht möglich sein, sondern muss in Abhängigkeit der implementierten Signalverarbeitung formuliert werden.

5.2 Validierung des Gesamtsystems

An das System sind acht Anforderungen gestellt worden (siehe Kapitel 1.2).

Die Plattform sollte weitgehend unabhängig von herstellerepezifischer Hardware entworfen werden und gewisse Mindestanforderungen an den Prozessor erfüllen (siehe Punkt 1). Letztere sind durch die Wahl des nRF52840-Chips von Nordic Semiconductor sichergestellt worden. Die Komponenten der Hardware sind unabhängig von Produkten für oder von Hörgeräteherstellern gewählt worden, mit Ausnahme des Hörers und dem entsprechenden Anschluss dafür. Dies konnte nicht umgangen werden, da das System hinter dem Ohr platzierbar sein sollte (siehe Punkt 4) und aus der Motivation heraus eine Adaptabilität zu einer medizinisch geprüften Hörhilfe zu gewährleisten, die Audioausgabe ähnlich erfolgen muss. Nichtsdestotrotz handelt es sich bei dem Hörer von Sonion zwar um ein Produkt für Hörsysteme, jedoch nicht für einen speziellen Hörgerätehersteller. Die restliche Hardware besteht aus COTS-Komponenten.

Wie in der zweiten Anforderung (siehe Punkt 2) verlangt, ist die Plattform für Audiosignalverarbeitung geeignet, indem die Komponenten so gewählt worden sind, dass die benötigten Schnittstellen bereitgestellt werden. Der nRF52840 unterstützt sowohl den Audioeingang über zwei PDM-Mikrofone mit 16 Bit Auflösung, als auch einen Audioausgang über I²S mit 8-, 16- oder 24-Bit [NS21a:166-246]. Beide Audioanschlüsse schaffen mindestens eine Abtastrate von 20 ksp/s [MI20:44-45; ND16]. Der Audioverstärker arbeitet mit 16-, 24- oder 32-Bit Datenauflösung [MI19:1].

Auch die geforderte Programmierbarkeit im 3. Punkt des Lastenhefts ist durch den nRF52840 gegeben. Darüber hinaus wird dem Entwickler dank eines Lizenzabkommens zwischen Nordic

Semiconductors und der SEGGER Microcontroller GmbH mit SEGGER Embedded Studio eine fortschrittliche und komfortable Programmierumgebung angeboten.

Das kompakte Design, die geringe Baugröße der Komponenten, ein Gewicht des Prototyps inklusive Gehäuse und Energiequelle von gerade einmal 10 g, das RIC-Modul von Sonion und die sorgfältig gewählte Kontur der Platine ermöglichen Portabilität und das Tragen von PrimeHA hinter dem Ohr. Die 4. Forderung ist somit ebenfalls erfüllt.

Wie der Überprüfung des maximalen Ausgangspegels in Abschnitt 4.2.2.3 entnommen werden kann, ist die gewünschte, strikte Limitierung des Ausgangspegels durch die Hardware (siehe Punkt 5) bedacht worden. Der Grenzwert ist auf 96 dB SPL in Bezug auf ein 1 kHz-Sinussignal festgelegt worden (siehe in Kapitel 3.2 Audio Ein- und Ausgänge und Kapitel 3.3.4).

Als zukunftssträchtige Energieversorgung dient die wiederaufladbare Akkuzelle CP1254 A4 von Varta mit einer Kapazität von 77 mAh. Bei der Wahl der Bauteile ist auf Energieeffizienz geachtet worden. Die geforderte Mindestlaufzeit von drei Stunden kann sowohl ohne als auch bei Verwendung einer microSD-Karte, wie in Anforderung 6 aufgeführt, bereitgestellt werden, wie im Kapitel 4.2.2.1 gezeigt worden ist.

Die Anbindung eines Beschleunigungssensors mit mindestens drei Messachsen ist durch die Integration des Bauteils ADXL362 im Lösungsentwurf berücksichtigt worden, wie auch die Anbindung eines microSD-Kartenanschlusses (siehe Punkt 7 und Punkt 8). Die korrekte Funktionsweise und Zuverlässigkeit beider Komponenten sind geprüft worden (siehe 4.2.1).

6 Zusammenfassung und Ausblick

Zusammenfassend kann die erste Implementierung des Projekts PrimeHA als Erfolg betrachtet werden. Die Anforderungen aus dem Lastenheft sind erfüllt worden und ein auf dessen Funktionalität geprüfter Prototyp der zu implementierenden Hörgerätetestplattform kann vom Autor präsentiert werden. Erste Algorithmen zur Audiosignalverarbeitung konnten auf der Plattform bereits entwickelt werden. Eine Erprobung dieser in Alltagssituationen befindet sich in der Planung.

Die Charakteristik des Systems kann als Ausblick weiter untersucht werden. Die Total Harmonic Distortion oder die Auswirkungen des Akkustands auf die Akustik können beispielweise untersucht werden.

Für die Zukunft haben sich im Laufe der Implementation und Erprobung potenzielle Erweiterungen und Anpassungen der Hardware ergeben:

Um den Einfluss der PDM-Schnittstelle zwischen den Mikrofonen und der zentralen Steuer- und Recheneinheit auf das Eigenrauschen zu untersuchen, könnte ein PDM zu I²S Wandler eingebaut werden. Alternativ ließe sich ein Aufbau mit I²S-Mikrofonen testen. Der nRF52840 besitzt sowohl eingangs- als auch ausgangsseitig eine I²S-Schnittstelle.

Für ein kleineres und handlicheres Endergebnis kann eine Version der Plattform erstellt werden, bei der der Fokus auf die essenziellen Komponenten gelegt wird. Entsprechend würden die optionalen Komponenten Beschleunigungssensor und microSD-Kartenanschluss entfernt werden. Letzterer beeinflusst die Mindestgröße und bei eingesteckter microSD-Karte den Betriebsstrom des Moduls signifikant. Aufgrund der dadurch verringerten Anzahl an benötigter GPIOs könnte das System zudem mit einem kleineren und günstigeren Chip wie dem nRF52810 anstelle des nRF52840 konzipiert werden.

Derzeit ist die Fernsteuerung von PrimeHA über Bluetooth Low Energy möglich. Um das Streamen von Musik beispielsweise oder im Allgemeinen den drahtlosen Austausch großer Datenmengen ebenfalls zu ermöglichen, bedarf es eines Mehrkernsystems. Diese Änderung ließe sich für die Hardware des Projekts mit geringem Aufwand realisieren, da der ISP1807 durch den seit Ende 2021 von Insight SIP erhältlichen ISP2053-AX ersetzt werden kann. Dieser besitzt einen ähnlichen Footprint und enthält einen nRF5340, welcher wiederum zwei Cortex M33 integriert hat.

Aus dem ersten Entwurf eines Gehäuses mit dem CAD Programm SOLIDWORKS haben sich potenzielle Verbesserungen für ein vereinfachtes Anbringen der Taster und einen inkrementierten Zusammenhalt von Gehäuseschale und Deckel, auch ohne die Verwendung von irreversiblen Klebstoffen, ergeben. Des Weiteren sollte ein Augenmerk auf eine reflexionsarme Konstruktion gelegt und die Möglichkeit Gummiringe bei den Mikrofonöffnungen zu montieren bedacht werden. Eine Möglichkeit Schall-absorbierendes Material um die Mikrofone herum anzubringen, sollte ebenfalls

bedacht werden, nachdem der Nutzen unterschiedlicher Materialien getestet und die Auswirkungen auf die Wärmeentwicklung innerhalb des Gehäuses weiter untersucht worden sind.

Erste Arbeiten, die auf der Plattform getestet werden können, sind zwei frühere Abschlussarbeiten, die in Zusammenarbeit von audifon und der TU Ilmenau entstanden sind. Es handelt sich hierbei um ein Lärmdosimeter von Gennadii Zverev [Zve22] und einen Szenen-Klassifikator von Sergei Aleshin [Ale20]. Beide Lösungen sind auf einem Nordic nRF52840 DK implementiert worden, weshalb eine komfortable Übertragung der Arbeiten auf PrimeHA möglich ist.

Anhang

A Stückliste und Kostenkalkulation

Tabelle A.1: Kostenkalkulation für das Projekt PrimeHA.

Komponentenkosten								583,74 € ***
Bezeichnung				Je PCB	Stückzahl gesamt	Einzelpreis	Gesamtpreis	
C2-C7, C9	0,1 µF	Keramikkondensator	1005 metrisch	7	70	0,10 € *	7,00 €	
C1	10 µF	Keramikkondensator	1005 metrisch	1	10	0,15 € *	1,50 €	
C8	2,2 µF	Keramikkondensator	1608 metrisch	1	10	0,15 € *	1,50 €	
C10	1,0 µF	Keramikkondensator	1005 metrisch	1	10	0,11 € *	1,10 €	
R10	2,0 MΩ	Dickschichtwiderstand	0402 metrisch	1	10	0,14 € *	1,40 €	
R2, R5	470 kΩ	Dickschichtwiderstand	0402 metrisch	2	20	0,37 € *	7,40 €	
R3	6,8 kΩ	Dickschichtwiderstand	0402 metrisch	1	10	0,37 € *	3,70 €	
R6	150 kΩ	Dickschichtwiderstand	0402 metrisch	1	10	0,38 € *	3,80 €	
R7	68 kΩ	Dickschichtwiderstand	0402 metrisch	1	10	0,37 € *	3,70 €	
R8	27 kΩ	Dickschichtwiderstand	0402 metrisch	1	10	0,49 € *	4,90 €	
R1, R9	1,0 kΩ	Dickschichtwiderstand	0402 metrisch	2	20	0,10 € *	2,00 €	
R11, R13, R14	10 kΩ	Dickschichtwiderstand	0402 metrisch	3	30	0,49 € *	14,70 €	
R4	3,0 kΩ	Dickschichtwiderstand	0402 metrisch	1	10	0,49 € *	4,90 €	
Q1	n-Kanal MOSFET		BSS816NW	1	10	0,094 €	0,94 €	
U1	Zentrale Steuer-/Recheneinheit		ISP1807	1	10	9,60 €	96,00 €	
IC1	Audioverstärker		MAX98357A	1	10	2,32 €	23,20 €	
AC1	Beschleunigungssensor		ADXL362	1	10	11,41 €	114,10 €	
IC2	Power-Management IC		LTC4063	1	10	4,30 €	43,00 €	
J9	8-Pin-Buchse		62300821021	1	10	1,05 €	10,50 €	
J2	microSD-Karten Slot		1051620001	1	10	0,85 €	8,50 €	
D1, D2	Schottky-Diode		BAT54LP	2	20	0,23 €	4,60 €	
MK1, MK2	PDM-Mikrofon		SPG08P4HM4 H-1	2	20	1,75 €	35,00 €	

S1, S2	Drucktaster	PTS841 ESD GMP SMTR LFS	2	20	0,52€	10,40 €
	Akkuzelle	CP1254 A4	1	10	17,99 € *	179,90 €
	Hörer	Sonion RIC- Modul 4400	1	10	– **	–
	Anschlussbuchse Hörer	CS88 socket	1	10	– **	–
Fertigung der Leiterplatten						253,86 € ***
Bestückung der Leiterplatten						428,80 € ***
Kosten für eine bestückte Leiterplatte						126,64 € ***
Gesamtkosten für 10 bestückte Leiterplatten						1266,40 € ***

* Handelsüblicher Preis.

Die Widerstände und Kondensatoren haben im Projekt aufgrund des Bestellungsauftrages keine zusätzlichen Kosten verursacht und sind beim Kauf einer großen Stückzahl günstiger. Hier wird jeweils der Preis für den Erwerb eines einzigen Widerstandes oder Kondensators kalkuliert. Die Akkuzelle ist von der Firma VARTA kostenlos zur Verfügung gestellt worden. Hörer und die entsprechende Anschlussbuchse sowie Schirmchen für den Gehörgang sind über das Unternehmen audifon, welches diese Arbeit ausgeschrieben, finanziert und betreut hat, bezogen worden.

** Zu dieser Instanz kann keine Kostenangabe gemacht werden, da es sich um firmeninterne Informationen handelt.

*** Preis ohne die mit „***“ gekennzeichneten Komponenten.

B Testung der entwickelten Hörgerätetestplattform

Tabelle B.1: Testplan und -protokoll zur Kontrolle der gefertigten Leiterplatte und Charakterisierung des Systems.

Testplan und -protokoll		
Legende	✓	Keines der PCBs weist den jeweiligen Fehler oder eine Funktionsbeeinträchtigung im entsprechenden funktionalen Block auf.
	✗ (xx)	PCB xx weist den jeweiligen Fehler oder eine Funktionsbeeinträchtigung auf.
Zustand	Kommentar	
Tests durch den Hersteller der Platinen Eurocircuits*		
Testverfahren		
Leiterplatte		
Sichtkontrolle der Innenlagen	✓	
Elektrischer Test (Flying Probe Test)	✓	
<ul style="list-style-type: none"> ➤ Überprüfung der Vollständigkeit des abzubildenden Leiterbildes ➤ Sicherstellung der Absenz von Kurzschlüssen 		Diese Qualitätskontrolltests sind vom Leiterplattenhersteller und Bestückungsunternehmen Eurocircuits durchgeführt worden. Einige Tests sind stichprobenartig erfolgt. Die Angaben zum Ergebnis der Qualitätskontrollen werden gemäß der Protokolldokumente zur Fertigung und Bestückung gemacht.
Stichprobenartige Endkontrolle durch Inspektor	✓	
<ul style="list-style-type: none"> ➤ Kosmetische Mängel ** ➤ Nachmessen der Leiterplattenmaße ➤ Überprüfung von Lochdurchmessern 		
Bestückung		
Maschinelle optische Inspektion	✓	
Stichprobenartige Röntgenstrahleninspektion	✓	
Sichtkontrolle		
Fehlerart		
Erscheinungsbild der Leiterplattenoberfläche	✓	Keine der Leiterplatten weist Kratzer in der Oberflächenbeschichtung oder Verunreinigungen auf und ist frei von Ablagerungen. Freiliegende Kupferflächen sind mit der im Fertigungsauftrag festgelegten, partiell aufgetragenen chemischen Nickel-Gold Oberfläche sauber abgedeckt.

		Lötstopplack bedeckt konsistent alle Leiterbahnen und Durchkontaktierungen.
Bauteilfehler		
Verbogener Bauteilanschluss	✓	Kein Board weist einen verbogenen Bauteilanschluss auf
Fehlender Bauteilanschluss	✓	Alle Bauteilanschlüsse sind kontaktiert.
Beschädigtes Bauteil	✓	Kein Bauteil zeigt eine Beschädigung.
Bestückungsfehler		
Verpolung und Orientierung des Bauteils	✓	Die Polung der Schottky-Dioden ist korrekt, wie auch die Orientierung aller ICs.
Fehlendes Bauteil	✓	Die Bestückung aller Leiterplatten ist vollständig.
Falsche Positionierung	✓	Alle Bauteile sind an der richtigen Position angebracht, jedoch stehen die beiden Schottky-Dioden auf sechs Leiterplatten (1-4, 9-10) leicht schräg. Der LTC4063 ist bei Board 6 nicht vollständig parallel zur Oberfläche der Platine.
Fehlbestückung	✓	Es sind die korrekten Bauteile mit den richtigen Bauteilwerten bestückt worden.
Lötfehler		
Grabsteineffekt	✓	Es sind keine Grabsteineffekte erkennbar.
Kurzschluss	✓	Es sind keine Kurzschlüsse optisch detektiert worden.
Unzureichende Lötverbindung	✓	Keine der sichtbaren Lötverbindungen zeigt eine Beeinträchtigung
Beschriftung	✓	Die Beschriftungen sind vollständig, ohne Hilfsmittel gut lesbar und entsprechen den Vorgaben

Funktionstest

Funktionaler Block

Zentrale Steuer- und Recheneinheit	✓	Die zentrale Steuer- und Recheneinheit ist bei allen zehn Prototypen über deren Programmierpins ansprechbar und programmierbar. Die entsprechenden Programme sind ebenso ausführbar.
Ein-/Ausschalten	✘ (3)	Bei Board 3 ist ein Anschalten des Systems nicht möglich, da das PWR_Hold Potenzial den Vorgaben durch die Firmware nicht folgt. (Siehe Kapitel 4.2.1) Das Ein- sowie Ausschalten aller anderen Instanzen funktioniert wie definiert.
Nutzereingabe	✓	Eine Mensch-Maschine Interaktion über die Taster ist möglich.
Bewegungssensor	✓	Eine Kommunikation zwischen Mikrocontroller und Sensor ist möglich.

Massendatenspeicher-Anbindung	✓	Eine eingelegte microSD-Karte wird erkannt, Daten können auf ihr gespeichert werden.
Audioeingang - Mikrofone	✓	Die Mikrofone erfassen Schall und stellen die Informationen in einer digitalen Form über eine funktionsfähige PDM-Verbindung bereit.
Audioausgang - Audioverstärker	✓	Bei den Platinen erfolgt die Ansteuerung des Verstärkers über I ² S korrekt und die Audio-Signalausgabe wie erwartet.
Externe Anschlüsse und Zugriffe	* (3)	Bei der 3. Leiterplatte sind bei den Testpunkten TP1 und TP2 die Testsignale nicht messbar. (Siehe Kapitel 4.2.1) Die messtechnisch erfassbaren Ausgabesignale für die Anschlussbuchse und die Testpunkte (TP1-TP4) sind bei den anderen Platinen quantifizierbar.
Bluetooth Low Energy	✓	Ein BLE-fähiges Endgerät kann mit der Testplattform eine Verbindung herstellen, Steuerbefehle empfangen und umsetzen.
Power-Management IC	✓	Die Spannungsversorgung zeigt bei allen Leiterplatten einen stabilen Wert von 3,3 V und der Akku lässt sich mit einem konstanten Ladestrom von 37 mA laden. ***

Elektrische und Elektroakustische Eigenschaft

Stromverbrauch des Systems	✓	Der maximal gemessene Stromverbrauch beträgt rund 11 mA bei 78,3% CPU-Auslastung. Die im Lastenheft geforderte Mindestbetriebsdauer von drei Stunden ist gegeben. Die Verwendung des Sleep-Modus und die Wahl von DC/DC Wandlern zur Versorgung des nRF52840 ist zur Verringerung des Betriebsstroms zu empfehlen. (Siehe Kapitel 4.2.2.1)
Frequenzgang des RIC-Moduls	✓	Der Frequenzgang aus dem Datenblatt zum verwendeten Hörer kann nachgebildet werden. (Siehe RIC-Modul in Kapitel 4.2.2.2)
Frequenzgang der Mikrofone	✓	Der Frequenzgang ist im Mittel zwischen 150 Hz und 7 kHz flach. Der Kurvenverlauf weist ab 2500 Hz Welligkeit auf. (Siehe Mikrofone in Kapitel 4.2.2.2) Der Frequenzgangs wird durch das Gehäuse beeinflusst, sodass der Frequenzgang zwischen 2,8 kHz und 7,5 kHz mehrere lokale Maxima und Minima aufweist. Die Extremstellen können durch Schall-absorbierendes Material innerhalb des Gehäuses verringert werden.
Begrenzung des Ausgangspegels auf maximal 96 dB SPL bei 1 kHz Sinus	✓	Der maximale Ausgangspegel bei der maximalen Systemlautstärke ist bei einem 1 kHz Sinuston kleiner als 96 dB SPL. Die Sicherheit der Entwickler und Nutzer ist sichergestellt. (Siehe Kapitel 4.2.2.3)

Eingangsbezogenes Eigenrauschen	✓	Das ermittelte Signal-Rausch-Verhältnis entspricht dem der auf der Testplattform verbauten Mikrofone (Siehe Kapitel 4.2.2.4)
Latenz durch die Hardware	✓	Die hardwarebedingte Latenz beträgt rund 2,4 ms. Eine zusätzliche Verzögerung durch die Signalverarbeitung von $\leq 3,6$ ms ist wünschenswert. (Siehe Kapitel 4.2.2.5)

* Angaben basierend auf dem vom Hersteller bereitgestellten Protokoll zur Fertigung des Auftrags.

** Kratzer, Fingerabdrücke, Staub etc.

*** Um den Power Management IC von der dritten Leiterplatte testen zu können, wird das Power_Hold Potenzial auf einen der funktionierenden Testpunkte (TP4) gegeben und händisch eine Verbindung von diesem zu R3 mit einem Stück Draht gelötet, sodass ein Anschalten des Systems möglich ist.

C Stromverbrauch der Testplattform

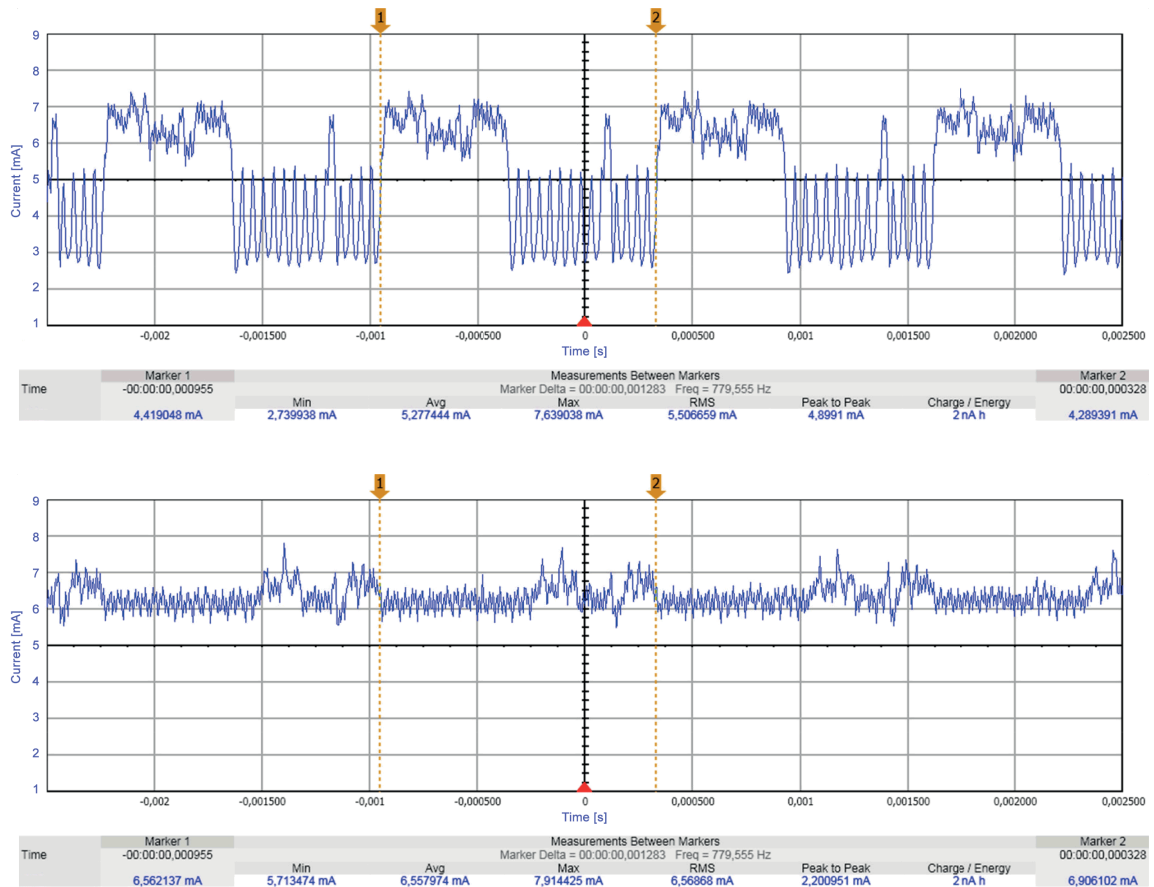


Abbildung C.1: Auswirkung des Sleep Modus auf den Betriebsstrom bei 42% CPU-Auslastung.
Vergleich des Stromverbrauchs mit Sleep Modus (oben) und ohne (unten).

Das obere Bild stellt den mit einem DC Power Analyzer N6705B von Keysight Technologies [KT17] erfassten Betriebsstrom dar, wobei in der Firmware der Sleep Modus aktiviert ist und die CPU eine Auslastung von etwa 42 % hat. Das untere Bild unterscheidet sich im Vergleich zum oberen dadurch, dass der Sleep Modus inaktiv ist.

Die Fensterlänge zur blockweisen Verarbeitung der kontinuierlichen Daten beträgt $1280 \mu\text{s}$ mit 32 Abtastwerten bei einer Abtastrate von 25 kHz in der Firmware. Entsprechend der CPU-Auslastung beträgt die durchschnittliche Verarbeitungszeit $533 \mu\text{s}$. Anders als im unteren Bild ohne Sleep Modus sinkt der Stromverbrauch, sobald diese Berechnungszeit vorbei ist.

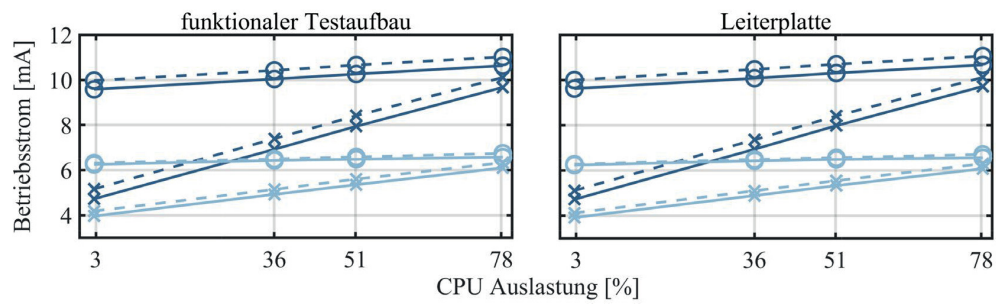


Abbildung C.2: Betriebsstrom von funktionalem Testaufbau und Leiterplatte bei unterschiedlichen CPU-Auslastungen und Einstellungen in der Firmware im Vergleich. Für eine detaillierte Erklärung der Kurven sei auf Abbildung 3.15 verwiesen.

D Kopie des Testberichts zur Werkskalibrierung der Messbox TBS25

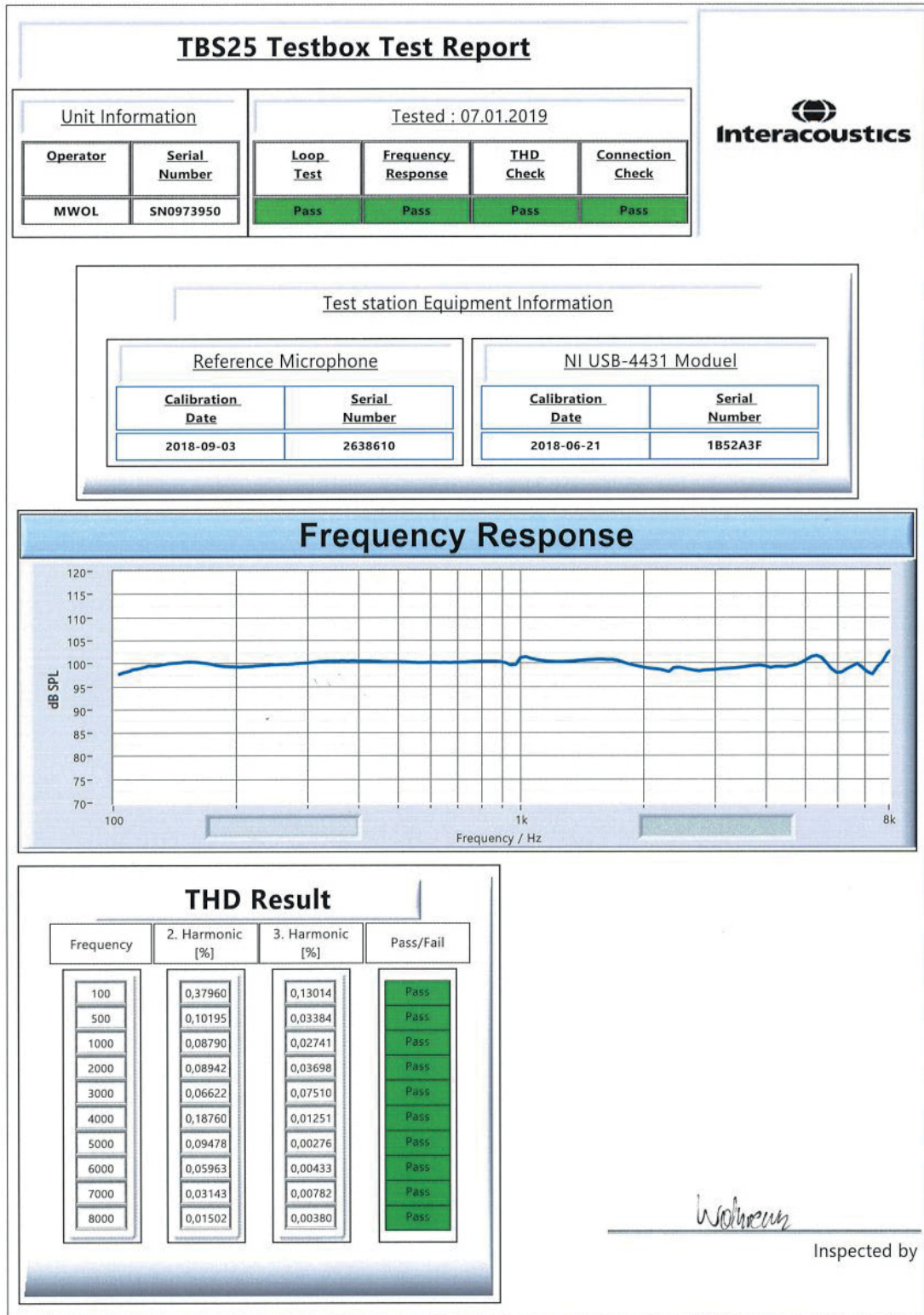


Abbildung D.1: Werkskalibrierung der genutzten Testbox TBS25 durch Interacoustics.

E Mikrofonfrequenzgang

Rechnung E.1: Berechnung des Mikrofonfrequenzgangs in Abhängigkeit der Testsignallautstärke ohne Einfluss des Frequenzgangs vom Lautsprecher, der das Testsignal abspielt, in dB SPL.

Erklärung der Parameter

$\text{Frequenzgang}_{\text{dB SPL}}$	Frequenzgang in Abhängigkeit der betrachteten Lautstärke in dB SPL.
$L_{\text{FS,Chirp}}^{\text{Mic}}$	Frequenzabhängige Pegel des Chirp-Signals in Abhängigkeit der betrachteten Lautstärke vom PrimeHA-Mikrofon, aufgenommen in dB FS.
$L_{\text{FS,Chirp}}^{\text{Speaker}}$	Frequenzabhängige Pegel des Chirp-Signals in Abhängigkeit der betrachteten Lautstärke vom Messmikrofon in der Lautsprechermessung, aufgenommen in dB FS.
$L_{\text{FS,1kHz}}^{\text{Mic}}$	Pegel bei 1 kHz vom PrimeHA-Mikrofon bei der höchsten Lautstärke des Testsignals, aufgenommen in dB FS.
$L_{\text{FS,1kHz}}^{\text{Speaker}}$	Pegel bei 1 kHz vom Messmikrofon in der Lautsprechermessung bei der höchsten Lautstärke des Testsignals, aufgenommen in dB FS.
$L_{\text{SPL,1kHz}}^{\text{real}}$	Tatsächlicher Schalldruckpegel in dB SPL beim Mikrofon.
$L_{\text{FS}}^{\text{Calib,Mic}}$	Kalibriersignal in dB FS für die Messungen zu den Mikrofonen von PrimeHA.
$L_{\text{FS}}^{\text{Calib,Speaker}}$	Kalibriersignal in dB FS für die Messungen zu dem Lautsprecher der Messbox.
$L_{\text{FS,1kHz,Pegel}}^{\text{Speaker}}$	Pegel bei 1 kHz in Abhängigkeit der betrachteten Lautstärke vom Messmikrofon in der Lautsprechermessung, aufgenommen in dB FS.

Berechnung

$\text{Frequenzgang}_{\text{dB SPL}} =$

$$\begin{aligned}
 &= (L_{\text{FS,Chirp}}^{\text{Mic}} - L_{\text{FS,Chirp}}^{\text{Speaker}}) - (L_{\text{FS,1kHz}}^{\text{Mic}} - L_{\text{FS,1kHz}}^{\text{Speaker}}) + L_{\text{SPL,1kHz}}^{\text{real}} + L_{\text{FS}}^{\text{Calib,Mic}} - L_{\text{FS}}^{\text{Calib,Speaker}} = \\
 &= (L_{\text{FS,Chirp}}^{\text{Mic}} - L_{\text{FS,Chirp}}^{\text{Speaker}}) - (L_{\text{FS,1kHz}}^{\text{Mic}} - L_{\text{FS,1kHz}}^{\text{Speaker}}) + L_{\text{FS,1kHz,Pegel}}^{\text{Speaker}} + 94 \text{ dB SPL} - L_{\text{FS}}^{\text{Calib,Speaker}} \\
 &\quad + L_{\text{FS}}^{\text{Calib,Mic}} - L_{\text{FS}}^{\text{Calib,Speaker}}
 \end{aligned}$$

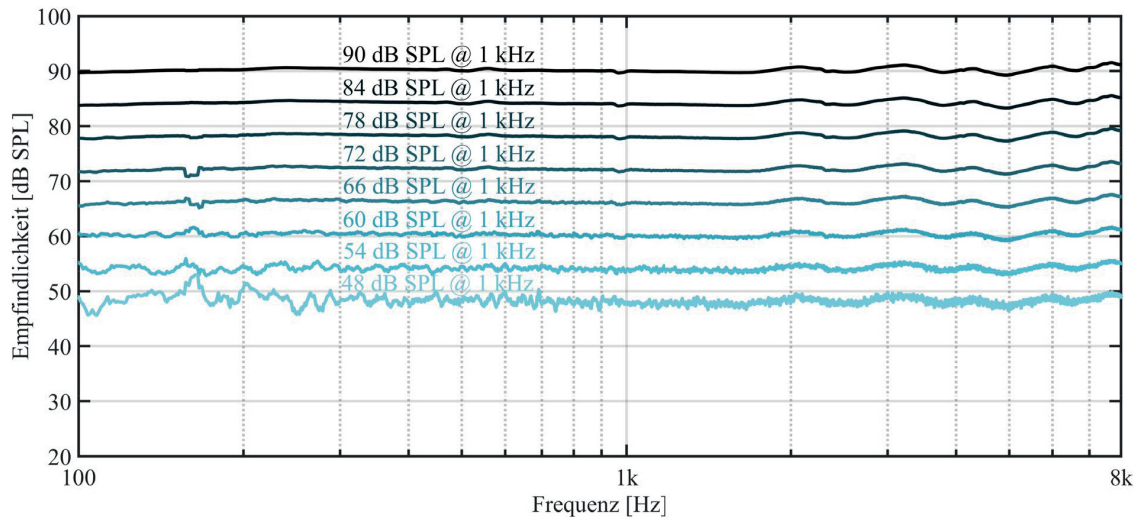


Abbildung E.1: Frequenzgang des Mikrofons MK2 auf der PrimeHA-Testplattform bei mehreren Pegeln im Abstand von 6 dB ohne Beeinflussung durch den Lautsprecherfrequenzgang, der das Testsignal abspielt, und ohne Gehäuse.

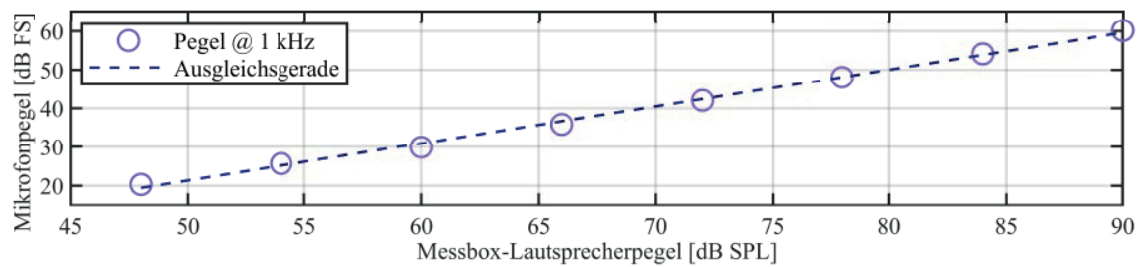


Abbildung E.2: Linearität der im Projekt PrimeHA verbauten Mikrofone.



Abbildung E.3: PrimeHA mit Gehäuse und mit Schall-absorbierendem Textil gefüllt.

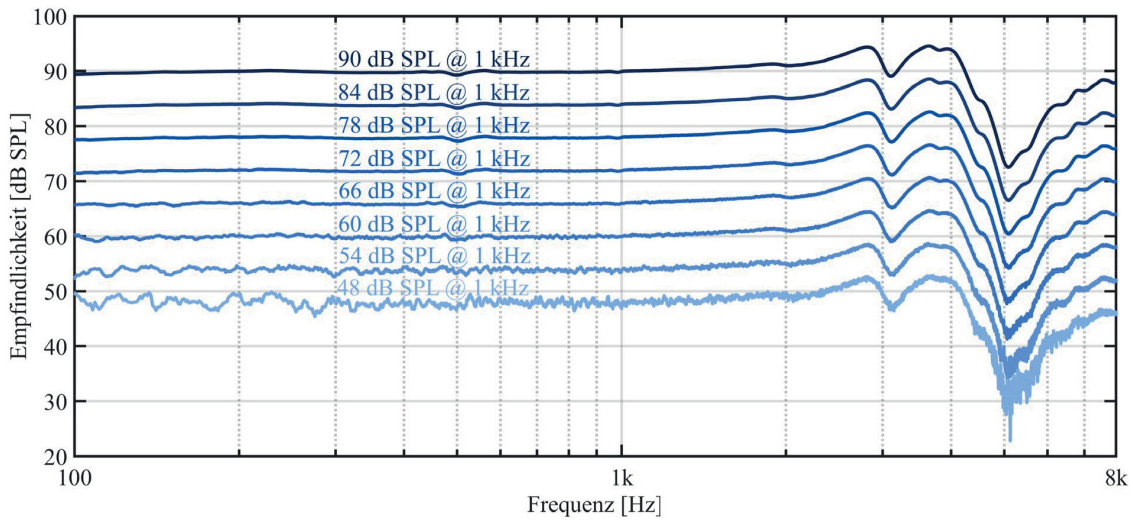


Abbildung E.4: Frequenzgang des Mikrofons MK2 auf der sich im Gehäuse befindenden PrimeHA-Testplattform bei mehreren Pegeln im Abstand von 6 dB ohne Beeinflussung durch den Lautsprecherfrequenzgang, der das Testsignal abspielt.

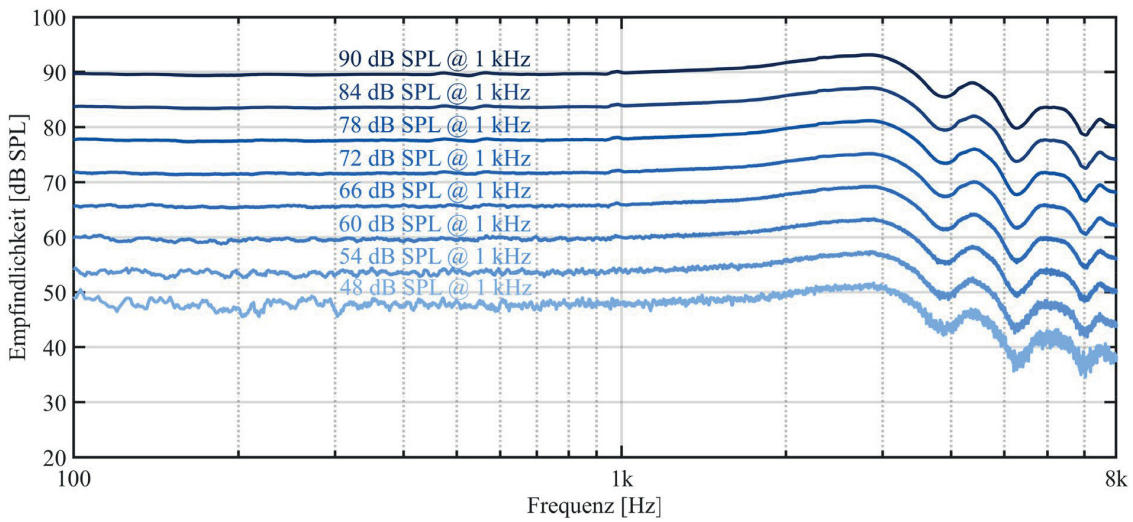
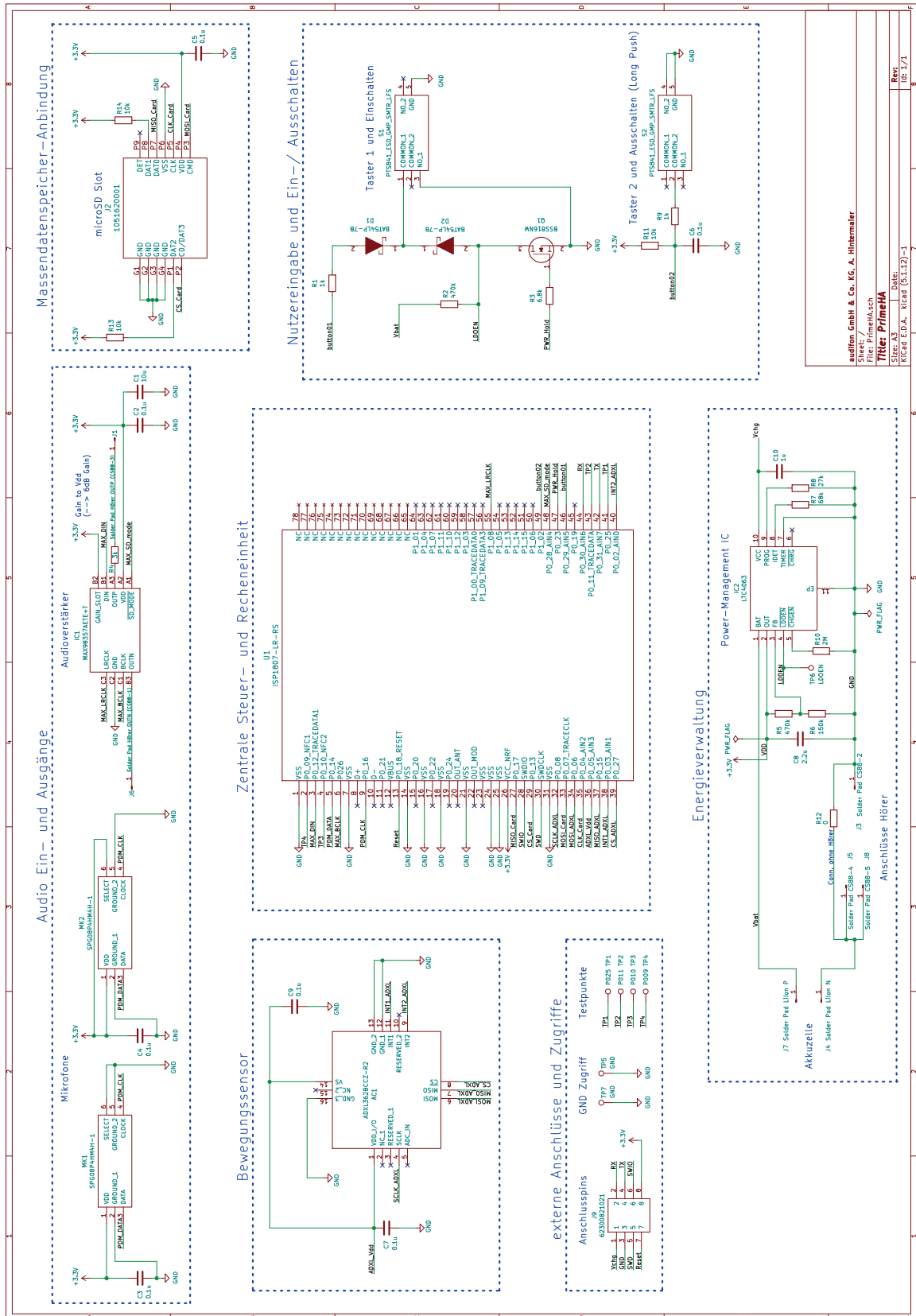


Abbildung E.5: Frequenzgang des Mikrofons MK2 auf der sich im Gehäuse befindenden PrimeHA-Testplattform bei mehreren Pegeln im Abstand von 6 dB ohne Beeinflussung durch den Lautsprecherfrequenzgang, der das Testsignal abspielt. Das Gehäuse ist zusätzlich mit Schall-absorbierendem Textil gefüllt.

Stromlaufplan zum Projekt PrimeHA



auflagen GmbH & Co. KG, A. Hintermair
Sheet: PrimeHA.sch
Title: PrimeHA
Date: 06.12.2011
Rev: 1/1

Literaturverzeichnis

- [Ada16] Adafruit Industries, *Adafruit MAX98357 I2S Class-D Mono Amp*. [Online]. Verfügbar unter: <https://cdn-learn.adafruit.com/downloads/pdf/adafruit-max98357-i2s-class-d-mono-amp.pdf> (Zugriff am: 30. Oktober 2022).
- [ADI18] Analog Devices Inc., *Datasheet SSM2518: Digital Input Stereo, 2 W, Class-D Audio Power Amplifier*. [Online]. Verfügbar unter: <https://www.analog.com/media/en/technical-documentation/data-sheets/ssm2518.pdf> (Zugriff am: 21. Oktober 2022).
- [ADI19] Analog Devices Inc., *Data Sheet ADXL362: Micropower, 3-Axis, ± 2 g/ ± 4 g/ ± 8 g Digital Output MEMS Accelerometer*. [Online]. Verfügbar unter: <https://www.analog.com/media/en/technical-documentation/data-sheets/adxl362.pdf> (Zugriff am: 23. Oktober 2022).
- [ADI22] Analog Devices Inc., *LTspice: Fast • Free • Unlimited*. [Online]. Verfügbar unter: <https://www.analog.com/en/design-center/design-tools-and-calculators/ltspice-simulator.html> (Zugriff am: 7. November 2022).
- [AIS21] AISLER, *PCB Design Rules*. [Online]. Verfügbar unter: <https://aisler.community/t/pcb-design-rules/41> (Zugriff am: 19. Oktober 2022).
- [Ale20] S. Aleshin, „Entwurf und Implementierung eines Machine Learning Verfahrens zur Klassifizierung von multimodalen Sensordaten für ein Embedded System mit beschränkter Rechenkapazität“. Masterarbeit, Technische Universität Ilmenau, Ilmenau, 2020.
- [Alt18] Altium Designer, *Winkelmythen beim PCB-Routing: 45-Grad-Winkel versus 90-Grad-Winkel*. [Online]. Verfügbar unter: <https://resources.altium.com/de/p/pcb-routing-angle-myths-45-degree-angle-versus-90-degree-angle> (Zugriff am: 27. Oktober 2022).
- [Amp22] Amplifon, *Rechargeable Hearing Aids Without Spare Batteries*. [Online]. Verfügbar unter: <https://www.amplifon.com/in/hearing-aids/benefits/rechargeable-hearing-aids> (Zugriff am: 26. Oktober 2022).
- [Arm22] arm Developer, *Cortex-M4: Specifications*. [Online]. Verfügbar unter: <https://developer.arm.com/Processors/Cortex-M4> (Zugriff am: 27. Oktober 2022).
- [aud19] audifon GmbH & Co. KG, *AUDIFIT 5: Gebrauchsanweisung 10/2019*. [Online]. Verfügbar unter: https://www.audifon.com/de/gebrauchsanweisungen/pdf/ProgrammingGuide_DEU.pdf (Zugriff am: 20. Oktober 2022).
- [BEO18] E. Böhmer, D. Ehrhardt und W. Oberschelp, *Elemente der angewandten Elektronik: Kompendium für Ausbildung und Beruf*, 17. Aufl., Wiesbaden, Heidelberg: Springer Vieweg, 2018.
- [Ber12] M. Berger, *Test- und Prüfverfahren in der Elektronikfertigung: Vom Arbeitsprinzip bis Design-for-Test-Regeln.*, Berlin, Offenbach: VDE Verlag, 2012.

- [Ber22] Bernafon Hörgeräte, *Bernafon Oasis NXT Anpasssoftware*. [Online]. Verfügbar unter: <https://www.bernafon.de/professionals/oasis-fitting-software/about-oasis> (Zugriff am: 20. Oktober 2022).
- [BH03] J. Benesty und Y. Huang, *Adaptive Signal Processing: Applications to Real-World Problems.*, Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg, 2003.
- [BK16] Brüel & Kjær, *Product Data: 2 cc Click-on Coupler Type 4946*. [Online]. Verfügbar unter: <https://www.bksv.com/-/media/literature/Product-Data/bp1985.ashx> (Zugriff am: 21. Oktober 2022).
- [BK22] Brüel & Kjær, *Klasse 1 Schallkalibrator: Typ 4231*. [Online]. Verfügbar unter: <https://www.bksv.com/de/transducers/acoustic/calibrators/sound-calibrator-4231> (Zugriff am: 18. Oktober 2022).
- [BLME18] R. J. Bennett, A. Laplante-Lévesque, C. J. Meyer und R. H. Eikelboom, „Exploring Hearing Aid Problems: Perspectives of Hearing Aid Owners and Clinicians“, *Ear and Hearing*, Jg. 39, Nr. 1, S. 172–187, 2018, doi: 10.1097/aud.0000000000000477.
- [BR17] N. Bisgaard und S. Ruf, „Findings From EuroTrak Surveys From 2009 to 2015: Hearing Loss Prevalence, Hearing Aid Adoption, and Benefits of Hearing Aid Use“, *American Journal of Audiology*, Jg. 26, 3S, S. 451–461, 2017, doi: 10.1044/2017_aja-16-0135.
- [BRSE20] D. Beer, A. Rusconi, F. Stoppel und L. Ehrig, „MEMS-Lautsprecher - Ein Paradigmenwechsel“, *Akustik Journal*, Nr. 01, S. 24–39, 2020. [Online]. Verfügbar unter: https://www.dega-akustik.de/fileadmin/dega-akustik.de/publikationen/akustik-journal/20-01/akustik_journal_2020_01_online_artikel2.pdf
- [BSZ+09] S. Bertoli, K. Staehelin, E. Zemp, C. Schindler, D. Bodmer und R. Probst, „Survey on hearing aid use and satisfaction in Switzerland and their determinants“, *International Journal of Audiology*, Jg. 48, Nr. 4, S. 183–195, 2009, doi: 10.1080/14992020802572627.
- [BT19] S. Bhunia und M. Tehranipoor, „Printed Circuit Board (PCB): Design and Test“ in *Hardware Security*, Elsevier, 2019, S. 81–105, doi: 10.1016/B978-0-12-812477-2.00009-5.
- [CBL+16] K. J. Contrera, J. Betz, L. Li, C. R. Blake, Y. K. Sung, J. S. Choi und F. R. Lin, „Quality of life after intervention with a cochlear implant or hearing aid“, *The Laryngoscope*, Jg. 126, Nr. 9, S. 2110–2115, 2016, doi: 10.1002/lary.25848.
- [CDC16] Centers for Disease Control and Prevention, *Understanding Noise Exposure Limits: Occupational vs. General Environmental Noise*. [Online]. Verfügbar unter: <https://blogs.cdc.gov/niosh-science-blog/2016/02/08/noise/> (Zugriff am: 20. Oktober 2022).
- [CGP+19] A. M. Castro Martinez, L. Gerlach, G. Payá-Vayá, H. Hermansky, J. Ooster und B. T. Meyer, „DNN-based performance measures for predicting error rates in automatic speech recognition and optimizing hearing aid parameters“, *Speech Communication*, Jg. 106, S. 44–56, 2019, doi: 10.1016/j.specom.2018.11.006.

- [CKS22] C&K Switches, *PTS841 Series: Microminiature SMT Side Actuated*. [Online]. Verfügbar unter: <https://www.ckswitches.com/media/2805/pts841.pdf> (Zugriff am: 23. Oktober 2022).
- [CLE+18] G. Courtois, H. Lissek, P. Estoppey, Y. Oesch und X. Gigandet, „Effects of Binaural Spatialization in Wireless Microphone Systems for Hearing Aids on Normal-Hearing and Hearing-Impaired Listeners“, *Trends in Hearing*, Jg. 22, 2018, doi: 10.1177/2331216517753548.
- [CP01] K. M. Cienkowski und V. Pimentel, „The hearing aid 'effect' revisited in young adults“, *British Journal of Audiology*, Jg. 35, Nr. 5, S. 289–295, 2001, doi: 10.1080/00305364.2001.11745247.
- [DDBM20] H. Dillon, J. Day, S. Bant und K. J. Munro, „Adoption, use and non-use of hearing aids: a robust estimate based on Welsh national survey statistics“, *International Journal of Audiology*, Jg. 59, Nr. 8, S. 567–573, 2020, doi: 10.1080/14992027.2020.1773550.
- [DI19] Diodes Incorporated, *BAT54LP: SURFACE MOUNT SCHOTTKY BARRIER DIODE*. [Online]. Verfügbar unter: <https://www.diodes.com/assets/Datasheets/ds30504.pdf> (Zugriff am: 23. Oktober 2022).
- [Dil12] H. Dillon, *Hearing aids*, 2. Aufl., Sydney, New York, Stuttgart: Boomerang Press; Thieme, 2012.
- [DOL22] United States Department of Labor, *OSHA Technical Manual (OTM): Section III: Chapter 5*. [Online]. Verfügbar unter: <https://www.osha.gov/otm/section-3-health-hazards/chapter-5> (Zugriff am: 24. Oktober 2022).
- [DS22] Dassault Systèmes, *SOLIDWORKS*. [Online]. Verfügbar unter: <https://www.solidworks.com/> (Zugriff am: 7. November 2022).
- [EG02] S. F. Erler und D. C. Garstecki, „Hearing Loss- and Hearing Aid-Related Stigma: Perceptions of Women with Age-Normal Hearing“, *American Journal of Audiology*, Jg. 11, Nr. 2, S. 83–91, 2002, doi: 10.1044/1059-0889(2002/020).
- [EHI+22] European Hearing Instrument Manufacturers Association, *Documents*. [Online]. Verfügbar unter: <https://www.ehima.com/documents/> (Zugriff am: 28. Oktober 2022).
- [Eur20] Eurocircuits, *Classification*. [Online]. Verfügbar unter: <https://www.eurocircuits.com/pcb-design-guidelines/classification/> (Zugriff am: 27. Oktober 2022).
- [Eur22a] Eurocircuits, *Eurocircuits Home: Leiterplattenherstellung & Bestückung in Europa, Schnell & Einfach*. [Online]. Verfügbar unter: <https://www.eurocircuits.de/> (Zugriff am: 27. Oktober 2022).
- [Eur22b] Eurocircuits, *Leitfaden Leiterplattendesign*. [Online]. Verfügbar unter: <https://www.eurocircuits.de/leiterplatten-design-guidelines/> (Zugriff am: 27. Oktober 2022).
- [EW89] P. Eisler und M. E. W. Williams, *My Life With the Printed Circuit.*, Bethlehem: Lehigh Univ. Press, 1989.

- [GAH22] R. Ghosh, H. Ali und J. H. L. Hansen, „CCi-MOBILE: A Portable Real Time Speech Processing Platform for Cochlear Implant and Hearing Research“, *IEEE Transactions on Biomedical Engineering*, Jg. 69, Nr. 3, S. 1251–1263, 2022, doi: 10.1109/TBME.2021.3123241.
- [GPB21] L. Gerlach, G. Payá-Vayá und H. Blume, „A Survey on Application Specific Processor Architectures for Digital Hearing Aids“, *Journal of Signal Processing Systems*, 2021, doi: 10.1007/s11265-021-01648-0.
- [Hai03] H. Hainzl, „Trends in der Leiterplatten- und Baugruppentechologie“, *e & i Elektrotechnik und Informationstechnik*, Jg. 120, Nr. 6, a13-a17, 2003, doi: 10.1007/BF03053965.
- [Hän06] J. Händschke, *Leiterplattendesign: Ein Handbuch nicht nur für Praktiker; mit 23 Tabellen*, 1. Aufl., Bad Saulgau: Leuze, 2006.
- [HEG21] E. Hering, J. Endres und J. Gutekunst, *Elektronik für Ingenieure und Naturwissenschaftler*, 8. Aufl., Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg, 2021.
- [HFVK10] I. Holube, S. Fredelake, M. Vlaming und B. Kollmeier, „Development and analysis of an International Speech Test Signal (ISTS)“, *International Journal of Audiology*, Jg. 49, Nr. 12, S. 891–903, 2010, doi: 10.3109/14992027.2010.506889.
- [HO22] Hörzentrum Oldenburg gGmbH, *openMHA*. [Online]. Verfügbar unter: <https://www.hz-ol.de/de/open-mha.html> (Zugriff am: 28. Oktober 2022).
- [Hum19] L. E. Humes, „The World Health Organization's hearing-impairment grading system: an evaluation for unaided communication in age-related hearing loss“, *International Journal of Audiology*, Jg. 58, Nr. 1, S. 12–20, 2019, doi: 10.1080/14992027.2018.1518598.
- [Int08] Interacoustics, *Operation Manual: Dedicated Test Chamber TBS25*. [Online]. Verfügbar unter: https://www.interacoustics.com/images/files/operation_manual_tbs25.pdf (Zugriff am: 25. Oktober 2022).
- [IS22a] Insight SIP, *ISP1807 Data Sheet: Built-in Antenna Low Energy Module*. [Online]. Verfügbar unter: https://www.insightsip.com/fichiers_insightsip/pdf/ble/ISP1807/isp_ble_DS1807.pdf (Zugriff am: 23. Oktober 2022).
- [IS22b] Insight SIP, *ISP1807 DK Data Sheet: Development Boards*. [Online]. Verfügbar unter: https://www.insightsip.com/fichiers_insightsip/pdf/ble/ISP1807/isp_ble_DS1807_DK.pdf (Zugriff am: 7. November 2022).
- [ITA11] Infineon Technologies AG, *BSS816NW: OptiMOS™2 Small-Signal-Transistor*. [Online]. Verfügbar unter: https://www.infineon.com/dgdl/Infineon-BSS816NW-DS-v02_03-en.pdf?fileId=db3a304335113a6301351e704a2e1332 (Zugriff am: 23. Oktober 2022).
- [JDGK05] C. E. Johnson, J. L. Danhauer, R. B. Gavin, S. R. Karns, A. C. Reith und I. P. Lopez, „The "Hearing Aid Effect" 2005: A Rigorous Test of the Visibility of New Hearing

- Aid Styles“, *American Journal of Audiology*, Jg. 14, Nr. 2, S. 169–175, 2005, doi: 10.1044/1059-0889(2005/019).
- [JHW+20] L. Jablonski, T. Harczos, B. Wolf, G. Hoch, A. Dieter, R. Hessler, S. Ayub, P. Ruther und T. Moser, *Hearing restoration by a low-weight power-efficient multichannel optogenetic cochlear implant system*, 2020.
- [JK03] W. Jillek und G. Keller, *Handbuch der Leiterplattentechnik: Band 4*, 1. Aufl., Bad Saulgau: Leuze, 2003.
- [Kat08] James M. Kates, *Digital Hearing Aids.*, San Diego: Plural Publishing, 2008.
- [KB18] S. Kramer und D. K. Brown, *Audiology*, 3. Aufl., San Diego: Plural Publishing Incorporated, 2018.
- [KC19] Knowles Corporation, *SPG08P4HM4H-1: Multimode digital top port sisonic™ microphone*. [Online]. Verfügbar unter: https://www.knowles.com/docs/default-source/default-document-library/spg08p4hm4h-1_baracus_datasheet68f91b731dff6ddb37cff0000940c19.pdf?Status=Master&sfvrsn=820676b1_0 (Zugriff am: 23. Oktober 2022).
- [KHM+21] H. Kayser, T. Herzke, P. Maanen, M. Zimmermann, G. Grimm und V. Hohmann, „Open community platform for hearing aid algorithm research: open Master Hearing Aid (openMHA)“, *SoftwareX*, Jg. 17, 2021, doi: 10.1016/j.softx.2021.100953.
- [KiC22] KiCad, *KiCad EDA: A Cross Platform and Open Source Electronics Design Automation Suite*. [Online]. Verfügbar unter: <https://www.kicad.org/> (Zugriff am: 7. November 2022).
- [Köl22] C. Köllner, *Das müssen Sie zur Halbleiter-Krise wissen*. [Online]. Verfügbar unter: <https://www.springerprofessional.de/en/halbleiter/halbleitertechnik/das-muessen-sie-zur-halbleiter-krise-wissen/19356172> (Zugriff am: 28. Oktober 2022).
- [Kol97] B. Kollmeier, Hg., *Hörflächenskalierung: Grundlagen und Anwendung der kategorialen Lautheitsskalierung für Hördiagnostik und Hörgeräte-Versorgung.*, Heidelberg: Median-Verl. von Killisch-Horn, 1997.
- [Kom13] M. Kompis, *Audiologie: Mit Audio-CD/CD-ROM*, 3. Aufl., Bern: Huber, 2013.
- [KP17] N. Kehtarnavaz und I. M. Panahi, „Smartphones as research platform for hearing improvement studies“, *The Journal of the Acoustical Society of America*, Jg. 141, Nr. 5, S. 3495, 2017, doi: 10.1121/1.4987304.
- [KT17] Keysight Technologies, *N6700 Modular Power System Family: Data Sheet*. [Online]. Verfügbar unter: <https://www.keysight.com/us/en/assets/7018-01522/data-sheets/5989-6319.pdf> (Zugriff am: 10. November 2022).
- [LB17] J. Lienig und H. Bruemmer, *Fundamentals of Electronic Systems Design.*, Cham: Springer International Publishing, 2017.
- [LCY20] Y.-C. Lee, T.-S. Chi und C.-H. Yang, „A 2.17-mW Acoustic DSP Processor With CNN-FFT Accelerators for Intelligent Hearing Assistive Devices“, *IEEE Journal of Solid-State Circuits*, Jg. 55, Nr. 8, S. 2247–2258, 2020, doi: 10.1109/JSSC.2020.2987695.

- [Lee09] F. Leens, „An introduction to I2C and SPI protocols“, *IEEE Instrumentation & Measurement Magazine*, Jg. 12, Nr. 1, S. 8–13, 2009, doi: 10.1109/MIM.2009.4762946.
- [Lew12] J. Lewis, *Common Inter-IC Digital Interfaces for Audio Data Transfer*. [Online]. Verfügbar unter: <https://www.analog.com/media/en/technical-documentation/technical-articles/ms-2275.pdf> (Zugriff am: 27. Oktober 2022).
- [Lew13] J. Lewis, *Analog and Digital MEMS Microphone Design Considerations*. [Online]. Verfügbar unter: <https://invensense.tdk.com/wp-content/uploads/2015/02/Analog-and-Digital-MEMS-Microphone-Design-Considerations.pdf> (Zugriff am: 28. Oktober 2022).
- [LR02] D. Linden und T. B. Reddy, Hg., *Handbook of batteries*, 3. Aufl., New York, NY: McGraw-Hill, 2002.
- [LTC10] Linear Technology Corporation, *LTC4063: Standalone Linear Li-Ion Charger with Micropower Low Dropout Linear Regulator*. [Online]. Verfügbar unter: <https://www.analog.com/media/en/technical-documentation/data-sheets/4063fc.pdf> (Zugriff am: 23. Oktober 2022).
- [MCB21] Multi Circuit Boards, *Basic Design Rules*. [Online]. Verfügbar unter: https://www.multi-circuit-boards.eu/fileadmin/user_upload/downloads/leiterplatten_design-hilfe/Multi-CB-Leiterplatten_Basic-Design-Rules.pdf (Zugriff am: 19. Oktober 2022).
- [MF13] A. McCormack und H. Fortnum, „Why do people fitted with hearing aids not wear them?“, *International Journal of Audiology*, Jg. 52, Nr. 5, S. 360–368, 2013, doi: 10.3109/14992027.2013.769066.
- [MI19] Maxim Integrated, *MAX98357A/MAX98357B: Tiny, Low-Cost, PCM Class D Amplifier with Class AB Performance*. [Online]. Verfügbar unter: <https://datasheets.maximintegrated.com/en/ds/MAX98357A-MAX98357B.pdf> (Zugriff am: 23. Oktober 2019).
- [MI20] Maxim Integrated, *MAX32650-MAX32652: Ultra-Low-Power Arm Cortex-M4 Processor with FPU-Based Microcontroller (MCU) with 3MB Flash and 1MB SRAM*. [Online]. Verfügbar unter: <https://datasheets.maximintegrated.com/en/ds/MAX32650-MAX32652.pdf> (Zugriff am: 27. Oktober 2022).
- [Mol09] Molex Incorporated, *1.45H micro SD header with D/C pin: SD-1051620-001*. [Online]. Verfügbar unter: https://www.molex.com/pdm_docs/sd/1051620001_sd.pdf (Zugriff am: 23. Oktober 2022).
- [MPK11] T. May, S. van de Par und A. Kohlrausch, „A Probabilistic Model for Robust Localization Based on a Binaural Auditory Front-End“, *IEEE Transactions on Audio, Speech, and Language Processing*, Jg. 19, Nr. 1, S. 1–13, 2011, doi: 10.1109/TASL.2010.2042128.
- [MW22] MathWorks, *MATLAB*. [Online]. Verfügbar unter: <https://de.mathworks.com/products/matlab.html> (Zugriff am: 8. November 2022).

- [ND16] Nordic DevZone, *Single PDM microphone at higher PCM sampling rate*. [Online]. Verfügbar unter: <https://devzone.nordicsemi.com/f/nordic-q-a/15150/single-pdm-microphone-at-higher-pcm-sampling-rate> (Zugriff am: 27. Oktober 2022).
- [NRC+20] D. Newsted, E. Rosen, B. Cooke, M. M. Beyea, M. T. W. Simpson und J. A. Beyea, „Approach to hearing loss“, *Canadian Family Physician*, Jg. 66, Nr. 11, S. 803–809, 2020.
- [NS21a] Nordic Semiconductor, *nRF52840: Product Specification v1.7*. [Online]. Verfügbar unter: https://infocenter.nordicsemi.com/pdf/nRF52840_PS_v1.7.pdf (Zugriff am: 28. Oktober 2022).
- [NS21b] Nordic Semiconductor, *nPM1100: Extremely compact Power Management IC (PMIC) with power path and charging*. [Online]. Verfügbar unter: <https://nsscpromedia.blob.core.windows.net/prod/software-and-other-downloads/product-briefs/npm1100-pmic-pb-1.1.pdf> (Zugriff am: 20. Oktober 2022).
- [NS21c] Nordic Semiconductor, *nRF52840 DK: Dual-core Bluetooth 5.3 SoC supporting Bluetooth Low Energy, Bluetooth mesh, NFC, Thread and Zigbee*. [Online]. Verfügbar unter: <https://www.nordicsemi.com/-/media/Software-and-other-downloads/Product-Briefs/nRF52840-DK-product-brief.pdf?la=en&hash=5D78D8104D4FC04D539BDBACFBB5150F34487447> (Zugriff am: 6. November 2022).
- [NS22a] Nordic Semiconductor, *nRF52840*. [Online]. Verfügbar unter: <https://nsscpromedia.blob.core.windows.net/prod/software-and-other-downloads/product-briefs/nrf52840-soc-v3.0.pdf> (Zugriff am: 27. Oktober 2022).
- [NS22b] Nordic Semiconductor, *nRF Toolbox: Container app for our Bluetooth Low Energy demo apps*. [Online]. Verfügbar unter: <https://www.nordicsemi.com/Products/Development-tools/nrf-toolbox> (Zugriff am: 26. Oktober 2022).
- [NXP21] NXP Semiconductors, *S32K1xx Data Sheet*. [Online]. Verfügbar unter: <https://www.nxp.com/docs/en/data-sheet/S32K-DS.pdf> (Zugriff am: 27. Oktober 2022).
- [OS22] ON Semiconductor, *Audiology Focus: Solutions*. [Online]. Verfügbar unter: <https://www.onsemi.com/solutions/medical/audiology-focus#;block-diagram:medical/hearing-aid> (Zugriff am: 22. Oktober 2022).
- [Oti22a] Oticon, *Rechargeable hearing aids*. [Online]. Verfügbar unter: <https://www.oticon.com/solutions/rechargeable-hearing-aids> (Zugriff am: 26. Oktober 2022).
- [Oti22b] Oticon, *Einfache Hörsystemanpassungen mit Oticon Genie 2*. [Online]. Verfügbar unter: <https://www.oticon.de/professionals/training-and-fitting/fitting/fitting-features> (Zugriff am: 10. Oktober 2022).
- [OYZ+19] Z. Ouyang, H. Yu, W.-P. Zhu und B. Champagne, „A Fully Convolutional Neural Network for Complex Spectrogram Processing in Speech Enhancement“ in *2019 IEEE International Conference on Acoustics, Speech and Signal Processing (ICASSP)*, Brighton, United Kingdom, 2019, S. 5756–5760, doi: 10.1109/ICASSP.2019.8683423.

- [Phi22] Philips, *HearSuite: Anpasssoftware*. [Online]. Verfügbar unter: <https://www.hearingsolutions.philips.com/de-de/professionals/hearsuite> (Zugriff am: 20. Oktober 2022).
- [Pho22a] Phonak, *Rechargeable hearing aids*. [Online]. Verfügbar unter: <https://www.phonak.com/com/en/about-us/rechargeable-technology.html> (Zugriff am: 26. Oktober 2022).
- [Pho22b] Phonak, *Phonak Target: Eine Anpassung, die zu Ihnen passt*. [Online]. Verfügbar unter: <https://www.phonakpro.com/ch/de/ressourcen/anpassung-tests/phonak-target-anpasssoftware/uebersicht-target.html> (Zugriff am: 20. Oktober 2022).
- [PHS+18] L. Pisha, S. Hamilton, D. Sengupta, C.-H. Lee, K. C. Vastare, T. Zubatiy, S. Luna, C. Yalcin, A. Grant, R. Gupta, G. Chockalingam, B. D. Rao und H. Garudadri, „A Wearable Platform for Research in Augmented Hearing“, *Asilomar Conference on Signals, Systems and Computers*, Jg. 2018, S. 223–227, 2018, doi: 10.1109/ACSSC.2018.8645557.
- [PS19] M. Post und P. Schmidt, *Lohmeyer Praktische Bauphysik: Eine Einführung mit Berechnungsbeispielen*, 9. Aufl., Wiesbaden, Heidelberg: Springer Vieweg, 2019.
- [PWZ+19] L. Pisha, J. Warchall, T. Zubatiy, S. Hamilton, C.-H. Lee, G. Chockalingam, P. P. Mercier, R. Gupta, B. D. Rao und H. Garudadri, „A Wearable, Extensible, Open-Source Platform for Hearing Healthcare Research“, *IEEE Access : practical innovations, open solutions*, Jg. 7, S. 162083–162101, 2019, doi: 10.1109/ACCESS.2019.2951145.
- [RAI07] RME Audio Interfaces, *FIREFACE 800*. [Online]. Verfügbar unter: https://archiv.rme-audio.de/products/fireface_800.php (Zugriff am: 21. Oktober 2022).
- [RP14] E. P. Rauterkus und C. V. Palmer, „The hearing aid effect in 2013“, *Journal of the American Academy of Audiology*, Jg. 25, Nr. 9, S. 893–903, 2014, doi: 10.3766/jaaa.25.9.10.
- [RS13] Rohde & Schwarz, *R&S®UPV Audio Analyzer: Specifications*. [Online]. Verfügbar unter: https://scdn.rohde-schwarz.com/ur/pws/dl_downloads/dl_common_library/dl_brochures_and_datasheets/pdf_1/UPV_dat_sw_en_0758-1306-22_v0400.pdf (Zugriff am: 21. Oktober 2022).
- [RS19] Rohde & Schwarz, *R&S®RTA4000 Oscilloscope: Power of ten*. [Online]. Verfügbar unter: https://scdn.rohde-schwarz.com/ur/pws/dl_downloads/dl_common_library/dl_brochures_and_datasheets/pdf_1/RTA4000_dat_en_5215-1776-32_v0500.pdf (Zugriff am: 22. Oktober 2022).
- [RS22] Rohde & Schwarz, *dB or not dB ? Was Sie Schon immer zum Rechnen mit dB wissen wollten...: Application Note IMA98*. [Online]. Verfügbar unter: https://scdn.rohde-schwarz.com/ur/pws/dl_downloads/dl_application/application_notes/1ma98/IMA98_10d_dB_or_not_dB.pdf (Zugriff am: 27. Oktober 2022).
- [SBZ+20] D. Sengupta, A. Boothroyd, T. Zubatiy, C. Yalcin, D. Hong, S. K. Hamilton, R. Gupta und H. Garudadri, „Open Speech Platform: Democratizing Hearing Aid

- Research“, *International Conference on Pervasive Computing Technologies for Healthcare*, S. 223–233, 2020, doi: 10.1145/3421937.3422017.
- [Sch17] D. Schöni, *Schaltungs- und Leiterplattendesign im Detail: Von der Idee zum fertigen Gerät.*, Norderstedt: BoD - Books on Demand, 2017.
- [SDA22] SD Association, *Simplified Specifications*. [Online]. Verfügbar unter: https://www.sdcard.org/downloads/pls/pdf/?p=Part1_Physical_Layer_Simplified_Specification_Ver9.00.jpg&f=Part1_Physical_Layer_Simplified_Specification_Ver9.00.pdf&e=EN_SS1_9 (Zugriff am: 7. November 2022).
- [Sig22a] Signia, *Be Brilliant™ with Pure Charge&Go X: Hear what matters with your versatile rechargeable hearing aids*. [Online]. Verfügbar unter: <https://www.signia.net/en/hearing-aids/pure/pure-charge-go-x/> (Zugriff am: 20. Oktober 2022).
- [SK11] A. Schwab und W. Kürner, *Elektromagnetische Verträglichkeit: Mit 294 Abbildungen und 15 Tabellen*, 5. Aufl., Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg, 2011.
- [SM02] M. A. Stone und B. C. J. Moore, „Tolerable hearing aid delays. II. Estimation of limits imposed during speech production“, *Ear and Hearing*, Jg. 23, Nr. 4, S. 325–338, 2002, doi: 10.1097/00003446-200208000-00008.
- [SM03] M. A. Stone und B. C. J. Moore, „Tolerable hearing aid delays. III. Effects on speech production and perception of across-frequency variation in delay“, *Ear and Hearing*, Jg. 24, Nr. 2, S. 175–183, 2003, doi: 10.1097/01.AUD.0000058106.68049.9C.
- [SM05] M. A. Stone und B. C. J. Moore, „Tolerable hearing-aid delays: IV. effects on subjective disturbance during speech production by hearing-impaired subjects“, *Ear and Hearing*, Jg. 26, Nr. 2, S. 225–235, 2005, doi: 10.1097/00003446-200504000-00009.
- [SM99] M. A. Stone und B. C. J. Moore, „Tolerable hearing aid delays. I. Estimation of limits imposed by the auditory path alone using simulated hearing losses“, *Ear and Hearing*, Jg. 20, Nr. 3, S. 182–192, 1999, doi: 10.1097/00003446-199906000-00002.
- [SMM+08] M. A. Stone, B. C. J. Moore, K. Meisenbacher und R. P. Derleth, „Tolerable hearing aid delays. V. Estimation of limits for open canal fittings“, *Ear and Hearing*, Jg. 29, Nr. 4, S. 601–617, 2008, doi: 10.1097/AUD.0b013e3181734ef2.
- [SMSG17] Segger Microcontroller GmbH, *SEGGER Embedded Studio ist für das Nordic SDK frei verwendbar*. [Online]. Verfügbar unter: https://c.a.segger.com/fileadmin/documents/Press_Releases/PR_171023_DE_SEGGER_Nordic_EmbeddedStudio.pdf (Zugriff am: 28. Oktober 2022).
- [SMSG22] Segger Microcontroller GmbH, *J-Link Debug Probes – A Market Leader for 10+ Years*. [Online]. Verfügbar unter: <https://www.segger.com/products/debug-probes/j-link/> (Zugriff am: 25. Oktober 2022).
- [Son14] Sonion, *Data Sheet: RIC-4400*. [Online]. Verfügbar unter: https://www.sonion.com/wp-content/uploads/RIC_4400_Rev_001.pdf (Zugriff am: 23. Oktober 2022).

- [Sou09] P. Souza, „Hearing Aids“ in *Springer reference, Encyclopedia of neuroscience*, M. D. Binder, N. Hirokawa und U. Windhorst, Hg., Berlin: Springer, 2009, S. 1817–1821, doi: 10.1007/978-3-540-29678-2_2155.
- [SPB+15] C. Seifert, G. Paya-Vaya, H. Blume, T. Herzke und V. Hohmann, „A Mobile SoC-Based Platform for Evaluating Hearing Aid Algorithms and Architectures“ in *2015 IEEE 5th International Conference on Consumer Electronics - Berlin (ICCE-Berlin)*, Berlin, Germany, 2015, S. 93–97, doi: 10.1109/ICCE-Berlin.2015.7391341.
- [Sta22] Starkey, *Rechargeable Hearing Aids: Recharge. Relax. Repeat.* [Online]. Verfügbar unter: <https://www.starkey.com/hearing-aids/rechargeable-hearing-aids> (Zugriff am: 26. Oktober 2022).
- [STM17] STMicroelectronics, *X-NUCLEO-LPM01A: STM32 Nucleo expansion board for power consumption measurement.* [Online]. Verfügbar unter: <https://docs.rs-online.com/80fb/0900766b8160a45d.pdf> (Zugriff am: 30. Oktober 2022).
- [Sto21] D. Stotz, *Elektromagnetische Verträglichkeit in der Praxis: Design-Analyse – Interpretation der Normen – Bewertung der Prüfergebnisse.*, Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg, 2021.
- [Tay21] B. Taylor und H. G. Mueller, *Fitting and Dispensing Hearing Aids*, 2. Aufl., San Diego: Plural Publishing Incorporated, 2021.
- [TIS20] TDK InvenSense, *ICS-41351: Top Port PDM Digital Output Multi-Mode Microphone.* [Online]. Verfügbar unter: <http://3cfeqx1hf82y3xcoull08ihx-wpengine.netdna-ssl.com/wp-content/uploads/2020/07/DS-000157-ICS-41351-v1.4.pdf> (Zugriff am: 23. Oktober 2022).
- [Tym22] Tympan, *An open source hearing aid development platform: Tympan Open Hearing.* [Online]. Verfügbar unter: <https://shop.tympan.org/> (Zugriff am: 20. Oktober 2022).
- [UDA00] NXP Semiconductors, *Data Sheet UDA1334ATS: Low power audio DAC with PLL.* [Online]. Verfügbar unter: <https://www.nxp.com/docs/en/data-sheet/UDA1334ATS.pdf> (Zugriff am: 21. Oktober 2022).
- [UH17] J. Ulrich und E. Hoffmann, *Hörakustik 3.0: Theorie und Praxis*, 3. Aufl., Heidelberg: DOZ Verlag, 2017.
- [Var21] Varta AG, *Data Sheet: CoinPower® CP1254 A4.* [Online]. Verfügbar unter: <https://asset.conrad.com/media10/add/160267/c1/-/en/002576667DS00/datasheet-2576667-varta-inr1254-button-cell-rechargeable-cp1254-a4-li-ion-74-mah-37-v-1-pcs.pdf> (Zugriff am: 23. Oktober 2022).
- [Var22] Varta AG, *Technical Handbook CoinPower: Rechargeable Li-Ion Button Cells.* [Online]. Verfügbar unter: https://www.varta-ag.com/fileadmin/varta/industry/downloads/products/lithium-ion-cells/VARTA_CoinPower_tec_handbook_en_geschuetzt.pdf (Zugriff am: 23. Oktober 2022).
- [VSS+17] L. Verma, H. K. Sanju, B. Scaria, M. Awasthi, A. Ravichandran, A. Kaki und S. G. R. Prakash, „A Comparative Study on Hearing Aid Benefits of Digital Hearing Aid

- Use (BTE) from Six Months to Two Years“, *International Archives of Otorhinolaryngology*, Jg. 21, Nr. 3, S. 224–231, 2017, doi: 10.1055/s-0036-1592117.
- [VTD16] S. Volkenstein, J. P. Thomas und S. Dazert, „Implantierbare Knochenleitungs- und aktive Mittelohr-Hörsysteme“, *Laryngo-Rhino-Otologie*, Jg. 95, Nr. 5, S. 352–363, 2016, doi: 10.1055/s-0042-104946.
- [WHO17] World Health Organization, *Global costs of unaddressed hearing loss and cost-effectiveness of interventions: A WHO Report, 2017.*, World Health Organization, 2017. [Online]. Verfügbar unter:
<https://apps.who.int/iris/bitstream/handle/10665/254659/9789241512046-eng.pdf>
- [WHO21] World Health Organization, *World report on hearing.*, Geneva: World Health Organization, 2021. [Online]. Verfügbar unter:
<https://apps.who.int/iris/handle/10665/339913>
- [Wid22] Widex, *WIDEX MOMENT™: Delivers the most pure, naturale sound ever.* [Online]. Verfügbar unter: <https://www.widexpro.com/en/products/moment/> (Zugriff am: 26. Oktober 2022).
- [WU19] D. R. Welling und C. A. Ukstins, *Fundamentals of audiology for the speech-language pathologist*, 2. Aufl., Burlington, MA: Jones & Bartlett Learning, 2019.
- [Wür21] Würth Elektronik, *Proteus-III Reference Manual: 2611011024000.* [Online]. Verfügbar unter: https://www.we-online.com/katalog/manual/2611011024000_Proteus-III%202611011024000%20Manual_rev1.7.pdf (Zugriff am: 28. Oktober 2022).
- [Wür22a] Würth Elektronik, *Basic Design Guide: DE.* [Online]. Verfügbar unter: https://www.we-online.com/web/de/index.php/show/media/04_leiterplatte/2011_2/relaunch/produkte_5/basic_design_rules/BASICDesignRules.pdf (Zugriff am: 22. Oktober 2022).
- [Wür22b] Würth Elektronik, *WR-PHD 1.27 mm SMT Dual Socket Header, H=4.50 mm.* [Online]. Verfügbar unter: https://www.we-online.com/katalog/de/PHD_1_27_SMT_DUAL_SOCKET_HEADER_6230XX21021 (Zugriff am: 20. Oktober 2022).
- [Zic18] G. Zickert, *Leiterplatten: Stromlaufplan, Layout und Fertigung Ein Lehrbuch für Einsteiger*, 2. Aufl., München: Fachbuchverlag Leipzig im Carl Hanser Verlag, 2018.
- [Zve22] G. Zverev, „Entwurf eines kompakten, energieeffizienten Lärmdosimeters mit integrierter Szenenerkennung und dessen Erprobung in mobilen Anwendungssituationen“. Masterarbeit, Technische Universität Ilmenau, Ilmenau, 2022.

Abbildungsverzeichnis

Abbildung 2.1:	Technologie in einem Hörgerät.	11
Abbildung 2.2:	HdO-Geräte mit Schallschlauch (links) und mit RIC-Modul (rechts).....	14
Abbildung 2.3:	Messbox TBS25 von Interacoustics mit Messmikrofon und Kuppler.....	15
Abbildung 2.4:	2 cc Kuppler von Brüel & Kjær mit Adapter für IdO sowie HdO mit RIC.....	16
Abbildung 3.1:	Systemarchitektur.	24
Abbildung 3.2:	Exemplarischer Vergleich des Platzbedarfs zweier microSD-Kartenanschlüsse. Von links: Vorder- und Rückseite des Speicherkartenverbinders 693072010801 von Würth Elektronik sowie Vorder- und Rückseite des 1051620001 von Molex.	30
Abbildung 3.3:	Zentrale Steuer- und Recheneinheit (Ausschnitt des Schaltplans zum Projekt PrimeHA).	36
Abbildung 3.4:	Energieverwaltung (Ausschnitt des Schaltplans zum Projekt PrimeHA).	36
Abbildung 3.5:	Nutzereingabe sowie Ein- und Ausschalten des Systems (Ausschnitt des Schaltplans zum Projekt PrimeHA).	38
Abbildung 3.6:	Funktionsweise des Ein- und Ausschaltens im System schematisch.....	39
Abbildung 3.7:	LTspice Simulation des Ein- und Ausschaltens des Systems mit Präsentation der Schaltung und Simulationsanweisungen (oben) sowie Darstellung der Simulation von relevanten Strömen und Spannungen (unten).....	41
Abbildung 3.8:	Audioeingang (Ausschnitt des Schaltplans zum Projekt PrimeHA).....	42
Abbildung 3.9:	Audioausgang (Ausschnitt des Schaltplans zum Projekt PrimeHA).	42
Abbildung 3.10:	Massendatenspeicheranbindung (Ausschnitt des Schaltplans zum Projekt PrimeHA).	43
Abbildung 3.11:	Bewegungssensor (Ausschnitt des Schaltplans zum Projekt PrimeHA).....	43
Abbildung 3.12:	Externe Anschlüsse und Zugriffe auf die Entwicklungsplattform (Ausschnitt des Schaltplans zum Projekt PrimeHA).	44
Abbildung 3.13:	Beschrifteter funktionaler Tischaufbau mit Lautsprecher.	45
Abbildung 3.14:	Test eines Entlade-/Ladezyklus mit dem PMIC LTC4063, einer CP1254A4 Akkuzelle und einer Last von 315 Ω	48
Abbildung 3.15:	Stromverbrauch des funktionalen Testaufbaus in Abhängigkeit der CPU-Auslastung mit Unterscheidung energieintensiver Einstellungen in der Firmware.....	50
Abbildung 3.16:	Platzierung zweier Widerstände zwischen Audioverstärker-Ausgang und Hörer.	52
Abbildung 3.17:	Entwurf der Leiterplatte zum Projekt PrimeHA in KiCad. Darstellung der Bauteilplatzierung, des Routings sowie 3D Modells der gefertigten Platine vorne (rot, links) und hinten (grün, rechts).	56

Abbildung 3.18:	CAD-Modell des Gehäuses für PrimeHA mit Nummern, auf welche an den entsprechenden Textstellen verwiesen wird. Gehäusedeckel (oben links), Gehäuseschale (unten links) sowie geschlossenes Gehäuse mit eingesetzten Tastern und microSD-Karten-Abdeckung (rechts).	58
Abbildung 3.19:	Platine mit Gehäuse aus gedruckten Gehäuseteilen. Gehäuse, Taster sowie microSD-Karten Abdeckung mit SLS-Verfahren gedruckt (links), mit FDM-Verfahren gedrucktes halb offenes (mittig) und geschlossenes Gehäuse (rechts).	59
Abbildung 3.20:	Demonstrator des Prototyps, von vorne und hinten (oben) und von einem erwachsenen Mann hinter dem Ohr getragen (unten).	60
Abbildung 4.1:	Gefertigte und bestückte Leiterplatte vorne und hinten mit 1 € Stück als Größenvergleich.	61
Abbildung 4.2:	Versuchsaufbau zur Messung der Betriebsdauer.	64
Abbildung 4.3:	Nachbildung einer Spezialanfertigung von Sonion zur Kontaktierung von Hörer und Kuppler.	66
Abbildung 4.4:	Frequenzgang des RIC-Moduls (eigene Messung).	66
Abbildung 4.5:	Positionierung der PrimeHA-Plattform in einer Messbox für die Ermittlung des Mikrofonfrequenzgangs des Mikrofons MK1.	67
Abbildung 4.6:	Frequenzantwort des Lautsprechers einer TBS25 Messbox bei mehreren Pegeln im Abstand von 6 dB bei geschlossenem Zustand.	68
Abbildung 4.7:	Frequenzgang des Mikrofons MK1 auf der PrimeHA-Testplattform bei mehreren Pegeln im Abstand von 6 dB ohne Beeinflussung durch den Lautsprecherfrequenzgang, der das Testsignal abspielt, und ohne Gehäuse.....	69
Abbildung 4.8:	Frequenzgang des Mikrofons MK1 auf der sich im Gehäuse befindenden PrimeHA-Testplattform bei mehreren Pegeln im Abstand von 6 dB ohne Beeinflussung durch den Lautsprecherfrequenzgang, der das Testsignal abspielt.	70
Abbildung 4.9:	Frequenzgang des Mikrofons MK1 auf der sich im Gehäuse befinden PrimeHA-Testplattform bei mehreren Pegeln im Abstand von 6 dB ohne Beeinflussung durch den Lautsprecherfrequenzgang, der das Testsignal abspielt. Das Gehäuse ist zusätzlich mit Schall-absorbierendem Textil gefüllt.	71
Abbildung 4.10:	Positionierung der Mikrofone in der Messbox zur Ermittlung der hardwarebedingten Latenz.	72
Abbildung C.1:	Auswirkung des Sleep Modus auf den Betriebsstrom bei 42% CPU-Auslastung. Vergleich des Stromverbrauchs mit Sleep Modus (oben) und ohne (unten).	87
Abbildung C.2:	Betriebsstrom von funktionalem Testaufbau und Leiterplatte bei unterschiedlichen CPU-Auslastungen und Einstellungen in der Firmware im Vergleich. Für eine detaillierte Erklärung der Kurven sei auf Abbildung 3.15 verwiesen	88
Abbildung D.1:	Werkskalibrierung der genutzten Testbox TBS25 durch Interacoustics.....	89
Abbildung E.1:	Frequenzgang des Mikrofons MK2 auf der PrimeHA-Testplattform bei mehreren Pegeln im Abstand von 6 dB ohne Beeinflussung durch den Lautsprecherfrequenzgang, der das Testsignal abspielt, und ohne Gehäuse.....	91

Abbildung E.2:	Linearität der im Projekt PrimeHA verbauten Mikrofone.	91
Abbildung E.3:	PrimeHA mit Gehäuse und mit Schall-absorbierendem Textil gefüllt.	91
Abbildung E.4:	Frequenzgang des Mikrofons MK2 auf der sich im Gehäuse befindenden PrimeHA-Testplattform bei mehreren Pegeln im Abstand von 6 dB ohne Beeinflussung durch den Lautsprecherfrequenzgang, der das Testsignal abspielt.	92
Abbildung E.5:	Frequenzgang des Mikrofons MK2 auf der sich im Gehäuse befindenden PrimeHA-Testplattform bei mehreren Pegeln im Abstand von 6 dB ohne Beeinflussung durch den Lautsprecherfrequenzgang, der das Testsignal abspielt. Das Gehäuse ist zusätzlich mit Schall-absorbierendem Textil gefüllt.	92

Tabellenverzeichnis

Tabelle 3.1:	Bauteilvergleich für die Systemkomponente zentrale Steuer- und Recheneinheit.....	27
Tabelle 3.2:	Bauteilvergleich für die Systemkomponenten digitale Mikrofone.....	29
Tabelle 3.3:	Bauteilvergleich für die Systemkomponente Audioverstärker.....	30
Tabelle 3.4:	Bauteilvergleich für die Systemkomponente Energieverwaltung.....	32
Tabelle 3.5:	Approximation des Betriebsstroms in Komponenten gegliedert.....	34
Tabelle 3.6:	Anforderungen an die Firmware für eine grundlegende Funktionsweise der Hörerätetestplattform und zur Kontrolle der Funktionalität einzelner Funktions-einheiten.....	46
Tabelle 3.7:	Bestimmung des Ausgangspegels bei 1 kHz in Abhängigkeit der Hörerwahl.....	51
Tabelle 3.8:	Messergebnisse zur Limitierung des Ausgangspegels mit einem oder zwei Widerständen nach dem Audioverstärker nach festgelegter Hörerwahl.....	52
Tabelle 3.9:	Designrichtlinien für den Leiterplattenentwurf.....	55
Tabelle A.1:	Kostenkalkulation für das Projekt PrimeHA.....	81
Tabelle B.1:	Testplan und -protokoll zur Kontrolle der gefertigten Leiterplatte und Charakterisierung des Systems.....	83

