HAW HAMBURG

**BACHELORARBEIT**

# Entwicklung eines Leitfadens für den Bau von Line Arrays mit einstellbarer vertikaler Richtcharakteristik anhand einer prototypischen Umsetzung

vorgelegt am 24. August 2026

Murad Zeynalli
Matrikel Nr.: [redacted]

Erstprüferin: Prof. Dr.-Ing. Eva Wilk
Zweitprüfer: B.Sc. Matthias Fehling

**HOCHSCHULE FÜR ANGEWANDTE WISSENSCHAFTEN HAMBURG**
Fakultät Elektro-, Medien- und Informationstechnik
Finkenau 35
20081 Hamburg

## Zusammenfassung

In dieser Arbeit wird ein praxisorientierter Leitfaden für den eigenständigen Aufbau eines Line-Array-Lautsprechers mit elektronisch einstellbarer vertikaler Richtcharakteristik entwickelt. Dazu wurde ein vollständiger Prototyp mit acht einzeln angesteuerten Breitbandlautsprechern, mehrkanaliger Signalverarbeitung und browserbasierter Steuerung aufgebaut und messtechnisch untersucht. Ergänzend wurden Berechnungs-, Simulations-, Konstruktions- und Softwarewerkzeuge entwickelt, die neben der Reproduktion des Prototyps auch eine Anpassung zentraler Systemparameter ermöglichen.

Die Messungen zeigen, dass der Prototyp einen nutzbaren Übertragungsbereich von etwa 80 Hz bis 20 kHz und einen maximal nutzbaren Schalldruckpegel von 116 dB SPL erreicht. Die Wirkung des Beam Steering konnte insbesondere anhand von STI-Messungen im Hörsaal nachgewiesen werden. Dabei verringerte sich die Differenz zwischen dem höchsten und niedrigsten STI-Wert innerhalb des untersuchten Zuhörerbereichs von 0,214 auf 0,040. Die Ergebnisse bestätigen damit die praktische Umsetzbarkeit des entwickelten Konzepts.

## Abstract

This thesis develops a practical guide for the independent construction of a line-array loudspeaker with electronically adjustable vertical directivity. For this purpose, a complete prototype with eight individually driven full-range loudspeakers, multichannel signal processing and browser-based control was built and characterized experimentally. In addition, calculation, simulation, construction and software tools were developed that enable both the reconstruction of the prototype and the modification of relevant system parameters.

The measurements show that the prototype achieves a usable frequency range of approximately 80 Hz to 20 kHz and a maximum usable sound pressure level of 116 dB SPL. The effect of beam steering was demonstrated in particular by STI measurements in a lecture hall. With beam steering enabled, the difference between the highest and lowest STI values within the investigated audience area decreased from 0.214 to 0.040. The results therefore confirm the practical feasibility of the developed concept.

# Inhaltsverzeichnis

Abbildungsverzeichnis . . . . . iv
Tabellenverzeichnis . . . . . vi
Formelverzeichnis . . . . . vii

**1 Einleitung . . . . . 1**

**2 Planung des Baus eines Line-Arrays . . . . . 3**

2.1 Ausgangskonzept und Anforderungen . . . . . 3
2.2 Theoretische Grundlagen und Berechnungsmodelle . . . . . 4
2.2.1 Frequenzgrenzen der Richtwirkungssteuerung . . . . . 4
2.2.2 Mathematisches Modell der Strahlsteuerung . . . . . 6
2.2.3 Mathematisches Simulationsmodell . . . . . 8
2.2.4 Akustische Auslegung des Lautsprechergehäuses . . . . . 10
2.3 Systemauslegung und Komponentenauswahl . . . . . 14
2.3.1 Materialkonzept des Lautsprechergehäuses . . . . . 14
2.3.2 Auswahl der elektronischen Systemarchitektur . . . . . 17
2.3.3 Auswahl und Dimensionierung der Komponenten . . . . . 20
2.4 Technische Ausarbeitung des Prototyps . . . . . 23
2.4.1 Konstruktion des Lautsprechergehäuses . . . . . 23
2.4.2 Verdrahtungskonzept . . . . . 30
2.4.3 Softwarearchitektur und Bedienkonzept . . . . . 31

**3 Bau eines Prototyps . . . . . 36**

3.1 Benötigte Ressourcen . . . . . 36
3.1.1 Werkzeuge . . . . . 36
3.1.2 Materialien und Komponenten . . . . . 37
3.1.3 Zeitaufwand . . . . . 39
3.2 Mechanischer Aufbau . . . . . 39
3.2.1 Additiv gefertigte Gehäusevariante . . . . . 39
3.2.2 Aluminiumgehäuse . . . . . 41
3.2.3 Dämpfung, Absorption und Abdichtung . . . . . 43
3.3 Elektrischer Aufbau . . . . . 48
3.3.1 Verdrahtung . . . . . 49
3.3.2 Integration der Elektronik und Anschluss . . . . . 50
3.3.3 Prüfung der Lautsprecherpolarität . . . . . 51
3.4 Softwareinstallation und Systemkonfiguration . . . . . 52
3.4.1 Installation der Software . . . . . 52
3.4.2 Neustart und WLAN-Verbindung . . . . . 53
3.4.3 Diagnose der Installation . . . . . 53
3.4.4 Alternative Verbindung über Ethernet . . . . . 54
3.4.5 Funktionstest . . . . . 55

**4 Messtechnische Überprüfung der Eigenschaften des Prototyps . . . . . 57**

4.1 Technische Kenndaten des Prototyps . . . . . 57

4.2 Elektrische und elektroakustische Messungen . . . . . 57
4.2.1 Thiele/Small-Parameter und Impedanzverhalten . . . . . 57
4.2.2 Klirrfaktor . . . . . 59
4.2.3 Systemlatenz . . . . . 61
4.3 Akustische Messungen im reflexionsarmen Raum . . . . . 62
4.3.1 Frequenzgang . . . . . 62
4.3.2 Richtcharakteristik . . . . . 64
4.4 Bewertung der Strahlsteuerung im Hörsaal . . . . . 65
4.4.1 Messraum und Messpositionen . . . . . 66
4.4.2 Verglichene Lautsprechersysteme und Betriebsarten . . . . . 67
4.4.3 Bewertung des Speech Transmission Index . . . . . 67
4.4.4 Messergebnisse . . . . . 68
4.4.5 Auswertung der STI-Messungen . . . . . 68
4.5 Subjektive Hörbeurteilung . . . . . 71
4.6 Vergleich mit kommerziellen Systemen . . . . . 72
4.7 Diskussion . . . . . 74

**5 Zusammenfassung . . . . . 76**

**Literaturverzeichnis . . . . . 77**

**Anhang A . . . . . 79**

**Anhang B . . . . . 80**
Inhalt des USB-Datenträgers . . . . . 83
Eigenständigkeitserklärung . . . . . 84

# Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1: Lautsprecher Fohhn FS-70 . . . 3
Abbildung 2: Delay-System zur Richtungssteuerung linearer Schallquellen . . . 6
Abbildung 3: Impulsantwort eines idealen Verzögerungsfilters für $D = 3$ und $D = 3{,}3$ . . . 7
Abbildung 4: Benutzeroberfläche der Simulationssoftware . . . 10
Abbildung 5: Berechnungswerkzeug zur Dimensionierung des geschlossenen Lautsprechergehäuses . . . 13
Abbildung 6: 3D-Modell des Probekörpers . . . 16
Abbildung 7: Aluminium-Vierkantrohr . . . 17
Abbildung 8: Blockschaltbild der Systemarchitektur – Variante 1 . . . 18
Abbildung 9: Blockschaltbild der Systemarchitektur – Variante 2 . . . 19
Abbildung 10: Blockschaltbild der Systemarchitektur – Variante 3 . . . 20
Abbildung 11: Technische Daten des Dayton Audio PC83-4 . . . 21
Abbildung 12: Elektrische und akustische Kenndaten des Wondom GAB8 . . . 22
Abbildung 13: Technische Daten des HiFiBerry Studio ADC . . . 23
Abbildung 14: 3D-Modell der additiv gefertigten Gehäusevariante . . . 25
Abbildung 15: 3D-Modell der inneren Struktur der additiv gefertigten Gehäusevariante . . . 26
Abbildung 16: 3D-Modell der Aluminiumgehäusevariante . . . 27
Abbildung 17: 3D-Modell der additiv gefertigten Abstandshalter . . . 29
Abbildung 18: TV-Zapfen-Befestigung . . . 30
Abbildung 19: Anschluss- und Verdrahtungsplan des Lautsprechersystems . . . 31
Abbildung 20: Softwarearchitektur und Datenfluss des Lautsprechersystems . . . 32
Abbildung 21: Signalfluss der digitalen Audioverarbeitung . . . 33
Abbildung 22: Probedrucke der Verbindungspins . . . 40
Abbildung 23: 3D-gedruckter Flansch mit eingesetzten Messing-Gewindeeinsätzen 41
Abbildung 24: Lautsprecheröffnung im Aluminiumgehäuse . . . 42
Abbildung 25: Befestigungsbohrungen für TV-Zapfen, Abstandshalter und Netzteil 43
Abbildung 26: Untere Gehäuseabdeckung mit den externen Anschlüssen . . . 44
Abbildung 27: 3D-gedruckte Dichtung aus TPU 90A . . . 45
Abbildung 28: Montagebereich eines Lautsprechertreibers vor und nach dem Aufbringen der Filzschicht . . . 46
Abbildung 29: Innenflächen des Aluminiumgehäuses mit viskoelastischer Dämpfung 47
Abbildung 30: Innenraum des Lautsprechergehäuses mit Verbundschaumstoff . . . 48
Abbildung 31: Aufbringen der Schraubensicherung vor der Montage . . . 49
Abbildung 32: Vorbereitete Netzteile für die Montage im Gehäuse . . . 50
Abbildung 33: Wärmeleitpads an den elektronischen Baugruppen . . . 51
Abbildung 34: Neuberechnung der Gehäuseparameter mit den gemessenen Thiele/Small-Parametern . . . 58
Abbildung 35: THD in Abhängigkeit vom Eingangspegel bei 1 kHz . . . 60
Abbildung 36: THD+N in Abhängigkeit vom Eingangspegel bei 1 kHz . . . 60
Abbildung 37: Messung der Gesamtlatenz mit Rational Acoustics Smaart 8 . . . 61
Abbildung 38: Gemessener Frequenzgang des Prototyps ohne Entzerrung . . . 62
Abbildung 39: Gemessener Frequenzgang des Prototyps mit aktiviertem EQ-Preset 63
Abbildung 40: Gemessene Richtcharakteristik des Prototyps bei ausgewählten Frequenzen . . . 65
Abbildung 41: Messaufbau und Zuhörerbereich im Ditze-Hörsaal . . . 66
Abbildung 42: Bewertung der Sprachverständlichkeit anhand des STI . . . 68

Abbildung 43: Entwickelter Prototyp sowie die Vergleichssysteme Fohhn FS-110 und FS-70 . . . . . 73
Abbildung A.1: Frequenzgang von 3D-gedruckten Lautsprechergehäusen . . . . . 79
Abbildung A.2: Polardiagramm von 3D-gedruckten Lautsprechergehäusen . . . . . 79
Abbildung B.1: Hauptseite der Benutzeroberfläche mit Gain- und Presetverwaltung 80
Abbildung B.2: Steering-Seite mit Schallfeldsimulation und Parametern der Strahlsteuerung . . . . . 80
Abbildung B.3: Equalization-Seite mit Filterparametern und dargestellter DSP-Übertragungsfunktion . . . . . 81
Abbildung B.4: Test-Seite zur gezielten Auswahl einzelner Ausgangskanäle . . . . . 81
Abbildung B.5: System-Seite mit Audio- und Netzwerkstatus, aktuellen Verzögerungswerten und Systemfunktionen . . . . . 82

# Tabellenverzeichnis

Tabelle 1: Berechnete akustische Parameter . . . . . 24
Tabelle 2: Grundlegende Werkzeuge für den Aufbau . . . . . 36
Tabelle 3: Zusätzliche Werkzeuge für die additiv gefertigte Gehäusevariante . . 37
Tabelle 4: Zusätzliche Werkzeuge für die Aluminiumvariante . . . . . 37
Tabelle 5: Materialien und Komponenten für den Aufbau . . . . . 38
Tabelle 6: Zusätzliche Materialien für die additiv gefertigte Gehäusevariante . . 38
Tabelle 7: Zusätzliche Materialien für die Aluminiumvariante . . . . . 39
Tabelle 8: Geschätzter Zeitaufwand für beide Gehäusevarianten . . . . . 39
Tabelle 9: Technische Kenndaten des aufgebauten Prototyps . . . . . 57
Tabelle 10: Vergleich der gemessenen Thiele/Small-Parameter mit den Herstellerangaben . . . . . 58
Tabelle 11: Thiele/Small-Parameter des bestückten Gehäuses . . . . . 59
Tabelle 12: Messpositionen für die STI-Untersuchung . . . . . 67
Tabelle 13: Gemessene STI-Werte der untersuchten Lautsprechersysteme und Betriebsarten . . . . . 68
Tabelle 14: Vergleich wesentlicher technischer Eigenschaften . . . . . 73

# Formelverzeichnis

Formel 1: Zusammenhang zwischen Wellenlänge und Frequenz . . . . . 4
Formel 2: Untere Frequenzgrenze aus der Arraylänge . . . . . 5
Formel 3: Wirksame Länge des Lautsprecherarrays . . . . . 5
Formel 4: Untere Frequenzgrenze aus Elementanzahl und Abstand . . . . . 5
Formel 5: Räumliches Abtastkriterium . . . . . 5
Formel 6: Obere Frequenzgrenze des Arrays . . . . . 5
Formel 7: Position eines Arrayelements . . . . . 6
Formel 8: Wegdifferenz für die Strahlsteuerung . . . . . 6
Formel 9: Verzögerung für die Strahlsteuerung . . . . . 6
Formel 10: Auf positive Werte verschobene Verzögerung . . . . . 7
Formel 11: Verzögerung in Abtastwerten . . . . . 7
Formel 12: Phasenverschiebung durch Zeitverzögerung . . . . . 7
Formel 13: Abstand eines Arrayelements zum Fokuspunkt . . . . . 7
Formel 14: Verzögerung zur Fokussierung . . . . . 8
Formel 15: Amplitudengewichtung eines Arrayelements . . . . . 8
Formel 16: Überblendung zur Hann-Gewichtung . . . . . 8
Formel 17: Abstand zwischen Schallquelle und Beobachtungspunkt . . . . . 8
Formel 18: Komplexer Schalldruck eines Arrayelements . . . . . 8
Formel 19: Wellenzahl . . . . . 8
Formel 20: Gesamtschalldruck des Arrays . . . . . 9
Formel 21: Relativer Schalldruckpegel . . . . . 9
Formel 22: Wirksames Gehäusevolumen . . . . . 11
Formel 23: Gesamtäquivalenzvolumen mehrerer Treiber . . . . . 11
Formel 24: Gesamtäquivalenzvolumen identischer Treiber . . . . . 11
Formel 25: Volumenverhältnis des geschlossenen Gehäuses . . . . . 11
Formel 26: Resonanzfrequenz des geschlossenen Systems . . . . . 11
Formel 27: Gesamtgüte des geschlossenen Systems . . . . . 11
Formel 28: Butterworth-Abstimmung des geschlossenen Systems . . . . . 11
Formel 29: Erforderliches Gehäusevolumen . . . . . 11
Formel 30: Axiale Gehäusemoden . . . . . 12
Formel 31: Berechneter geometrischer Steuerbereich . . . . . 21

# 1 Einleitung

Beschallungssysteme werden in einer Vielzahl öffentlicher Räume eingesetzt, um Sprache und Musik möglichst gleichmäßig und verständlich innerhalb eines definierten Zuhörerbereichs wiederzugeben. Eine wesentliche Aufgabe bei der Auslegung solcher Systeme besteht darin, die abgestrahlte Schallenergie gezielt auf die zu beschallenden Bereiche zu konzentrieren und eine möglichst gleichmäßige Schallversorgung zu erreichen.

Insbesondere in akustisch anspruchsvollen Räumen, beispielsweise in Kirchen, Hörsälen oder anderen Veranstaltungsräumen mit großen reflektierenden Flächen, kann eine gezielte Kontrolle der Richtcharakteristik von Vorteil sein. Eine Möglichkeit zur elektronischen Beeinflussung der Abstrahlrichtung stellt das sogenannte Beam Steering dar. Hierbei wird die Richtcharakteristik eines aus mehreren Einzellautsprechern bestehenden Arrays durch eine gezielte Signalverarbeitung der einzelnen Lautsprecher beeinflusst. Dadurch kann insbesondere die vertikale Schallabstrahlung verändert werden, ohne dass das gesamte Lautsprechersystem mechanisch neu ausgerichtet werden muss.

Kommerzielle Lautsprechersysteme mit einer solchen elektronisch steuerbaren vertikalen Richtcharakteristik sind bereits verfügbar und werden insbesondere im Bereich fest installierter Beschallungsanlagen eingesetzt. Im Vergleich zu konventionellen Lautsprechersystemen sind diese Systeme jedoch mit einem erheblichen technischen Aufwand verbunden und entsprechend kostenintensiv.

Während zu den physikalischen Grundlagen von Lautsprecherarrays, Interferenz, Richtwirkung und digitaler Signalverarbeitung umfangreiche Fachliteratur vorhanden ist, sind praxisorientierte und zusammenhängende Informationen zum eigenständigen Aufbau eines vollständigen Beam-Steering-Lautsprechers nur begrenzt verfügbar. Insbesondere fehlt eine Dokumentation, welche die akustische Dimensionierung, die Auswahl geeigneter Lautsprecher, die mechanische Konstruktion, die Mehrkanal-Signalverarbeitung sowie die Steuerung des Systems gemeinsam betrachtet und daraus einen reproduzierbaren Entwicklungsprozess ableitet.

Aus dieser Ausgangssituation ergibt sich die Motivation für die vorliegende Arbeit. Untersucht werden soll, mit welchem technischen und finanziellen Aufwand ein Lautsprechersystem mit einstellbarer vertikaler Richtcharakteristik unter Verwendung handelsüblicher und vergleichsweise kostengünstiger Komponenten realisiert werden kann. Zur Vereinfachung des mechanischen Aufbaus und zur Reduzierung des erforderlichen Bearbeitungsaufwands sollen dabei gezielt additive Fertigungsverfahren, insbesondere der 3D-Druck, eingesetzt werden. Auf diese Weise soll die Anzahl mechanisch zu bearbeitender Gehäuseteile möglichst gering gehalten und der Aufbau des Prototyps vereinfacht werden.

Aufgrund unvorhersehbarer Umstände wurde für die prototypische Umsetzung eine Aluminium-Vierkantrohrkonstruktion verwendet.

Ungeachtet dieser konstruktiven Anpassung wird in der vorliegenden Arbeit sowohl die ursprünglich vorgesehene, überwiegend additiv gefertigte Gehäusevariante als auch die tatsächlich realisierte Aluminiumkonstruktion betrachtet.

Dabei soll nicht ausschließlich die Entwicklung eines einzelnen funktionsfähigen Prototyps im Vordergrund stehen. Vielmehr soll der gesamte Entwicklungsprozess nachvollziehbar dokumentiert werden. Hierzu gehören unter anderem die Festlegung geeigneter akustischer und technischer Anforderungen, die Dimensionierung des Lautsprecherarrays, die Auswahl der

verwendeten Komponenten, die Entwicklung der Signalverarbeitung und Steuerung sowie die abschließende messtechnische Bewertung des Gesamtsystems.

Ziel dieser Bachelorarbeit ist die Entwicklung eines Leitfadens für den eigenständigen Aufbau eines Line-Array-Lautsprechers mit elektronisch einstellbarer vertikaler Richtcharakteristik. Als Grundlage hierfür wird ein vollständiger funktionsfähiger Prototyp entwickelt, aufgebaut und messtechnisch untersucht.

Der entwickelte Lautsprecher soll aus mehreren einzeln ansteuerbaren Lautsprechertreibern bestehen. Durch eine digitale Signalverarbeitung sollen für die einzelnen Kanäle definierte Laufzeit- und Pegelanpassungen vorgenommen werden können, sodass die vertikale Hauptabstrahlrichtung des Arrays innerhalb eines vorgegebenen Winkelbereichs elektronisch verändert werden kann. Die Bedienung und Konfiguration des Systems soll über eine benutzerfreundliche Steueroberfläche erfolgen.

Die Funktionsfähigkeit des entwickelten Systems wird anschließend durch elektrische und akustische Messungen überprüft.

# 2 Planung des Baus eines Line-Arrays

In diesem Kapitel werden die wesentlichen Planungsgrundlagen für die Entwicklung und den Aufbau des Prototyps beschrieben. Dazu gehören zunächst das zugrunde liegende Systemkonzept sowie die theoretischen Zusammenhänge, auf denen die entwickelten Berechnungs- und Simulationswerkzeuge basieren.

Darauf aufbauend werden die Auswahl der elektronischen Systemarchitektur, des Gehäusematerials und der für den Prototyp verwendeten Komponenten erläutert. Abschließend werden die grundlegenden konstruktiven und technischen Planungen des Gehäuses, der elektrischen Verschaltung sowie der Softwarearchitektur vorgestellt.

Die in diesem Kapitel beschriebenen Planungs- und Entwicklungsdaten werden durch digitale Projektdaten ergänzt, die auf einem separaten USB-Datenträger bereitgestellt werden.

## 2.1 Ausgangskonzept und Anforderungen

Die Ausgangsidee für die Entwicklung eines eigenen Beam-Steering-Lautsprechers entstand durch die praktische Arbeit mit dem elektronisch steuerbaren Lautsprechersystem FS-70 des Herstellers Fohhn. Im Rahmen einer anschließenden Betrachtung kommerziell verfügbarer Lösungen wurde dieses System aufgrund seines Funktionsumfangs und seines konstruktiven Aufbaus als wesentliche konzeptionelle Referenz für die weitere Entwicklung herangezogen. Abbildung 1 zeigt das als Referenz verwendete System.



Abbildung 1: Lautsprecher Fohhn FS-70

Quelle: Fohhn Audio AG (2023b).

Durch die praktische Nutzung konnten sowohl grundlegende Anforderungen an das zu entwickelnde Lautsprechersystem als auch einzelne konstruktive und funktionale Aspekte identifiziert werden, die gegenüber der Referenzlösung verändert werden sollten. Aus diesen Betrachtungen wurde zunächst folgender Funktionsumfang abgeleitet:

- Schlanke, vertikal ausgerichtete Gehäuseform mit vollständiger Integration von DSP, Leistungsverstärker und Netzteil in das Gehäuse
- Einstellung der Eingangs- beziehungsweise Ausgangsverstärkung sowie eine Mute-Funktion, integrierter Equalizer und Limiter
- Speicherung und Abruf unterschiedlicher Systemkonfigurationen als Presets
- Grafische Simulation der Schallpegelverteilung innerhalb eines Raumes in der X-Z-Ebene
- Auswahl der Frequenz, für welche die simulierte Schallpegelverteilung dargestellt wird
- Festlegung der Lautsprecherposition innerhalb der Simulation anhand der X- und Z-Koordinate sowie des Neigungswinkels
- Unterstützung einer invertierten Montage durch eine entsprechende *Upside-down*-Funktion
- Einstellung der vertikalen Abstrahlung hinsichtlich Strahlrichtung, Fokussierungsdistanz und Nebenkeulenunterdrückung
- Möglichkeit zur Aufteilung der Abstrahlung in zwei unabhängig einstellbare Schallstrahlen
- Definition von Zuhörerbereichen innerhalb der Raumdarstellung

Gegenüber dem verwendeten Referenzsystem wurden zudem einzelne funktionale Anpassungen vorgesehen. Für die elektrischen Schnittstellen sollen anstelle der dort eingesetzten Phoenix-Steckverbinder die im professionellen Audiobereich verbreiteten Anschlüsse PowerCON, XLR und EtherCON verwendet werden.

Darüber hinaus soll die Konfiguration und Steuerung der digitalen Signalverarbeitung nicht über eine herstellerspezifische Software, sondern über eine browserbasierte Weboberfläche erfolgen. Dadurch kann das System unabhängig vom verwendeten Bediengerät konfiguriert werden, ohne dass zusätzliche Software installiert werden muss.

Das betrachtete Referenzsystem ermöglicht zusätzlich zum analogen Audioeingang eine digitale Signalübertragung über Dante. Auf eine direkte Integration dieser Schnittstelle wurde für den zu entwickelnden Prototyp bewusst verzichtet, da hierfür zusätzliche Hardware erforderlich wäre und die Gesamtkosten des Systems entsprechend steigen würden.

Als primäre Audioschnittstelle wird daher ein analoger Eingang vorgesehen. Eine Einbindung in ein Dante-Netzwerk bleibt bei Bedarf über einen externen Dante-zu-Analog-Wandler möglich.

## 2.2 Theoretische Grundlagen und Berechnungsmodelle

### 2.2.1 Frequenzgrenzen der Richtwirkungssteuerung

Der nutzbare Frequenzbereich eines linearen Lautsprecherarrays wird hauptsächlich durch zwei geometrische Größen bestimmt: die Gesamtlänge $L$ des Arrays und den Abstand $d$ zwischen benachbarten Lautsprechern.

Grundlage ist der Zusammenhang zwischen Frequenz $f$, Schallgeschwindigkeit $c$ und Wellenlänge $\lambda$:

$$\lambda = \frac{c}{f}. \tag{1}$$

Bei tiefen Frequenzen ist die Wellenlänge groß gegenüber der Arraylänge. Die Laufzeitunterschiede zwischen den einzelnen Schallquellen werden dadurch klein und die erzeugte Richtwirkung nimmt ab.

Eine deutliche Bündelung entsteht, wenn die Arraylänge in die Größenordnung einer Wellenlänge kommt (McCarthy 2016, S. 378). Als praktische Abschätzung gilt daher:

$$f_{\min} \approx \frac{c}{L}. \tag{2}$$

Für $N$ gleichmäßig angeordnete Lautsprecher mit dem Mittenabstand $d$ kann die wirksame Arraylänge angenähert durch

$$L = (N-1)d \tag{3}$$

beschrieben werden.

Damit ergibt sich:

$$f_{\min} \approx \frac{c}{(N-1)d}. \tag{4}$$

Eine größere Anzahl von Lautsprechern kann somit bei gleichbleibendem Abstand die Arraylänge vergrößern und die Richtwirkung zu tieferen Frequenzen erweitern.

Bei hohen Frequenzen wird dagegen der Abstand $d$ zwischen den einzelnen Lautsprechern entscheidend. Wird dieser im Verhältnis zur Wellenlänge zu groß, können neben dem Hauptstrahl zusätzliche Richtungsmaxima (*Grating Lobes*) entstehen (Ballou 2008, S. 658–659).

Als konservative Bedingung gilt:

$$d \leq \frac{\lambda}{2}. \tag{5}$$

Daraus folgt:

$$f_{\max} \approx \frac{c}{2d}. \tag{6}$$

Ein kleinerer Lautsprecherabstand erhöht somit die obere nutzbare Frequenz. Da der minimale Abstand durch die Abmessungen der Lautsprecher begrenzt wird, ermöglichen kleinere Lautsprecher grundsätzlich eine dichtere Anordnung.

Für eine möglichst große steuerbare Bandbreite sollte das Array daher gleichzeitig möglichst lang sein und einen möglichst kleinen Elementabstand besitzen. Dies lässt sich insbesondere durch eine größere Anzahl kleiner Lautsprecherelemente erreichen.

Die beschriebenen Grenzen zeigen zugleich eine grundsätzliche Einschränkung des Verfahrens: Die Richtcharakteristik eines endlichen Arrays ist frequenzabhängig (Ballou 2008, S. 656–659). Unterhalb von $f_{\min}$ nimmt die Bündelung ab, während oberhalb von $f_{\max}$ zusätzliche Nebenkeulen und Interferenzen auftreten können.

Dies ist insbesondere bei breitbandiger Musikwiedergabe problematisch, da verschiedene Frequenzbereiche räumlich unterschiedlich abgestrahlt werden und dadurch positionsabhängige Klangverfärbungen entstehen können.

Für Sprachbeschallung ist diese Einschränkung weniger kritisch, da der für die Sprachverständlichkeit relevante Frequenzbereich wesentlich kleiner ist. Die gezielte Bündelung kann zudem den Direktschallanteil im Zuhörerbereich erhöhen und die Anregung reflektierender Raumflächen reduzieren. Damit eignet sich das Prinzip besonders für Sprachbeschallung in akustisch schwierigen Räumen.

### 2.2.2 Mathematisches Modell der Strahlsteuerung

Die elektronische Strahlsteuerung eines linearen Arrays erfolgt durch eine progressive Verzögerung der einzelnen Lautsprechersignale. Dadurch kann die Hauptabstrahlrichtung verändert werden, ohne das Array mechanisch zu neigen (Ballou 2008, S. 663). Abbildung 2 zeigt das zugrunde liegende Prinzip einer solchen Verzögerungsstaffelung.

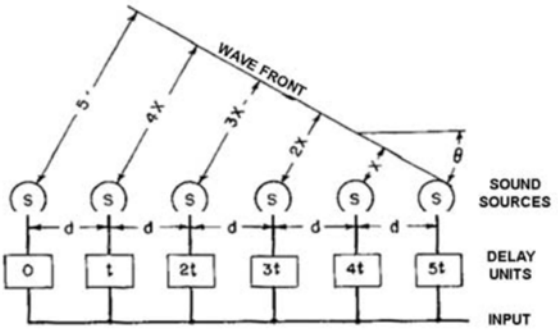



Abbildung 2: Delay-System zur Richtungssteuerung linearer Schallquellen

Quelle: Olson (1991).

Für ein Array mit $N$ gleichmäßig angeordneten Lautsprechern wird die Position des $n$-ten Elements relativ zur Arraymitte durch

$$y_n = \left(n - \frac{N-1}{2}\right) d \tag{7}$$

beschrieben. Dabei bezeichnet $d$ den Mittenabstand der Lautsprecher.

Für einen gewünschten Steuerwinkel $\theta_0$ ergibt sich die erforderliche Wegdifferenz zu

$$\Delta s_n = y_n \sin(\theta_0). \tag{8}$$

Mit der Schallgeschwindigkeit $c$ folgt daraus die notwendige Verzögerung

$$\tau_n = \frac{y_n \sin(\theta_0)}{c}. \tag{9}$$

Das Vorzeichen hängt von der verwendeten Definition der Arrayachse und des Steuerwinkels ab. Für die Strahlformung sind ausschließlich die relativen Laufzeitunterschiede zwischen den Elementen entscheidend.

Um ausschließlich positive Verzögerungswerte zu erhalten, können alle Kanäle um den kleinsten berechneten Wert verschoben werden:

$$\tau'_n = \tau_n - \min(\tau_n). \tag{10}$$

Die relativen Laufzeitunterschiede und damit die Richtcharakteristik bleiben dabei unverändert.

Bei einer Abtastrate $f_\mathrm{s}$ ergibt sich die Verzögerung in Samples zu

$$D_n = \tau'_n f_\mathrm{s}. \tag{11}$$

Da $D_n$ im Allgemeinen nicht ganzzahlig ist, müssen auch Teilabtastungsverzögerungen (*Fractional Delays*) berücksichtigt werden. Abbildung 3 stellt die Impulsantwort eines idealen Verzögerungsfilters für einen ganzzahligen und einen gebrochenen Verzögerungswert gegenüber.

Eine zeitliche Verzögerung entspricht im Frequenzbereich einer frequenzabhängigen Phasenverschiebung:

$$\varphi_n(f) = -2\pi f \tau'_n. \tag{12}$$

Die gleiche Laufzeit erzeugt somit bei unterschiedlichen Frequenzen unterschiedliche Phasenverschiebungen.

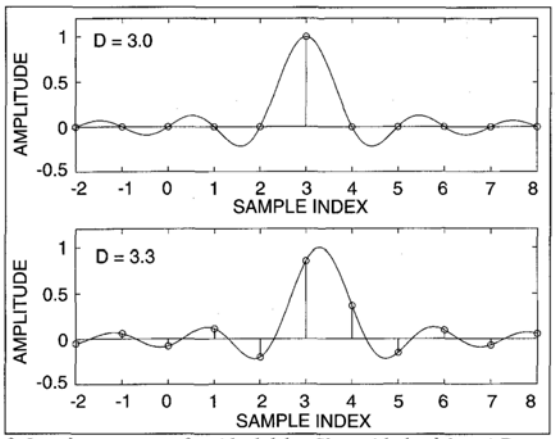



Abbildung 3: Impulsantwort eines idealen Verzögerungsfilters für $D = 3$ und $D = 3{,}3$

Quelle: Laakso u. a. (1996).

Neben der reinen Winkelsteuerung kann die Abstrahlung auch auf einen Punkt in endlicher Entfernung fokussiert werden.

Für einen Fokuspunkt $(x_\mathrm{F}, y_\mathrm{F})$ ergibt sich zunächst der Abstand des $n$-ten Lautsprechers zu

$$r_{n,\mathrm{F}} = \sqrt{(x_\mathrm{F} - x_n)^2 + (y_\mathrm{F} - y_n)^2}. \tag{13}$$

Damit die Schallanteile aller Elemente gleichzeitig am Fokuspunkt eintreffen, werden die relativen Verzögerungen aus den unterschiedlichen Ausbreitungswegen bestimmt:

$$\tau_{n,\mathrm{F}} = \frac{r_{\max,\mathrm{F}} - r_{n,\mathrm{F}}}{c}. \tag{14}$$

Dabei bezeichnet $r_{\max,\mathrm{F}}$ den größten Abstand eines Arrayelements zum Fokuspunkt. Im Gegensatz zur Fernfeldsteuerung nach einem Winkel wird damit eine gekrümmte Wellenfront erzeugt, deren Beiträge sich im gewünschten Fokuspunkt konstruktiv überlagern.

Zusätzlich kann die Abstrahlcharakteristik durch eine Amplitudengewichtung der einzelnen Elemente (*Gain Shading*) beeinflusst werden. Dazu wird jedem Lautsprecher ein Gewichtungsfaktor $w_n$ zugewiesen:

$$x'_n(t) = w_n x_n(t). \tag{15}$$

Eine stärkere Absenkung der äußeren Elemente reduziert deren Beitrag zur Gesamtstrahlung. Dadurch können Nebenkeulen verringert und die Form des Hauptstrahls verändert werden, gleichzeitig nimmt jedoch die effektiv wirksame Arraylänge ab (Lawrence 2022).

In der implementierten Steuerung wird der Übergang zwischen gleichmäßiger Gewichtung und einer Hann-förmigen Gewichtung kontinuierlich eingestellt. Für einen Shading-Faktor $a$ mit $0 \leq a \leq 1$ ergibt sich

$$w_n = (1 - a) + a\, w_{\mathrm{Hann},n}. \tag{16}$$

Bei $a = 0$ werden alle Arrayelemente gleich gewichtet, während bei $a = 1$ die vollständige Hann-Gewichtung verwendet wird.

### 2.2.3 Mathematisches Simulationsmodell

Für die Simulation wird das Array vereinfacht als Anordnung idealisierter Punktquellen betrachtet (Ballou 2008, S. 1357–1358). Der Einfluss realer Lautsprechereigenschaften, insbesondere deren frequenzabhängige Richtcharakteristik, wird dabei zunächst vernachlässigt.

Der Abstand zwischen dem $n$-ten Lautsprecher an der Position $(x_n, y_n)$ und einem Beobachtungspunkt $(x, y)$ beträgt

$$r_n = \sqrt{(x - x_n)^2 + (y - y_n)^2}. \tag{17}$$

Für eine einzelne Frequenz kann der komplexe Schalldruckbeitrag des $n$-ten Elements angenähert durch

$$p_n(x, y, f) = \frac{w_n}{r_n} \exp\left[-j\left(k r_n + 2\pi f \tau'_n\right)\right] \tag{18}$$

beschrieben werden.

Dabei ist

$$k = \frac{2\pi f}{c} \tag{19}$$

die Wellenzahl und $w_n$ ein optionaler Gewichtungsfaktor des jeweiligen Elements.

Der Faktor $1/r_n$ beschreibt die geometrische Abnahme des Schalldrucks einer idealisierten Kugelwelle mit zunehmender Entfernung. Der Exponentialterm berücksichtigt die Phase aufgrund der Schallausbreitung und der zusätzlich eingebrachten Steering-Verzögerung.

Der resultierende Schalldruck ergibt sich aus der komplexen Überlagerung aller Arrayelemente:

$$p_{\text{ges}}(x, y, f) = \sum_{n=0}^{N-1} p_n(x, y, f). \tag{20}$$

Dadurch werden konstruktive und destruktive Interferenzen zwischen den einzelnen Quellen automatisch berücksichtigt.

Für die grafische Darstellung kann der berechnete Betrag auf das Maximum des simulierten Feldes normiert werden:

$$L_{\text{rel}}(x, y, f) = 20 \log_{10} \left( \frac{|p_{\text{ges}}(x, y, f)|}{|p_{\text{ges}}|_{\text{max}}} \right). \tag{21}$$

Der höchste berechnete Wert entspricht damit 0 dB. Alle weiteren Punkte werden relativ dazu dargestellt.

Das Modell dient damit zur qualitativen Darstellung der frequenz- und winkelabhängigen Interferenzstruktur des Arrays. Da reale Lautsprecher keine idealen Punktquellen sind, stellt es jedoch eine Vereinfachung des tatsächlichen Schallfeldes dar.

Bei der Erzeugung von zwei unabhängigen Schallstrahlen wird das Array in zwei Gruppen von Lautsprechern unterteilt. Für jede Gruppe werden die erforderlichen Verzögerungen nach demselben Verfahren separat für den jeweiligen Steuerwinkel berechnet. Das grundlegende mathematische Modell bleibt dadurch unverändert.

Auf Grundlage der zuvor beschriebenen mathematischen Zusammenhänge wurde im Rahmen dieser Arbeit eine eigene Simulationsanwendung in Python entwickelt. Sie berechnet die komplexe Überlagerung der einzelnen Arrayelemente und stellt die daraus resultierende relative Schallpegelverteilung in der X-Z-Ebene grafisch dar.

Innerhalb der Simulation können verschiedene geometrische und akustische Parameter des Arrays sowie die Parameter der Strahlsteuerung verändert werden. Dadurch lassen sich unterschiedliche Arraykonfigurationen bereits vor dem mechanischen Aufbau qualitativ untersuchen.

Die Anwendung wurde nicht als vollständiges Werkzeug zur raumakustischen Simulation entwickelt, sondern dient der näherungsweisen Untersuchung der Richtcharakteristik und damit als Hilfsmittel zur Dimensionierung eines Lautsprecherarrays.

Für die Dimensionierung des in dieser Arbeit beschriebenen Prototyps wurde sie insbesondere zur Auswahl des Lautsprecherdurchmessers, des Elementabstands und der Anzahl der Arrayelemente eingesetzt. Darüber hinaus kann die Anwendung auch zur vergleichenden Untersuchung alternativer Arraykonfigurationen verwendet werden. Abbildung 4 zeigt die Benutzeroberfläche der entwickelten Simulationsanwendung.

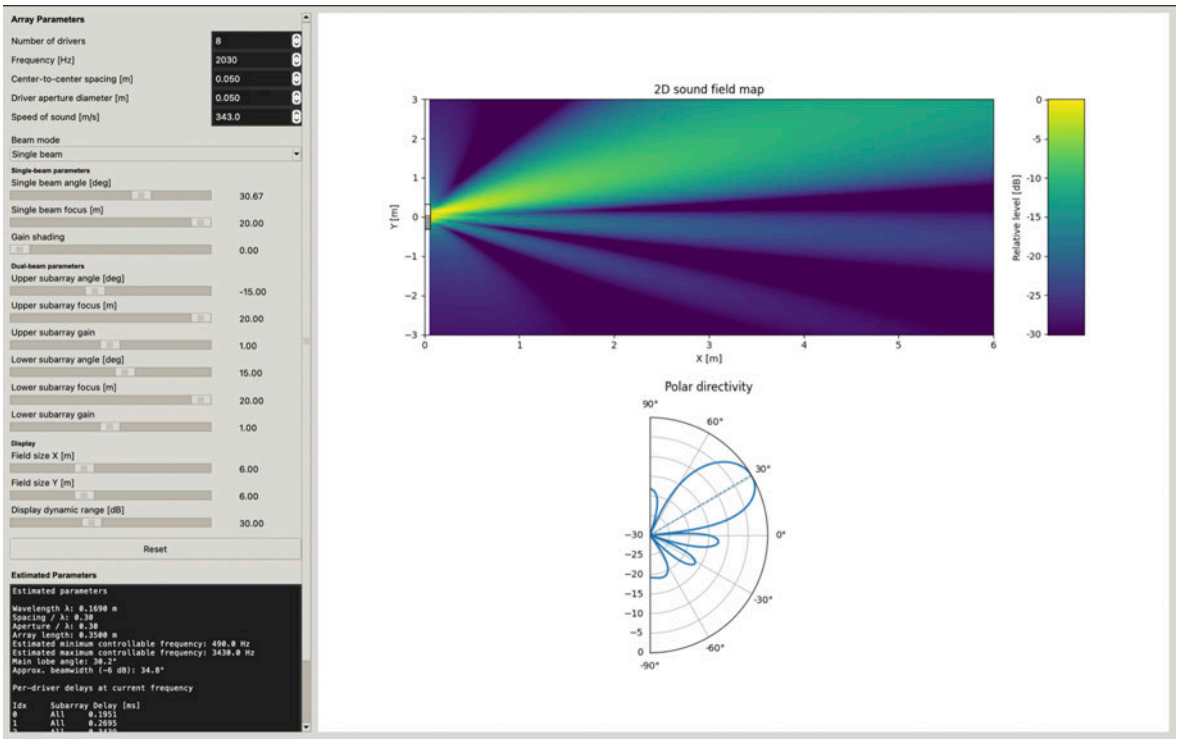



Abbildung 4: Benutzeroberfläche der Simulationssoftware

Quelle: Eigene Darstellung.

### 2.2.4 Akustische Auslegung des Lautsprechergehäuses

Bei der Auslegung des Lautsprechergehäuses sind vor allem zwei akustische Aspekte zu berücksichtigen. Das eingeschlossene Luftvolumen beeinflusst das Tieftonverhalten der Lautsprechertreiber, während innerhalb des Gehäuses stehende Wellen und unerwünschte Schwingungen der Gehäusewände auftreten können.

Für die Konstruktion müssen daher sowohl das erforderliche Innenvolumen als auch geeignete Maßnahmen zur Bedämpfung des Gehäuses berücksichtigt werden.

**Wahl des Gehäuseprinzips** Für den Prototyp wurde ein geschlossenes Lautsprechergehäuse gewählt. Bei dieser Bauform wirkt das eingeschlossene Luftvolumen als zusätzliche Feder auf die Lautsprechermembran. Das resultierende Tieftonverhalten kann im Kleinsignalbereich als System zweiter Ordnung beschrieben werden (Small 1972).

Bei einem Bassreflexgehäuse wird das System dagegen durch einen Helmholtzresonator erweitert. Die resultierende Abstimmung hängt dadurch stärker vom Zusammenspiel zwischen Lautsprechertreiber, Gehäusevolumen und Bassreflexkanal ab (Görne 2015, S. 290–291) (Thiele 1971; Small 1973).

Da im vorgesehenen Aufbau mehrere Treiber eingesetzt werden und das Konzept auch auf alternative Treibermodelle übertragbar bleiben soll, wurde zugunsten einer einfachen und reproduzierbaren Dimensionierung ein geschlossenes Gehäuse gewählt. Eine maximale Erweiterung des Tieftonbereichs war für den Prototyp gegenüber diesen Eigenschaften von untergeordneter Bedeutung.

**Dimensionierung des geschlossenen Volumens** Ausgangspunkt der Berechnung ist das wirksame Gehäusevolumen $V_\mathrm{b}$. Dieses entspricht dem tatsächlich verfügbaren Luftvolumen

innerhalb des Gehäuses:

$$V_\mathrm{b} = V_\mathrm{innen} - V_\mathrm{verdrängt}. \tag{22}$$

Vom geometrischen Innenvolumen werden dabei insbesondere die Volumina der Lautsprechertreiber, Verstrebungen und weiterer Einbauten abgezogen.

Für mehrere Treiber in einem gemeinsamen geschlossenen Volumen addieren sich deren Äquivalenzvolumina:

$$V_\mathrm{as,tot} = \sum_{n=1}^{N} V_{\mathrm{as},n}. \tag{23}$$

Bei identischen Treibern gilt entsprechend

$$V_\mathrm{as,tot} = N V_\mathrm{as}. \tag{24}$$

Das Verhältnis zwischen dem Gesamtäquivalenzvolumen der Treiber und dem wirksamen Gehäusevolumen wird durch

$$\alpha = \frac{V_\mathrm{as,tot}}{V_\mathrm{b}} \tag{25}$$

beschrieben.

Damit ergeben sich die Resonanzfrequenz und die Gesamtgüte des eingebauten Systems zu

$$f_\mathrm{c} = f_\mathrm{s}\sqrt{1+\alpha} \tag{26}$$

und

$$Q_\mathrm{tc} = Q_\mathrm{ts}\sqrt{1+\alpha}. \tag{27}$$

Ein kleineres Gehäusevolumen führt somit sowohl zu einer höheren Systemresonanz als auch zu einer höheren Systemgüte. Für

$$Q_\mathrm{tc} \approx 0{,}707 \tag{28}$$

ergibt sich eine Butterworth-Abstimmung mit maximal flachem Amplitudenverlauf (Small 1972).

Soll eine bestimmte Systemgüte erreicht werden, kann das dafür erforderliche Gehäusevolumen umgekehrt aus

$$V_\mathrm{b} = \frac{V_\mathrm{as,tot}}{\left(\frac{Q_\mathrm{tc}}{Q_\mathrm{ts}}\right)^2 - 1} \tag{29}$$

bestimmt werden. Damit lässt sich bereits vor der konstruktiven Ausarbeitung prüfen, ob das vorgesehene Innenvolumen mit den Eigenschaften der ausgewählten Treiber vereinbar ist.

**Interne Gehäusemoden** Neben der Tieftonabstimmung muss das Schallfeld innerhalb des Gehäuses berücksichtigt werden. Durch Reflexionen zwischen gegenüberliegenden Innenflächen können stehende Wellen entstehen (Görne 2015, S. 77–79).

Für die ersten axialen Moden entlang der drei Innenabmessungen $L_x$, $L_y$ und $L_z$ gilt

$$f_x = \frac{c}{2L_x}, \qquad f_y = \frac{c}{2L_y}, \qquad f_z = \frac{c}{2L_z}. \tag{30}$$

Mit zunehmender Innenabmessung sinkt die entsprechende Eigenfrequenz. Welche dieser Moden für das reale Gehäuse besonders relevant ist, hängt jedoch nicht ausschließlich von ihrer Frequenz ab. Entscheidend ist auch, wie stark die jeweilige Mode durch die Position und Anordnung der Lautsprechertreiber angeregt wird.

Aus diesem Grund sollten bei der Gehäuseplanung insbesondere die ersten axialen Moden betrachtet werden. Liegt eine ausgeprägte Mode innerhalb des relevanten Übertragungsbereichs, kann sie zu frequenzabhängigen Schwankungen des Schalldrucks im Innenraum und damit zu unerwünschten Einflüssen auf das Übertragungsverhalten führen.

Zur Verringerung dieser Effekte kann das Gehäuse mit porösem Absorptionsmaterial ausgekleidet beziehungsweise gefüllt werden. Durch die erhöhte akustische Dämpfung wird die Ausprägung stehender Wellen reduziert (Görne 2015, S. 90–91).

**Mechanische Ausführung und Bedämpfung** Auch die Gehäusewände selbst können durch den im Innenraum entstehenden Schalldruck zu Schwingungen angeregt werden. Dadurch können sie unerwünscht Schall abstrahlen und das Übertragungsverhalten des Lautsprechers beeinflussen.

Für die Konstruktion ist deshalb eine möglichst steife Gehäusestruktur anzustreben. Eine höhere Wandstärke, steife Werkstoffe und gegebenenfalls zusätzliche Verstrebungen reduzieren die Verformung größerer Wandflächen.

Neben der Steifigkeit ist die Dämpfung der Konstruktion von Bedeutung. Insbesondere bei metallischen Gehäusen können viskoelastische Dämpfungsschichten eingesetzt werden, um angeregte Wandschwingungen zu reduzieren und deren Ausschwingen zu verkürzen.

Poröses Absorptionsmaterial und mechanische Dämpfung erfüllen dabei unterschiedliche Aufgaben:

- Poröses Absorptionsmaterial bedämpft vor allem das Schallfeld innerhalb des Gehäuses und reduziert die Ausprägung stehender Wellen.
- Eine steife Konstruktion und gegebenenfalls Verstrebungen reduzieren die mechanische Bewegung der Gehäusewände.
- Viskoelastische Dämpfungsschichten reduzieren bereits angeregte Wandschwingungen und deren Ausschwingverhalten.

Die Maßnahmen ergänzen sich und sollten entsprechend der verwendeten Gehäusekonstruktion kombiniert werden. Ziel ist ein Gehäuse, dessen akustischer Einfluss gegenüber der vorgesehenen Abstrahlung der Lautsprechertreiber möglichst gering bleibt.

Da es sich um ein geschlossenes Gehäuse handelt, ist außerdem eine ausreichende Luftdichtheit aller Verbindungen erforderlich. Undichtigkeiten verändern die akustischen Randbedingungen des eingeschlossenen Volumens und sollten daher insbesondere an Segmentverbindungen, Anschlussplatten und Lautsprecheröffnungen vermieden werden.

**Berechnungswerkzeug** Zur Dimensionierung des geschlossenen Gehäuses wurde eine Excel-basierte Berechnungstabelle erstellt. Aus den eingegebenen Thiele/Small-Parametern, der Anzahl der Lautsprechertreiber und den vorgesehenen Gehäuseabmessungen werden die wesentlichen akustischen Kenngrößen des geschlossenen Systems automatisch berechnet.

Die Tabelle ermöglicht den direkten Vergleich unterschiedlicher Treiber- und Gehäusekonfigurationen und wurde zur Dimensionierung des in dieser Arbeit beschriebenen Prototyps eingesetzt.

Da sämtliche Eingangsparameter frei angepasst werden können, kann das Berechnungswerkzeug ebenfalls für die überschlägige Dimensionierung alternativer Line-Array-Konfigurationen verwendet werden. Abbildung 5 zeigt den Aufbau der Berechnungstabelle im unausgefüllten Zustand.

**3. Enclosure input data**

| Parameter | Unit | Box 1 | Box 2 |
|---|---|---|---|
| Name | - | | |
| Raw internal width before inner lining | mm | | |
| Raw internal depth before inner lining | mm | | |
| Raw internal length | mm | | |
| Inner lining thickness per wall | mm | | |
| Solid displacement to subtract | L | | |
| Effective volume increase from wool/fill | % | | |

**2. Driver input data**

| Parameter | Unit | Driver 1 | Driver 2 |
|---|---|---|---|
| Name | - | | |
| Free-air resonance Fs | Hz | | |
| Total Q Qts | - | | |
| Equivalent compliance volume Vas | L | | |
| Effective piston area Sd | cm² | | |
| Linear excursion Xmax | mm | | |

**4. Calculated system results — four enclosure/driver combinations**

| Parameter | Unit | Box 1 + Driver 1 | Box 1 + Driver 2 | Box 2 + Driver 1 | Box 2 + Driver 2 |
|---|---|---|---|---|---|
| Effective acoustic volume Vb | L | | | | |
| Total Vas of all drivers | L | | | | |
| Alpha = Vas,total / Vb | - | | | | |
| Closed-box resonance fc | Hz | | | | |
| Closed-box Qtc | - | | | | |
| Estimated f-3dB of sealed high-pass | Hz | | | | |
| Required Vb for target Qtc | L | | | | |
| Total piston area Sd,total | cm² | | | | |
| Total displacement volume Vd,total | cm³ | | | | |
| Air-spring stiffness kB,total | N/m | | | | |
| First longitudinal internal air mode | Hz | | | | |
| First width internal air mode | Hz | | | | |
| First depth internal air mode | Hz | | | | |
| Coherent array gain, ideal | dB | | | | |
| Qtc assessment | - | | | | |
| fc assessment | - | | | | |

Abbildung 5: Berechnungswerkzeug zur Dimensionierung des geschlossenen Lautsprechergehäuses

Quelle: Eigene Darstellung.

## 2.3 Systemauslegung und Komponentenauswahl

### 2.3.1 Materialkonzept des Lautsprechergehäuses

Für die Konstruktion des Lautsprechergehäuses wurden zunächst unterschiedliche Fertigungs- und Materialkonzepte betrachtet. Neben den akustischen und mechanischen Eigenschaften war dabei insbesondere eine möglichst einfache Reproduzierbarkeit des Aufbaus von Bedeutung.

Eine klassische Konstruktion aus Holz beziehungsweise Multiplexplatten wurde nicht weiterverfolgt. Zwar stellt Holz einen etablierten Werkstoff für Lautsprechergehäuse dar, die Herstellung der für den vorgesehenen Aufbau erforderlichen Bauteile setzt jedoch eine präzise Bearbeitung und den Zuschnitt mehrerer teilweise komplex geformter Platten voraus. Für einen Aufbau mit einfachen Werkzeugen und ohne entsprechend ausgestattete Werkstatt wäre dies nur eingeschränkt reproduzierbar.

Additiv gefertigte Gehäuseteile bieten demgegenüber den Vorteil, dass auch komplexe Geometrien unmittelbar hergestellt werden können und nach dem Druck nur ein geringer mechanischer Bearbeitungsaufwand erforderlich ist. Auch metallische Standardprofile stellen in dieser Hinsicht eine geeignete Alternative dar, da die erforderliche Nachbearbeitung im Wesentlichen auf das Bohren der benötigten Öffnungen reduziert werden kann.

**Auswahl des Filamentmaterials** Da der Einsatz additiver Fertigungsverfahren Bestandteil des ursprünglichen Gehäusekonzepts war, musste zunächst ein geeignetes Filament ausgewählt werden.

Als Grundlage für die Materialauswahl wurde unter anderem eine Untersuchung der AGH University of Science and Technology herangezogen, in der unterschiedliche FDM-Materialien hinsichtlich ihres Einflusses auf das akustische Verhalten eines Lautsprechergehäuses verglichen wurden (Chojnacki, Pawlik und Kamisiński 2021).

Die Ergebnisse zeigen, dass Unterschiede der mechanischen Materialeigenschaften das Resonanzverhalten des Gehäuses und damit den gemessenen Frequenzgang beeinflussen können. Steifere Materialien wie PET-G und PA12CF zeigten in einzelnen untersuchten Frequenzbereichen geringere durch Gehäuseresonanzen verursachte Abweichungen. Flexiblere Materialien wie ABS und TPE führten dagegen teilweise zu einer stärkeren rückwärtigen Schallabstrahlung (Chojnacki, Pawlik und Kamisiński 2021). Die zugehörigen Frequenzgänge und Polardiagramme sind in Anhang A wiedergegeben.

Neben den mechanischen und akustischen Eigenschaften wurden auch die Verarbeitbarkeit und die Umgebungsbeständigkeit berücksichtigt. ABS wurde aufgrund der beim FDM-Druck auftretenden Emissionen ultrafeiner Partikel und flüchtiger organischer Verbindungen, insbesondere Styrol, nicht weiter berücksichtigt (Azimi u. a. 2016).

PLA besitzt zwar eine vergleichsweise einfache Verarbeitbarkeit, weist jedoch eine geringe Wärmebeständigkeit auf und kann bei langfristiger UV-Belastung degradieren (Marin u. a. 2023).

Für größere Gehäuseteile sind zusätzlich eine hohe Maßhaltigkeit, eine geringe Verformungsneigung und möglichst geringe Anforderungen an die Druckumgebung relevant. Der Filamentvergleich von Bambu Lab zeigt deutliche Unterschiede zwischen technischen Filamenten hinsichtlich Steifigkeit, Wärmebeständigkeit und Druckanforderungen (Bambu Lab 2025).

Insbesondere Polyamid-Verbundwerkstoffe stellen vergleichsweise hohe Anforderungen an die Trocknung des Filaments und die kontrollierte Druckumgebung. Dies erschwert eine zuverlässige Verarbeitung auf einfacheren beziehungsweise offenen 3D-Druckern.

Als Material für die additiv gefertigte Gehäusevariante wurde daher ein kohlenstofffaserverstärktes PET-Filament (PET-CF) ausgewählt. Es bietet eine hohe Steifigkeit und Dimensionsstabilität sowie eine vergleichsweise hohe Wärmebeständigkeit. Gleichzeitig weist PET-CF eine geringe Neigung zu Verzug auf und kann nach Herstellerangaben grundsätzlich auch auf offenen 3D-Druckern verarbeitet werden (Bambu Lab 2023).

Damit stellt PET-CF für den vorgesehenen Aufbau einen geeigneten Kompromiss zwischen mechanischen Eigenschaften, Maßhaltigkeit und praktischer Verarbeitbarkeit dar.

**Verstärkung der additiv gefertigten Gehäusevariante** Um die mechanische Stabilität einer additiv gefertigten Konstruktion weiter zu erhöhen, wurde vorgesehen, Teile des Gehäuses als Hohlstruktur auszuführen und die entstehenden Hohlräume anschließend mit einem mineralischen Füllmaterial auszugießen.

Hierfür wurde eine Mischung aus Alabastergips, Wasser und Polyvinylacetat-Klebstoff (PVA) erprobt. Für die verwendete Mischung wurden auf 1000 g Gips etwa 600 ml Wasser und 150 ml PVA-Klebstoff eingesetzt. Der PVA-Anteil sollte dabei insbesondere die Sprödigkeit der ausgehärteten Gipsfüllung reduzieren und die Haftung an den umgebenden Kunststoffflächen verbessern.

Durch die Füllung werden sowohl die Masse als auch die mechanische Stabilität der Gehäusewände erhöht. Gleichzeitig kann die mehrschichtige Konstruktion aus Kunststoffwand und Füllmaterial unerwünschte Wandschwingungen gegenüber einer ungefüllten Hohlstruktur reduzieren.

Zur praktischen Bewertung dieses Konstruktionsprinzips wurde ein Probekörper in Form eines Gehäusewandsegments mit den Abmessungen

$$500\,\mathrm{mm} \times 165\,\mathrm{mm} \times 21\,\mathrm{mm}$$

hergestellt. Das Bauteil bestand aus vier miteinander verbundenen Teilsegmenten und wurde anschließend mit der beschriebenen Gipsmischung gefüllt. Abbildung 6 zeigt das zugehörige 3D-Modell.

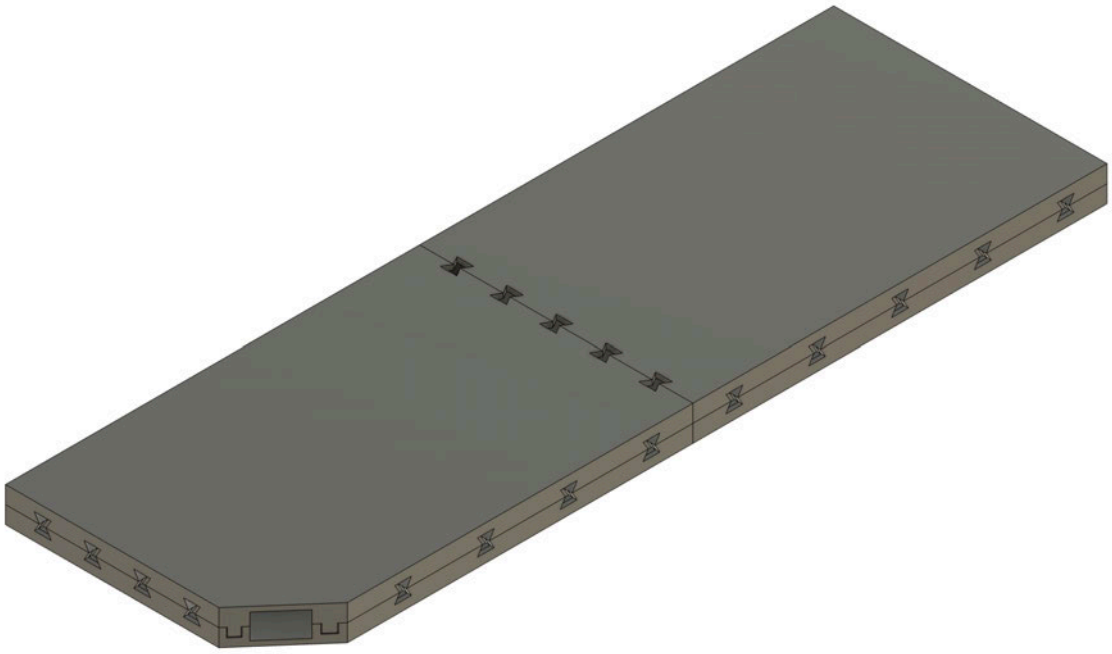


Abbildung 6: 3D-Modell des Probekörpers

Quelle: Eigene Darstellung.

Bei einem einfachen Belastungsversuch hielt das Bauteil einer statischen Last von 50 kg ohne sichtbare Deformationen stand, wobei die Belastung gezielt im Bereich einer Verbindung zwischen den gedruckten Teilsegmenten eingebracht wurde. Der Versuch stellt keine standardisierte Festigkeitsprüfung dar, zeigte jedoch, dass die vorgesehene segmentierte und gefüllte Konstruktion für den prototypischen Aufbau eine ausreichende mechanische Stabilität erreichen kann.

Für die Verbindung der einzelnen gedruckten Gehäuseteile ist zusätzlich eine luftdichte Abdichtung erforderlich. Hierfür muss ein Dichtstoff verwendet werden, der mit dem eingesetzten PET-CF chemisch verträglich ist und dessen Oberfläche nicht angreift.

**Realisierte Aluminiumkonstruktion** Aufgrund unvorhergesehener Randbedingungen konnte der ursprünglich vorgesehene additiv gefertigte Hauptkörper des Prototyps nicht wie geplant hergestellt werden. Für die praktische Umsetzung musste daher kurzfristig auf eine alternative Konstruktion zurückgegriffen werden.

Als Hauptkörper wurde ein handelsübliches Aluminium-Vierkantrohr mit den Außenabmessungen

$$150\,\text{mm} \times 150\,\text{mm}$$

einer Wandstärke von 5 mm und einer Länge von 1000 mm ausgewählt. Die verwendeten Abmessungen entsprechen einem verfügbaren Standardprofil, wodurch keine individuelle Fertigung des Grundkörpers erforderlich war.

Die Verwendung eines Standardprofils ermöglicht zudem eine einfache mechanische Bearbeitung. Die für Lautsprechertreiber, Anschlüsse und Befestigungselemente erforderlichen Öff-

nungen können mit vergleichsweise einfachen Werkzeugen hergestellt werden. Abbildung 7 zeigt das verwendete Halbzeug im unbearbeiteten Zustand.



Abbildung 7: Aluminium-Vierkantrohr

Quelle: Eigene Darstellung.

Aluminium wurde gegenüber einer vergleichbaren Stahlkonstruktion insbesondere aufgrund seiner geringeren Dichte und seiner hohen Korrosionsbeständigkeit gewählt. Dadurch lässt sich bei ausreichender mechanischer Steifigkeit das Gesamtgewicht des Lautsprechergehäuses reduzieren, ohne dass eine zusätzliche Beschichtung zum Schutz vor Korrosion erforderlich ist.

Die ursprünglich entwickelte additiv gefertigte Gehäusevariante bleibt dennoch Bestandteil des Gesamtkonzepts. Die Aluminiumkonstruktion stellt die für den aufgebauten Prototyp realisierte Alternative dar, während die PET-CF-Konstruktion die ursprünglich vorgesehene, mit einfachen Fertigungsverfahren reproduzierbare Variante beschreibt.

### 2.3.2 Auswahl der elektronischen Systemarchitektur

Die Beam-Steering-Technologie setzt voraus, dass die Anzahl der unabhängig ansteuerbaren DSP- und Verstärkerkanäle der Anzahl der verwendeten Lautsprechertreiber entspricht. Zur Erfüllung dieser Anforderung sowie zur Realisierung der vorgesehenen Steuerung über eine Weboberfläche wurden drei unterschiedliche elektronische Systemarchitekturen untersucht.

#### DSP-Modul mit ESP32-Steuerung

Bei der ersten Variante wird ein vierkanaliges DSP-Modul auf Basis des ADAU1701 eingesetzt. Zur Erweiterung der verfügbaren Kanalzahl können bei Bedarf mehrere Module miteinander gekoppelt werden. Da der ADAU1701 bereits über analoge Ein- und Ausgänge verfügt, sind keine zusätzlichen externen ADC- oder DAC-Module erforderlich. Die analogen Ausgangssignale des DSP können somit direkt den einzelnen Leistungsverstärkerkanälen zugeführt werden.

Die Steuerung des DSP sowie die Bereitstellung der Weboberfläche werden bei dieser Architektur durch einen ESP32-Mikrocontroller übernommen. Die Kommunikation mit dem DSP erfolgt dabei über die entsprechenden digitalen Schnittstellen des Mikrocontrollers. Der zugehörige Signalfluss ist in Abbildung 8 dargestellt.

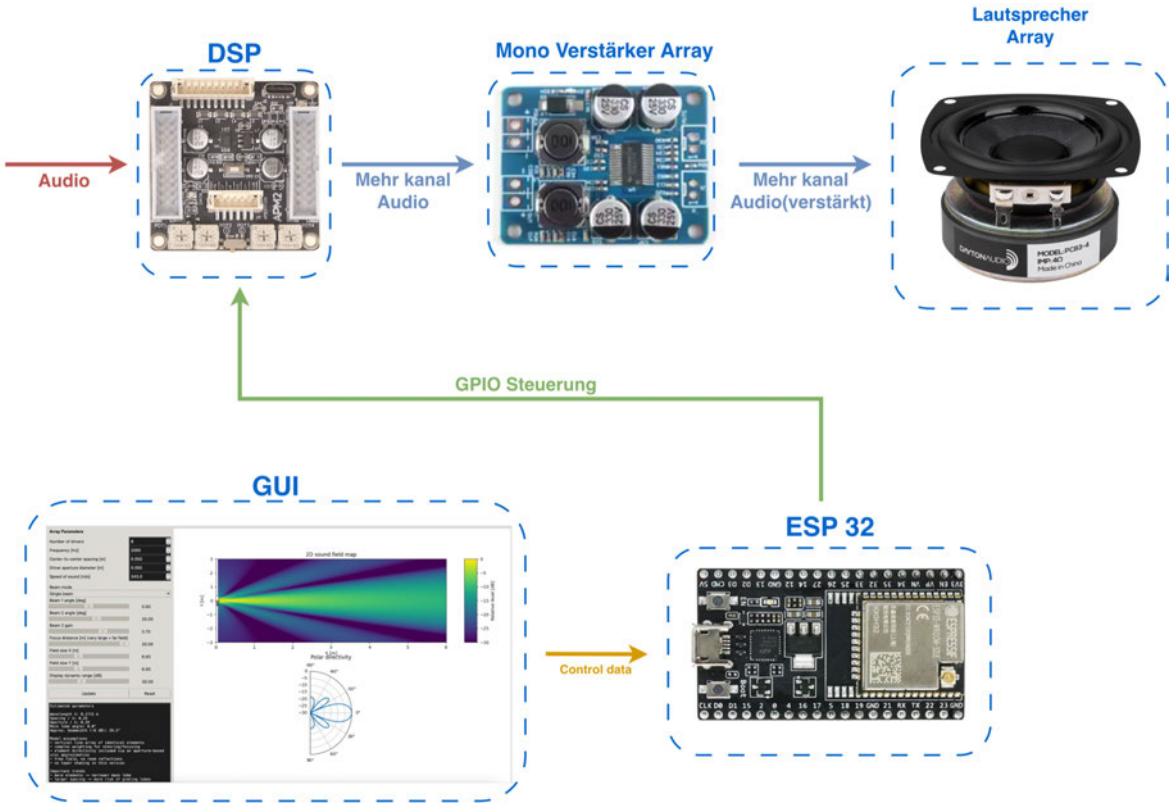



Abbildung 8: Blockschaltbild der Systemarchitektur – Variante 1

Quelle: Eigene Darstellung.

### Raspberry Pi mit separater AD- und DA-Wandlung

Bei der zweiten Variante werden sowohl die digitale Signalverarbeitung als auch die Weboberfläche auf einem Raspberry Pi realisiert. Da die Audioverarbeitung innerhalb des Raspberry Pi vollständig digital erfolgt, werden für den analogen Audioeingang ein externer A/D-Wandler und für die analogen Ausgangssignale ein mehrkanaliger D/A-Wandler benötigt.

Zusätzlich ist für die Synchronisation der verwendeten Audiowandler eine geeignete Takterzeugung erforderlich. Da der Raspberry Pi hierfür nicht ohne Weiteres einen für alle verwendeten Wandler geeigneten Master-Clock-Ausgang bereitstellt, muss abhängig von den eingesetzten Komponenten eine zusätzliche Clock-Schaltung vorgesehen werden. Abbildung 9 zeigt den resultierenden Aufbau.

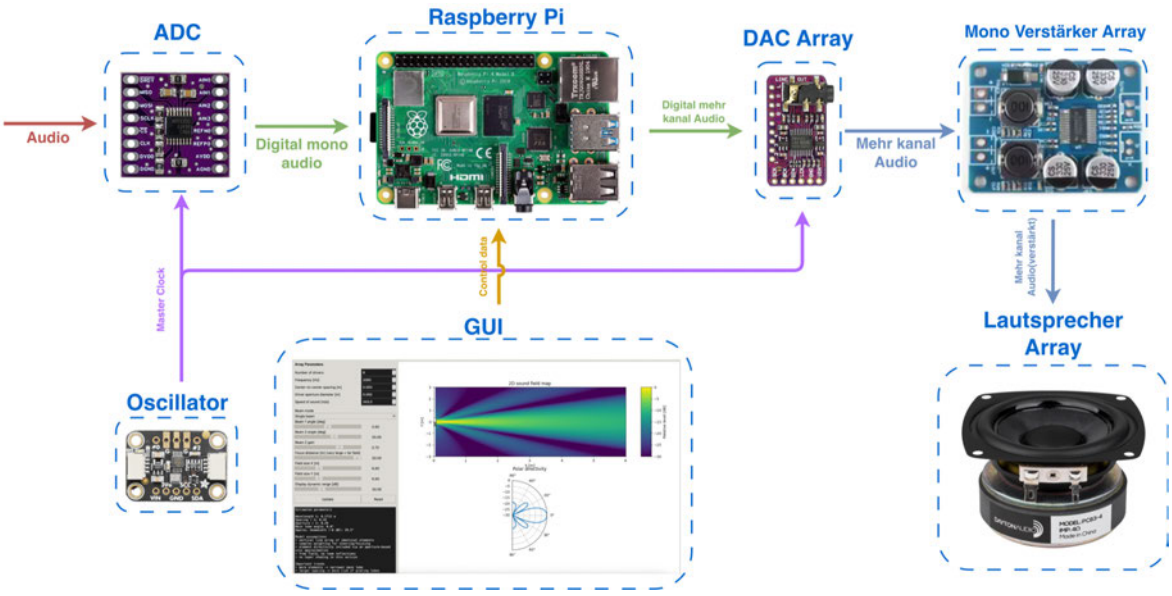



Abbildung 9: Blockschaltbild der Systemarchitektur – Variante 2

Quelle: Eigene Darstellung.

### Raspberry Pi mit fertigen Audio-Modulen

Die dritte Variante basiert ebenfalls auf einem Raspberry Pi, verzichtet jedoch weitgehend auf eine diskret aufgebaute Audio-Schnittstelle. Für die Signalerfassung wird ein fertiges Raspberry-Pi-Audiomodul mit Line-Eingang eingesetzt. Die Wiedergabe erfolgt über einen mehrkanaligen Leistungsverstärker mit digitaler USB-Audioschnittstelle.

Dadurch entfallen sowohl eine separate mehrkanalige D/A-Wandlung als auch mehrere einzelne Leistungsverstärkermodule. Gleichzeitig können die digitale Signalverarbeitung und die Weboberfläche vollständig auf dem Raspberry Pi ausgeführt werden. Der vereinfachte Aufbau dieser Variante ist in Abbildung 10 dargestellt.

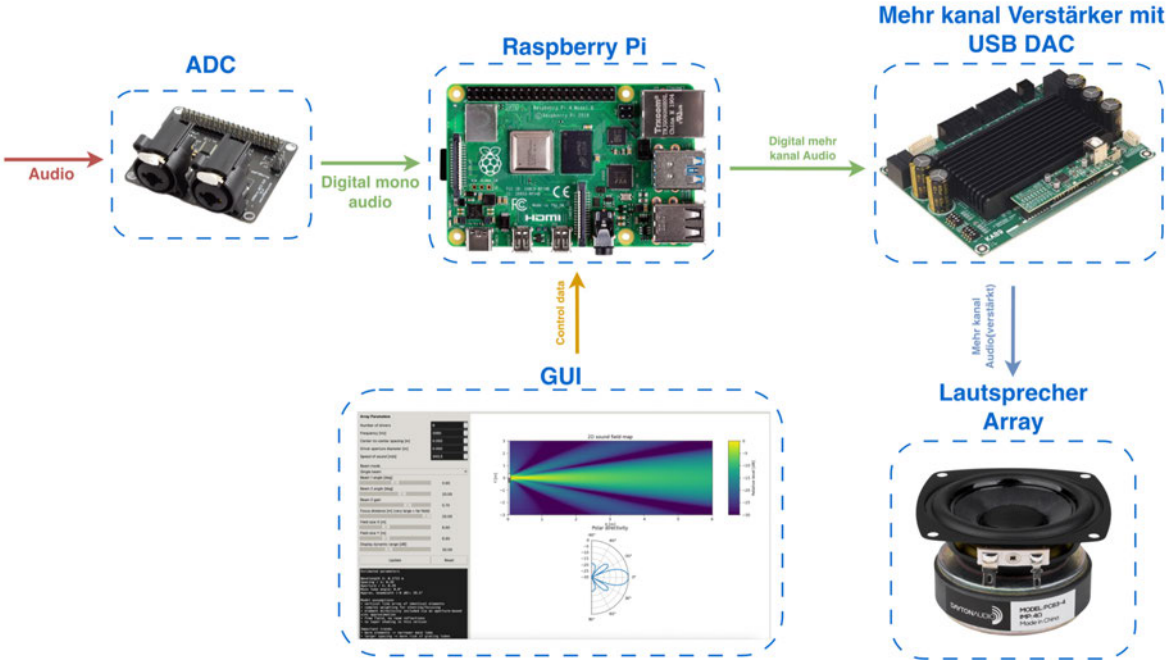



Abbildung 10: Blockschaltbild der Systemarchitektur – Variante 3

Quelle: Eigene Darstellung.

Obwohl alle drei untersuchten Architekturen grundsätzlich für die Realisierung des Systems geeignet sind, wurde für den Prototyp die dritte Variante gewählt. Ausschlaggebend hierfür waren insbesondere der vergleichsweise einfache mechanische und elektrische Aufbau sowie der geringe Konfigurationsaufwand.

Durch den Einsatz des Raspberry Pi steht zudem eine hohe Rechenleistung zur Verfügung, wodurch die Signalverarbeitung flexibel erweitert und angepasst werden kann. Gleichzeitig wird durch die geringere Anzahl einzelner Baugruppen die Komplexität der Gesamtverschaltung reduziert, was sich positiv auf die Robustheit und Fehlersuche des Systems auswirkt.

Ein wesentlicher Nachteil dieser Architektur liegt hingegen in den höheren Komponentenkosten gegenüber den beiden zuvor beschriebenen Varianten. Dieser Nachteil wurde zugunsten der einfacheren Integration, der höheren Flexibilität und des geringeren Entwicklungsaufwands akzeptiert.

### 2.3.3 Auswahl und Dimensionierung der Komponenten

Ausgehend von der zuvor beschriebenen Systemarchitektur mussten die akustischen und elektronischen Komponenten des Prototyps ausgewählt und aufeinander abgestimmt werden. Dabei standen neben den technischen Anforderungen insbesondere die Verfügbarkeit, Integrationsfähigkeit und ein möglichst günstiges Preis-Leistungs-Verhältnis im Vordergrund.

**Lautsprechertreiber** Auf Grundlage der zuvor entwickelten Beam-Steering-Simulation wurden zunächst verschiedene Arraykonfigurationen untersucht. Dabei zeigte sich, dass eine Anordnung aus etwa sechs bis acht Lautsprechertreibern mit einem Nenndurchmesser von 2,5 bis 3 Zoll einen geeigneten Kompromiss zwischen nutzbarem Frequenzbereich der Strahlsteuerung, Richtwirkung und konstruktivem Aufwand ermöglicht.

Da Leistungsverstärker mit einer durch vier teilbaren Kanalzahl im Mehrkanalbereich verbreitet sind, wurde die Anzahl für den Prototyp auf acht Lautsprechertreiber festgelegt. Dadurch

können acht Verstärker- und DSP-Kanäle vollständig genutzt und sämtliche Treiber unabhängig voneinander angesteuert werden.

Da für das gesamte Array nur ein Lautsprechertyp vorgesehen ist, muss dieser einen möglichst großen Frequenzbereich eigenständig übertragen können. Aus diesem Grund wurden Breitbandtreiber eingesetzt. Gleichzeitig war aufgrund des geschlossenen Gehäuseprinzips eine möglichst niedrige untere Grenzfrequenz vorteilhaft. Innerhalb des zuvor festgelegten Größenbereichs wurden daher 3-Zoll-Treiber gegenüber kleineren Varianten bevorzugt.

Unter Berücksichtigung der technischen Eigenschaften und der Kosten wurde der Dayton Audio PC83-4 ausgewählt. Der Hersteller gibt für den 3-Zoll-Breitbandtreiber einen Übertragungsbereich von 80 Hz bis 20 kHz, eine Nennimpedanz von 4 Ω und eine Belastbarkeit von 30 W RMS an. Die Freiluftresonanz beträgt $f_s = 80{,}1$ Hz, das Äquivalenzvolumen $V_{as}$ etwa 1,98 l. Der Treiber wird vom Hersteller ausdrücklich auch für den Einsatz in Line-Array-Systemen vorgesehen (Dayton Audio 2017). Die vollständigen Herstellerangaben sind in Abbildung 11 wiedergegeben.

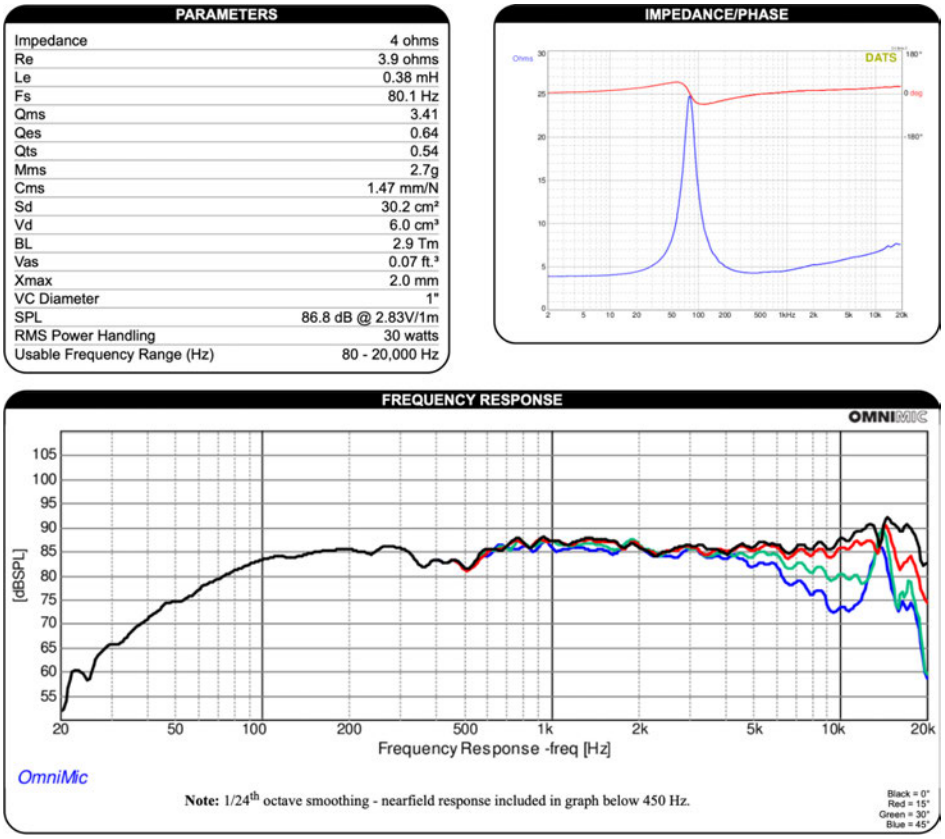



Abbildung 11: Technische Daten des Dayton Audio PC83-4

Quelle: Dayton Audio (2017).

Für die gewählte Anordnung aus acht Treibern wurden mit dem zuvor entwickelten Berechnungs- und Simulationsmodell die für die Strahlsteuerung relevanten Frequenzgrenzen bestimmt. Für die vorgesehene Geometrie ergibt sich ein näherungsweiser Steuerbereich von

$$f_{\min} \approx 576\,\text{Hz} \qquad \text{bis} \qquad f_{\max} \approx 2018\,\text{Hz}. \tag{31}$$

Diese Werte beziehen sich auf die geometrischen Grenzen des Arrays und stellen keine Grenz-

frequenzen des Lautsprechertreibers selbst dar.

**Leistungsverstärker** Für die Leistungsverstärkung wurde das Mehrkanalmodul Wondom GAB8 ausgewählt. Ein wesentlicher Vorteil für den vorgesehenen Aufbau ist die integrierte USB-Audioschnittstelle. Über USB UAC 2.0 kann ein digitales 7.1-Audiosignal mit 24 Bit und 48 kHz unmittelbar vom Steuerrechner an den Verstärker übertragen werden. Dadurch entfällt ein separater mehrkanaliger D/A-Wandler.

Das Modul basiert auf einer Class-D-Endstufenarchitektur und stellt bis zu 50 W pro Kanal an 4 Ω zur Verfügung. Für den Betrieb mit $10 \times 50$ W wird ein typischer Wirkungsgrad von etwa 90 % angegeben. Der THD+N-Wert beträgt bei 4 Ω und 1 kHz etwa 0,14 % bei 10 W beziehungsweise 0,69 % bei 50 W Ausgangsleistung (WONDOM Audio Technology 2023).

Damit stehen für die verwendeten PC83-4 sowohl eine ausreichende Anzahl an Verstärkerkanälen als auch ausreichende Leistungsreserven zur Verfügung. Abbildung 12 fasst die wesentlichen Kenndaten des Moduls zusammen.

| Parameter | Conditions | Min. | Typ. | Max. | Units |
|---|---|---|---|---|---|
| Efficiency | 10x50W@24V, 4Ohm, 1kHz | - | 90 | - | % |
| Minimum Load Impedance | Floating may lead to EMI issues | 3 | 4 | 16 | Ω |
| Nominal Power Requirement | 24V power supply recommended | 150 | 350 | 750 | W |
| Operating Voltage | 4Ω or higher, if resistance 3Ω, use 20V or less | 15 | 24 | 30 | V |
| Standby Power | SHDN short to GND, Signal detected@24V, 0.13A | - | 3.12 | - | W |
| Idle Power | MUTE short to GND, Signal detected@24V, 0.53A | - | 12.7 | - | |
| Power Consumption | 1/4 of max output power @4Ω,1kHz,24V | - | 240 | - | W |

GAB8 Audio Performance Parameters

| Parameter | Conditions | | Min. | Typ. | Max. | Units |
|---|---|---|---|---|---|---|
| Output Noise Level | A-weighting, USB connection activated | L&R | - | 169 | - | uV |
| SNR | 10x50W@4Ohm, A-weighting | | - | 101 | - | dB |
| THD+N | 1W@4Ω, 1kHz, / CH | | - | 0.18 | - | % |
| | 10W@4Ω, 1kHz, / CH | | - | 0.14 | - | |
| | 50W@4Ω, 1kHz, / CH | | - | 0.69 | - | |
| DC Offset | - | | - | 10 | - | mV |

Abbildung 12: Elektrische und akustische Kenndaten des Wondom GAB8

Quelle: WONDOM Audio Technology (2023).

**Stromversorgung des Leistungsverstärkers** Für die Stromversorgung des GAB8 wird vom Hersteller der Einsatz des Mean Well LRS-350N2 mit 24 V Ausgangsspannung und 350 W Nennleistung empfohlen. Diese Empfehlung wurde für den Prototyp gefolgt (WONDOM Audio Technology 2023).

**Audioeingang und Steuerrechner** Die Auswahl des A/D-Wandlers steht unmittelbar mit dem verwendeten Steuerrechner in Verbindung. Für den analogen Audioeingang wurde der HiFiBerry Studio ADC eingesetzt. Das Modul wird direkt über den 40-poligen GPIO-Anschluss auf einem Raspberry Pi montiert und stellt zwei analoge Eingangskanäle zur Verfügung.

Die XLR-/6,35-mm-Kombibuchsen ermöglichen den Anschluss symmetrischer analoger Audiosignale. Der integrierte A/D-Wandler unterstützt eine Auflösung von bis zu 24 Bit bei einer Abtastrate von bis zu 192 kHz (HiFiBerry 2024). Damit übersteigen seine technischen Möglichkeiten die für die Signalverarbeitung des Prototyps benötigten Anforderungen. Die zugehörigen technischen Daten sind in Abbildung 13 dargestellt.

| | | |
|---|---|---|
| Maximum input voltage | 2.1Vrms unbalanced<br>4.2Vrms for balanced input | |
| Maximum output voltage | 2.1Vrms | |
| ADC signal-to-noise ratio | 110db | typical |
| ADC THD+N | -90db | typical |
| Frequency response | 10Hz-70kHz | (-3dB) |
| Input gain | -12db to 32dB | |
| Power consumption | <0.3W | |
| Sample rates | 44.1-192kHz | |

Abbildung 13: Technische Daten des HiFiBerry Studio ADC

Quelle: HiFiBerry (2024).

Der Studio ADC ist mit Raspberry-Pi-Modellen kompatibel, die über einen 40-poligen GPIO-Anschluss verfügen. Für den aufgebauten Prototyp wurde ein Raspberry Pi 5 mit 2 GB Arbeitsspeicher eingesetzt. Da die entwickelte Signalverarbeitung und Weboberfläche keinen hohen Arbeitsspeicherbedarf aufweisen, stellt die Speicherkapazität hierbei kein wesentliches Dimensionierungskriterium dar.

Für die Stromversorgung des Raspberry Pi 5 empfiehlt der Hersteller ein USB-C-Netzteil mit 5 V und 5 A. Im Prototyp wurde daher das originale Raspberry-Pi-USB-C-Netzteil mit 27 W verwendet.

Eine Versorgung mit 5 V und 3 A ist grundsätzlich möglich, reduziert beim Raspberry Pi 5 jedoch den für angeschlossene USB-Geräte verfügbaren Strom. Da im entwickelten System eine USB-Audioverbindung zum Mehrkanalverstärker verwendet wird, stellt die empfohlene 27-W-Stromversorgung die robustere Lösung dar.

**Übertragbarkeit der Komponentenauswahl** Die beschriebenen Komponenten wurden für die konkrete prototypische Umsetzung ausgewählt und stellen keine zwingende Voraussetzung für die Realisierung des Gesamtkonzepts dar. Werden die in den vorhergehenden Abschnitten definierten akustischen, elektrischen und signaltechnischen Anforderungen eingehalten, können Lautsprechertreiber, Verstärker, A/D-Wandler, Steuerrechner und Netzteile durch geeignete Alternativkomponenten ersetzt werden.

## 2.4 Technische Ausarbeitung des Prototyps

### 2.4.1 Konstruktion des Lautsprechergehäuses

Die konstruktive Auslegung des Lautsprechergehäuses erfolgte auf Grundlage der zuvor beschriebenen akustischen Berechnungen. Dabei ist zu berücksichtigen, dass für die Dimensionierung zunächst die vom Hersteller angegebenen Thiele/Small-Parameter des Lautsprechertreibers verwendet wurden.

Zum Zeitpunkt der Konstruktion lagen noch keine eigenen Messwerte der verwendeten Treiber vor. Bei einer späteren Überarbeitung oder Anpassung des Gehäuses wird daher empfohlen, die tatsächlichen Thiele/Small-Parameter der eingesetzten Lautsprecher zu bestimmen und die Gehäuseberechnung auf Grundlage dieser Messwerte erneut durchzuführen.

Tabelle 1 stellt die auf dieser Grundlage berechneten akustischen Kenngrößen beider Gehäusevarianten gegenüber.

Tabelle 1: Berechnete akustische Parameter

| Parameter | Einheit | Gedrucktes Gehäuse | Aluminiumgehäuse |
|---|---|---|---|
| Effektives akustisches Volumen $V_b$ | L | 20,99 | 20,91 |
| Gesamtäquivalentvolumen $V_{as,total}$ | L | 15,86 | 15,86 |
| Volumenverhältnis $\alpha = V_{as,total}/V_b$ | – | 0,76 | 0,76 |
| Systemresonanzfrequenz $f_c$ | Hz | 106,12 | 106,22 |
| Gesamtgüte des geschlossenen Systems $Q_{tc}$ | – | 0,715 | 0,716 |
| Geschätzte untere Grenzfrequenz $f_{-3\,dB}$ | Hz | 104,90 | 104,90 |
| Erforderliches Volumen $V_b$ für Ziel-$Q_{tc}$ | L | 22,20 | 22,20 |
| Gesamtmembranfläche $S_{d,total}$ | $cm^2$ | 241,60 | 241,60 |
| Gesamtverschiebevolumen $V_{d,total}$ | $cm^3$ | 48,32 | 48,32 |
| Luftfedersteifigkeit $k_{B,total}$ | N/m | 3938,64 | 3955,11 |
| Erste longitudinale Innenraummode | Hz | 190,56 | 171,50 |
| Erste Innenraummode in Breitenrichtung | Hz | 1190,97 | 1299,24 |
| Erste Innenraummode in Tiefenrichtung | Hz | 1319,23 | 1299,24 |
| Idealer kohärenter Array-Gewinn | dB | 18,06 | 18,06 |
| Bewertung von $Q_{tc}$ | – | gut / nahezu linear | gut / nahezu linear |
| Bewertung von $f_c$ | – | guter Bereich | guter Bereich |

**Additiv gefertigte Gehäusevariante** Für die ursprünglich vorgesehene additiv gefertigte Variante wurde mithilfe des entwickelten Excel-Berechnungswerkzeugs zunächst das erforderliche Gehäusevolumen bestimmt.

Als geometrisches Innenvolumen wurden etwa 16,85 l vorgesehen. Da das Gehäuse zusätzlich mit dichtem faserförmigem Absorptionsmaterial zur Bedämpfung interner Reflexionen und stehender Wellen gefüllt werden sollte, wurde ein größeres akustisch wirksames Volumen berücksichtigt. Für die gewählte Füllung wurde dieses mit etwa 21 l angesetzt und liegt damit nahe am berechneten Zielwert von etwa 22,2 l.

Nach der Berechnung ergibt sich für diese Konfiguration ein vergleichsweise gleichmäßiger Tieftonverlauf mit einer unteren Grenzfrequenz von etwa 104 Hz. Für ein geschlossenes Gehäuse dieser Baugröße stellt dies einen für den vorgesehenen Anwendungsbereich geeigneten Wert dar.

Der konstruktive Aufbau dieser Variante ist in Abbildung 14 dargestellt.

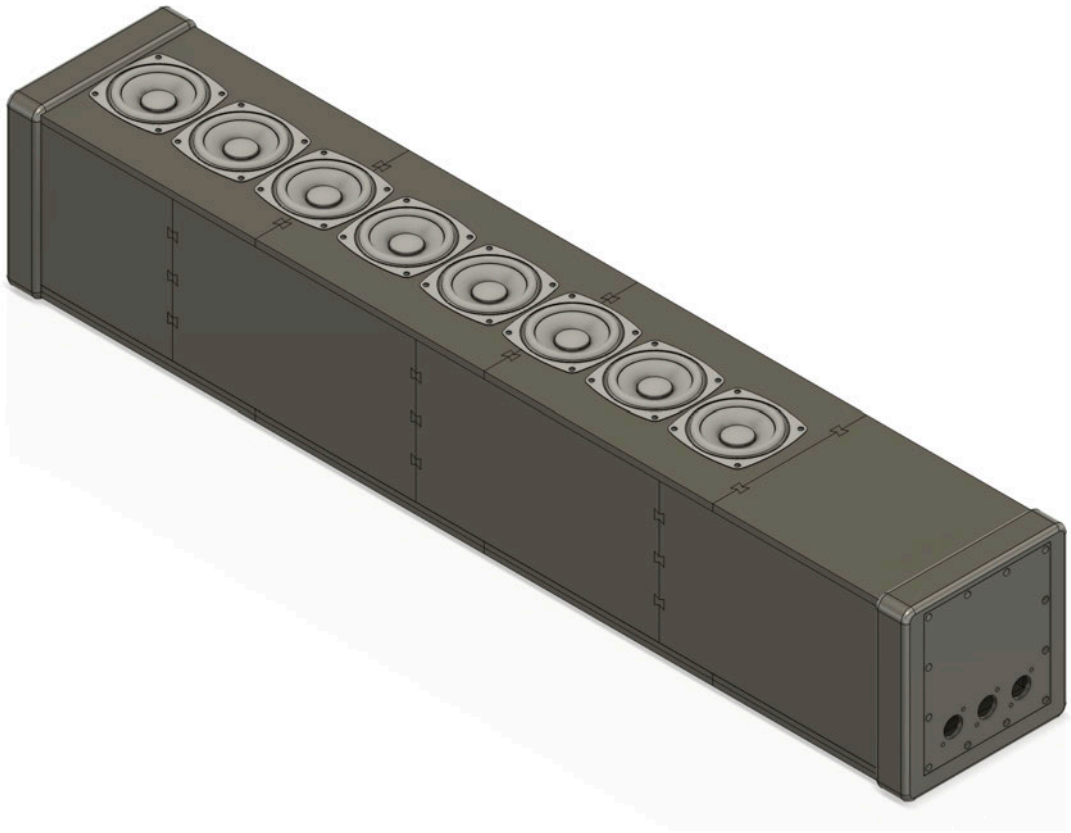


Abbildung 14: 3D-Modell der additiv gefertigten Gehäusevariante

Quelle: Eigene Darstellung.

Die inneren Abmessungen des Gehäuses wurden auf

$$130\,\text{mm} \times 144\,\text{mm} \times 900\,\text{mm}$$

festgelegt. Die Lautsprechertreiber befinden sich im oberen Bereich des Gehäuses, während im unteren Abschnitt ein separater Bauraum für die elektronischen Komponenten vorgesehen ist.

Am oberen und unteren Ende des Hauptkörpers befinden sich Flansche. Diese verbinden die vier Gehäusewände miteinander und stellen gleichzeitig die Befestigungspunkte für die obere und untere Abdeckung bereit. In der unteren Abdeckung sind die benötigten Öffnungen für EtherCON-, XLR- und PowerCON-Anschlüsse vorgesehen.

Die Frontwand mit den Lautsprecherausschnitten ist als durchgehendes Bauteil ausgeführt. Die Seiten- und Rückwände bestehen dagegen aus einer inneren und einer äußeren Wandstruktur, zwischen denen ein Hohlraum vorgesehen ist.

Nach der Montage kann dieser Hohlraum mit der zuvor beschriebenen Alabastergipsmischung ausgefüllt werden. Dadurch entsteht ein mehrschichtiger Wandaufbau, der die Steifigkeit der Konstruktion erhöht und unerwünschte Schwingungen der relativ dünnen Kunststoffflächen reduziert.

Ein besonderes Ziel der Konstruktion bestand darin, den Montageaufwand möglichst gering zu halten. Die einzelnen Gehäuseelemente werden deshalb zunächst über formschlüssige Nut-

Feder-Verbindungen positioniert. Anschließend werden die Segmente durch Verbindungselemente in Form eines doppelten Schwalbenschwanzes miteinander verriegelt.

Dadurch kann der Hauptkörper ohne aufwendige mechanische Nachbearbeitung zusammengesetzt werden. Nach Abschluss der Gehäusemontage können elektronische Komponenten, Halterungen und weitere Einbauteile unmittelbar an den dafür vorgesehenen Befestigungspunkten montiert werden. Abbildung 15 zeigt den inneren Aufbau mit den beschriebenen Verbindungselementen.

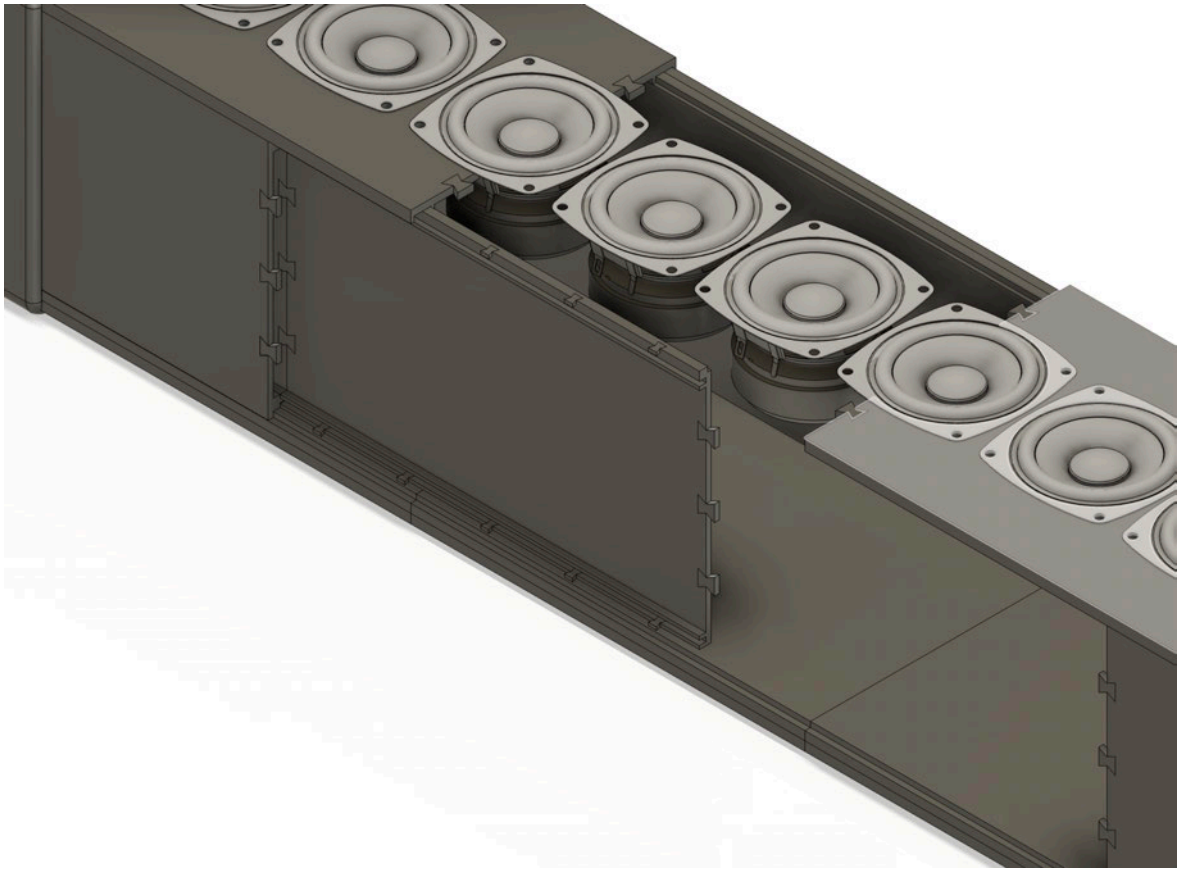


Abbildung 15: 3D-Modell der inneren Struktur der additiv gefertigten Gehäusevariante

Quelle: Eigene Darstellung.

**Realisierte Aluminiumvariante** Da der ursprünglich vorgesehene additiv gefertigte Hauptkörper aufgrund unvorhergesehener Randbedingungen nicht wie geplant realisiert werden konnte, wurde für den aufgebauten Prototyp auf die bereits beschriebene Aluminiumkonstruktion zurückgegriffen. Das zugehörige Konstruktionsmodell zeigt Abbildung 16.

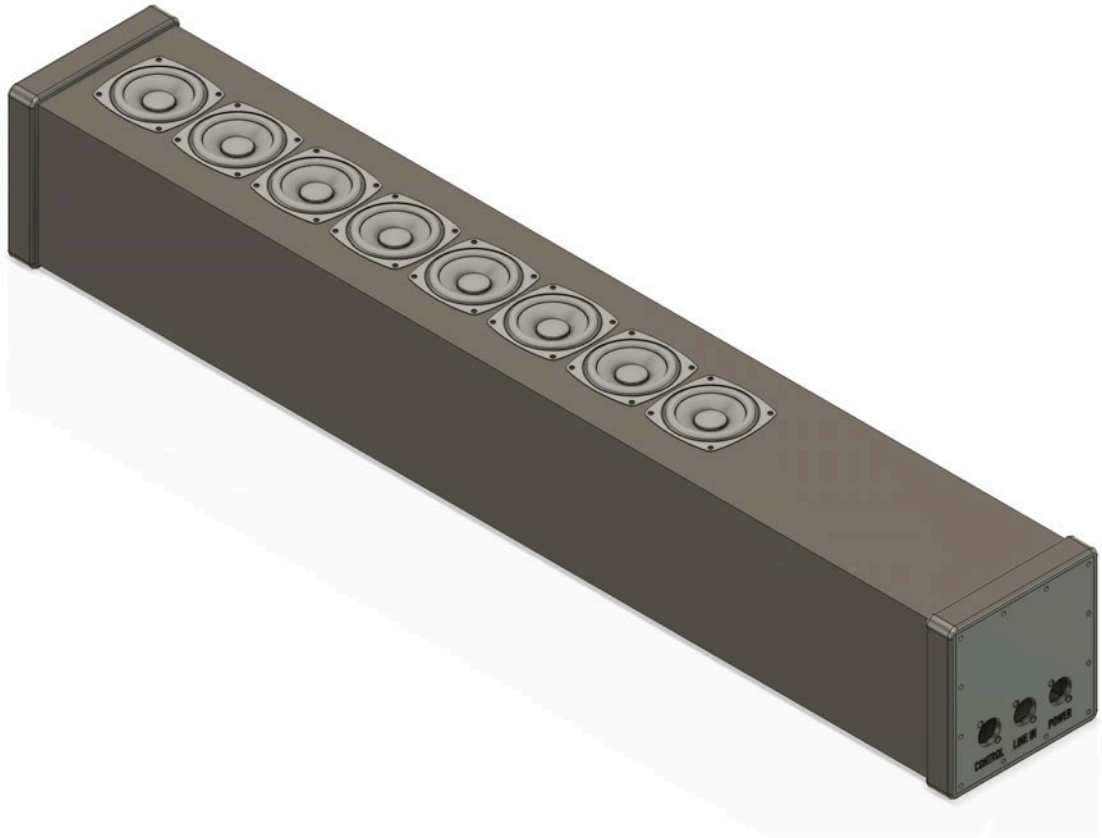



Abbildung 16: 3D-Modell der Aluminiumgehäusevariante

Quelle: Eigene Darstellung.

Um auch bei dieser Variante den Bearbeitungsaufwand gering zu halten, wurde das verwendete Aluminium-Vierkantrohr nicht in der Länge gekürzt, sondern mit seiner handelsüblichen Standardlänge von

$$1000\,\mathrm{mm}$$

eingesetzt. Das Profil besitzt Außenabmessungen von

$$150\,\mathrm{mm} \times 150\,\mathrm{mm}$$

bei einer Wandstärke von 5 mm. Daraus ergeben sich innere Querschnittsabmessungen von

$$140\,\mathrm{mm} \times 140\,\mathrm{mm}.$$

Die Innenflächen wurden zusätzlich mit einer insgesamt 4 mm starken viskoelastischen Dämpfungsschicht versehen. Unter Berücksichtigung dieser Schicht ergibt sich für die verfügbare Innengeometrie ein Volumen von etwa 17,42 l.

Das Volumen liegt damit geringfügig über demjenigen der ursprünglich vorgesehenen Kunststoffkonstruktion. Aufgrund des geschlossenen Gehäuseprinzips führt diese Abweichung jedoch nur zu vergleichsweise geringen Änderungen der berechneten Systemparameter. Die

entsprechenden Ergebnisse des Berechnungswerkzeugs zeigen, dass die für die Tieftonabstimmung relevanten Werte beider Varianten nur geringfügig voneinander abweichen.

Das etwas größere physische Innenvolumen kann darüber hinaus durch eine entsprechend angepasste Menge des verwendeten Absorptionsmaterials berücksichtigt werden.

Die Aluminiumkonstruktion besitzt gegenüber der vorgesehenen gefüllten Kunststoffstruktur ein anderes mechanisches Schwingungsverhalten. Insbesondere die geringe werkstoffinterne Dämpfung von Aluminium kann dazu führen, dass angeregte Wandschwingungen vergleichsweise schwach bedämpft werden.

Zur Verringerung dieses Effekts werden die Innenflächen des Profils mit zwei Lagen viskoelastischen Dämpfungsmaterials versehen. Die bei einer Wandbewegung auftretende Verformung der Schicht führt zu mechanischen Verlusten, wodurch ein Teil der Schwingungsenergie in Wärme umgewandelt wird. Auf diese Weise werden angeregte Wandschwingungen stärker bedämpft und deren Ausschwingen reduziert.

Zusätzlich wird im Innenraum poröses Absorptionsmaterial eingesetzt, um interne Reflexionen und stehende Wellen zu bedämpfen. Die viskoelastische Beschichtung und das faserförmige Absorptionsmaterial erfüllen somit unterschiedliche Funktionen: Erstere wirkt vor allem auf die mechanischen Schwingungen des Gehäuses, während Letzteres hauptsächlich das innere Schallfeld bedämpft.

**Montage der elektronischen Komponenten** Die obere und untere Gehäuseöffnung werden nach demselben Grundprinzip wie bei der additiv gefertigten Variante verschlossen. Hierfür werden separate 3D-gedruckte Flansche mit entsprechenden Abdeckungen verwendet.

Auch für die Befestigung des Raspberry Pi und des Verstärkermoduls werden additiv gefertigte Abstandshalter eingesetzt. Diese sind erforderlich, da sich auf der Unterseite der Leiterplatten leitfähige Lötstellen befinden. Ein unmittelbarer Kontakt mit dem Aluminiumgehäuse könnte zu elektrischen Kurzschlüssen führen. Die Abstandshalter können entweder mit einem geeigneten Klebstoff auf der Innenfläche befestigt oder mechanisch verschraubt werden. Für eine lösbare Verbindung können entsprechende Bohrungen in das Aluminiumprofil eingebracht und Gewinde für die Befestigungsschrauben geschnitten werden. Die Ausführung der Abstandshalter ist in Abbildung 17 dargestellt.

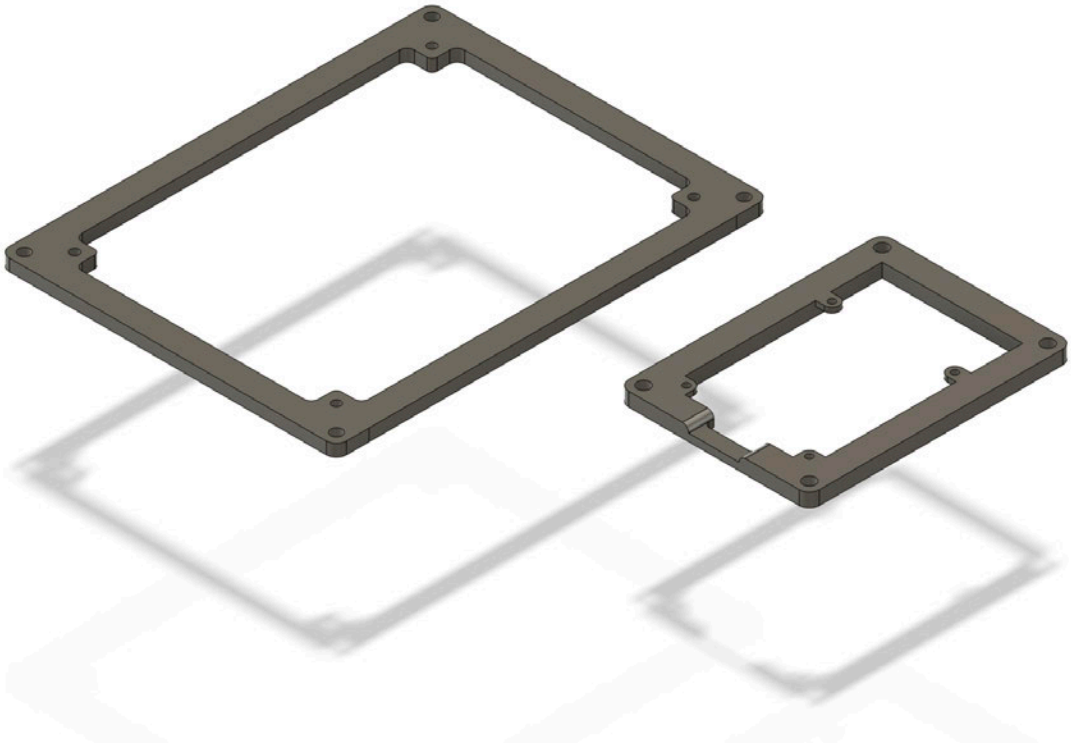


Abbildung 17: 3D-Modell der additiv gefertigten Abstandshalter

Quelle: Eigene Darstellung.

**Bearbeitung und Montage der Lautsprechertreiber** Für die Montage der acht Lautsprechertreiber müssen in die Aluminiumfront die entsprechenden Schallöffnungen sowie die Befestigungsbohrungen eingebracht werden.

Die Positionen dieser Bohrungen wurden bereits während der 3D-Konstruktion festgelegt. Zusätzlich wurde eine maßstäbliche Bohrschablone als PDF-Zeichnung erstellt, sodass die erforderlichen Positionen auf das Aluminiumprofil übertragen werden können.

Dadurch bleibt der notwendige mechanische Bearbeitungsaufwand auch bei der Aluminiumvariante auf Bohren beziehungsweise das Herstellen der Lautsprecheröffnungen beschränkt.

**Mechanische Aufstellung und Befestigung** Das Gehäusekonzept ist nicht auf eine bestimmte Befestigungsmethode beschränkt. Abhängig vom vorgesehenen Anwendungsfall können unterschiedliche Halterungen verwendet werden. Aufgrund der Gehäusegeometrie ist grundsätzlich auch eine freistehende Aufstellung möglich.

Für den aufgebauten Prototyp wurde eine Befestigung über einen TV-Zapfen gewählt, wie in Abbildung 18 dargestellt. Dieser wird über einen zusätzlichen Metallwinkel mit dem Lautsprechergehäuse verbunden und ermöglicht die Montage auf einem geeigneten Lautsprecher- beziehungsweise Kurbelstativ.

Damit bleibt die Befestigung konstruktiv vom eigentlichen Gehäusekonzept getrennt und kann bei einer alternativen Umsetzung ohne grundlegende Änderung des Lautsprechers angepasst werden.



Abbildung 18: TV-Zapfen-Befestigung

Quelle: Eigene Darstellung.

### 2.4.2 Verdrahtungskonzept

Zur eindeutigen und reproduzierbaren Verdrahtung des Systems wurde ein vollständiger Anschlussplan erstellt (Abbildung 19). Dieser zeigt neben den einzelnen elektronischen Baugruppen auch die jeweils zu verbindenden Schnittstellen und Anschlüsse.

Für jede Verbindung sind der vorgesehene Kabeltyp, die Kabellänge sowie die verwendeten Steckverbinder angegeben. Dadurch soll die Montage vereinfacht und insbesondere bei einer späteren Reproduktion des Systems eine eindeutige Zuordnung aller Verbindungen ermöglicht werden.

Für leistungsführende Verbindungen innerhalb des Systems wurde ein Leiterquerschnitt von mindestens AWG 16 vorgesehen. Dadurch sollen bei den auftretenden Strömen Leitungsverluste und eine unnötige Erwärmung der Kabel begrenzt werden.

Da innerhalb des Lautsprechers sowohl leistungsführende Leitungen als auch digitale und analoge Audiosignale geführt werden, ist außerdem auf eine störungsarme Verdrahtung zu achten. Für Ethernet-, USB- und XLR-Verbindungen sollten daher normgerechte Kabel mit geeigneter Schirmung verwendet werden. Signal- und Versorgungsleitungen sollten nach Möglichkeit getrennt geführt und unnötig lange Leitungswege vermieden werden. Dadurch kann die Einkopplung elektromagnetischer Störungen in empfindliche Signalpfade reduziert werden.

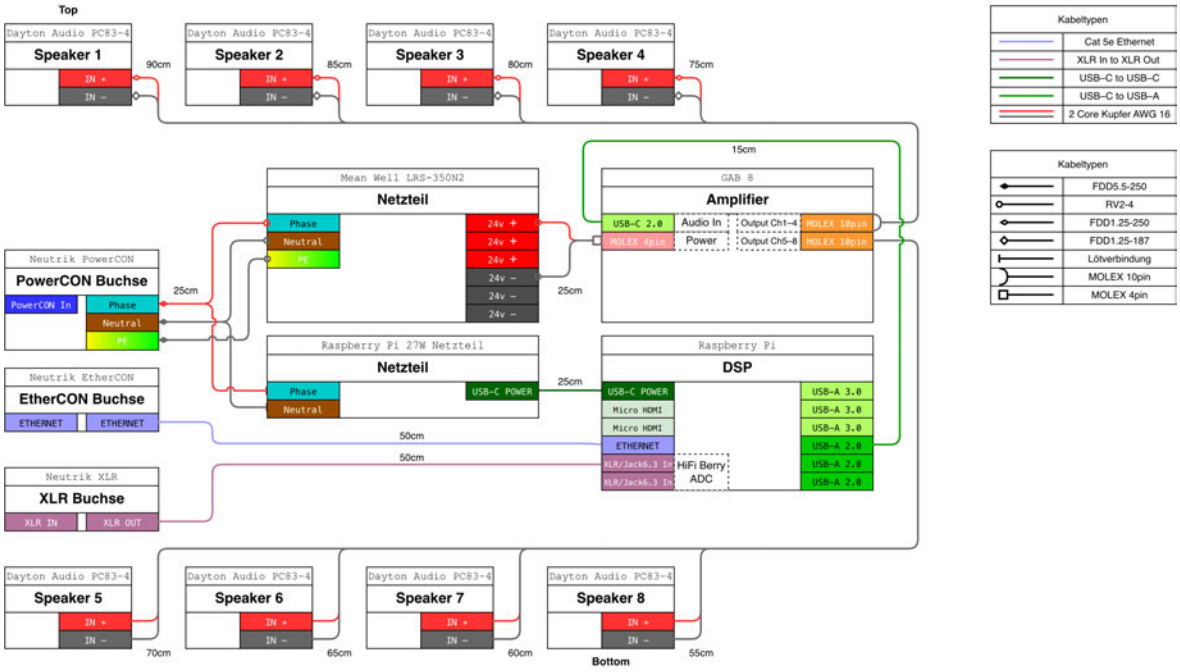



Abbildung 19: Anschluss- und Verdrahtungsplan des Lautsprechersystems

Quelle: Eigene Darstellung.

### 2.4.3 Softwarearchitektur und Bedienkonzept

Die Software des Lautsprechers übernimmt zwei grundsätzlich unterschiedliche Aufgaben. Zum einen muss das Audiosignal kontinuierlich in Echtzeit verarbeitet werden. Zum anderen müssen sämtliche Parameter über eine möglichst einfach zugängliche Benutzeroberfläche eingestellt werden können.

Für die eigentliche Audiosignalverarbeitung wurde C++ gewählt. Gegenüber Python ermöglicht C++ eine deutlich schnellere und ressourcenschonendere Ausführung zeitkritischer Berechnungen. Dies ist insbesondere bei der parallelen Verarbeitung von acht Audiokanälen und den dafür erforderlichen Verzögerungen von Vorteil.

Python wird dagegen für die nicht zeitkritische Systemsteuerung eingesetzt. Ein Python-basiertes FastAPI-Backend bildet die Schnittstelle zwischen der browserbasierten Benutzeroberfläche und der DSP-Anwendung. Dadurch bleiben Bedienung und Netzwerkkommunikation von der eigentlichen Audioverarbeitung getrennt.

**Software- und Signalfluss** Das Eingangssignal wird über den HiFiBerry Studio ADC digitalisiert und anschließend durch die C++-DSP-Anwendung verarbeitet. Der Zugriff auf die Audiogeräte erfolgt dabei über ALSA, die unter Linux verwendete Audioschnittstelle. Nach der Bearbeitung werden acht unabhängige Kanäle über USB an den Wondom GAB8 übertragen.

Die Weboberfläche selbst verarbeitet keine Audiodaten. Änderungen werden vom FastAPI-Backend übernommen und in einer JSON-basierten Konfiguration gespeichert. Die DSP-Anwendung liest diese Parameter regelmäßig ein und übernimmt Änderungen während des Betriebs. Aktuelle Betriebsinformationen und berechnete Delaywerte werden über eine separate Statusdatei wieder an die Benutzeroberfläche zurückgegeben. Abbildung 20 zeigt den beschriebenen Audio-, Steuer- und Statuspfad im Zusammenhang.

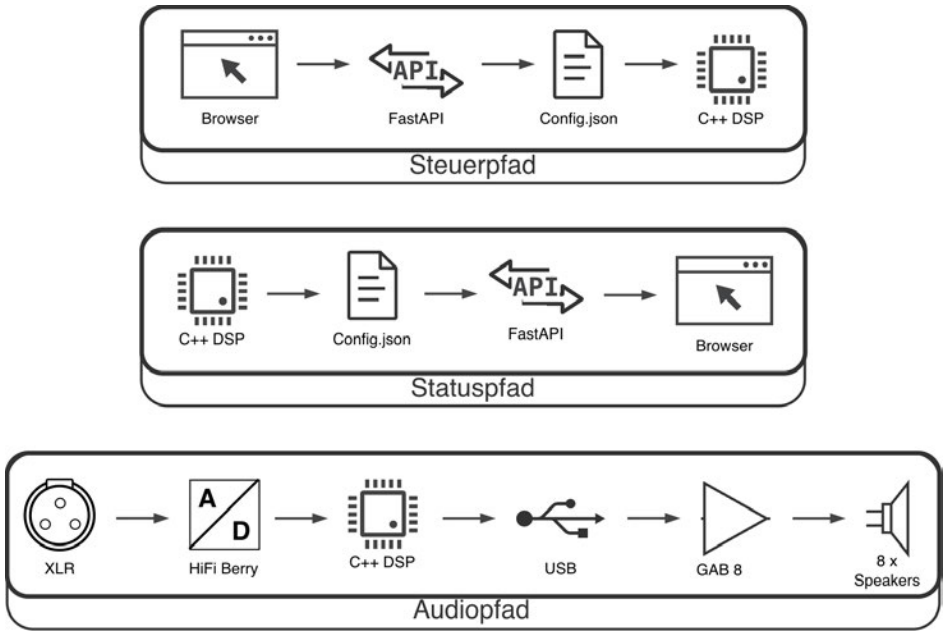



Abbildung 20: Softwarearchitektur und Datenfluss des Lautsprechersystems

Quelle: Eigene Darstellung.

**Netzwerkzugriff** Da die Steuerung vollständig browserbasiert erfolgt, ist auf dem Bediengerät keine zusätzliche Software erforderlich. Für den Zugriff auf die Weboberfläche sind drei Verbindungsarten vorgesehen.

Im mobilen Betrieb stellt der Lautsprecher ein eigenes WLAN bereit. Nach der Verbindung mit diesem Netzwerk kann die Weboberfläche über die feste Adresse `http://192.168.4.1` aufgerufen werden. Damit ist der Lautsprecher auch unabhängig von einer vorhandenen Netzwerkinfrastruktur bedienbar.

Alternativ kann der Raspberry Pi über Ethernet mit einem bestehenden Netzwerk verbunden werden. Der Zugriff erfolgt in diesem Fall über die innerhalb dieses Netzwerks vergebene IP-Adresse.

Als dritte Möglichkeit kann ein Bediengerät über Ethernet direkt mit dem Raspberry Pi verbunden werden. Diese Variante ermöglicht eine kabelgebundene Steuerung ohne zusätzliches Netzwerkgerät und eignet sich insbesondere für Einrichtung, Wartung und Messbetrieb.

Unabhängig von der gewählten Verbindung bleibt die Benutzeroberfläche identisch. Lediglich der Netzwerkweg zum Webserver ändert sich.

**Digitale Signalverarbeitung** Die Audioverarbeitung erfolgt mit einer Abtastrate von 48 kHz. Das Eingangssignal durchläuft zunächst die gemeinsamen DSP-Stufen, bevor es auf die acht Lautsprecherkanäle aufgeteilt wird.

Für die Entzerrung werden überwiegend digitale IIR-Filter in Biquad-Struktur eingesetzt. Zur Verfügung stehen Hoch- und Tiefpass mit wählbaren Flankensteilheiten von 6, 12 und 24 dB/Okt., Low- und High-Shelf-Filter sowie fünf parametrische Equalizer. Frequenz, Güte und Verstärkung der parametrischen Filter können unabhängig eingestellt werden.

Der Limiter besitzt einstellbare Threshold-, Attack- und Release-Parameter und befindet sich vor der Aufteilung auf die acht Ausgangskanäle. Die Mute-Funktion wird gemeinsam mit der Gain-Stufe realisiert.

Nach dieser globalen Signalbearbeitung wird das Signal für jedes Arrayelement separat verzögert und gewichtet. Abschließend kann über eine Output-Maske festgelegt werden, welche physikalischen Ausgänge aktiv sind. Dadurch können einzelne Lautsprecherkanäle beispielsweise während der Inbetriebnahme gezielt überprüft werden. Die vollständige Verarbeitungskette ist in Abbildung 21 dargestellt.

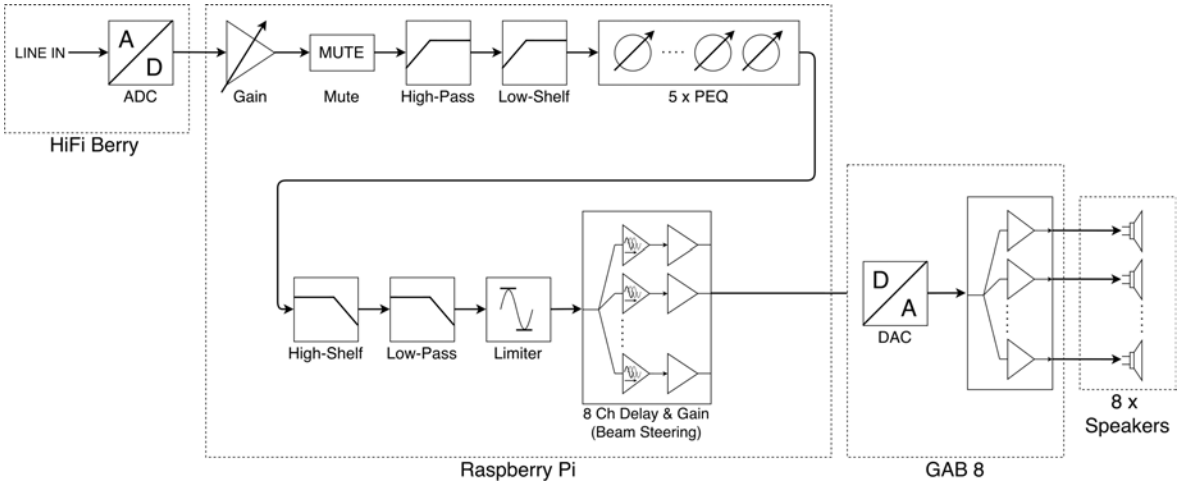



Abbildung 21: Signalfluss der digitalen Audioverarbeitung

Quelle: Eigene Darstellung.

**Pufferung und Latenz** Bei der blockweisen Audioverarbeitung wird die Anzahl der pro Verarbeitungsschritt eingelesenen beziehungsweise ausgegebenen Samples durch `period_size` festgelegt. Eine kleinere Periodengröße reduziert die durch die Blockverarbeitung entstehende Latenz, erhöht jedoch gleichzeitig die Anzahl der erforderlichen Verarbeitungsvorgänge pro Sekunde.

Bei einer Abtastrate von 48 kHz entspricht eine `period_size` von 256 Samples einer Zeitdauer von etwa 5,33 ms. Für den Prototyp wurde dieser Wert auf 128 Samples reduziert, wodurch sich die Periodendauer auf etwa 2,67 ms halbiert.

Die `buffer_size` legt dagegen fest, wie viele Samples insgesamt im Audiopuffer zwischengespeichert werden können. Ein größerer Puffer erhöht die Betriebssicherheit gegenüber kurzfristigen Verzögerungen der Signalverarbeitung, vergrößert jedoch grundsätzlich auch das mögliche Latenzbudget des Audiopfades.

Eine weitere Verringerung der `period_size` wurde nicht verwendet, da die DSP die Audioblöcke dann in entsprechend kürzeren Zeitabständen vollständig verarbeiten muss. Wird ein Block nicht rechtzeitig bereitgestellt, können sogenannte Buffer Underruns beziehungsweise XRUNs auftreten, die sich als hörbare Aussetzer im Audiosignal bemerkbar machen.

Die gewählten Werte stellen daher einen Kompromiss zwischen geringer Latenz und einem stabilen kontinuierlichen Audiostream dar.

Die tatsächliche Gesamtlatenz des Systems ist daher größer als die reine Periodendauer und ergibt sich aus der Summe der Ein- und Ausgabepufferung sowie der Wandlungs- und Verarbeitungszeiten.

**Umsetzung der Strahlsteuerung** Die in Abschnitt 2.2.2 beschriebenen Laufzeitbeziehungen bilden unmittelbar die Grundlage der DSP-Implementierung. Aus den berechneten

Verzögerungen werden entsprechend Gleichung (11) Werte in Samples gebildet und den acht Delay-Linien zugewiesen:

```
steering = calculate_steering(cfg);

for (int i = 0; i < 8; ++i) {
    delay_lines[i].set_delay(
        steering.delays_samples[i]
    );
}
```

Die Fokusberechnung verwendet entsprechend Gleichung (14) die unterschiedlichen Ausbreitungswege zum gewünschten Fokuspunkt. Die Amplitudengewichtung der einzelnen Arrayelemente basiert auf Gleichung (16). Die berechneten Werte werden im Programm gemeinsam mit den Verzögerungen den entsprechenden Ausgangskanälen zugeordnet.

```
result.delays_samples[spk] =
    delays_seconds[i] * sample_rate;

result.weights[spk] =
    hann_weight(i, count, amount);
```

Neben dem normalen Betrieb mit einem gemeinsamen Beam kann das Array in zwei Gruppen mit jeweils vier Treibern aufgeteilt werden. Für beide Gruppen werden die Steering-Parameter unabhängig berechnet. Die gleiche Berechnungsstruktur wird somit für beide Schallstrahlen weiterverwendet.

**Bedienoberfläche** Die browserbasierte Benutzeroberfläche ist nach den praktischen Funktionen des Lautsprechers in fünf Bereiche gegliedert:

- *Main* für Gain, Mute und Presetverwaltung
- *Steering* für Strahlsteuerung und Simulation
- *Equalization* für Filter und Limiter
- *Test* für die Auswahl einzelner Ausgangskanäle
- *System* für Betriebszustand und Diagnose

Screenshots sämtlicher Seiten der Benutzeroberfläche sind in Anhang B dargestellt.

Änderungen werden unmittelbar an das Backend übertragen und benötigen keinen zusätzlichen Apply-Vorgang. Dadurch können Parameter insbesondere bei Einrichtung und Messung des Systems schnell verändert werden.

Auf der Steering-Seite werden neben Strahlrichtung, Fokussierungsdistanz und Nebenkeulenunterdrückung auch die geometrischen Randbedingungen der Simulation eingestellt. Dazu gehören die X- und Z-Position des Lautsprechers, dessen mechanischer Neigungswinkel sowie die Montageorientierung. Für eine invertierte Montage steht eine *Upside-down*-Funktion zur Verfügung.

Die Frequenz der dargestellten Schallfeldsimulation ist frei wählbar. Damit kann unmittelbar betrachtet werden, wie sich die Richtcharakteristik innerhalb des nutzbaren Frequenzbereichs verändert. Zusätzlich können Zuhörerbereiche in der X-Z-Ebene definiert werden. Diese dienen der räumlichen Orientierung bei der Ausrichtung des Schallstrahls und verändern die eigentliche DSP-Berechnung nicht.

Bei Bedarf kann ein zweiter Beam aktiviert und unabhängig hinsichtlich Winkel, Fokus und Shading eingestellt werden. Damit werden die im Ausgangskonzept geforderten wesentlichen Funktionen zur räumlichen Konfiguration innerhalb einer gemeinsamen Bedienoberfläche zusammengeführt.

Die Equalization-Seite stellt zusätzlich die resultierende elektrische DSP-Übertragungsfunktion dar. Diese Anzeige ist nicht mit dem akustischen Frequenzgang des Lautsprechers gleichzusetzen.

Die Steering-Seite verwendet für die grafische Darstellung das in Abschnitt 2.2.3 beschriebene Punktquellenmodell. Die Darstellung dient der qualitativen Beurteilung der Abstrahlung und stellt keine kalibrierte absolute Schalldruckprognose dar.

**Preset- und Systemverwaltung** Presets dienen dazu, häufig verwendete Systemzustände vollständig zu speichern und später wieder aufzurufen. Gespeichert werden die Gain-Einstellung, die Filter- und Limiterparameter sowie die Steering-Konfiguration mit Lautsprecherposition, Montageorientierung, Beam-Parametern und definierten Zuhörerbereichen.

Der Testmodus wird nicht gemeinsam mit einem normalen Preset gespeichert, da diese Funktion ausschließlich der Diagnose einzelner Ausgangskanäle dient.

Ein Preset kann zusätzlich als Startkonfiguration festgelegt werden. Dadurch kann der Lautsprecher nach dem Einschalten automatisch mit einer zuvor definierten Einstellung betrieben werden. Änderungen an einem geladenen Preset wirken zunächst nur auf den aktuellen Systemzustand und überschreiben die gespeicherte Konfiguration nicht automatisch.

DSP-Anwendung und Webserver werden beim Systemstart automatisch gestartet. Die zeitkritische Audioverarbeitung verbleibt vollständig innerhalb der C++-DSP-Anwendung. Netzwerkkommunikation, Benutzeroberfläche und Presetverwaltung werden außerhalb des Audiopfades ausgeführt.

**Installationspaket** Zur Vereinfachung und Reproduzierbarkeit der Softwareinstallation wurden sämtliche erforderlichen Bestandteile des Systems in einem gemeinsamen Installationspaket zusammengefasst:

`beam-speaker-release_20260731_123412.tar.gz`

Das Paket enthält die C++-DSP-Anwendung, die Weboberfläche, die erforderlichen Konfigurationsdateien sowie Skripte zur automatisierten Installation und Diagnose. Dadurch kann das vollständige Softwaresystem auf einem neu eingerichteten Raspberry Pi mit geringem manuellem Konfigurationsaufwand installiert werden.

# 3 Bau eines Prototyps

Für die Zielsetzung dieser Arbeit besitzt die praktische Durchführung eine zentrale Bedeutung, da aus den einzelnen Arbeitsschritten der Leitfaden für den reproduzierbaren Aufbau des Lautsprechersystems abgeleitet wird. In diesem Kapitel werden daher sämtliche für die praktische Umsetzung relevanten Schritte beschrieben, beginnend bei den benötigten Werkzeugen und Materialien über den mechanischen und elektrischen Aufbau bis hin zur Installation und Konfiguration der Software.

Neben dem tatsächlich realisierten Aluminiumgehäuse werden auch die wesentlichen Arbeitsschritte der ursprünglich vorgesehenen additiv gefertigten Gehäusevariante beschrieben. Der Schwerpunkt liegt jedoch auf der Umsetzung des aufgebauten Prototyps.

**Der gesamte Aufbau des Lautsprechers ist in einem dafür geeigneten technischen Arbeitsbereich durchzuführen. Der Arbeitsplatz sollte für Kinder und Haustiere unzugänglich sowie ausreichend belüftet sein. Bei mechanischen Bearbeitungs- und Montagearbeiten wird das Tragen einer geeigneten Schutzbrille und, sofern erforderlich, eines zusätzlichen Gesichtsschutzes empfohlen. Arbeiten an netzspannungsführenden Leitungen und geöffneten Netzteilen dürfen ausschließlich durch elektrotechnisch qualifizierte Personen und nur im spannungsfreien Zustand durchgeführt werden.**

## 3.1 Benötigte Ressourcen

### 3.1.1 Werkzeuge

Für den Aufbau des Lautsprechers werden unabhängig von der gewählten Gehäusevariante die in Tabelle 2 aufgeführten Werkzeuge benötigt.

Tabelle 2: Grundlegende Werkzeuge für den Aufbau

| **Werkzeug** |
|---|
| 3D-Drucker mit einer Druckfläche von mindestens 250 mm × 250 mm, einer 0,6 mm-Düse und Eignung für PET-CF-Filament |
| Lötkolben einschließlich Lötzubehör |
| Schrauber mit einem maximalen Drehmoment von mindestens 50 N m |
| Flachzange |
| Innensechskantschlüssel für M4-Schrauben |
| Kreuzschlitzschraubendreher |
| Schneidmesser |
| Hammer |
| Crimpzange |
| Kartuschenpistole für Dichtstoff |

Für die Herstellung der additiv gefertigten Gehäusevariante werden zusätzlich die in Tabelle 3 aufgeführten Werkzeuge benötigt.

Tabelle 3: Zusätzliche Werkzeuge für die additiv gefertigte Gehäusevariante

| **Werkzeug** |
|---|
| Eimer mit einem Fassungsvermögen von etwa 20 l |
| Rührquirl für den Schrauber |
| Holzbohrer mit 3,5 mm Durchmesser |
| Waage mit einem Messbereich bis mindestens 10 kg |

Bei Verwendung des Aluminiumgehäuses werden stattdessen die in Tabelle 4 aufgeführten zusätzlichen Werkzeuge benötigt.

Tabelle 4: Zusätzliche Werkzeuge für die Aluminiumvariante

| **Werkzeug** |
|---|
| Lochsäge für Aluminium mit 76 mm Durchmesser |
| Metallbohrer mit 3,5 mm Durchmesser |
| Gewindeschneidsatz M4 |
| Metall-Feilensatz |
| Andrückroller für viskoelastisches Dämpfungsmaterial |

### 3.1.2 Materialien und Komponenten

Die für den Aufbau des Lautsprechers erforderlichen elektronischen Komponenten, Verbindungselemente und Verbrauchsmaterialien sind in Tabelle 5 zusammengefasst.

Alle angegebenen Preise verstehen sich einschließlich Mehrwertsteuer und entsprechen dem Stand vom 20. August 2026. Versandkosten wurden nicht berücksichtigt.

Tabelle 5: Materialien und Komponenten für den Aufbau

| **Bauteil** | **Anzahl** | **Einzelpreis** | **Gesamtpreis** |
|---|---|---|---|
| Dayton Audio PC83-4 | 8 | 15,65 € | 125,20 € |
| WONDOM GAB8 | 1 | 79,00 € | 79,00 € |
| Raspberry Pi 5, 2 GB RAM | 1 | 68,90 € | 68,90 € |
| Raspberry Pi 27 W USB-C-Netzteil | 1 | 12,40 € | 12,40 € |
| SanDisk A1 UHS-I U3 Speicherkarte, 32 GB | 1 | 16,99 € | 16,99 € |
| HiFiBerry Studio ADC XLR | 1 | 71,84 € | 71,84 € |
| Mean Well LRS-350-24 | 1 | 35,30 € | 35,30 € |
| Neutrik NAC3MPA Buchse | 1 | 5,24 € | 5,24 € |
| Neutrik NA3 Durchgangsadapter | 1 | 8,90 € | 8,90 € |
| Seetronic SE8FDNH-13 Buchse | 1 | 7,50 € | 7,50 € |
| USB-A-auf-USB-C-Kabel, 15 cm | 1 | 3,00 € | 3,00 € |
| USB-C-auf-USB-C-Kabel, 25 cm | 1 | 3,00 € | 3,00 € |
| XLR-Kabel, 0,5 m | 1 | 8,35 € | 8,35 € |
| Ethernet-Cat5e-Kabel, 0,5 m | 1 | 5,00 € | 5,00 € |
| Stabilit Schwerlast-Winkelverbinder, 70×70×55 mm | 1 | 2,20 € | 2,20 € |
| Verbundschaumstoff Megapur, 50 × 50 × 3 cm | 2 | 12,95 € | 25,90 € |
| Kork-Dichtungspapier, 300 × 200 × 1 mm | 1 | 8,99 € | 8,99 € |
| Kabelschuh-Set, 0,5–6,0 $mm^2$ | 1 | 7,64 € | 7,64 € |
| Zweiadriges Kupferkabel, 1,3 $mm^2$ / 16 AWG, 10 m | 1 | 20,00 € | 20,00 € |
| Selbstklebender Filz, 1 mm, 40 × 200 cm | 1 | 12,99 € | 12,99 € |
| TV-Zapfen, 28 mm | 1 | 5,90 € | 5,90 € |
| Set aus 100 M4-Schrauben mit Muttern und Unterlegscheiben, 10 mm | 1 | 3,90 € | 3,90 € |
| Set aus 50 M4-Gewindeeinsätzen, $M4 \times 5 \times 4$ | 1 | 9,99 € | 9,99 € |
| Schraubensicherung, 5 ml | 1 | 9,93 € | 9,93 € |
| Neutrik SCDP-FX-9 Steckerdichtung | 3 | 1,87 € | 5,61 € |
| Dichtstoff 522 | 1 | 8,59 € | 8,59 € |
| Isopropanol, 1 l | 1 | 10,00 € | 10,00 € |
| **Gesamtkosten** | | | **582,26 €** |

Für die jeweilige Gehäusevariante kommen zusätzlich die folgenden materialspezifischen Kosten hinzu.

Tabelle 6: Zusätzliche Materialien für die additiv gefertigte Gehäusevariante

| **Material** | **Anzahl** | **Einzelpreis** | **Gesamtpreis** |
|---|---|---|---|
| Bambu Lab PET-CF, 1000 g | 3 | 90,99 € | 272,97 € |
| Alabastergips, 3 kg | 1 | 14,79 € | 14,79 € |
| PVA-Kleber, 1 l | 1 | 8,94 € | 8,94 € |
| **Zusätzliche Gesamtkosten** | | | **296,70 €** |

Tabelle 7: Zusätzliche Materialien für die Aluminiumvariante

| **Material** | **Anzahl** | **Einzelpreis** | **Gesamtpreis** |
|---|---|---|---|
| Bambu Lab PET-CF, 500 g | 1 | 47,00 € | 47,00 € |
| Aluminium-Vierkantrohr, 150 × 150 × 5 mm, Länge 1 m | 1 | 91,43 € | 91,43 € |
| Wärmeleitpad, 2,5 W/(m K), 100 × 100 × 5 mm | 1 | 6,99 € | 6,99 € |
| Selbstklebende Alubutyl-Dämmung, 2 mm, 0,5 $m^2$ | 1 | 13,00 € | 13,00 € |
| **Zusätzliche Gesamtkosten** | | | **158,42 €** |

Nach Abzug der ausschließlich für die Aluminiumvariante benötigten Materialien aus der allgemeinen Kostenaufstellung ergeben sich für die gemeinsamen Komponenten Basiskosten von etwa 582,26 €.

Damit liegen die geschätzten Gesamtkosten bei etwa 878,96 € für die additiv gefertigte Variante und bei etwa 740,68 € für die Aluminiumvariante. Versandkosten sind dabei nicht berücksichtigt.

### 3.1.3 Zeitaufwand

Der geschätzte Zeitaufwand unterscheidet sich deutlich zwischen der additiv gefertigten und der Aluminiumvariante. Dabei ist zwischen aktiver Arbeitszeit und passiven Wartezeiten zu unterscheiden.

Tabelle 8: Geschätzter Zeitaufwand für beide Gehäusevarianten

| **Arbeitsschritt** | **Additiv gefertigt** | **Aluminium** |
|---|---|---|
| Aktive Arbeitszeit | 12 h | 15 h |
| Druckzeit | 120 h | 8 h |
| Aushärte- und Wartezeit | 24 h | 1 h |
| **Gesamtzeit** | **156 h** | **24 h** |

Die Aluminiumvariante erfordert eine etwas längere aktive Arbeitszeit, da insbesondere die Lautsprecheröffnungen und Befestigungsbohrungen mechanisch hergestellt werden müssen.

Bei der additiv gefertigten Variante entsteht der größte Zeitaufwand dagegen durch die hohe Anzahl zu druckender Bauteile. Zusätzlich ist nach dem Befüllen der Hohlräume eine ausreichende Aushärtezeit der Gipsmischung erforderlich.

Die Gesamtzeit stellt dabei nicht die tatsächlich aufzuwendende Arbeitszeit dar, sondern umfasst auch Druck-, Aushärte- und sonstige Wartezeiten.

## 3.2 Mechanischer Aufbau

### 3.2.1 Additiv gefertigte Gehäusevariante

Im Rahmen mehrerer Probedrucke wurden geeignete Druckparameter für die unterschiedlichen Gehäusebauteile bestimmt. Für sämtliche Teile wurde eine Schichthöhe von 0,3 mm verwendet.

Die Verbindungspins, mit denen die einzelnen Gehäusesegmente miteinander verriegelt werden, werden mit 100 % Infill und einem konzentrischen Füllmuster gedruckt. Dadurch wird eine möglichst hohe mechanische Belastbarkeit dieser Verbindungselemente erreicht.

Für die obere und untere Abdeckung werden ebenfalls 100 % Infill, ein Grid-Füllmuster sowie sechs Wandlinien verwendet. Für die übrigen Gehäuseteile hat sich ein Infill von 60 % mit Gyroid-Struktur als geeigneter Kompromiss zwischen Bauteilsteifigkeit, Druckstabilität und Materialbedarf erwiesen. Abbildung 22 zeigt die im Rahmen der Parameterbestimmung angefertigten Probedrucke.



Abbildung 22: Probedrucke der Verbindungspins

Quelle: Eigene Darstellung.

**Montage und Abdichtung** Wie bereits im Materialkonzept beschrieben, sollten sämtliche Verbindungsstellen während der Montage mit einem für PET-CF geeigneten Dichtstoff abgedichtet werden. Dadurch wird sowohl ein Austreten der später eingebrachten Gipsmischung als auch eine akustisch relevante Undichtigkeit des geschlossenen Gehäuses vermieden.

Die Gipsfüllung sollte erst nach vollständiger Montage des Gehäusekörpers und nach dem Aushärten des Dichtstoffs eingebracht werden. Dadurch wird verhindert, dass sich noch nicht ausreichend fixierte Bauteile während des Vergusses verschieben oder verformen.

**Herstellung und Einbringen der Gipsfüllung** Für das vollständige Gehäuse sollten etwa 5 kg der zuvor beschriebenen Gipsmischung vorbereitet werden. Als Mischungsverhältnis werden auf jeweils 1000 g Alabastergips etwa 600 ml Wasser und 150 ml PVA-Kleber verwendet.

Die Mischung muss gründlich verrührt werden, um Klumpenbildung zu vermeiden. Während des Einfüllens sollte das Gehäuse wiederholt vorsichtig abgeklopft beziehungsweise bewegt werden, damit eingeschlossene Luft entweichen und die Mischung auch kleinere Hohlräume vollständig ausfüllen kann.

Da die verwendete Mischung bereits nach etwa 20 min deutlich anzusteifen beginnt, sollte der Verguss unmittelbar nach dem Anmischen durchgeführt werden. Bei kleinen Einfüllöffnungen kann eine geeignete Einfüllhilfe beziehungsweise ein Trichter verwendet werden.

Nach dem Verguss sollte das Gehäuse mindestens 24 h unbewegt aushärten, bevor mit der weiteren mechanischen Bearbeitung begonnen wird.

**Nachbearbeitung und Befestigungspunkte** Nach dem Aushärten können erforderliche Bohrungen mit einem geeigneten Holz- beziehungsweise Kunststoffbohrer eingebracht werden.

Bei weniger stark belasteten Befestigungspunkten können Schrauben direkt in dafür vorgesehene Kunststoffbereiche eingeschraubt werden, wodurch sich beim ersten Einschrauben ein entsprechender Gewindegang im Material ausbildet.

Für häufig gelöste oder stärker belastete Schraubverbindungen werden dagegen Messing-Gewindeeinsätze verwendet. Dies betrifft insbesondere die oberen und unteren Flansche.

Die Gewindeeinsätze werden mit einem Lötkolben kontrolliert in die dafür vorgesehenen Aufnahmen eingeschmolzen. Die Temperatur sollte dabei nur so hoch gewählt werden, dass das umgebende Material ausreichend plastisch wird, ohne die Geometrie des Bauteils unnötig zu verformen. Abbildung 23 zeigt einen Flansch mit eingesetzten Gewindeeinsätzen.



Abbildung 23: 3D-gedruckter Flansch mit eingesetzten Messing-Gewindeeinsätzen

Quelle: Eigene Darstellung.

### 3.2.2 Aluminiumgehäuse

Sämtliche für die Aluminiumvariante vorgesehenen Kunststoffbauteile werden nach den im vorhergehenden Abschnitt beschriebenen Druckparametern gefertigt. Dies betrifft insbesondere die Flansche, Abdeckungen und Abstandshalter. Die Messing-Gewindeeinsätze werden ebenfalls wie zuvor beschrieben in die dafür vorgesehenen Aufnahmen eingeschmolzen.

**Übertragen und Bohren der Gehäuseöffnungen** Als erster Bearbeitungsschritt wird die maßstäbliche Bohrschablone sorgfältig auf einer der Außenflächen des Aluminiumprofils ausgerichtet und fixiert. Anschließend werden sämtliche Bohrpunkte angekörnt. Dadurch bleiben die Positionen auch dann erhalten, wenn die aufgeklebte Schablone während der weiteren Bearbeitung beschädigt oder entfernt wird.

Die Lautsprecheröffnungen werden mit einer geeigneten Lochsäge für Aluminium hergestellt. Um ein Verkanten der Lochsäge und eine übermäßige Erwärmung zu vermeiden, sollte mit niedriger Drehzahl, gleichmäßigem Vorschub und einem für Aluminium geeigneten Bohr- oder Schneidmittel gearbeitet werden.

Die Befestigungsbohrungen für die Lautsprechertreiber werden mit einem Metallbohrer von 3,5 mm Durchmesser hergestellt. Nach Abschluss der Bohrarbeiten müssen sämtliche Schnitt- und Bohrkanten sorgfältig entgratet werden. Hierfür können Feilen verwendet werden. Abbildung 24 zeigt eine fertiggestellte Lautsprecheröffnung.

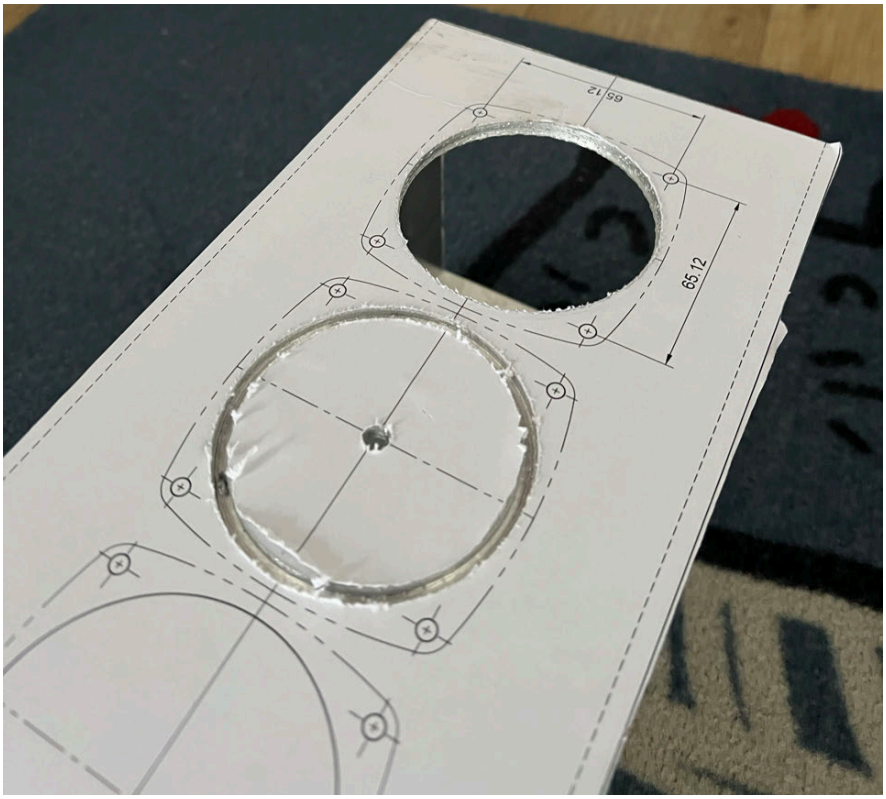



Abbildung 24: Lautsprecheröffnung im Aluminiumgehäuse

Quelle: Eigene Darstellung.

**Bohrungen für Einbauteile und Befestigung** Nach der Herstellung der Lautsprecheröffnungen können die Befestigungspositionen der weiteren Komponenten auf das Gehäuse übertragen werden.

Die 3D-gedruckten Abstandshalter für Raspberry Pi und Verstärkermodul werden hierzu an der unteren Seitenfläche des Gehäuses positioniert und die entsprechenden Bohrpunkte markiert. Die Befestigungsbohrungen werden ebenfalls mit einem 3,5 mm-Metallbohrer hergestellt.

Auf der gegenüberliegenden Gehäuseseite werden die Bohrungen für die Befestigung des Netzteils vorgesehen. In diesem Arbeitsschritt können gleichzeitig die Bohrungen für die mechanische Lautsprecherhalterung hergestellt werden.

Beim aufgebauten Prototyp wurde der TV-Zapfen an der Rückseite des Gehäuses befestigt. Der Befestigungspunkt befindet sich etwa 350 mm oberhalb der unteren Gehäusekante. Die Lage sämtlicher Befestigungsbohrungen ist in Abbildung 25 dargestellt.

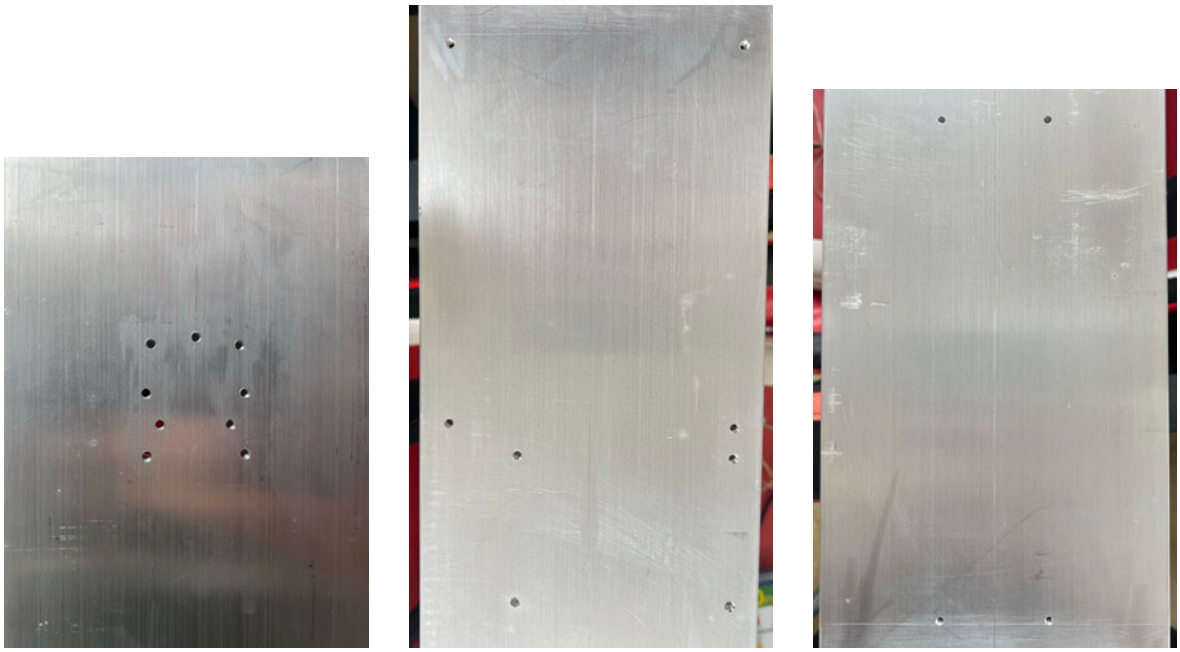


Abbildung 25: Befestigungsbohrungen für TV-Zapfen, Abstandshalter und Netzteil

Quelle: Eigene Darstellung.

**Gewinde und Oberflächenvorbereitung** Nach Abschluss sämtlicher Bohrarbeiten werden in die vorgesehenen Befestigungsbohrungen M4-Gewinde geschnitten. Dies betrifft sowohl die Befestigung der Lautsprechertreiber als auch die Verschraubungen der Abstandshalter, des Netzteils und der mechanischen Halterung.

Beim Gewindeschneiden sollte auch ein Schneidmittel verwendet werden. Dadurch werden Reibung und Werkzeugbelastung reduziert und die Herstellung sauberer Gewindegänge erleichtert.

Nach der mechanischen Bearbeitung müssen sämtliche Metallspäne vollständig aus dem Gehäuse entfernt werden. Anschließend werden die Innen- und Außenflächen, insbesondere die späteren Klebe- und Dichtflächen, mit Isopropanol gereinigt und entfettet.

**Montage der Flansche** Nach der Reinigung können die zuvor gedruckten oberen und unteren Flansche eingesetzt werden. Die Verbindung mit dem Aluminiumprofil erfolgt mit dem vorgesehenen Dichtstoff. Dieser übernimmt gleichzeitig die mechanische Fixierung und die luftdichte Abdichtung der Verbindungsstelle.

Beim Einsetzen ist auf eine gleichmäßige und rechtwinklige Positionierung des Flansches gegenüber dem Aluminiumprofil zu achten. Bei Bedarf kann der Flansch vorsichtig mit einem Hammer und einer geeigneten Zwischenlage vollständig in seine vorgesehene Position gebracht werden.

Nach dem Einsetzen muss der Dichtstoff entsprechend seiner Verarbeitungszeit aushärten. Für den im Prototyp verwendeten Dichtstoff wurde vor der weiteren Bearbeitung eine Wartezeit von mindestens einer Stunde vorgesehen.

### 3.2.3 Dämpfung, Absorption und Abdichtung

Nach Abschluss der mechanischen Bearbeitung werden das Gehäuse abgedichtet sowie Maßnahmen zur Bedämpfung der Aluminiumflächen und des inneren Schallfeldes durchgeführt.

Wie bereits in Abschnitt 2.2.4 beschrieben, erfüllen diese Maßnahmen unterschiedliche Aufgaben und sollten daher getrennt betrachtet werden.

**Abdichtung der Anschlüsse und Gehäusedeckel** Die drei externen Anschlüsse werden in die dafür vorgesehenen Öffnungen der unteren Gehäuseabdeckung eingesetzt. Zwischen Steckverbinder und Abdeckung wird jeweils eine passende Steckerdichtung eingelegt. Anschließend werden die Buchsen mit den vorgesehenen Befestigungsschrauben gleichmäßig angezogen.

Für die endgültige Ausführung ist die Verwendung eines abgedichteten XLR-Durchgangsadapters vorgesehen. Beim aufgebauten Prototyp stand jedoch lediglich eine konventionelle XLR-Buchse mit offener Rückseite zur Verfügung. Zur Herstellung einer luftdichten Verbindung wurde deshalb zunächst das interne XLR-Kabel an die Buchse angelötet.

Das Kabel wurde anschließend durch eine dafür vorgesehene 3D-gedruckte Abdeckung geführt. Diese wurde mit Dichtstoff luftdicht an der Rückseite der Anschlussbuchse beziehungsweise der Gehäuseabdeckung befestigt. Dadurch konnte die offene Rückseite der verwendeten Buchse gegenüber dem Gehäuseinnenraum abgedichtet werden. Abbildung 26 zeigt die fertiggestellte untere Abdeckung mit den externen Anschlüssen.



Abbildung 26: Untere Gehäuseabdeckung mit den externen Anschlüssen

Quelle: Eigene Darstellung.

Die obere und untere Abdeckung werden ebenfalls gegenüber den Flanschen abgedichtet. Hierfür kann eine Dichtung aus 1 mm starkem Kork-Dichtungspapier verwendet werden, die entsprechend dem inneren Konturverlauf des Flansches zugeschnitten wird.

Beim Prototyp wurden alternativ 3D-gedruckte Dichtungen aus elastischem TPU 90A verwen-

det, wie in Abbildung 27 dargestellt. Die zugehörige 3D-Datei ist Bestandteil der bereitgestellten Gehäusedaten. Durch die elastische Dichtung wird beim Verschrauben ein gleichmäßiger Anpressdruck zwischen Deckel und Flansch erzeugt.

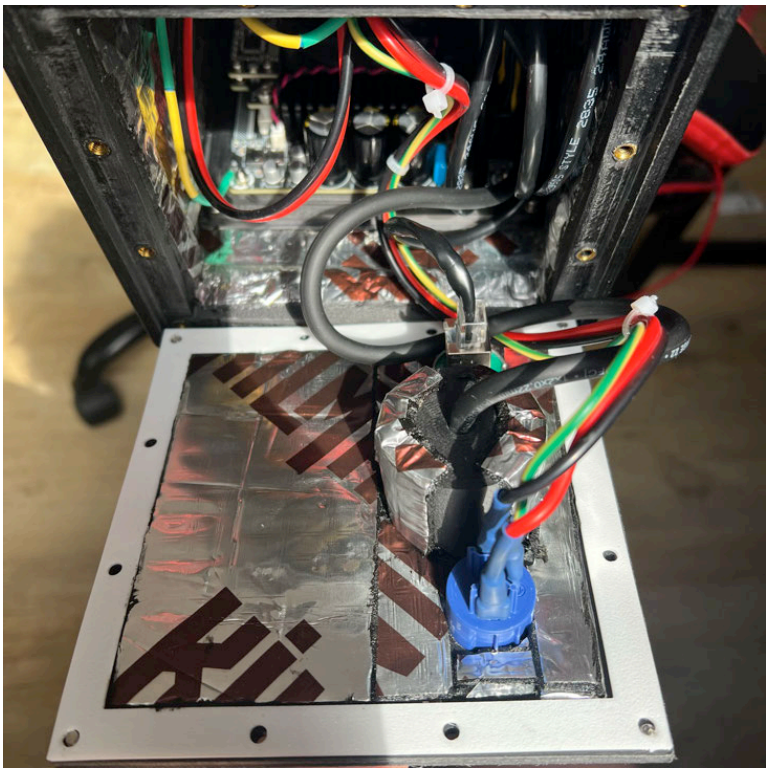


Abbildung 27: 3D-gedruckte Dichtung aus TPU 90A

Quelle: Eigene Darstellung.

Zusätzlich kann die äußere Gehäuseoberfläche mit selbstklebendem Filz beklebt werden. Neben der optischen Aufwertung des Gehäuses verbessert die weiche Zwischenschicht die flächige Auflage der Lautsprecherränder auf der Gehäuseoberfläche und kann dadurch kleine Unebenheiten im Bereich der Montageflächen ausgleichen.

Für den Prototyp wird ein Filzzuschnitt von etwa 1020 mm × 700 mm verwendet. Die Verklebung beginnt an einer Seitenfläche und wird anschließend umlaufend über die Gehäuseflächen fortgeführt. Überstehendes Material wird nach vollständigem Aufbringen entlang der Gehäusekanten sauber abgeschnitten.

Erst nach dem Aufkleben des Filzes werden die Öffnungen für Befestigungsschrauben und Lautsprechertreiber freigelegt. Die Lautsprecheröffnungen werden dabei nicht vollständig kreisförmig ausgeschnitten. Stattdessen wird der Filz im Bereich der Öffnung kreuzförmig eingeschnitten und die entstehenden Segmente nach innen umgelegt.

Dadurch entsteht im Bereich des Lautsprecherrandes eine weiche, durchgehende Auflagefläche. Beim Verschrauben des Treibers wird der Filz zwischen Chassisrand und Gehäuse komprimiert und unterstützt damit eine möglichst gleichmäßige und dichte Montage. Abbildung 28 zeigt den Montagebereich vor und nach dem Aufbringen der Filzschicht.

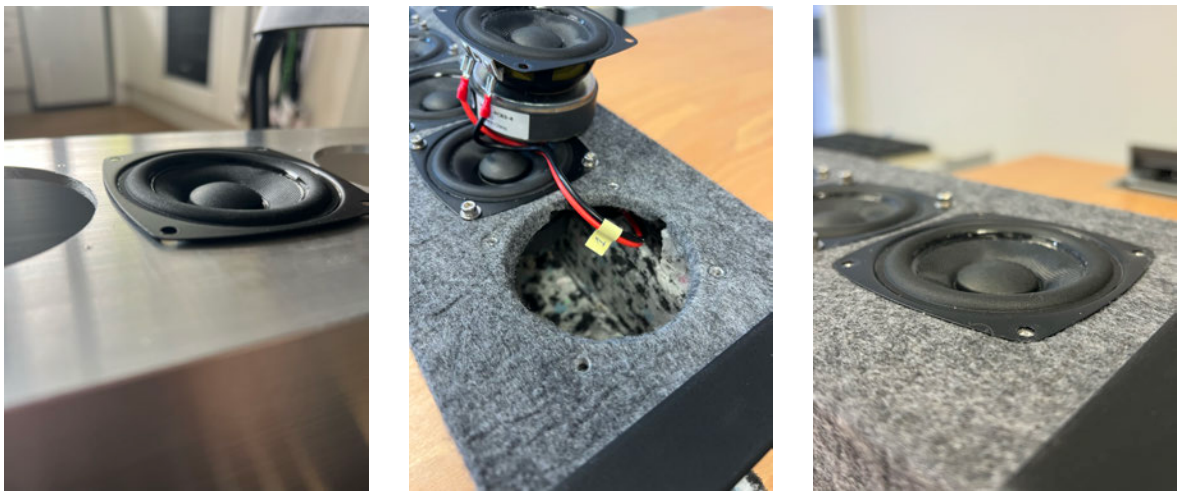


Abbildung 28: Montagebereich eines Lautsprechertreibers vor und nach dem Aufbringen der Filzschicht

Quelle: Eigene Darstellung.

**Viskoelastische Dämpfung des Aluminiumgehäuses** Nachdem die Positionen sämtlicher elektronischer Komponenten und Befestigungspunkte festgelegt wurden, können die verbleibenden freien Innenflächen mit Alubutyl ausgekleidet werden.

Auf den Wandflächen werden zwei Lagen des jeweils 2 mm starken Materials aufgebracht. Jede Lage sollte nach dem Aufkleben mit einem Andrückroller sorgfältig und vollflächig angepresst werden. Dadurch wird ein möglichst enger mechanischer Kontakt zwischen Aluminiumwand und Dämpfungsschicht hergestellt.

Auf der oberen und unteren Abdeckung können aufgrund ihrer vergleichsweise frei schwingenden Fläche zusätzlich drei bis vier Lagen aufgebracht werden. Ziel der viskoelastischen Beschichtung ist es, angeregte Schwingungen der Aluminiumflächen stärker zu bedämpfen und deren Ausschwingen zu reduzieren.

Die Übergänge zwischen Flansch und Aluminiumprofil können zusätzlich mit kleinen Streifen des Dämpfungsmaterials überdeckt werden. Gleiches gilt für mechanische Durchführungen im Bereich der Halterung. Abbildung 29 zeigt die ausgekleideten Innenflächen.

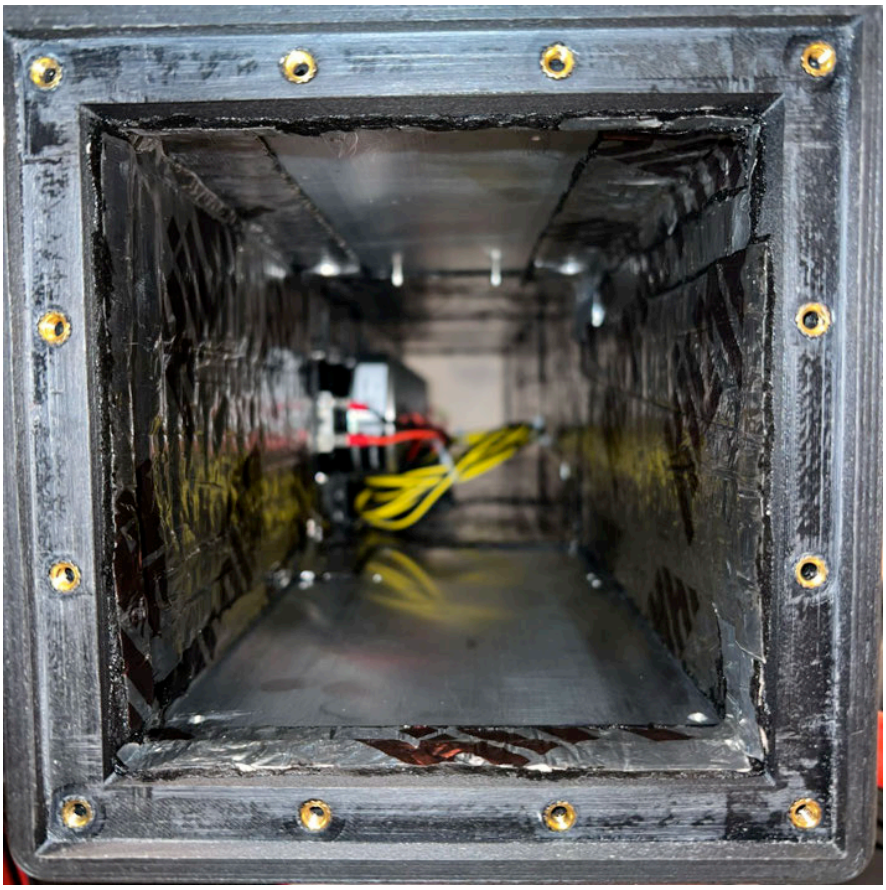


Abbildung 29: Innenflächen des Aluminiumgehäuses mit viskoelastischer Dämpfung

Quelle: Eigene Darstellung.

**Absorption im Gehäuseinnenraum** Zur Bedämpfung interner Reflexionen und stehender Wellen wird Verbundschaumstoff als poröses Absorptionsmaterial in das freie akustische Volumen eingebracht.

Der Verbundschaumstoff wird ausschließlich in den für die Lautsprechertreiber vorgesehenen Gehäusebereich eingebracht. Der Bereich der Elektronik bleibt frei, damit die Kühlung der elektronischen Komponenten nicht behindert wird. Auch unmittelbar hinter den Lautsprechermembranen muss ausreichend freier Raum erhalten bleiben.

Das verbleibende freie Volumen kann anschließend möglichst gleichmäßig mit dem Absorptionsmaterial ausgefüllt werden. Eine starke Verdichtung des Materials ist dabei nicht erforderlich, da dessen akustische Wirkung auf der Luftbewegung innerhalb der porösen Struktur beruht.

Neben der Bedämpfung interner Resonanzen kann eine solche Füllung bei einem geschlossenen Lautsprechergehäuse auch zu einer Erhöhung des akustisch wirksamen Volumens führen. Die Größe dieses Effekts hängt jedoch vom verwendeten Material, dessen Menge und Packungsdichte ab und sollte daher nicht als fester Prozentwert verallgemeinert werden. Abbildung 30 zeigt den mit Verbundschaumstoff gefüllten Gehäuseinnenraum.



Abbildung 30: Innenraum des Lautsprechergehäuses mit Verbundschaumstoff

Quelle: Eigene Darstellung.

## 3.3 Elektrischer Aufbau

Sämtliche mechanisch belasteten Schraubverbindungen, insbesondere zur Befestigung der Lautsprechertreiber, der elektronischen Komponenten und des TV-Zapfens, werden mit Schraubensicherung montiert. Dadurch soll verhindert werden, dass sich die Verbindungen durch die beim Betrieb auftretenden Vibrationen selbstständig lösen.

Hierfür wird unmittelbar vor dem endgültigen Anziehen eine kleine Menge Schraubensicherung entweder auf das Schraubengewinde oder in das entsprechende Gewinde eingebracht. Die Schraubensicherung dient dabei primär der Sicherung der Verbindung. Abbildung 31 zeigt das Aufbringen der Schraubensicherung vor der Montage.

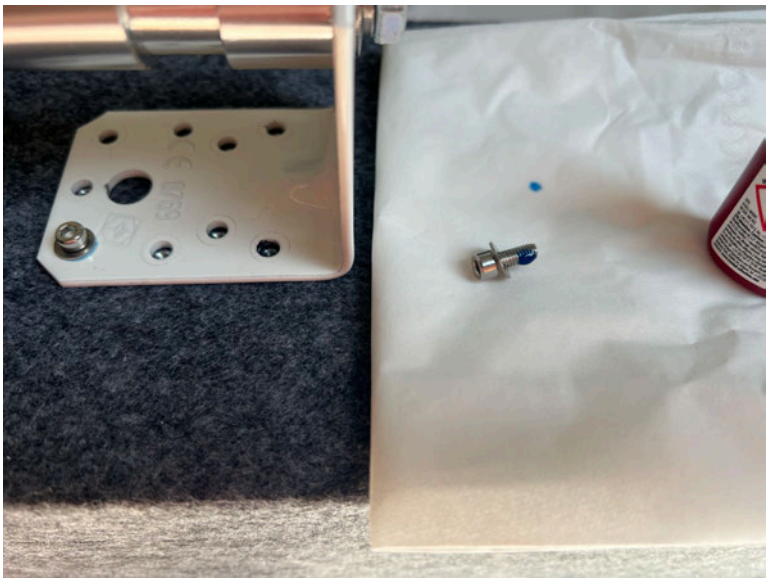


Abbildung 31: Aufbringen der Schraubensicherung vor der Montage

Quelle: Eigene Darstellung.

### 3.3.1 Verdrahtung

Zunächst werden die vom Verstärkermodul zu den Lautsprechertreibern führenden Leitungen entsprechend dem Anschlussplan in Abbildung 19 vorbereitet. Die vorhandenen Ausgangsleitungen des Verstärkers werden bei Bedarf durch Löten verlängert und die Leitungsenden anschließend mit geeigneten Kabelschuhen beziehungsweise Crimpkontakten versehen.

Die Kanalzuordnung folgt der im Anschlussplan festgelegten Nummerierung. Der oberste Lautsprechertreiber entspricht Kanal 1, der unterste Kanal 8. Beide Enden jeder Lautsprecherleitung werden entsprechend nummeriert, um Verwechslungen bei der späteren Montage zu vermeiden.

Die Leitungen werden entlang einer seitlichen Kante der Frontseite geführt und so verlegt, dass sie den Einbau der Lautsprecher und der übrigen Komponenten möglichst wenig behindern.

Nach demselben Prinzip werden die Versorgungsleitungen zwischen Verstärkermodul und Netzteil sowie zwischen Netzteil und PowerCON-Anschluss vorbereitet. Bei allen netzspannungsführenden Verbindungen ist der Schutzleiter PE zwingend anzuschließen. Er stellt im Fehlerfall die Schutzerdung berührbarer leitfähiger Gehäuseteile sicher.

Um den verfügbaren Bauraum im Gehäuse besser auszunutzen, wurde das Netzteil des Raspberry Pi demontiert und dessen Platine in ein kleines 3D-gedrucktes Gehäuse eingesetzt.

Die Leitungen für Phase und Neutralleiter wurden auf der einen Seite direkt mit der Netzteilplatine verlötet und auf der anderen Seite an die entsprechenden Anschlüsse des Hauptnetzteils angeschlossen. Dadurch werden beide Netzteile über denselben Netzanschluss versorgt.

Zur kompakten und sicheren Positionierung im Gehäuse werden beide Netzteile anschließend mit Kabelbindern miteinander fixiert. Abbildung 32 zeigt die so vorbereitete Baugruppe.

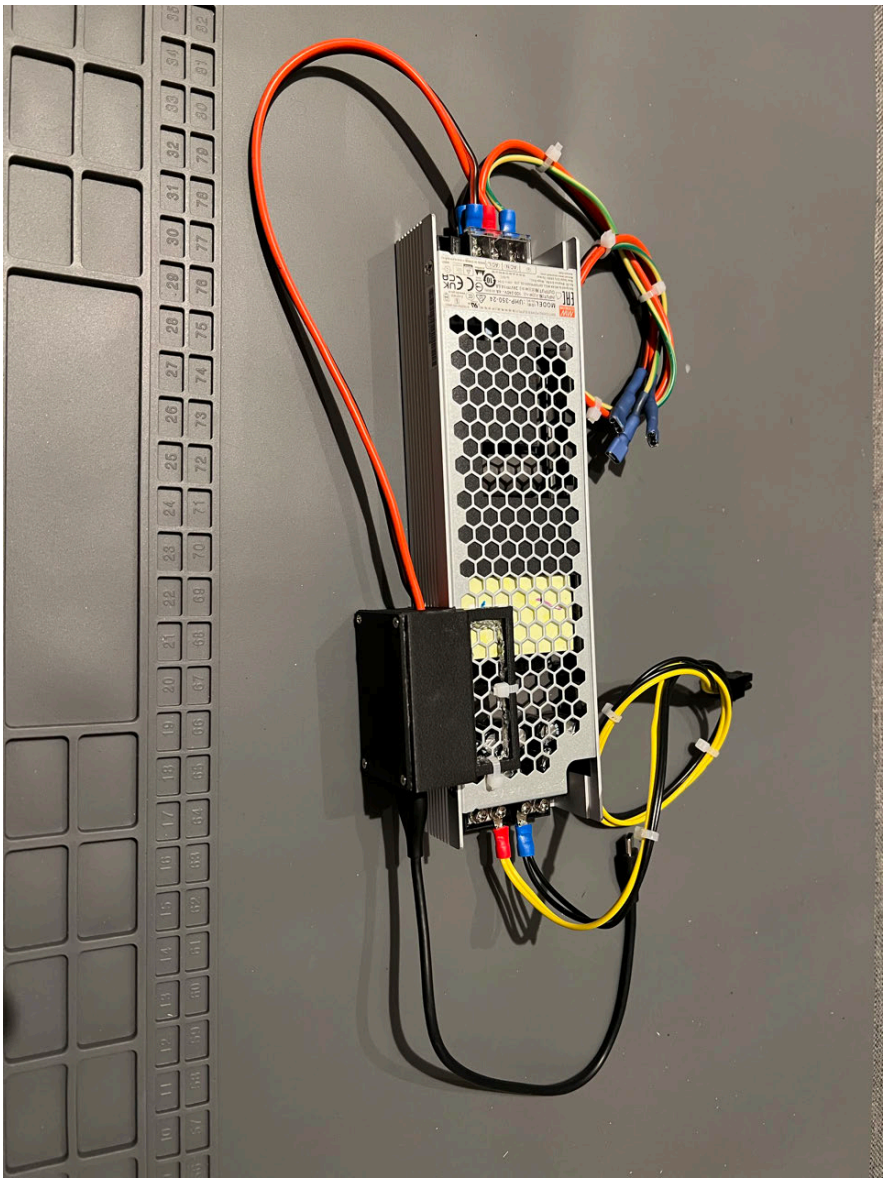


Abbildung 32: Vorbereitete Netzteile für die Montage im Gehäuse

Quelle: Eigene Darstellung.

### 3.3.2 Integration der Elektronik und Anschluss

Zunächst werden Raspberry Pi und Verstärkermodul mit den vorgesehenen Schrauben und Muttern auf den zuvor montierten Abstandshaltern befestigt.

Da sowohl der Raspberry Pi als auch das Verstärkermodul während des Betriebs Wärme erzeugen und im geschlossenen Gehäuse keine aktive Luftführung vorgesehen ist, wird das Aluminiumgehäuse zusätzlich zur Wärmeableitung genutzt. Die Höhe der Abstandshalter beträgt etwa 4,9 mm. Zwischen wärmeführenden Bereichen der Leiterplatten und der Aluminiumwand kann daher ein 5 mm starkes Wärmeleitpad eingesetzt werden.

Vor dem Aufbringen der Wärmeleitpads werden die entsprechenden Kontaktflächen mit Isopropanol gereinigt und entfettet. Dadurch wird ein möglichst vollständiger thermischer Kontakt zwischen Wärmeleitpad und Aluminiumoberfläche erreicht. Abbildung 33 zeigt die mit Wärmeleitpads versehenen Baugruppen.

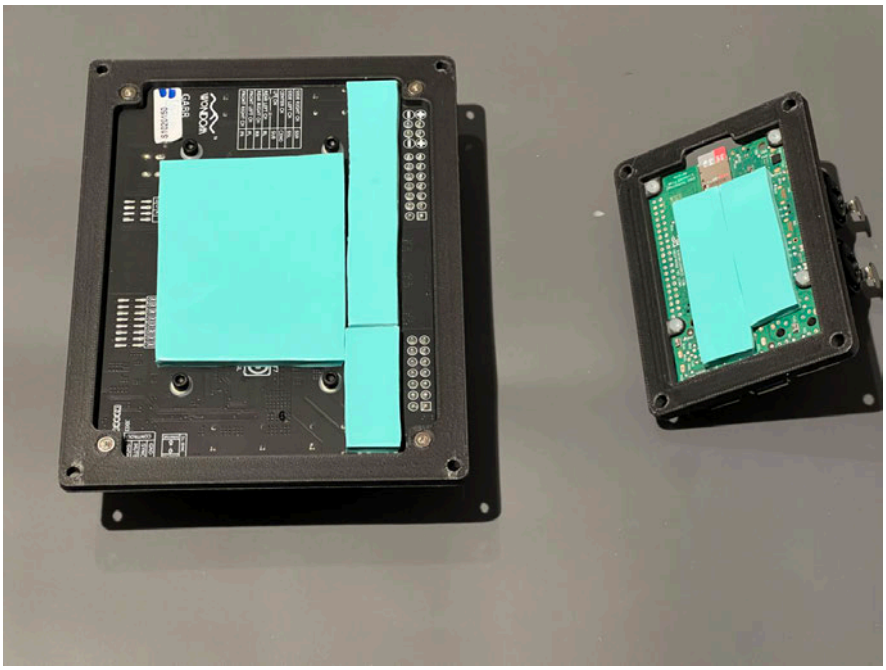


Abbildung 33: Wärmeleitpads an den elektronischen Baugruppen

Quelle: Eigene Darstellung.

Vor der endgültigen Montage des Raspberry Pi wird das kurze USB-A-auf-USB-C-Kabel angeschlossen, da der entsprechende Anschluss nach dem Einsetzen der Baugruppe nur noch eingeschränkt zugänglich ist.

Anschließend werden zunächst der Raspberry Pi und danach das Verstärkermodul im Gehäuse befestigt. Die vorbereiteten Netzteile werden ebenfalls an den vorgesehenen Befestigungspunkten montiert.

Der Schutzleiter der Netzversorgung wird mit den dafür vorgesehenen Schutzleiteranschlüssen verbunden. Sofern Netzteilgehäuse und Aluminiumgehäuse elektrisch leitend miteinander verbunden werden, müssen sämtliche berührbaren metallischen Gehäuseteile zuverlässig in das Schutzleitersystem einbezogen werden.

Die übrigen Audio-, USB-, Netzwerk- und Versorgungsleitungen werden entsprechend Abbildung 19 angeschlossen. Signalführende Leitungen werden dabei soweit wie konstruktiv möglich von netzspannungs- und leistungsführenden Leitungen getrennt geführt. Dadurch wird die Einkopplung elektromagnetischer Störungen in den Audiopfad reduziert.

### 3.3.3 Prüfung der Lautsprecherpolarität

Vor der endgültigen Montage der Lautsprechertreiber wird deren elektrische Polarität überprüft. Dieser Arbeitsschritt ist für ein Beam-Steering-Array besonders relevant, da ein verpolter Lautsprechertreiber die vorgesehene Interferenz zwischen den Arrayelementen und damit die resultierende Richtcharakteristik deutlich beeinflussen kann.

Die Prüfung kann mit einer 9 V-Batterie durchgeführt werden. Hierzu wird die Gleichspannung jeweils kurzzeitig unter Beachtung der vorgesehenen Polarität an den entsprechenden Lautsprecherkanal angelegt.

Bei korrekter Polarität müssen sich die Membranen aller acht Lautsprechertreiber bei gleicher Anschlussrichtung in dieselbe Richtung bewegen. Für den vorgesehenen Anschluss wird eine

Bewegung der Membran nach außen als positive Polarität verwendet.

Die Gleichspannung darf nur kurzzeitig angelegt werden, da eine dauerhafte Gleichstrombelastung zu einer unnötigen Erwärmung der Schwingspule führt.

Erst nachdem die Polarität sämtlicher Lautsprechertreiber überprüft wurde, werden diese endgültig im Gehäuse verschraubt.

Nach Abschluss der Verdrahtung kann die Spannungsversorgung erstmals eingeschaltet werden. Leuchten die vorgesehenen Statusanzeigen des Raspberry Pi und des Verstärkermoduls auf und treten keine auffälligen Betriebszustände auf, ist die grundlegende elektrische Versorgung hergestellt.

Eine vollständige Funktionsprüfung des Audiosystems erfolgt erst nach der Installation und Konfiguration der Software. Die obere und untere Gehäuseabdeckung sollten daher erst nach Abschluss der notwendigen Kontrollen endgültig verschlossen werden.

## 3.4 Softwareinstallation und Systemkonfiguration

Für die Installation wird eine neu eingerichtete Installation von Raspberry Pi OS vorausgesetzt. Bei der Einrichtung wird für das Benutzerkonto der Name `speaker` verwendet. Der Raspberry Pi muss zunächst mit einem Netzwerk verbunden und der SSH-Zugriff aktiviert werden.

Für die Installation wird das in Abschnitt 2.4.3 beschriebene Installationspaket verwendet.

`beam-speaker-release_20260731_123412.tar.gz`

Dieses enthält den C++-Quellcode der Signalverarbeitung, die Weboberfläche, die Systemkonfiguration sowie Skripte zur Installation, Diagnose und Aktualisierung des Systems.

### 3.4.1 Installation der Software

Zunächst wird das Installationspaket vom Steuercomputer auf den Raspberry Pi übertragen. Der folgende Befehl wird auf dem Steuercomputer ausgeführt. Dabei ist `<IP-Adresse>` durch die aktuelle IP-Adresse des Raspberry Pi zu ersetzen:

```
scp beam-speaker-release_20260731_123412.tar.gz \
speaker@<IP-Adresse>:/home/speaker/
```

Beispielsweise:

```
scp beam-speaker-release_20260731_123412.tar.gz \
speaker@192.168.178.50:/home/speaker/
```

Anschließend wird eine SSH-Verbindung zum Raspberry Pi hergestellt:

```
ssh speaker@<IP-Adresse>
```

Alle weiteren Befehle werden direkt auf dem Raspberry Pi ausgeführt.

Zunächst wird in das Benutzerverzeichnis gewechselt und das Installationspaket entpackt:

```
cd ~

tar -xzf beam-speaker-release_20260731_123412.tar.gz

cd beam-speaker-release_20260731_123412
```

Die Installation wird anschließend mit Administratorrechten gestartet:

```
sudo ./install.sh
```

Das Installationsskript führt die wesentlichen Einrichtungsschritte automatisch aus. Dazu gehören:

- Installation der erforderlichen Systempakete
- Installation der Python-Abhängigkeiten
- Kompilierung der C++-DSP-Anwendung
- Einrichtung der Weboberfläche
- Einrichtung der systemd-Dienste
- Konfiguration der HiFiBerry- und GAB8-Audioschnittstellen
- Einrichtung des WLAN-Access-Points
- Konfiguration der Ethernet-Schnittstelle
- Aktivierung des automatischen Softwarestarts

Während der Installation werden die einzelnen Arbeitsschritte im Terminal ausgegeben. Nach erfolgreicher Einrichtung sollten unter anderem folgende Dienste als aktiv angezeigt werden:

```
DSP:       active
Web:       active
Wi-Fi AP:  active
DHCP:      active
```

Zusätzlich werden die erkannten Audioein- und -ausgabegeräte ausgegeben.

### 3.4.2 Neustart und WLAN-Verbindung

Nach Abschluss der Installation wird der Raspberry Pi neu gestartet:

```
sudo reboot
```

Die bestehende SSH-Verbindung wird dabei automatisch getrennt. Nach dem Neustart werden sowohl die DSP-Anwendung als auch die Weboberfläche automatisch gestartet.

Der Raspberry Pi stellt anschließend ein eigenes WLAN bereit:

```
SSID:     BeamSpeaker
Passwort: 12345678
```

Der Steuercomputer, ein Tablet oder ein Smartphone kann direkt mit diesem Netzwerk verbunden werden. Die Weboberfläche ist anschließend unter folgender Adresse erreichbar:

```
http://192.168.4.1:8000
```

Auf dem verwendeten Bediengerät ist keine zusätzliche Software erforderlich. Die vollständige Steuerung erfolgt über einen Webbrowser.

### 3.4.3 Diagnose der Installation

Nach der Installation kann die korrekte Einrichtung des Systems über das bereitgestellte Diagnoseskript überprüft werden.

Hierzu wird erneut eine SSH-Verbindung hergestellt:

```
ssh speaker@192.168.4.1
```

Anschließend wird das Diagnoseskript ausgeführt:

```
cd ~/beam-speaker-release_20260731_123412
```

```
sudo ./diagnose.sh
```

Bei einer korrekt eingerichteten Installation sollten insbesondere folgende Komponenten mit `[ OK ]` bestätigt werden:

- DSP binary
- `config.json`
- FastAPI backend
- HiFiBerry ADC
- GAB8
- `beam-dsp.service`
- `beam-web.service`
- `hostapd`
- `dnsmasq`
- `nftables`
- `wlan0`
- Web API

Das Diagnoseskript prüft damit sowohl die Verfügbarkeit der Audioschnittstellen als auch die relevanten Netzwerk- und Systemdienste. Zusätzlich wird kontrolliert, ob die DSP-Anwendung ihren Betriebszustand ordnungsgemäß bereitstellt.

### 3.4.4 Alternative Verbindung über Ethernet

Neben dem integrierten WLAN-Access-Point kann der Lautsprecher auch direkt über Ethernet gesteuert werden. Für diese Verbindung verwendet der Raspberry Pi die feste Adresse

```
192.168.50.1
```

Bei einer direkten Ethernet-Verbindung kann am Steuercomputer beispielsweise folgende statische Netzwerkkonfiguration verwendet werden:

```
IP-Adresse:    192.168.50.10
Subnetzmaske:  255.255.255.0
```

Die Weboberfläche ist anschließend unter

```
http://192.168.50.1:8000
```

erreichbar.

Wird der Raspberry Pi stattdessen über Ethernet mit einem bestehenden Netzwerk oder Router verbunden, kann die Schnittstelle zusätzlich eine IP-Adresse über DHCP beziehen.

### 3.4.5 Funktionstest

Nach Abschluss der Installation kann die grundlegende Funktion des Systems direkt über die Weboberfläche überprüft werden. Hierzu wird ein Audiosignal an den Audioeingang des Lautsprechers angeschlossen und die Weboberfläche unter

`http://192.168.4.1:8000`

geöffnet.

Zunächst wird auf der Seite *Main* geprüft, ob das System betriebsbereit ist. Der Ausgangspegel sollte zu Beginn niedrig eingestellt werden. Anschließend wird ein kontinuierliches Audiosignal, beispielsweise Musik oder ein Sinussignal, am Eingang eingespeist.

Für einen grundlegenden Funktionstest werden nacheinander folgende Funktionen überprüft:

1. **Audioausgabe**

   Der Main Gain wird langsam erhöht. Das Eingangssignal muss über alle acht Lautsprechertreiber wiedergegeben werden.

2. **Gain und Mute**

   Der Main Gain wird verändert und die Pegeländerung kontrolliert. Bei aktivierter Mute-Funktion darf kein Nutzsignal ausgegeben werden.

3. **Equalizer**

   Auf der Seite *Equalization* wird ein EQ-Band aktiviert und dessen Gain deutlich verändert. Die resultierende Klangänderung muss unmittelbar wahrnehmbar sein. Anschließend wird der Filter wieder deaktiviert.

4. **Beam Steering**

   Auf der Seite *Steering* wird die Strahlsteuerung aktiviert. Anschließend kann beispielsweise ein Winkel von $+20°$ beziehungsweise $-20°$ eingestellt werden. Die Änderung muss unmittelbar übernommen werden.

   Bei einer geeigneten Hörposition sollte eine Veränderung der vertikalen Schallverteilung wahrnehmbar sein.

5. **Test-Funktion**

   Auf der Seite *Test* werden einzelne Ausgangskanäle ausgewählt. Das Audiosignal darf jeweils nur über die aktivierten Lautsprecher wiedergegeben werden.

   Dadurch können gleichzeitig die acht Verstärker- und Lautsprecherkanäle sowie deren Zuordnung überprüft werden.

Nach Abschluss des Tests werden die Test-Funktion und das Beam Steering deaktiviert. Anschließend wird der Main Gain wieder auf einen niedrigen Ausgangswert eingestellt.

Wenn Audioausgabe, Pegelsteuerung, Equalizer, Strahlsteuerung und die acht Ausgangskanäle wie beschrieben reagieren, kann die grundlegende Funktion der Signalverarbeitung und Steuerungssoftware als bestätigt angesehen werden.

**Fehlerbehandlung** Falls alle Komponenten physisch korrekt angeschlossen sind, jedoch eine Verbindungsfehlermeldung angezeigt wird oder keine Audioausgabe beziehungsweise keine Reaktion auf Bedienänderungen erfolgt, sollte zunächst die zuvor beschriebene Diagnose erneut ausgeführt werden.

Bleibt der Fehler bestehen und sind keine fehlerhaften Verbindungen oder nicht erkannten Audiogeräte feststellbar, empfiehlt sich eine erneute Installation des bereitgestellten Softwarepakets. Dadurch können fehlerhafte oder unvollständige Konfigurationen sowie Installationsfehler ausgeschlossen werden.

Nach der Neuinstallation sollte der Funktionstest vollständig wiederholt werden.

# 4 Messtechnische Überprüfung der Eigenschaften des Prototyps

Zur Validierung der Eigenschaften des im Rahmen dieser Arbeit entwickelten und aufgebauten Prototyps wurden verschiedene elektrische, elektroakustische und akustische Messungen durchgeführt.

In diesem Kapitel werden die Ergebnisse dieser Untersuchungen dargestellt und bewertet. Dabei werden die gemessenen Eigenschaften soweit möglich mit den zuvor berechneten beziehungsweise erwarteten Systemeigenschaften verglichen.

Ergänzend zur messtechnischen Auswertung wird auch eine subjektive Beurteilung der klanglichen und richtungsbezogenen Eigenschaften des Lautsprechers vorgenommen. Abschließend wird der entwickelte Prototyp hinsichtlich seiner wesentlichen technischen Eigenschaften, seines Funktionsumfangs und seiner Kosten mit kommerziell verfügbaren Systemen vergleichbarer Zielsetzung gegenübergestellt.

## 4.1 Technische Kenndaten des Prototyps

Der aufgebaute Prototyp wurde zunächst hinsichtlich seiner grundlegenden technischen Kenngrößen erfasst. Die ermittelten Werte sind in Tabelle 9 zusammengefasst.

Tabelle 9: Technische Kenndaten des aufgebauten Prototyps

| **Kenngröße** | **Wert** |
|---|---|
| Abmessungen ohne Befestigung | 15,2 cm × 15,5 cm × 103,5 cm |
| Masse | 16,8 kg |
| Leistungsaufnahme, Leerlauf | 28 W |
| Leistungsaufnahme, maximal | 300 W |

## 4.2 Elektrische und elektroakustische Messungen

Die Messung der Thiele/Small-Parameter sowie des Impedanzverlaufs und Klirrfaktors erfolgte mit einem Audio Precision APx515 Audio Analyzer in Verbindung mit dem Transducer Interface APx1701.

### 4.2.1 Thiele/Small-Parameter und Impedanzverhalten

Vor der Messung des vollständigen Lautsprechers wurden zunächst die Thiele/Small-Parameter aller acht verwendeten Lautsprechertreiber einzeln im Freifeldzustand bestimmt. Ziel dieser Messung war es, einerseits die Streuung zwischen den einzelnen Exemplaren zu bewerten und andererseits die gemessenen Werte mit den Herstellerangaben zu vergleichen.

Zwischen den acht Lautsprechertreibern zeigten sich Abweichungen von weniger als 5 %. Damit weisen die verwendeten Exemplare untereinander eine vergleichsweise geringe Streuung auf.

Deutlich größere Unterschiede ergeben sich dagegen im Vergleich mit den im Datenblatt angegebenen Werten. Die gemittelten Messwerte und deren Abweichungen sind in Tabelle 10 dargestellt.

Tabelle 10: Vergleich der gemessenen Thiele/Small-Parameter mit den Herstellerangaben

| Parameter | Messmittelwert | Datenblatt | Differenz | Abweichung |
|---|---|---|---|---|
| $F_s$ | 99,74 Hz | 80,1 Hz | +19,64 Hz | +24,5 % |
| $Q_{ms}$ | 4,19 | 3,41 | +0,78 | +22,8 % |
| $Q_{es}$ | 1,11 | 0,64 | +0,47 | +73,4 % |
| $Q_{ts}$ | 0,877 | 0,54 | +0,337 | +62,3 % |
| $R_e$ | 4,92 Ω | 3,9 Ω | +1,02 Ω | +26,1 % |
| $L_e$ | 0,07 mH | 0,38 mH | −0,31 mH | −81,6 % |

Für die Gehäuseabstimmung sind insbesondere die Abweichungen von $F_s$, $Q_{es}$ und $Q_{ts}$ relevant. Die gegenüber dem Datenblatt höhere Freiluftresonanz verschiebt die zu erwartende Systemresonanzfrequenz des geschlossenen Gehäuses nach oben. Gleichzeitig führen die höheren Gütewerte zu einer höheren Systemgüte und damit zu einer stärkeren Ausprägung des Frequenzgangs im Bereich der Resonanz.

Die gemessenen Mittelwerte wurden anschließend in das in Abschnitt 2.2.4 beschriebene Berechnungswerkzeug übernommen. Auf dieser Grundlage wurden die für das tatsächlich verwendete Gehäuse zu erwartenden Systemparameter erneut bestimmt. Abbildung 34 zeigt das Ergebnis dieser Neuberechnung.

| | | 3D Print + Datasheet Speaker | 3D Print + Measured Speaker | Aluminium + Datasheet Speaker | Aluminium + Measured Speaker |
|---|---|---|---|---|---|
| **4. Calculated system results — four enclosure/driver combinations** | | | | | |
| **Parameter** | **Unit** | **Box 1 + Driver 1** | **Box 1 + Driver 2** | **Box 2 + Driver 1** | **Box 2 + Driver 2** |
| Effective acoustic volume Vb | L | 20,99 | 20,99 | 20,91 | 20,91 |
| Total Vas of all drivers | L | 15,86 | 15,86 | 15,86 | 15,86 |
| Alpha = Vas,total / Vb | - | 0,76 | 0,76 | 0,76 | 0,76 |
| Closed-box resonance fc | Hz | 106,12 | 131,16 | 106,22 | 131,28 |
| Closed-box Qtc | - | 0,715 | 1,153 | 0,716 | 1,154 |
| Estimated f-3dB of sealed high-pass | Hz | 104,90 | 97,70 | 104,90 | 97,76 |
| Required Vb for target Qtc | L | 22,20 | not possible | 22,20 | not possible |
| Total piston area Sd,total | cm² | 241,60 | 241,60 | 241,60 | 241,60 |
| Total displacement volume Vd,total | cm³ | 48,32 | 48,32 | 48,32 | 48,32 |
| Air-spring stiffness kB,total | N/m | 3938,64 | 3938,64 | 3955,11 | 3955,11 |
| First longitudinal internal air mode | Hz | 190,56 | 190,56 | 171,50 | 171,50 |
| First width internal air mode | Hz | 1190,97 | 1190,97 | 1299,24 | 1299,24 |
| First depth internal air mode | Hz | 1319,23 | 1319,23 | 1299,24 | 1299,24 |
| Coherent array gain, ideal | dB | 18,06 | 18,06 | 18,06 | 18,06 |
| Qtc assessment | - | good / near flat | high Q, EQ recommended | good / near flat | high Q, EQ recommended |
| fc assessment | - | good range | limited LF | good range | limited LF |

Abbildung 34: Neuberechnung der Gehäuseparameter mit den gemessenen Thiele/Small-Parametern

Quelle: Eigene Darstellung.

Die Neuberechnung zeigt einen deutlichen Unterschied zur ursprünglichen Gehäuseauslegung. Für das Aluminiumgehäuse ergibt sich mit den gemessenen Treiberparametern eine erwartete Systemresonanz von etwa

$$f_c \approx 132\,\text{Hz}$$

und eine Gesamtgüte von etwa

$$Q_{tc} \approx 1{,}16.$$

Damit wird die ursprünglich auf Grundlage der Datenblattwerte berechnete Butterworth-nahe Abstimmung mit $Q_{\mathrm{tc}} \approx 0{,}716$ nicht erreicht.

Besonders relevant ist hierbei, dass bereits der gemessene Freiluftwert $Q_{\mathrm{ts}} = 0{,}877$ oberhalb des für eine Butterworth-Abstimmung erforderlichen Wertes liegt. Eine Gesamtgüte von $Q_{\mathrm{tc}} \approx 0{,}707$ wäre mit diesen Treibern in einem geschlossenen Gehäuse daher unabhängig vom Gehäusevolumen nicht erreichbar.

Für die anschließende Messung des vollständigen Lautsprechers wurden jeweils vier Lautsprechertreiber parallel geschaltet. Die beiden daraus entstehenden Gruppen wurden anschließend in Reihe miteinander verbunden.

Diese Verschaltung beeinflusst insbesondere den gemessenen elektrischen Gesamtwiderstand und muss bei der Interpretation der Impedanzmessung berücksichtigt werden.

Aus der Messung des vollständig bestückten Gehäuses ergaben sich die in Tabelle 11 zusammengefassten Werte:

Tabelle 11: Thiele/Small-Parameter des bestückten Gehäuses

| **Parameter** | **Messwert** |
|---|---|
| $F_s$ | 114,20 Hz |
| $Q_{ms}$ | 3,90 |
| $Q_{es}$ | 1,87 |
| $Q_{ts}$ | 1,26 |
| $R_e$ | 0,85 Ω |
| $L_e$ | 0,01 mH |

Die gemessene Resonanzfrequenz des bestückten Systems von 114,2 Hz liegt oberhalb des ursprünglich aus den Datenblattwerten berechneten Wertes von etwa 106 Hz, jedoch unterhalb der auf Grundlage der gemessenen Einzelchassisparameter erwarteten Resonanz von etwa 132 Hz.

Die aus der Gesamtimpedanzmessung abgeleiteten Gütewerte sind dabei nicht unmittelbar mit den Thiele/Small-Parametern eines einzelnen Freilufttreibers gleichzusetzen. Sie bestätigen jedoch qualitativ, dass das reale System deutlich schwächer bedämpft beziehungsweise resonanter abgestimmt ist als ursprünglich auf Basis der Herstellerdaten angenommen.

Die Abweichung zwischen berechneter und gemessener Systemresonanz zeigt zugleich, dass das vereinfachte Kleinsignalmodell die reale Mehrtreiberanordnung mit Absorptionsmaterial, elektrischer Verschaltung und den tatsächlichen Gehäusebedingungen nur näherungsweise beschreibt.

### 4.2.2 Klirrfaktor

Zur Bestimmung der nichtlinearen Verzerrungen wurde das Messsignal über den regulären Audioeingang in das System eingespeist. Sämtliche DSP-Effekte waren während der Messung deaktiviert und der Main Gain auf 0 dB eingestellt. Das Ausgangssignal wurde direkt an den Lautsprecherklemmen abgegriffen, sodass die Verzerrungen des vollständigen elektronischen Signalpfades einschließlich A/D-Wandlung, DSP und Leistungsverstärkung erfasst wurden.

Die Messung erfolgte als *Stepped Level Sweep* mit einem sinusförmigen Testsignal bei 1 kHz. Dabei wurde der Eingangspegel schrittweise erhöht und für jeden Pegel sowohl THD als auch THD+N bestimmt.

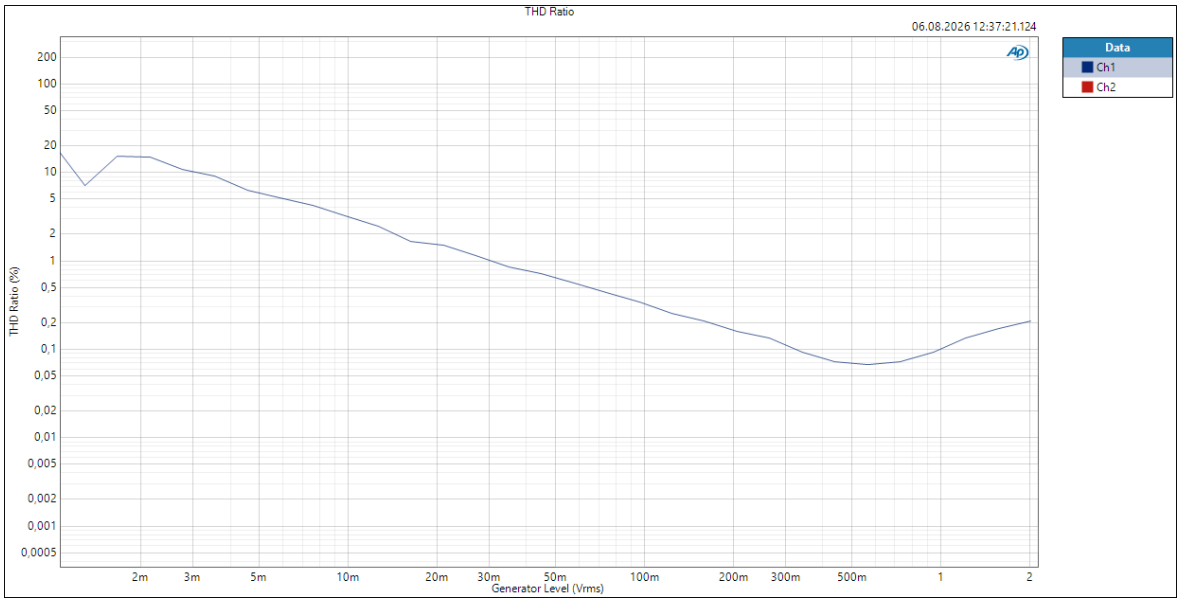



Abbildung 35: THD in Abhängigkeit vom Eingangspegel bei 1 kHz

Quelle: Eigene Messung.

**THD** Die in Abbildung 35 dargestellte Messung zeigt insgesamt ein niedriges Verzerrungsniveau. Bereits ab einem Eingangspegel von etwa 30 $\mathrm{mV_{rms}}$ fällt der Klirrfaktor unter 1 %.

Das Minimum der gemessenen Verzerrungen liegt ungefähr im Bereich von 500 $\mathrm{mV_{rms}}$. Im für den Betrieb relevanten Eingangsbereich zwischen etwa 500 $\mathrm{mV_{rms}}$ und 2 $\mathrm{V_{rms}}$ liegt THD überwiegend zwischen ungefähr 0,07 % und 0,2 %.

Damit weist der elektronische Signalpfad im vorgesehenen Arbeitsbereich nur geringe harmonische Verzerrungen auf.

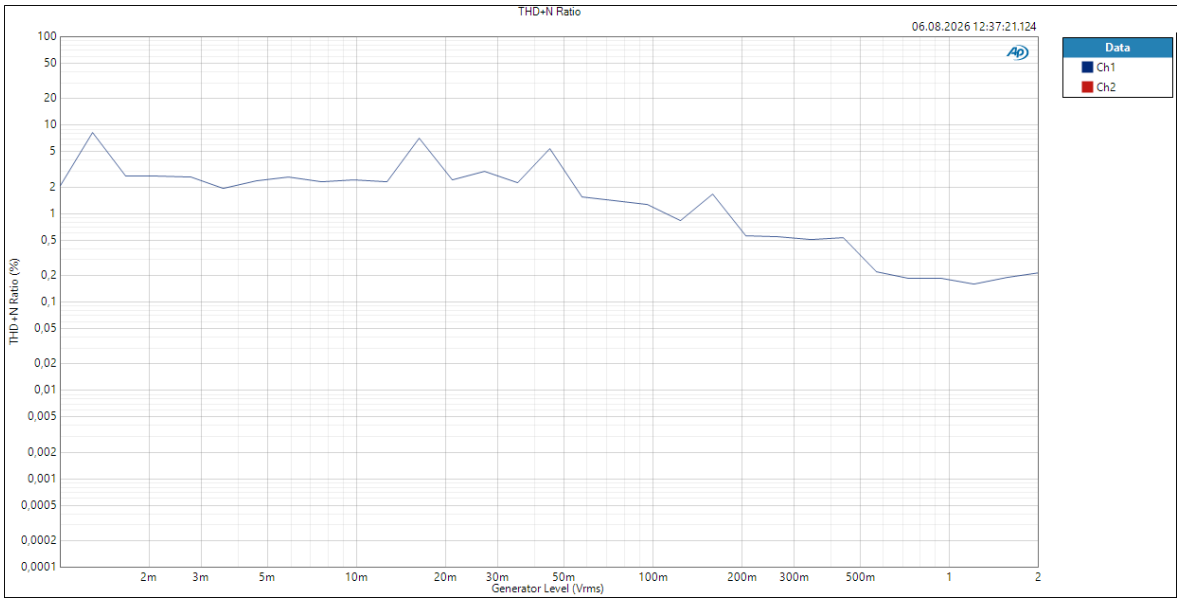



Abbildung 36: THD+N in Abhängigkeit vom Eingangspegel bei 1 kHz

Quelle: Eigene Messung.

**THD+N** Der in Abbildung 36 dargestellte Verlauf von THD+N liegt erwartungsgemäß oberhalb des reinen THD-Wertes, da zusätzlich zu den harmonischen Verzerrungen auch der Rauschanteil des Systems berücksichtigt wird.

Insbesondere bei kleinen Eingangspegeln ist der Einfluss des Grundrauschens deutlich erkennbar. Mit zunehmendem Signalpegel nimmt dessen relativer Anteil ab.

Im relevanten Eingangsbereich von etwa $500\,\mathrm{mV_{rms}}$ bis $2\,\mathrm{V_{rms}}$ bleibt THD+N unter etwa 0,5 %. Damit zeigt das System auch unter Berücksichtigung des Rauschanteils im vorgesehenen Arbeitsbereich ein insgesamt niedriges THD+N-Niveau.

Der Abstand zwischen THD und THD+N zeigt jedoch, dass der Rauschanteil im Vergleich zu den reinen harmonischen Verzerrungen einen merklichen Beitrag zum Gesamtergebnis leistet.

### 4.2.3 Systemlatenz

Zur Bestimmung der Gesamtlatenz wurde ein Messmikrofon unmittelbar vor dem Lautsprecher positioniert und die Laufzeit mit der *Delay Finder*-Funktion von Rational Acoustics Smaart 8 bestimmt.

Unabhängig davon, ob die EQ- und Filterstufen aktiviert oder deaktiviert waren, wurde eine konstante Verzögerung von

$$t_{\mathrm{latency}} = 13{,}0\,\mathrm{ms}$$

gemessen. Die zugeschalteten Filter verursachen damit im vorliegenden DSP-Aufbau keine messbare zusätzliche Gesamtlatenz. Abbildung 37 zeigt die zugehörige Messung.

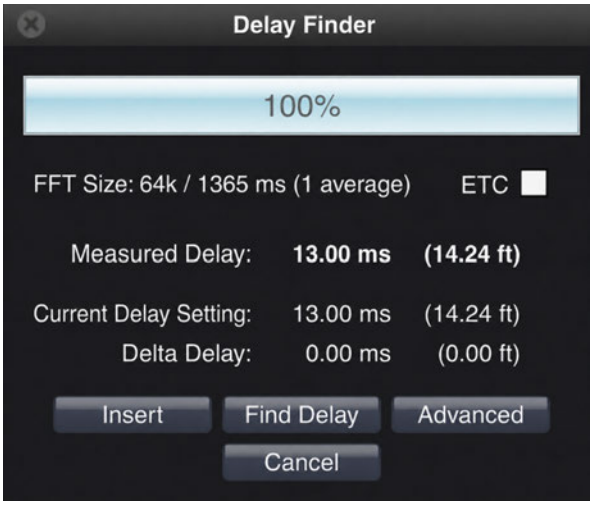



Abbildung 37: Messung der Gesamtlatenz mit Rational Acoustics Smaart 8

Quelle: Eigene Messung.

Der gemessene Wert umfasst den vollständigen Signalweg vom Audioeingang über A/D-Wandlung, DSP-Verarbeitung und D/A-Wandlung beziehungsweise Verstärkung bis zur akustischen Wiedergabe durch den Lautsprecher. Zusätzlich ist die geringe Schalllaufzeit zwischen Lautsprecher und Messmikrofon enthalten.

Für Live-Anwendungen ist eine möglichst geringe Verzögerung des gesamten Signalpfades erforderlich. In einem White Paper der Audio Engineering Society wird für die vollständige

Systemlatenz zwischen Signalquelle und wiedergegebenem Signal ein allgemein akzeptierter Grenzbereich von ungefähr 15 bis 20 ms angegeben (Bouillot u. a. 2009, S. 736).

Mit einer gemessenen End-to-End-Latenz von 13 ms liegt der entwickelte Prototyp unterhalb dieses Bereichs. Damit bleibt zugleich ein gewisser zeitlicher Spielraum für zusätzliche Geräte im Signalweg.

Die gemessene Latenz kann für die vorgesehene Echtzeit-Sprachbeschallung daher als grundsätzlich akzeptabel bewertet werden. Mit 13 ms ist sie jedoch bereits vergleichsweise hoch und sollte bei einer zukünftigen Optimierung des Systems weiter reduziert werden.

## 4.3 Akustische Messungen im reflexionsarmen Raum

Zur Bewertung des akustischen Übertragungsverhaltens wurde der aufgebaute Prototyp in einem reflexionsarmen Raum vermessen. Die Messung und Auswertung erfolgten mit der Software EASERA. Als Anregung wurde ein MLS-Signal mit pinker spektraler Gewichtung verwendet.

### 4.3.1 Frequenzgang

Zunächst wurde der Frequenzgang des Prototyps ohne zusätzliche Entzerrung bestimmt.

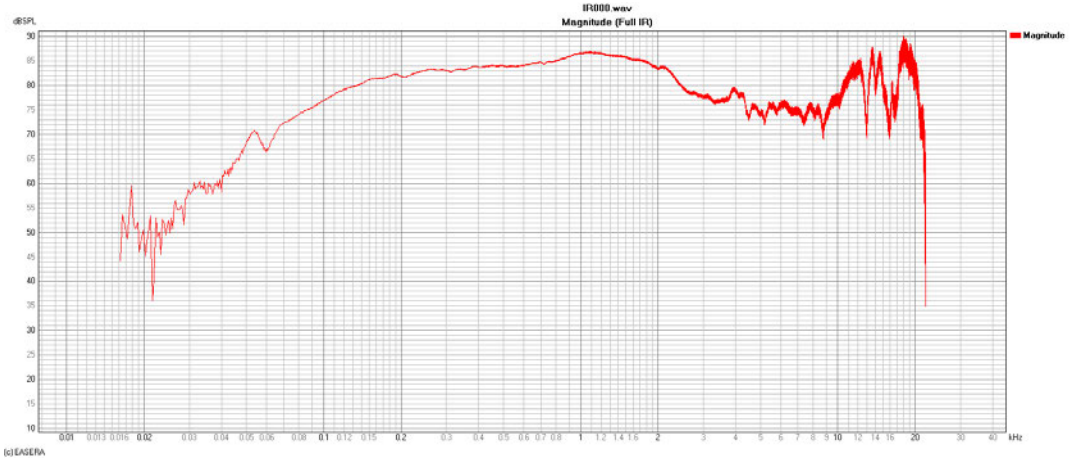



Abbildung 38: Gemessener Frequenzgang des Prototyps ohne Entzerrung

Quelle: Eigene Messung.

Der in Abbildung 38 dargestellte Verlauf ist deutlich ungleichmäßig. Bis etwa 1 kHz steigt der Schalldruckpegel zunächst kontinuierlich an. Zwischen ungefähr 2 kHz und 10 kHz fällt der Pegel anschließend um nahezu 10 dB ab. Oberhalb von etwa 10 kHz ist erneut ein Anstieg zu erkennen.

Im Tieftonbereich fällt zusätzlich eine schmale Überhöhung bei etwa 53 Hz mit einem unmittelbar folgenden Einbruch um 60 Hz auf. Die geringe Frequenzdifferenz zwischen beiden Merkmalen sowie deren ausgeprägte Form sprechen eher für eine Interferenz beziehungsweise eine verbleibende Reflexion innerhalb des Messaufbaus als für eine breitbandige Eigenschaft des Lautsprechersystems selbst.

Gerade im unteren Frequenzbereich können auch in einem reflexionsarmen Raum Restreflexionen beziehungsweise die begrenzten Abmessungen des Messraums zu solchen schmalbandigen Überhöhungen und Auslöschungen führen. Der Bereich um 53 bis 60 Hz wird deshalb bei der

weiteren Beurteilung des Lautsprechers nicht als belastbarer Bestandteil des Frequenzgangs herangezogen.

**Entzerrung des Frequenzgangs** Der unbehandelte Frequenzgang zeigt, dass für einen möglichst ausgeglichenen Betrieb eine zusätzliche Entzerrung sinnvoll ist. Hierfür wurde innerhalb der DSP-Software ein eigener EQ-Preset erstellt.

Die breite Pegelanhebung im mittleren Frequenzbereich wurde mit einem breitbandigen Filter um etwa 10 dB abgesenkt. Zusätzlich wurde ein Hochpassfilter eingesetzt, um den Tieffrequenzbereich unterhalb des für den Lautsprecher sinnvoll nutzbaren Bereichs zu begrenzen. Dadurch wird zugleich verhindert, dass die auffällige Überhöhung um 53 Hz unnötig stark angeregt wird.

Der daraus resultierende Frequenzgang ist in Abbildung 39 dargestellt.

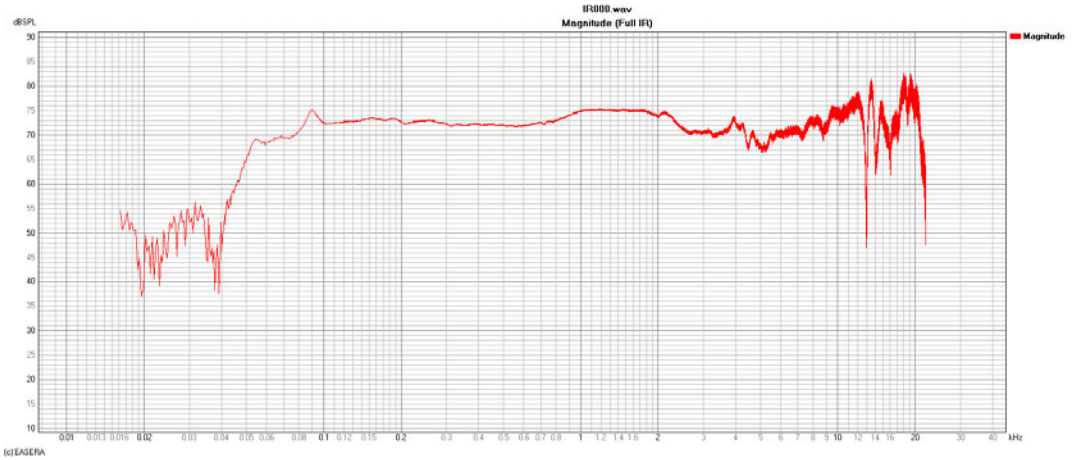



Abbildung 39: Gemessener Frequenzgang des Prototyps mit aktiviertem EQ-Preset

Quelle: Eigene Messung.

Durch die Entzerrung konnte der Frequenzgang deutlich geglättet werden. Ein zunächst noch vorhandener schmaler Pegelanstieg im Bereich um 90 Hz wurde in einer späteren Anpassung des Presets zusätzlich reduziert.

Zwischen etwa 1 kHz und 2 kHz verbleibt eine leichte Anhebung von ungefähr 3 dB. Auf eine weitere Korrektur wurde bewusst verzichtet, da die Abweichung vergleichsweise gering ist und zusätzliche Filter gleichzeitig einen stärkeren Eingriff in den Phasenverlauf verursachen würden.

Als nutzbarer Übertragungsbereich des entzerrten Systems wird der Frequenzbereich definiert, in dem der gemessene Schalldruckpegel gegenüber dem mittleren Übertragungsniveau von etwa 73 dB SPL um nicht mehr als ungefähr 6 dB abfällt. Nach diesem Kriterium ergibt sich bei aktiviertem EQ-Preset ein nutzbarer Übertragungsbereich von etwa 80 Hz bis 20 kHz

Das erstellte EQ-Preset stellt keine allgemeingültige Referenzentzerrung dar. Es dient vielmehr als praxisorientierte Ausgangskonfiguration und zeigt, in welchem Umfang sich das Übertragungsverhalten des Prototyps mit der integrierten Signalverarbeitung korrigieren lässt. Abhängig von Aufstellung, Raumakustik und gewünschter Klangabstimmung kann die Entzerrung jederzeit angepasst oder vollständig deaktiviert werden.

**Maximaler Schalldruckpegel** Zur Bestimmung des maximal nutzbaren Schalldruckpegels wurde das System mit einem MLS-basierten, rosa gewichteten Messsignal angesteuert und der Pegel schrittweise erhöht.

Bis zu einem Schalldruckpegel von etwa

$$L_{\max} \approx 119\,\mathrm{dB\,SPL}$$

waren im verwendeten Messaufbau keine deutlich wahrnehmbaren Verzerrungen festzustellen. Bei einer weiteren Pegelsteigerung traten deutlich wahrnehmbare Verzerrungen auf, sodass dieser Wert als praktische obere Belastungsgrenze des Prototyps betrachtet werden kann.

Für den regulären Betrieb wurde zusätzlich eine Sicherheitsreserve von etwa 3 dB berücksichtigt. Damit ergibt sich ein praxisgerecht nutzbarer maximaler Schalldruckpegel von ungefähr

$$L_{\max,\mathrm{nutzbar}} \approx 116\,\mathrm{dB\,SPL}.$$

Die Sicherheitsreserve reduziert das Risiko hörbarer Verzerrungen und verringert gleichzeitig die thermische und mechanische Belastung der Lautsprechertreiber.

### 4.3.2 Richtcharakteristik

Zusätzlich zum Frequenzgang wurde die Richtcharakteristik des Prototyps untersucht. Der Lautsprecher wurde hierzu in aufrechter Position auf einem Drehteller montiert und schrittweise um seine vertikale Achse gedreht. Dadurch wurde die horizontale Richtcharakteristik des Systems in der Horizontalebene erfasst.

Dieser Parameter ist insbesondere für den Einsatz zur Sprachbeschallung relevant, da eine gezielte Bündelung des abgestrahlten Schalls die akustische Rückkopplungsneigung verringern kann. Entscheidend ist dabei, wie viel Schallenergie außerhalb des vorgesehenen Zuhörerbereichs und insbesondere in Richtung eines verwendeten Mikrofons abgestrahlt wird.

Die in Abbildung 40 dargestellten Polardiagramme zeigen eine deutlich frequenzabhängige Richtwirkung. Bei niedrigen Frequenzen ist die Abstrahlung noch vergleichsweise breit. Mit steigender Frequenz nimmt die Bündelung zunehmend zu, während die rückwärtige und seitliche Abstrahlung deutlich reduziert wird.

Besonders ausgeprägt ist dieser Effekt bei 8 kHz, wo bereits außerhalb des Hauptabstrahlbereichs eine starke Pegelabnahme zu erkennen ist. Bei 500 Hz ist die Richtwirkung dagegen wesentlich geringer und die Abstrahlung bleibt über einen großen Winkelbereich vergleichsweise gleichmäßig.

Für Anwendungen zur Sprachverstärkung ist dieses Verhalten grundsätzlich vorteilhaft. Durch die Konzentration der Schallenergie in Richtung des Zuhörerbereichs kann insbesondere bei einer geeigneten Positionierung von Lautsprecher und Mikrofon ein höherer nutzbarer Pegel vor dem Einsetzen akustischer Rückkopplung erreicht werden. Dies ist beispielsweise bei Beschallungssituationen relevant, in denen sich das Lautsprechersystem in räumlicher Nähe hinter oder seitlich des Sprechers befindet.

Die dargestellten Polardiagramme wurden ohne aktivierte Entzerrung aufgenommen. Die fehlenden Messungen mit aktiviertem EQ-Preset beeinflussen die grundsätzliche Aussage zur Richtcharakteristik jedoch nur geringfügig. Da die verwendete Entzerrung global vor der Aufteilung auf die einzelnen Lautsprecherkanäle erfolgt, verändert sie vor allem den Pegel der jeweiligen Frequenzbereiche, nicht jedoch deren normierte räumliche Abstrahlform.

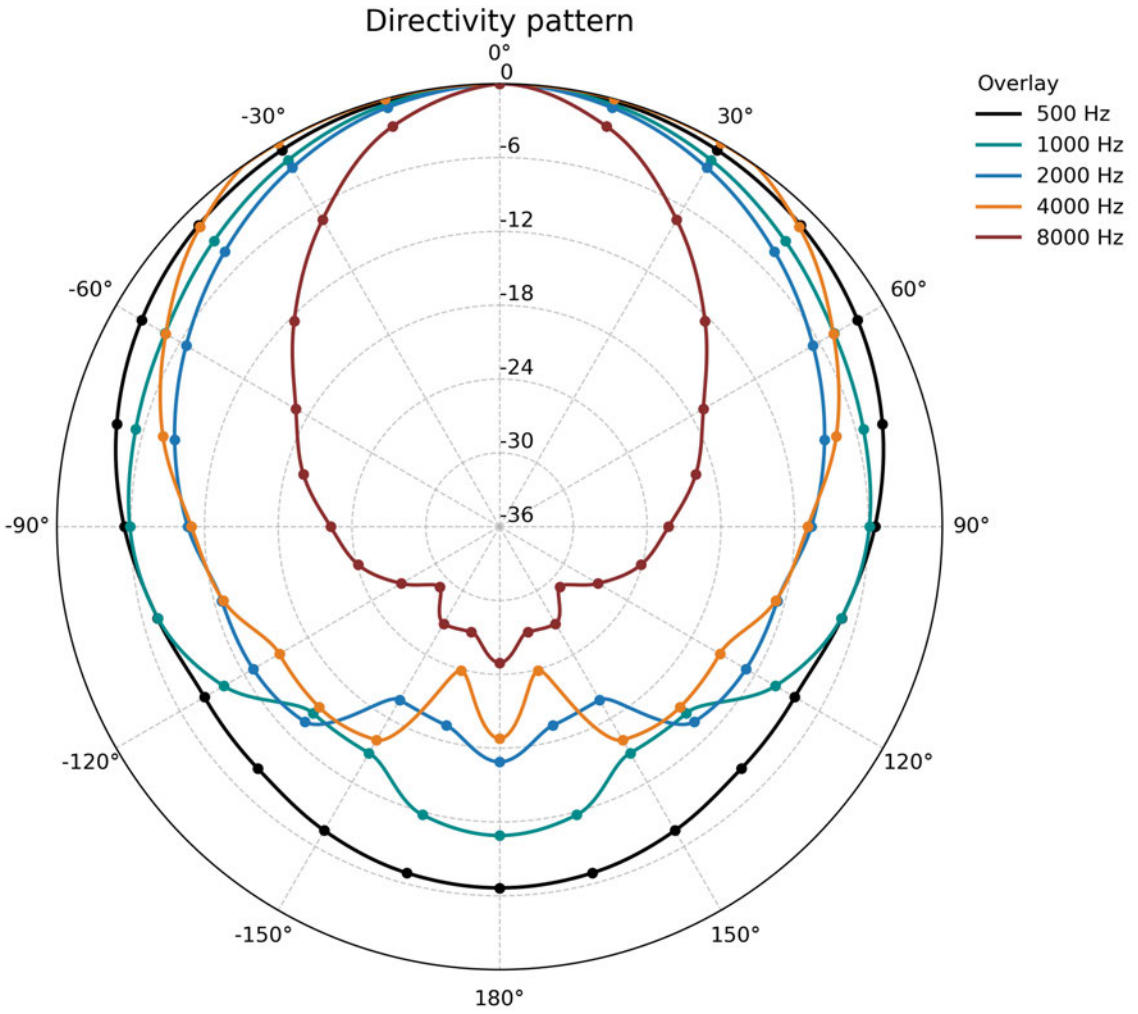



Abbildung 40: Gemessene Richtcharakteristik des Prototyps bei ausgewählten Frequenzen

Quelle: Eigene Messung.

Die dargestellte Messmethode eignet sich zur reproduzierbaren Bestimmung der Richtcharakteristik in einer einzelnen Ebene. Der eigentliche Beam-Steering-Effekt wirkt beim vorliegenden System jedoch vor allem auf die vertikale Abstrahlung und lässt sich mit einer einfachen Rotation des gesamten Lautsprechers nur eingeschränkt repräsentativ erfassen.

Aus diesem Grund wurde im reflexionsarmen Raum ausschließlich die oben beschriebene horizontale Richtcharakteristik bestimmt.

## 4.4 Bewertung der Strahlsteuerung im Hörsaal

Da sich die Wirkung der elektronischen Strahlsteuerung mit einer einfachen Polarmessung nur eingeschränkt praxisnah erfassen lässt, wurde ihr Einfluss zusätzlich unter realen Raumbedingungen untersucht. Als Bewertungsgröße wurde die Sprachverständlichkeit herangezogen.

Durch die gezielte vertikale Bündelung kann mit Beam Steering ein größerer Anteil der abgestrahlten Schallenergie auf den vorgesehenen Zuhörerbereich konzentriert werden. Dies ist insbesondere für die Sprachübertragung relevant, deren Bewertung nach dem STI-Verfahren in den Oktavbändern von 125 Hz bis 8 kHz erfolgt (BS EN 60268-16). Durch eine gezieltere

Schallversorgung kann der Direktschallanteil an den Zuhörerpositionen erhöht und gleichzeitig die Anregung nicht zu beschallender Raumflächen reduziert werden. Beide Effekte können zu einer günstigeren Übertragung sprachtypischer Modulationen und damit zu höheren beziehungsweise räumlich gleichmäßiger verteilten STI-Werten beitragen (Ballou 2008, S. 1405–1408).

Die Messungen wurden mit EASERA durchgeführt. Als Anregung wurde ein MLS-basiertes, rosa gewichtetes Messsignal verwendet. Aus der gemessenen Impulsantwort wurde anschließend der STI an den jeweiligen Messpositionen bestimmt.

### 4.4.1 Messraum und Messpositionen

Als Untersuchungsort wurde der Ditze-Hörsaal am Standort Finkenau 35 in Hamburg gewählt. Der Raum besitzt ansteigende, annähernd halbkreisförmig angeordnete Sitzreihen und entspricht damit einer für Vorlesungs- und Sprachbeschallung typischen Zuhörergeometrie.

Der Hörsaal ist bereits mit raumakustisch wirksamen Absorptionsflächen ausgestattet. Bei einem Raumvolumen von ungefähr 542 $m^3$ wurde eine Nachhallzeit von etwa 1,1 s bestimmt. Der Hallradius beträgt ungefähr 1,27 m. Abbildung 41 zeigt den Messaufbau sowie den untersuchten Zuhörerbereich.



Abbildung 41: Messaufbau und Zuhörerbereich im Ditze-Hörsaal

Quelle: Eigene Darstellung.

Um sowohl die vorgesehene Zuhörerfläche als auch den Bereich des Vortragenden zu erfassen, wurden fünf repräsentative Messpositionen festgelegt. Drei Positionen befinden sich entlang der Lautsprecherachse innerhalb der ansteigenden Sitzreihen. Zwei weitere Positionen liegen im vorderen Bereich, in dem sich ein Vortragender während einer Veranstaltung bewegen kann. Die gewählten Positionen sind in Tabelle 12 aufgeführt.

Tabelle 12: Messpositionen für die STI-Untersuchung

| **Messposition** | **Abstand** | **Position im Raum** |
|---|---|---|
| Vorne | 4,15 m | vorderer Bereich der Sitzreihen |
| Mitte | 6,80 m | mittlerer Bereich der Sitzreihen |
| Hinten | 10,15 m | hinterer Bereich der Sitzreihen |
| Nahposition | 1,00 m | unmittelbarer Bereich vor dem Lautsprecher |
| Vortragsbereich | 2,70 m | mittlerer Bereich der möglichen Bewegungsfläche des Vortragenden |

### 4.4.2 Verglichene Lautsprechersysteme und Betriebsarten

Um den Einfluss der einzelnen Verarbeitungsstufen voneinander trennen zu können, wurde der entwickelte Prototyp in vier unterschiedlichen Betriebszuständen untersucht:

- ohne EQ und ohne Beam Steering
- mit aktiviertem EQ
- mit aktiviertem Beam Steering
- mit aktiviertem EQ und Beam Steering

Für die Steering-Messungen wurde ein vertikaler Steuerwinkel von 13° eingestellt.

Zusätzlich wurden zwei kommerzielle Lautsprechersysteme als Referenz verwendet. Mit der Fohhn FS-70 wurde ein System mit elektronisch steuerbarer vertikaler Richtcharakteristik untersucht. Auch hier wurde ein Steering-Winkel von 13° eingestellt.

Als weitere Referenz wurde eine konventionelle Fohhn Hybrid-1 verwendet (Fohhn Audio AG 2021). Dadurch lässt sich der Prototyp nicht ausschließlich mit einem kommerziellen Beam-Steering-System vergleichen, sondern auch mit einem herkömmlichen PA-Lautsprecher ohne elektronische Strahlsteuerung.

Für die Messreihe wurde ein Referenzpegel von 75 dB SPL auf 1 m Abstand verwendet. Damit sollte verhindert werden, dass Unterschiede der STI-Werte primär durch unterschiedliche Wiedergabepegel der untersuchten Lautsprechersysteme verursacht werden.

### 4.4.3 Bewertung des Speech Transmission Index

Der STI beschreibt die Übertragung sprachtypischer Amplitudenmodulationen durch ein elektroakustisches System. Nachhall, Störgeräusche und andere Einflüsse auf dem Übertragungsweg reduzieren die Modulationstiefe und damit den resultierenden STI (Ballou 2008, S. 1405–1408).

Der Index reicht von 0 bis 1. Werte nahe 0 entsprechen einer sehr geringen Sprachverständlichkeit, während Werte nahe 1 eine sehr gute Übertragungsqualität kennzeichnen. Zur praktischen Interpretation werden die STI-Werte in unterschiedliche Qualitätsbereiche beziehungsweise Qualifikationsklassen eingeordnet. Abbildung 42 zeigt die zugehörige Einteilung.

| Category | Nominal STI value | Type of message information | Examples of typical uses (for natural or reproduced voice) | Comment |
|---|---|---|---|---|
| A+ | >0,76 | | Recording studios | Excellent intelligibility but rarely achievable in most environments |
| A | 0,74 | Complex messages, unfamiliar words | Theatres, speech auditoria, parliaments, courts, Assistive Hearing Systems (AHS) | High speech intelligibility |
| B | 0,7 | Complex messages, unfamiliar words | | |
| C | 0,66 | Complex messages, unfamiliar words | Theatres, speech auditoria, teleconferencing, parliaments, courts | High speech intelligibility |
| D | 0,62 | Complex messages, familiar words | Lecture theatres, classrooms, concert halls | Good speech intelligibility |
| E | 0,58 | Complex messages, familiar context | Concert halls, modern churches | High quality PA systems |
| F | 0,54 | Complex messages, familiar context | PA systems in shopping malls, public buildings' offices, VA systems, cathedrals | Good quality PA systems |
| G | 0,5 | Complex messages, familiar context | Shopping malls, public buildings' offices, VA systems | Target value for VA systems |
| H | 0,46 | Simple messages, familiar words | VA and PA systems in difficult acoustic environments | Normal lower limit for VA systems |
| I | 0,42 | Simple messages, familiar context | VA and PA systems in very difficult spaces | |
| J | 0,38 | | Not suitable for PA systems | |
| U | <0,36 | | Not suitable for PA systems | |

Abbildung 42: Bewertung der Sprachverständlichkeit anhand des STI

Quelle: British Standards Institution (BS EN 60268-16).

Für die vorliegende Untersuchung wird ausschließlich der STI als Bewertungsgröße verwendet. Die BS EN 60268-16 beschreibt die objektive Bewertung der Sprachverständlichkeit anhand des Speech Transmission Index (BS EN 60268-16). Der ältere Kennwert %ALCons wird daher in der weiteren Auswertung nicht zusätzlich herangezogen.

### 4.4.4 Messergebnisse

Die an den fünf Messpositionen bestimmten STI-Werte sind in Tabelle 13 zusammengefasst. Die Darstellung ermöglicht sowohl einen Vergleich der verschiedenen Lautsprechersysteme als auch eine Beurteilung der Veränderung über die Entfernung innerhalb des Zuhörerbereichs.

Tabelle 13: Gemessene STI-Werte der untersuchten Lautsprechersysteme und Betriebsarten

| **System / Betriebsart** | **4,15 m** | **6,80 m** | **10,15 m** | **1,00 m** | **2,70 m** |
|---|---|---|---|---|---|
| Prototyp ohne EQ / Steering | 0,757 | 0,567 | 0,543 | 0,809 | 0,658 |
| Prototyp mit EQ | 0,756 | 0,563 | 0,535 | 0,804 | 0,652 |
| Prototyp mit Steering | 0,648 | 0,678 | 0,638 | 0,760 | 0,599 |
| Prototyp mit EQ und Steering | 0,643 | 0,678 | 0,633 | 0,753 | 0,593 |
| Fohhn FS-70 mit Steering | 0,667 | 0,632 | 0,629 | 0,807 | 0,630 |
| Fohhn Hybrid-1 | 0,685 | 0,578 | 0,602 | 0,841 | 0,643 |

### 4.4.5 Auswertung der STI-Messungen

Die Messergebnisse zeigen einen deutlichen Einfluss der Strahlsteuerung auf die räumliche Verteilung der Sprachverständlichkeit. Besonders aussagekräftig ist dabei der Vergleich der drei Messpositionen innerhalb des eigentlichen Zuhörerbereichs.

Ohne aktiviertes Beam Steering erreicht der Prototyp im vorderen Bereich mit einem STI von 0,757 zunächst einen sehr hohen Wert. Mit zunehmender Entfernung fällt dieser jedoch

deutlich auf 0,567 in der Raummitte und 0,543 im hinteren Bereich ab. Nach der in BS EN 60268-16 angegebenen Einordnung (BS EN 60268-16) entspricht der vordere Messpunkt damit einer sehr hohen Sprachverständlichkeit, während die beiden weiter entfernten Positionen nur noch ungefähr im Bereich der Kategorien E bis F liegen.

Durch die Aktivierung des Beam Steering verändert sich diese Verteilung deutlich. Der STI sinkt an der vorderen Position auf 0,648, steigt gleichzeitig jedoch in der Raummitte auf 0,678 und im hinteren Bereich auf 0,638.

Damit wird die Sprachverständlichkeit im Zuhörerbereich wesentlich gleichmäßiger verteilt. Der Unterschied zwischen höchstem und niedrigstem STI-Wert beträgt ohne Steering

$$\Delta STI = 0{,}757 - 0{,}543 = 0{,}214,$$

während er mit aktiviertem Steering nur noch

$$\Delta STI = 0{,}678 - 0{,}638 = 0{,}040$$

beträgt.

Die Spannweite über die drei Zuhörerpositionen wird damit um mehr als 80 % reduziert. Gleichzeitig steigt der arithmetische Mittelwert des STI innerhalb des Zuhörerbereichs von etwa 0,622 auf 0,655.

Besonders deutlich wird die Wirkung an den beiden weiter entfernten Messpositionen. In der Raummitte erhöht sich der STI durch Steering um 0,111, im hinteren Bereich um 0,095. Dies entspricht einer relativen Verbesserung von ungefähr 20 % beziehungsweise 17 %. Der Pegel beziehungsweise die Verständlichkeit wird somit nicht lediglich insgesamt verändert, sondern gezielt von der Nahposition in Richtung der weiter entfernten Zuhörerbereiche verlagert.

Dieses Verhalten entspricht dem grundlegenden Ziel einer gerichteten Beschallung. Nicht der maximal erreichbare Wert an einer einzelnen Position ist entscheidend, sondern eine möglichst gleichmäßige Versorgung des gesamten Zuhörerbereichs.

**Einfluss der Entzerrung** Die Aktivierung des EQ-Presets hat dagegen nur einen sehr geringen Einfluss auf die gemessenen STI-Werte.

Ohne Steering verändern sich die Werte durch die Entzerrung an den fünf Messpositionen lediglich um etwa 0,001 bis 0,008. Auch bei aktiviertem Steering bleibt die Differenz zwischen Messungen mit und ohne EQ mit maximal etwa 0,007 sehr gering.

Damit ist erkennbar, dass die deutliche Veränderung der Sprachverständlichkeit innerhalb des Raumes primär durch die Strahlsteuerung und nicht durch die Frequenzgangkorrektur verursacht wird.

Bei der Interpretation ist allerdings zu berücksichtigen, dass STI nur eingeschränkt auf Änderungen des Frequenzgangs durch Entzerrung reagiert. In der Literatur wird ausdrücklich darauf hingewiesen, dass STI-Messungen vor und nach einer Equalizerkorrektur nahezu identisch ausfallen können, obwohl sich die subjektive Sprachverständlichkeit verbessert (Ballou 2008, S. 1408).

**Vergleich mit den Referenzsystemen** Der Vergleich mit der Fohhn FS-70 zeigt, dass beide Beam-Steering-Systeme eine ähnlich gleichmäßige Verteilung über die drei Zuhörerpositionen erreichen.

Für die FS-70 liegen die Werte bei

$$0{,}667, \qquad 0{,}632, \qquad 0{,}629.$$

Der Unterschied zwischen höchstem und niedrigstem Wert beträgt damit

$$\Delta STI_{\mathrm{FS70}} = 0{,}038.$$

Der entwickelte Prototyp erreicht mit aktiviertem Steering einen vergleichbaren Wert von

$$\Delta STI_{\mathrm{Prototyp}} = 0{,}040.$$

Die räumliche Gleichmäßigkeit der Sprachverständlichkeit liegt damit bei beiden Systemen auf einem sehr ähnlichen Niveau.

Der arithmetische Mittelwert der drei Zuhörerpositionen beträgt beim Prototyp mit Steering etwa 0,655 und bei der FS-70 etwa 0,643. Aufgrund der geringen Anzahl von Messpositionen sollte dieser Unterschied jedoch nicht als allgemeiner Leistungsnachweis zwischen beiden Systemen interpretiert werden. Wesentlich aussagekräftiger ist die sehr ähnliche geringe Spannweite über den Zuhörerbereich.

Die konventionelle Fohhn Hybrid-1 erreicht an den drei Positionen STI-Werte von 0,685, 0,578 und 0,602. Der Wertebereich beträgt damit

$$\Delta STI_{\mathrm{Hybrid1}} = 0{,}107$$

und ist deutlich größer als bei beiden Systemen mit elektronischer Strahlsteuerung.

Die Messung zeigt damit, dass auch eine konventionelle PA-Box im untersuchten Hörsaal insgesamt eine gute Sprachverständlichkeit erreichen kann. Die Verteilung über die Zuhörerfläche ist jedoch weniger gleichmäßig als bei den beiden Beam-Steering-Systemen.

**Gesamtbewertung** Die Messreihe bestätigt damit die praktische Wirksamkeit der implementierten Strahlsteuerung.

Der größte Vorteil besteht nicht in einer generellen Erhöhung des STI an allen Positionen, sondern in der gezielten Umverteilung der Sprachübertragung innerhalb des Raumes. Während der Prototyp ohne Steering im Nahbereich sehr hohe Werte erreicht und nach hinten deutlich abfällt, entsteht mit aktiviertem Steering eine wesentlich gleichmäßigere Versorgung der gesamten Zuhörerfläche.

Die mit dem Prototyp erreichte räumliche Gleichmäßigkeit liegt dabei auf einem vergleichbaren Niveau wie bei der kommerziellen Fohhn FS-70 und deutlich über der konventionellen Fohhn Hybrid-1.

Unter Berücksichtigung des prototypischen Charakters des entwickelten Systems stellt dieses Ergebnis eine deutliche Bestätigung der grundlegenden Funktionsfähigkeit der implementierten Beam-Steering-Technologie dar.

## 4.5 Subjektive Hörbeurteilung

Die Messungen im Ditze-Hörsaal boten zusätzlich die Möglichkeit, den Prototyp unter praxisnahen Einsatzbedingungen zu beurteilen und direkt mit den beiden verwendeten Fohhn-Systemen zu vergleichen. Die folgenden Eindrücke stellen eine subjektive Hörbeurteilung dar und sind nicht als Ersatz für die zuvor beschriebenen messtechnischen Ergebnisse zu verstehen.

**Musikwiedergabe** Bei der Musikwiedergabe mit aktiviertem Standard-EQ-Preset und deaktiviertem Beam Steering zeigte der Prototyp insgesamt einen Klangcharakter, der dem der Fohhn FS-70 vergleichbar erschien.

Im Tieftonbereich war eine deutliche Begrenzung wahrnehmbar, was aufgrund des geschlossenen Gehäuseprinzips und des Verzichts auf eine Bassreflexabstimmung zu erwarten war. Gleichzeitig wirkte die Wiedergabe im Hochtonbereich subjektiv etwas weniger präzise. Demgegenüber waren der Mittelton- und insbesondere der Grundtonbereich deutlich präsent.

Für eine reine Musikwiedergabe ist der Prototyp damit grundsätzlich einsetzbar. In Verbindung mit einem Subwoofer und einer auf den jeweiligen Anwendungsfall abgestimmten Entzerrung erscheint auch ein Einsatz als vollständiges PA-System realistisch.

**Sprachwiedergabe und Beam Steering** Mit aktiviertem Beam Steering verändert sich der tonale Eindruck hörbar. Aus diesem Grund erscheint diese Betriebsart für eine möglichst neutrale Musikwiedergabe weniger geeignet, während sie bei der Sprachbeschallung ihre eigentliche Stärke zeigt.

Im Zuhörerbereich des Hörsaals wurde Sprache über den gesamten Tribünenbereich sehr deutlich und gleichmäßig wahrgenommen. Der Unterschied gegenüber dem Betrieb ohne Beam Steering war dabei unmittelbar hörbar. Besonders in den weiter entfernten Bereichen blieb die Sprachwiedergabe klarer und präsenter.

Auch im Vergleich mit der konventionellen Fohhn Hybrid-1 war der Unterschied deutlich wahrnehmbar. Ohne gezielte vertikale Strahlsteuerung nahm mit zunehmender Entfernung der Anteil der Raumreflexionen gegenüber dem Direktschall subjektiv stärker zu, wodurch die Sprache weniger deutlich hervortrat.

Im direkten Vergleich mit der Fohhn FS-70 zeigte der Prototyp ebenfalls eine sehr überzeugende Sprachwiedergabe. Subjektiv wurde die Stimme mit dem Prototyp etwas präsenter und deutlicher wahrgenommen. Diese Einschätzung stimmt grundsätzlich mit den zuvor ermittelten STI-Werten überein, bei denen beide Beam-Steering-Systeme eine vergleichsweise gleichmäßige Sprachverständlichkeit über den Zuhörerbereich erreichten.

**Beurteilung aus Sicht des Vortragenden** Zusätzlich wurden alle drei Lautsprechersysteme aus der Position eines Vortragenden beurteilt.

Sowohl die Fohhn FS-70 als auch die Fohhn Hybrid-1 zeigten bei der Sprachverstärkung eine sehr geringe subjektiv wahrnehmbare Systemlatenz. Beim entwickelten Prototyp war die Verzögerung dagegen deutlicher wahrnehmbar. Sie war nicht so ausgeprägt, dass die Sprachwiedergabe oder das Sprechen erheblich beeinträchtigt wurde, fiel im direkten Vergleich mit den kommerziellen Systemen jedoch auf.

Dieser Eindruck steht im Einklang mit der zuvor gemessenen End-to-End-Latenz von 13 ms, die für den vorgesehenen Betrieb zwar als grundsätzlich akzeptabel bewertet wurde, jedoch bereits vergleichsweise hoch ist.

Ein deutlicher Vorteil zeigte sich dagegen hinsichtlich der möglichen Verstärkung vor dem Einsetzen akustischer Rückkopplungen. Beim Prototyp konnte die Mikrofonverstärkung subjektiv weiter angehoben werden als bei der Fohhn FS-70 und insbesondere als bei der Fohhn Hybrid-1, bevor eine Rückkopplung einsetzte.

Eine mögliche Ursache hierfür ist die vergleichsweise starke horizontale Bündelung des Prototyps. Dadurch gelangt bei geeigneter Positionierung weniger Schallenergie zurück in den Bereich des Mikrofons.

**Gesamteindruck** Insgesamt hinterließ der Prototyp sowohl bei Musik- als auch bei Sprachwiedergabe einen positiven Höreindruck. Die größten Stärken zeigten sich bei der Sprachbeschallung mit aktivierter Strahlsteuerung, während bei der Musikwiedergabe insbesondere die begrenzte Tieftonwiedergabe und die subjektiv geringere Hochtonpräzision als Einschränkungen wahrgenommen wurden.

Im direkten Hörvergleich wurden die Sprachwiedergabe und die räumliche Abbildung des entwickelten Prototyps subjektiv als mindestens vergleichbar mit den verwendeten Fohhn-Systemen und teilweise als angenehmer wahrgenommen. Diese Einschätzung stellt bewusst eine persönliche Hörbeurteilung dar und ergänzt die objektiven Messergebnisse der vorangegangenen Abschnitte.

## 4.6 Vergleich mit kommerziellen Systemen

Während der praktischen Messungen wurde der entwickelte Prototyp mit einer Fohhn FS-70 und einer Fohhn Hybrid-1 verglichen. Die Auswahl dieser Systeme ergab sich aus ihrer Verfügbarkeit zum Zeitpunkt der Messungen und ihrer Eignung für den vorgesehenen Versuchsaufbau.

Für den abschließenden Vergleich wird zusätzlich die Fohhn FS-110 berücksichtigt. Sie entspricht hinsichtlich ihres Funktionsumfangs weitgehend der kleineren FS-70, verwendet jedoch acht anstelle von vier Breitbandchassis und ist damit hinsichtlich der Anzahl der Lautsprechertreiber besser mit dem entwickelten Prototyp vergleichbar.

Da die Fohhn Focus Slim Serie während der Konzeption des Prototyps als Referenz für den angestrebten Funktionsumfang diente, werden im Folgenden die wesentlichen technischen Eigenschaften und Kosten des Prototyps der FS-70 und FS-110 gegenübergestellt. Abbildung 43 zeigt die drei verglichenen Systeme, Tabelle 14 fasst ihre technischen Eigenschaften zusammen.



Prototyp



Fohhn FS-110



Fohhn FS-70

Abbildung 43: Entwickelter Prototyp sowie die Vergleichssysteme Fohhn FS-110 und FS-70

Tabelle 14: Vergleich wesentlicher technischer Eigenschaften

| **Parameter** | **Prototyp** | **Fohhn FS-110** | **Fohhn FS-70** |
|---|---|---|---|
| Abmessungen | 152 × 155 × 1035 mm | 85 × 1100 × 90 mm | 85 × 700 × 90 mm |
| Masse | 16,8 kg | 5,8 kg | 3,9 kg |
| Lautsprecherchassis | 8 × 3” Breitband | 8 × 2,5” Breitband | 4 × 2,5” Breitband |
| Max. nutzbarer Schalldruckpegel | 116 dB SPL | 117 dB SPL | 111 dB SPL |
| Übertragungsbereich | 80 Hz–20 kHz | 62 Hz–17 kHz | 62 Hz–17 kHz |
| Systemlatenz | 13 ms | Dante + 1,2 ms | Dante + 1,2 ms |
| Leistungsaufnahme | 28 W Leerlauf, 300 W maximal | 15 W Leerlauf, 200 W maximal | 10 W Leerlauf, 100 W maximal |
| Audioeingänge | analog, symmetrisch XLR | analog, Dante | analog, Dante |
| Steuerung | Weboberfläche über Browser, WLAN oder Ethernet | Fohhn Audio Soft, USB-C oder Netzwerk | Fohhn Audio Soft, USB-C oder Netzwerk |
| Beam Steering | ja | ja | ja |
| Anzahl unabhängiger Beams | 2 | 2 | 2 |
| Preis inkl. MwSt. | 741 € | 4 736 € | 3 212 € |

Die technischen Angaben zu FS-70 und FS-110 wurden den Herstellerunterlagen entnommen (Fohhn Audio AG 2023b; Fohhn Audio AG 2023a). Fohhn gibt für die FS-70 vier und für die FS-110 acht 2,5”Breitbandchassis an. Beide Systeme gehören zur gleichen Focus-Slim-Serie und verwenden dieselbe Beam-Steering-Plattform.

Der deutlichste Nachteil des Prototyps zeigt sich bei den mechanischen Kenndaten. Mit 16,8 kg ist er etwa dreimal so schwer wie die FS-110 und mehr als viermal so schwer wie die FS-70. Auch Breite und Tiefe des Gehäuses fallen beim Prototyp wesentlich größer aus. Damit besteht insbesondere bei Masse und Gehäusequerschnitt noch erhebliches Optimierungspotenzial.

Beim maximal nutzbaren Schalldruckpegel liegen Prototyp und FS-110 mit 116 beziehungsweise 117 dB SPL nahezu gleichauf. Die FS-70 erreicht mit 111 dB SPL einen niedrigeren Wert. Hinsichtlich des erreichbaren Pegels ergibt sich damit für den Prototyp gegenüber der hinsichtlich der Treiberanzahl vergleichbaren FS-110 kein wesentlicher Unterschied.

Deutlicher fällt der Unterschied im Tieftonbereich aus. Der nutzbare Übertragungsbereich des Prototyps beginnt bei 80 Hz, während für beide Fohhn-Systeme 62 Hz angegeben werden. Damit besitzen FS-70 und FS-110 einen klaren Vorteil bei der Tieftonwiedergabe. Der Unterschied im Tieftonbereich ist neben dem gewählten geschlossenen Gehäuseprinzip auch vor dem Hintergrund der deutlich von den Herstellerangaben abweichenden gemessenen Thiele/Small-Parameter der verwendeten Treiber zu betrachten. Der Prototyp erweitert den Übertragungsbereich dagegen am oberen Ende bis 20 kHz, während Fohhn 17 kHz angibt.

Hinsichtlich des Funktionsumfangs bestehen zwischen den drei Beam-Steering-Systemen keine wesentlichen Unterschiede. Da die Focus-Slim-Systeme bereits in der Planungsphase als funktionale Referenz verwendet wurden, wurden die für den Prototyp festgelegten Anforderungen entsprechend daran ausgerichtet. Die vorgesehenen Funktionen zur Strahlsteuerung, zur Erzeugung eines zweiten Beams, zur Entzerrung, zur Pegelregelung und zur Speicherung von Konfigurationen konnten im Prototyp umgesetzt werden.

Ein Unterschied besteht bei der Bedienung und Einbindung in das Audiosystem. FS-70 und FS-110 werden über die Fohhn Audio Soft konfiguriert. Für Änderungen an Routing, EQ, Pegel oder Presets ist dazu ein Windows-PC mit der entsprechenden Software vorgesehen. Der Prototyp verwendet dagegen eine browserbasierte Benutzeroberfläche, sodass auf dem Bediengerät keine zusätzliche Steuerungssoftware installiert werden muss. Der Zugriff ist sowohl über Ethernet als auch drahtlos über den integrierten WLAN-Zugangspunkt möglich. Die Steuerung kann dadurch beispielsweise über einen Laptop, ein Tablet oder ein Smartphone erfolgen. Die Audioübertragung bleibt davon unabhängig und erfolgt über den symmetrischen XLR-Eingang. Fohhn bietet zusätzlich Dante als digitale Audioschnittstelle an.

Bei der Systemlatenz zeigt sich dagegen ein wesentlicher Unterschied. Für den Prototyp wurden 13 ms End-to-End-Latenz gemessen. Für die Focus-Slim-Systeme gibt Fohhn eine zusätzliche Systemlatenz von Dante plus 1,2 ms an. Die gemessenen 13 ms des Prototyps bleiben dennoch ein relevantes Optimierungsziel, insbesondere da bereits ein wesentlicher Teil des für eine Live-Beschallung verfügbaren Latenzbudgets innerhalb des Lautsprechersystems verbraucht wird.

Auch die Leistungsaufnahme fällt beim Prototyp höher aus. Im Leerlauf beträgt die Differenz mit 28 W gegenüber 15 beziehungsweise 10 W ebenfalls deutlich weniger, bleibt jedoch vorhanden.

Die Kosten stellen den größten quantitativen Unterschied zwischen den Systemen dar. Für den aufgebauten Prototyp ergeben sich Material- und Komponentenkosten von rund 741 €. Die FS-70 kostet zum gleichen Zeitpunkt 3 212 €, die FS-110 4 736 €. Damit liegt der Prototyp um 2 471 € beziehungsweise 76,9 % unter dem Preis der FS-70. Gegenüber der FS-110 beträgt die Differenz 3 995 € beziehungsweise 84,4 %.

Alle drei Preise entsprechen dem Stand vom 23. August 2026, enthalten die gesetzliche Mehrwertsteuer und verstehen sich ohne Versandkosten.

## 4.7 Diskussion

Die durchgeführten Messungen zeigen insgesamt, dass der entwickelte Prototyp für ein geschlossenes Breitbandsystem brauchbare akustische Eigenschaften erreicht. Der gemessene Übertragungsbereich, der maximal nutzbare Schalldruckpegel sowie die Ergebnisse

der Verzerrungs- und Impedanzmessungen zeigen, dass das System grundsätzlich für die vorgesehene Sprachbeschallung und in eingeschränktem Umfang auch für Musikwiedergabe geeignet ist.

Ein wesentliches Ergebnis der Untersuchung betrifft die Gehäuseauslegung. Diese wurde zunächst mit den Thiele/Small-Parametern aus dem Datenblatt vorgenommen. Die späteren Messungen der tatsächlich eingesetzten Treiber zeigten jedoch deutliche Abweichungen, insbesondere bei $f_s$, $Q_{es}$ und $Q_{ts}$. Die Neuberechnung ergab deshalb eine deutlich höhere Systemresonanz und Gesamtgüte als ursprünglich vorgesehen. Da der gemessene Wert von $Q_{ts}$ bereits oberhalb von 0,707 liegt, wäre die angestrebte Butterworth-nahe Abstimmung mit diesen Treibern in einem geschlossenen Gehäuse grundsätzlich nicht erreichbar gewesen.

Für eine zukünftige Umsetzung sollten die tatsächlich verwendeten Lautsprechertreiber daher vor der endgültigen Festlegung des Gehäusevolumens vermessen werden. Gerade bei kostengünstigen Breitbandtreibern kann dadurch vermieden werden, dass die Gehäuseauslegung auf nicht repräsentativen Herstellerdaten basiert.

Besonders aussagekräftig waren die STI-Messungen im Ditze-Hörsaal. Obwohl die Wirkung des Beam Steering dabei nicht direkt über eine vollständige räumliche Richtcharakteristik erfasst wurde, konnte dessen praktischer Einfluss auf die Sprachverständlichkeit deutlich nachgewiesen werden. Mit aktivierter Strahlsteuerung verringerte sich die Spannweite der STI-Werte innerhalb des Zuhörerbereichs erheblich. Damit ließ sich zeigen, dass die Schallenergie gezielter in die vorgesehene Zuhörerfläche verteilt werden kann.

Eine wesentliche Einschränkung der Untersuchung besteht darin, dass die veränderbare vertikale Richtcharakteristik des Systems nicht vollständig messtechnisch erfasst wurde. Die Messungen im reflexionsarmen Raum beschränkten sich auf die zuvor beschriebene horizontale Ebene. Eine direkte Vermessung unterschiedlicher Steering-Winkel in der vertikalen Ebene hätte eine genauere Quantifizierung der Hauptkeulenlage, der Strahlbreite und möglicher Nebenkeulen ermöglicht.

Zusätzlich wäre eine standardisierte Untersuchung des *Gain before Feedback* sinnvoll gewesen. Während der praktischen Versuche konnte beim Prototyp subjektiv eine höhere Mikrofonverstärkung vor dem Einsetzen akustischer Rückkopplung erreicht werden. Diese Beobachtung wurde jedoch nicht unter definierten und reproduzierbaren Bedingungen messtechnisch quantifiziert. Eine entsprechende Messung könnte den praktischen Nutzen der Richtwirkung für Sprachbeschallungsanwendungen weiter belegen.

Auch die subjektive Hörbeurteilung besitzt nur eine eingeschränkte Aussagekraft, da sie auf einer einzelnen Beurteilung und nicht auf einem standardisierten Hörversuch mit mehreren Versuchspersonen beruht. Die daraus abgeleiteten Aussagen sind daher als Ergänzung zu den objektiven Messergebnissen und nicht als eigenständiger Leistungsnachweis zu verstehen.

Eine weitere Einschränkung besteht darin, dass im Rahmen dieser Arbeit keine Befragung potenzieller Anwender durchgeführt wurde. Dadurch konnte weder das grundsätzliche Interesse an einem selbst aufgebauten Beam-Steering-Lautsprecher noch die Verständlichkeit und praktische Nachvollziehbarkeit des entwickelten Leitfadens systematisch bewertet werden. Eine entsprechende Nutzerstudie könnte diese Aspekte in einer weiterführenden Untersuchung ergänzen.

Insgesamt zeigen die Ergebnisse dennoch, dass die wesentlichen funktionalen und akustischen Ziele des Projekts erreicht wurden. Die größten offenen Punkte betreffen weniger die grundsätzliche Funktionsfähigkeit der Strahlsteuerung als vielmehr deren vollständige messtechnische Charakterisierung und die weitere Optimierung des Gesamtsystems.

# 5 Zusammenfassung

Ziel dieser Arbeit war die Entwicklung eines praxisorientierten Leitfadens für den Aufbau eines Line-Array-Lautsprechers mit elektronisch einstellbarer vertikaler Richtcharakteristik. Die theoretischen Grundlagen, die Systemauslegung, die Auswahl der Komponenten sowie der mechanische, elektrische und softwareseitige Aufbau wurden anhand eines eigenen Prototyps praktisch umgesetzt und dokumentiert.

Der entwickelte Lautsprecher verwendet acht einzeln angesteuerte Breitbandchassis und kombiniert eine mehrkanalige Verstärkung mit einer auf einem Raspberry Pi 5 ausgeführten digitalen Signalverarbeitung. Die zeitkritische Audioverarbeitung wurde in C++ realisiert, während die Bedienung über eine browserbasierte Weboberfläche erfolgt. Neben der Strahlsteuerung wurden unter anderem Equalizer, Limiter, Presets sowie der Betrieb mit zwei unabhängigen Beams umgesetzt.

Für das Lautsprechergehäuse wurden zwei konstruktive Varianten entwickelt. Das ursprüngliche Konzept basierte auf einem überwiegend 3D-gedruckten Aufbau mit gefüllten Gehäusestrukturen. Aufgrund unvorhersehbarer Umstände wurde der Prototyp stattdessen mit einem Aluminium-Vierkantprofil aufgebaut. Beide Varianten wurden konstruktiv ausgearbeitet und als alternative Umsetzungsmöglichkeiten in den Leitfaden aufgenommen.

Der entwickelte Leitfaden soll nicht nur die Reproduktion des aufgebauten Prototyps ermöglichen, sondern auch die getroffenen Entscheidungen und deren technische Zusammenhänge nachvollziehbar machen. Mithilfe der bereitgestellten Berechnungs-, Simulations- und Softwarewerkzeuge können zentrale Systemparameter angepasst und darauf aufbauend alternative Ausführungen des Lautsprechers entwickelt werden.

Die durchgeführten Messungen bestätigten die grundsätzliche Funktionsfähigkeit des Systems. Mit aktiviertem Standard-EQ wurde ein nutzbarer Übertragungsbereich von etwa 80 Hz bis 20 kHz erreicht. Der maximal nutzbare Schalldruckpegel beträgt etwa 116 dB SPL, die gemessene End-to-End-Latenz 13 ms.

Besonders relevant für die Zielsetzung der Arbeit waren die STI-Messungen im Ditze-Hörsaal. Mit aktiviertem Beam Steering wurde die Sprachverständlichkeit über den Zuhörerbereich deutlich gleichmäßiger verteilt. Der Unterschied zwischen höchstem und niedrigstem STI-Wert innerhalb der drei untersuchten Zuhörerpositionen verringerte sich von 0,214 ohne Steering auf 0,040 mit aktivierter Strahlsteuerung. Damit konnte der praktische Nutzen der implementierten Richtungssteuerung unter realen Raumbedingungen nachgewiesen werden.

Im Vergleich mit den kommerziellen Referenzsystemen Fohhn FS-70 und FS-110 zeigte der Prototyp einen weitgehend vergleichbaren Funktionsumfang. Nachteile bestehen insbesondere bei Masse, Gehäuseabmessungen, Tieftonwiedergabe und Systemlatenz. Die Material- und Komponentenkosten lagen mit rund 741 € jedoch deutlich unter den Preisen der betrachteten kommerziellen Systeme.

Insgesamt zeigt die Arbeit, dass ein funktionsfähiger Beam-Steering-Lautsprecher mit frei verfügbaren Komponenten und überschaubarem Kostenaufwand eigenständig realisiert werden kann. Der entwickelte Prototyp bestätigt die technische Umsetzbarkeit des erarbeiteten Konzepts und bildet gemeinsam mit den bereitgestellten Berechnungs-, Konstruktions- und Softwaredaten die Grundlage für den entwickelten Leitfaden.

# Literaturverzeichnis


Azimi, Parham u. a. (2016). „Emissions of Ultrafine Particles and Volatile Organic Compounds from Commercially Available Desktop Three-Dimensional Printers with Multiple Filaments“. In: *Environmental Science & Technology* 50.3, S. 1260–1268. DOI: 10.1021/acs.est.5b04983.

Ballou, Glen M., Hrsg. (2008). *Handbook for Sound Engineers*. 4. Aufl. Boston, MA: Focal Press. ISBN: 978-0-240-80969-4.

Bambu Lab (2023). *PET-CF. Carbon Fiber Reinforced PET Filament*. URL: https://bambulab.com/en/filament/pet-cf (besucht am 13. 08. 2026).

— (2025). *Bambu Filament Guide*. Bambu Lab. URL: https://bambulab.com/en/filament-guide (besucht am 13. 08. 2026).

Bouillot, Nicolas u. a. (Sep. 2009). „AES White Paper AESTD1003V1: Best Practices in Network Audio“. In: *Journal of the Audio Engineering Society* 57.9, S. 729–741.

British Standards Institution (30. Sep. 2011). *BS EN 60268-16:2011. Sound system equipment—Objective rating of speech intelligibility by speech transmission index*. British Standard. British Standards Institution. London. DOI: 10.3403/30249993. URL: https://landingpage.bsigroup.com/LandingPage/Undated?UPI=000000000030249993 (besucht am 22. 08. 2026).

Chojnacki, Bartłomiej, Jan Pawlik und Tadeusz Kamisiński (2021). „Influence of Different Materials Used for 3D Printing in Miniature Speaker Enclosure Development“. In: *InterNoise 2021: 50th International Congress and Exposition on Noise Control Engineering*. Washington, D.C.: Institute of Noise Control Engineering of the USA, S. 5631–5636. ISBN: 978-1-7325986-5-2. DOI: 10.3397/IN-2021-3188.

Dayton Audio (2017). *PC83-4 3-Inch Full-Range Poly Cone Driver. Specification Sheet*. Dayton Audio. URL: https://www.daytonaudio.com/images/resources/295-154-dayton-audio-pc83-4-specifications.pdf (besucht am 16. 08. 2026).

Fohhn Audio AG (2021). *Hybrid-1. Media Scale active loudspeaker*. Fohhn Audio AG. URL: https://fohhn.partcommunity.com/3d-cad-models/?info=fohhn_audio%2Fmedia%2Fhybrid-1.prj (besucht am 23. 08. 2026).

— (2023a). *FS-110. Focus Slim—Active line source loudspeaker with Fohhn Beam Steering Technology*. Fohhn Audio AG. URL: https://fohhn.partcommunity.com/3d-cad-models/fs-110-focus-slim-fohhn-audio?info=fohhn_audio%2Ffocus_slim%2Ffs-110.prj (besucht am 23. 08. 2026).

— (2023b). *FS-70. Focus Slim—Active line source loudspeaker with Fohhn Beam Steering Technology*. Fohhn Audio AG. URL: https://fohhn.partcommunity.com/3d-cad-models/fs-70-focus-slim-fohhn-audio?info=fohhn_audio%2Ffocus_slim%2Ffs-70.prj (besucht am 23. 08. 2026).

Görne, Thomas (2015). *Tontechnik. Hören, Schallwandler, Impulsantwort und Faltung, digitale Signale, Mehrkanaltechnik, tontechnische Praxis*. 4. Aufl. Medien. München: Carl Hanser Verlag. 384 S. ISBN: 978-3-446-43964-1. URL: https://www.hanserpublications.com/Tontechnik/978-3-446-43964-1 (besucht am 15. 08. 2026).

HiFiBerry (26. Nov. 2024). *Datasheet Studio ADC*. HiFiBerry. URL: https://www.hifiberry.com/docs/data-sheets/datasheet-studio-adc/ (besucht am 16. 08. 2026).

Laakso, Timo I. u. a. (Jan. 1996). „Splitting the Unit Delay: Tools for Fractional Delay Filter Design“. In: *IEEE Signal Processing Magazine* 13.1, S. 30–60. ISSN: 1053-5888. DOI: 10.1109/79.482137.

Lawrence, Michael (2022). *Between the Lines. Concepts in Sound System Design and Alignment*. New York: Precision Audio Press. 210 S. ISBN: 979-8-2180-0753-9. URL: https://www.precisionaudioservices.com/book (besucht am 12. 08. 2026).

Marin, Elia u. a. (2023). „Non-destructive Spectroscopic Diagnostic Tools for the Assessment of the Mechanical Strength of 3D-Printed PLA“. In: *Polymer Degradation and Stability* 216, S. 110506. DOI: 10.1016/j.polymdegradstab.2023.110506.

McCarthy, Bob (2016). *Sound Systems: Design and Optimization. Modern Techniques and Tools for Sound System Design and Alignment*. 3. Aufl. Routledge. ISBN: 978-0-415-73101-0.

Olson, Harry Ferdinand (1991). *Acoustical Engineering*. 2. Aufl. Reprint of the 1957 edition published by D. Van Nostrand Co. Philadelphia, PA: Professional Audio Journals, Inc. 736 S. URL: https://openlibrary.org/books/OL1575709M/Acoustical_engineering (besucht am 11. 08. 2026).

Small, Richard H. (Dez. 1972). „Closed-Box Loudspeaker Systems—Part 1: Analysis“. In: *Journal of the Audio Engineering Society* 20.10, S. 798–808. ISSN: 0004-7554. URL: https://aes2.org/publications/elibrary-page/?id=2022 (besucht am 12. 08. 2026).

— (Juni 1973). „Vented-Box Loudspeaker Systems—Part 1: Small-Signal Analysis“. In: *Journal of the Audio Engineering Society* 21.5, S. 363–372. ISSN: 0004-7554. URL: https://aes2.org/publications/elibrary-page/?id=1967 (besucht am 12. 08. 2026).

Thiele, Neville (Mai 1971). „Loudspeakers in Vented Boxes: Part 1“. In: *Journal of the Audio Engineering Society* 19.5, S. 382–392. ISSN: 0004-7554. URL: https://aes2.org/publications/elibrary-page/?id=2173 (besucht am 12. 08. 2026).

WONDOM Audio Technology (2023). *GAB8: 10 x 50 W Class D 7.3/5.3 Configurable Audio Amplifier Board—TPA3244. User Manual*. Version UMGAB8-02. WONDOM Audio Technology. URL: https://files.sure-electronics.com/download/GAB8_10x50W_USB_Codec_Input_User_Manual.pdf (besucht am 16. 08. 2026).

# Anhang A

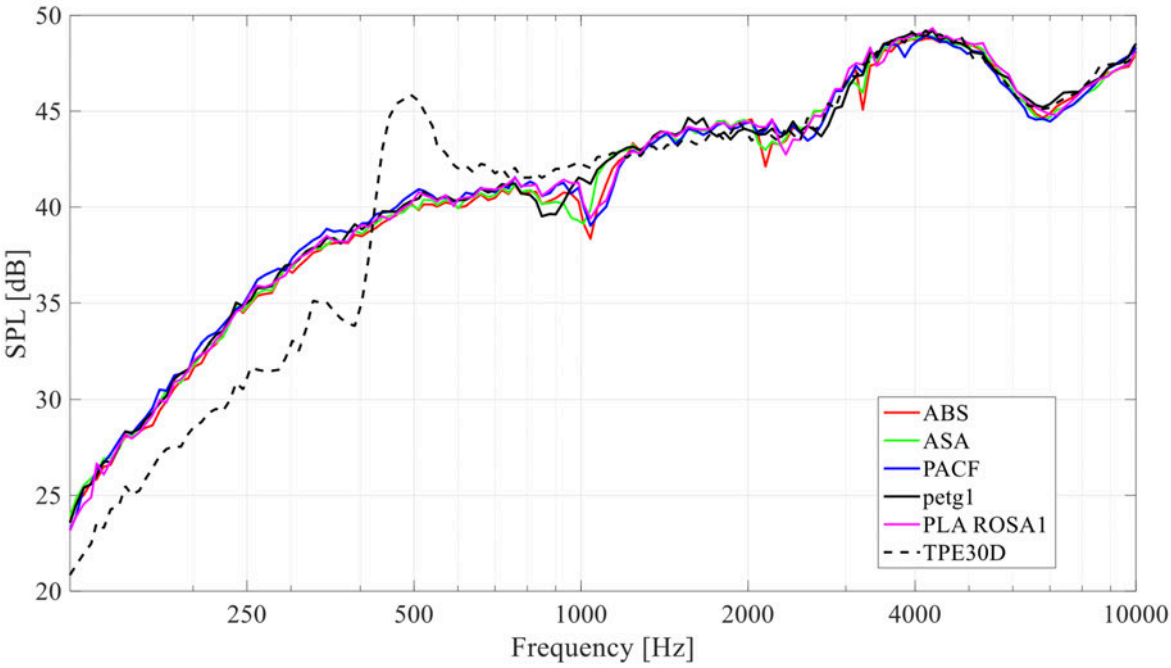



Abbildung A.1: Frequenzgang von 3D-gedruckten Lautsprechergehäusen

Quelle: Chojnacki, Pawlik und Kamisiński (2021).

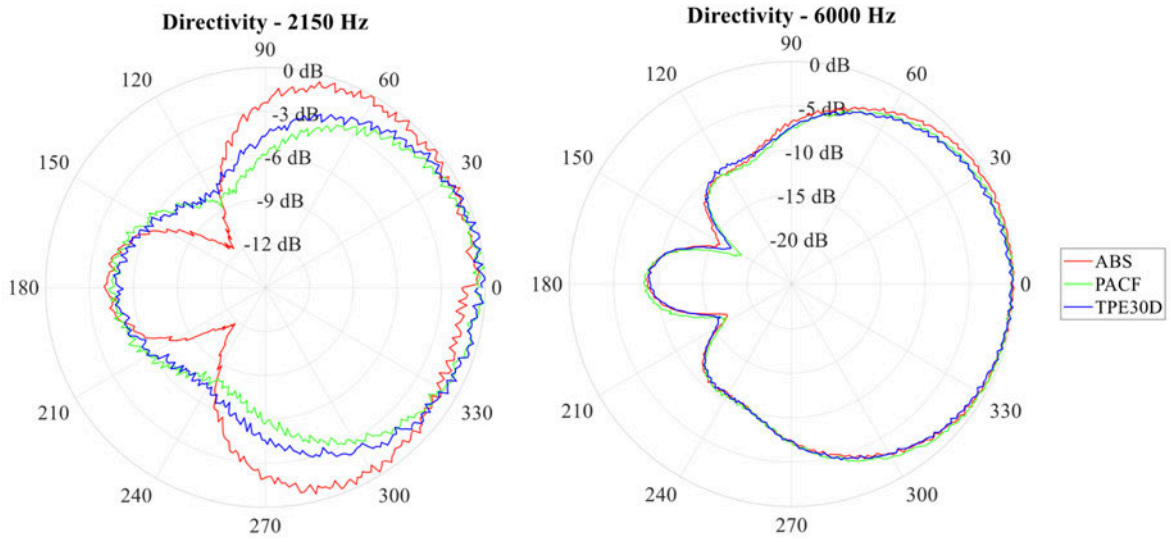



Abbildung A.2: Polardiagramm von 3D-gedruckten Lautsprechergehäusen

Quelle: Chojnacki, Pawlik und Kamisiński (2021).

# Anhang B

Die folgenden Abbildungen zeigen sämtliche Seiten der browserbasierten Benutzeroberfläche des entwickelten Beam-Steering-Lautsprechers: die Hauptseite (Abbildung B.1), die Steering-Seite (Abbildung B.2), die Equalization-Seite (Abbildung B.3), die Test-Seite (Abbildung B.4) sowie die System-Seite (Abbildung B.5).

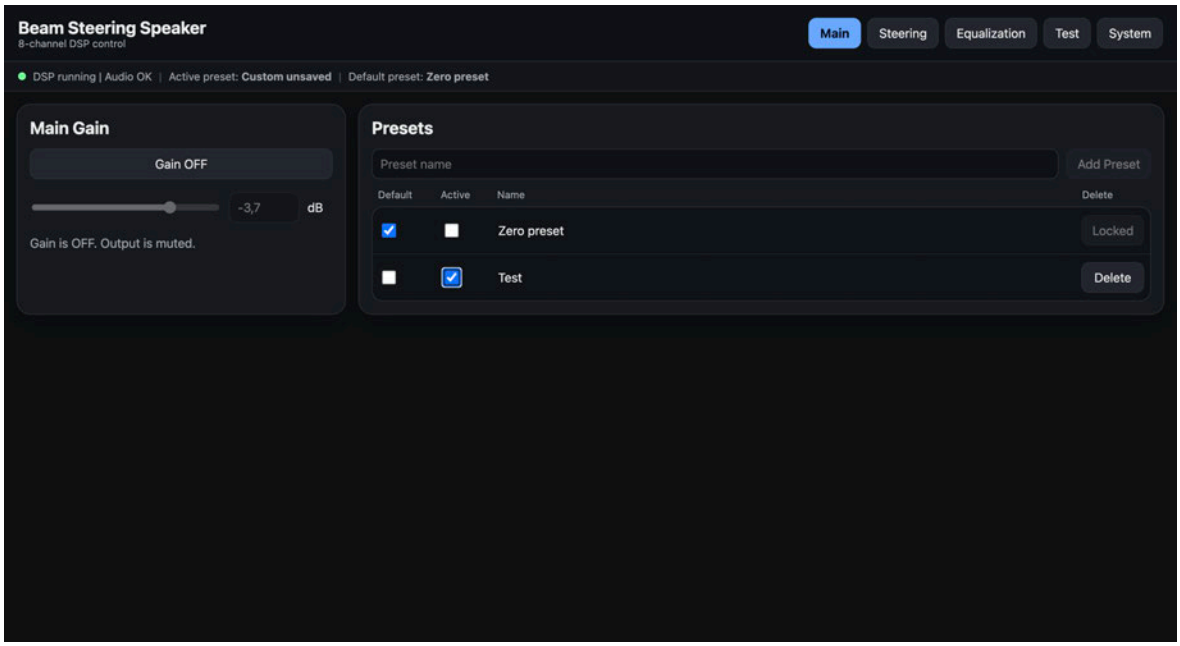



Abbildung B.1: Hauptseite der Benutzeroberfläche mit Gain- und Presetverwaltung

Quelle: Eigene Darstellung.

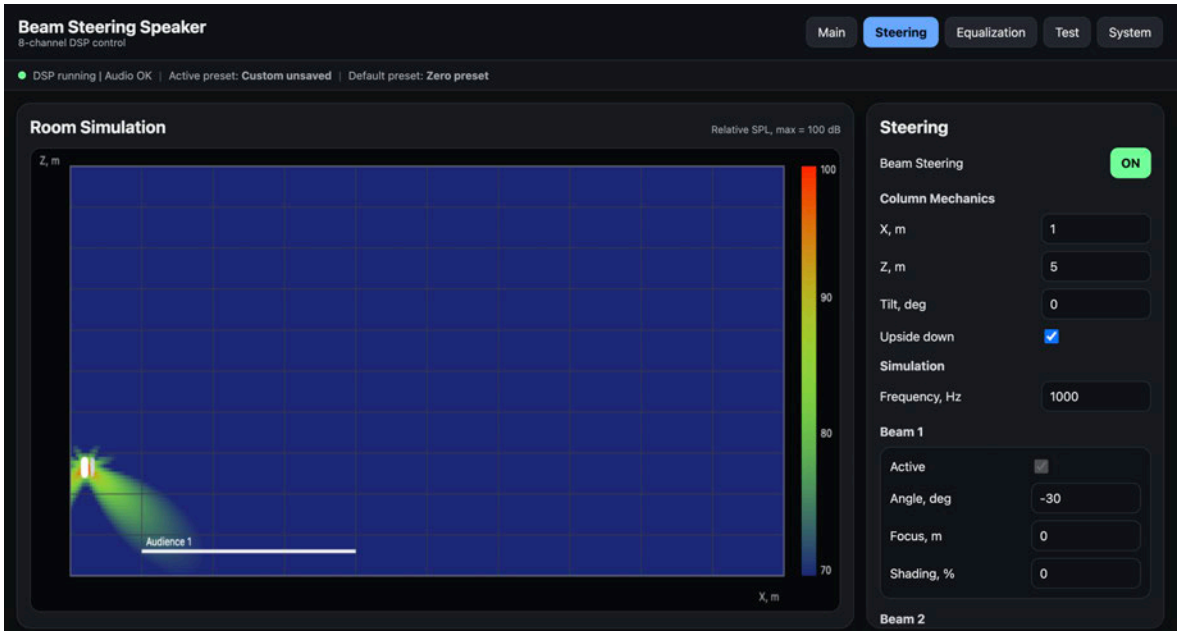



Abbildung B.2: Steering-Seite mit Schallfeldsimulation und Parametern der Strahlsteuerung

Quelle: Eigene Darstellung.




Abbildung B.3: Equalization-Seite mit Filterparametern und dargestellter DSP-Übertragungsfunktion

Quelle: Eigene Darstellung.

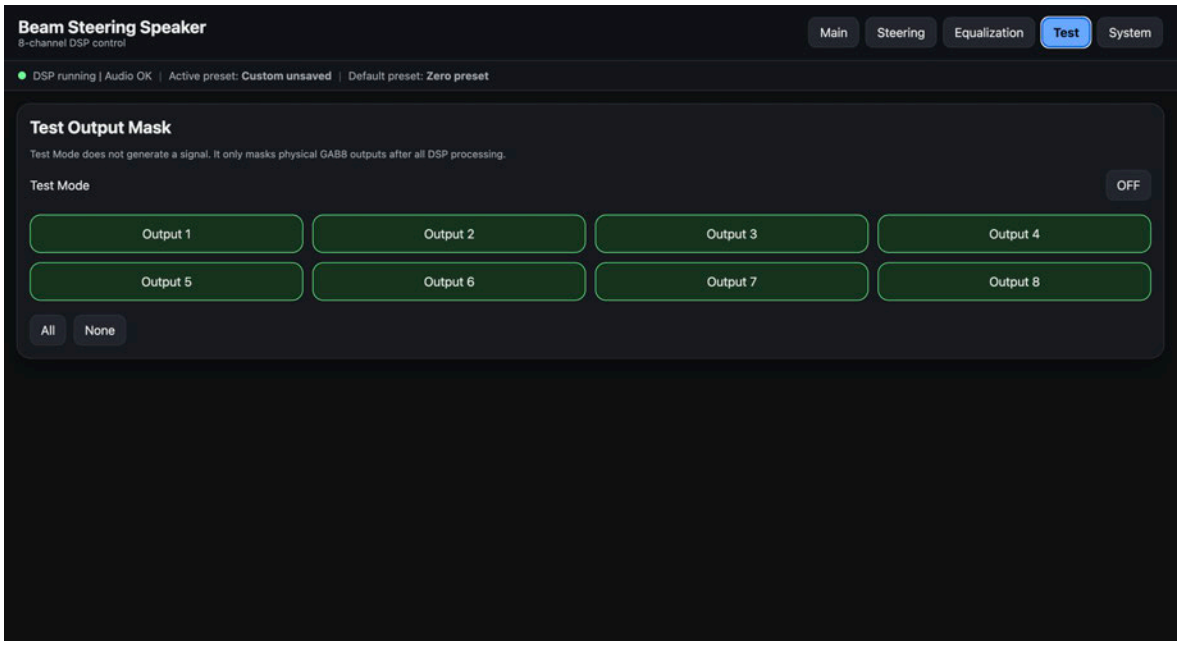



Abbildung B.4: Test-Seite zur gezielten Auswahl einzelner Ausgangskanäle

Quelle: Eigene Darstellung.

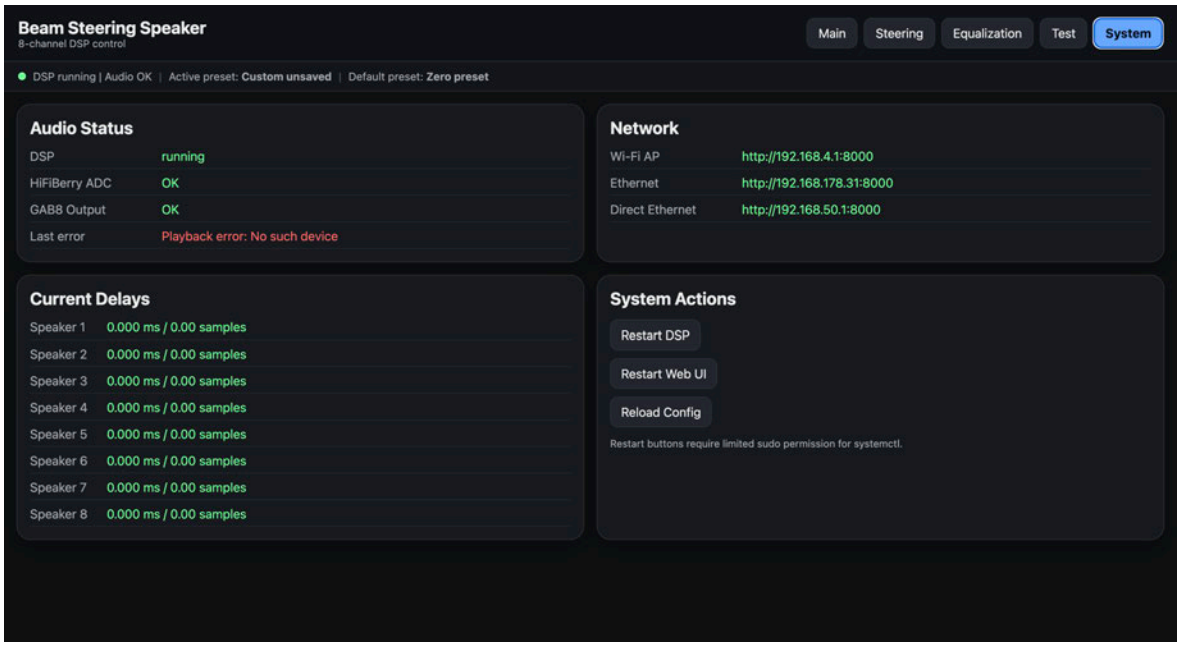



Abbildung B.5: System-Seite mit Audio- und Netzwerkstatus, aktuellen Verzögerungswerten und Systemfunktionen

Quelle: Eigene Darstellung.

## Inhalt des USB-Datenträgers

Die folgende Übersicht listet die digitalen Projektdaten auf, die dieser Arbeit auf einem separaten USB-Datenträger beiliegen. Die Daten ergänzen den in dieser Arbeit beschriebenen Leitfaden und ermöglichen die Reproduktion sowie die Anpassung des entwickelten Lautsprechersystems.

| Ordner / Datei | Inhalt |
|---|---|
| `Bachelorarbeit` | |
| `BA_Entwicklung_eines_Line_Arrays.pdf` | Vorliegende Bachelorarbeit als PDF-Dokument |
| `Konstruktionsdaten` | |
| `Bohrschablone_Treiber.pdf` | Bohrschablone zur Positionierung der Treiberöffnungen |
| `speaker_3d_model_aluminium.f3d` | Fusion-3D-Modell des Aluminiumgehäuses |
| `speaker_3d_model_print.f3d` | Fusion-3D-Modell des additiv gefertigten Lautsprechergehäuses |
| `Berechnung und Simulation` | |
| `beam_steering_loudspeaker_calculator.xlsx` | Tabellenkalkulation zur Berechnung der Beam-Steering-Parameter |
| `beam_steering_simulationsmodell.py` | Python-Modell zur Simulation des Beam-Steering-Lautsprechers |
| `Software` | |
| `beam-speaker-release_20260731_123412 2.tar.gz` | Archiv der Softwareversion des Beam-Steering-Lautsprechers |

## Eigenständigkeitserklärung

Hiermit versichere ich, dass ich die vorliegende Bachelorarbeit mit dem Titel:

---

selbständig und nur mit den angegebenen Hilfsmitteln verfasst habe. Alle Passagen, die ich wörtlich aus der Literatur oder aus anderen Quellen wie z. B. Internetseiten übernommen habe, habe ich deutlich als Zitat mit Angabe der Quelle kenntlich gemacht.

| Datum | Unterschrift |
| --- | --- |