



# **Aufbau und Verifikation eines Referenzlautsprechers nach ISO 6926**

Rodrigo Feitl-Schönleitner, BSc

**Toningenieur-Projekt**

Betreuer: Dipl.-Ing. Dr.techn. Werner Weselak

**Institut für Signalverarbeitung und Sprachkommunikation**

Leiter: Univ.-Prof. Dipl.-Ing. Dr.techn. Gernot Kubin

**Technische Universität Graz**

Graz, im Jänner 2025

## Zusammenfassung

Für die Messung von Schallleistungspegeln nach ISO 3744 mit einem vergleichenden Verfahren ist eine Referenzschallquelle erforderlich, deren Schallleistungspegel bekannt ist. Im Zuge einer vorangehenden Arbeit wurde eine solche Quelle, ausgeführt als Lautsprechersystem, entworfen. Diese bietet gegenüber den handelsüblichen Radiallüftern den Vorteil, dass das abgestrahlte Geräusch an jenes des zu vermessenden schallabstrahlenden Objektes angepasst werden kann.

Im Zuge dieser Arbeit werden zunächst die Bauteile in einem 3D-CAD-Programm entworfen und anschließend wird ein Prototyp aus MDF und 3D-gedruckten Teilen gefertigt. Das Lautsprechersystem besteht aus drei tetraederförmig angeordneten Tieftontreibern für einen angemessenen Pegel bei tiefen Frequenzen, und einem darin eingebauten inversen Hornlautsprecher, der eine ungerichtete Abstrahlung bei hohen Frequenzen bietet. Um das Eingangssignal auf die Treiber aufzuteilen, wird eine Frequenzweiche entworfen. Zusätzlich werden Aufsätze für das Horn gefertigt, die die omnidirektionale Richtwirkung verbessern.

Zur Überprüfung der Konformität des Lautsprechersystems mit der Norm ISO 6926, welche die Anforderungen an eine solche Quelle festlegt, werden akustische Messungen durchgeführt. Anhand dieser Messdaten werden Größen errechnet, die Aufschluss darüber geben, ob die Quelle die Anforderungen hinsichtlich zeitlicher Stabilität, spektraler Eigenschaften und Richtwirkung erfüllt. Die Ergebnisse zeigen, dass der entworfene Referenzlautsprecher mit bestimmten Aufsätzen alle normativen Anforderungen erfüllt. Zukünftige Messungen in einem Raum der Genauigkeitsklasse 1 können diese Resultate weiter präzisieren.

## Abstract

For the measurement of sound power levels according to ISO 3744 using a comparative method, a reference sound source with a known sound power level is required. As part of a preceding project, such a source, designed as a loudspeaker system, has been developed. Compared to conventional radial fans, this design offers the possibility of adapting the emitted sound to match the sound of the sound-emitting object to be measured.

In this project, the components are first designed using a 3D CAD program. Then a prototype is constructed from MDF and 3D-printed parts. The loudspeaker system consists of three woofers, arranged in a tetrahedral configuration to achieve sufficient sound power levels at low frequencies, and an integrated inverse horn speaker that provides omnidirectional radiation at high frequencies. A passive crossover is designed to distribute the input signal to the drivers. Additionally, various attachments for the inverse horn are fabricated to improve its omnidirectional directivity.

To verify the compliance of the loudspeaker system with ISO 6926, which specifies the requirements for such a source, acoustic measurements are performed. Based on these measurements, parameters are calculated to assess whether the loudspeaker system meets the requirements for temporal stability, spectral properties, and directivity. The results demonstrate that the designed reference loudspeaker, with certain attachments, fulfils all normative requirements. Future measurements in a Class 1 precision room can further refine these results.

# Inhaltsverzeichnis

<b>1</b>	<b>Einleitung</b>	<b>5</b>
<b>2</b>	<b>Aufbau des Lautsprechersystems</b>	<b>7</b>
2.1	Tetraeder-Grundkonstruktion.....	8
2.2	3D-Druck-Teile .....	11
2.3	Zusammenbau der Komponenten .....	14
2.4	Stückliste .....	16
<b>3</b>	<b>Passive Frequenzweiche</b>	<b>17</b>
3.1	Übernahmefrequenz .....	17
3.2	Schaltplan .....	17
3.3	Dimensionierung .....	18
3.4	Simulation .....	20
3.5	Aufbau.....	21
3.6	Zusammenbau der Komponenten .....	24
3.7	Stückliste .....	25
<b>4</b>	<b>Messungen</b>	<b>27</b>
4.1	Klippel DA 2 und Outline Drehteller .....	27
4.2	PAK Mobile MKII .....	35
<b>5</b>	<b>Messergebnisse</b>	<b>45</b>
5.1	Zeitliche Stabilität (Anforderung 1).....	46
5.2	Spektrale Eigenschaften (Anforderungen 2 und 3).....	49
5.3	Richtwirkung (Anforderung 4) .....	52
<b>6</b>	<b>Diskussion</b>	<b>59</b>

---

## Literaturverzeichnis

- [1] R. Feitl-Schönleitner, Entwurf eines Referenzlautsprechers nach ISO 6926, SPSC, 2023.
- [2] Austrian Standards International, EN ISO 6926: Acoustics – Requirements for the performance and calibration of reference sound sources used for the determination of sound power levels, 2021-11-01.
- [3] Austrian Standard International, EN ISO 3745: Akustik – Bestimmung der Schalleistungs- und Schallenergiepegel von Geräuschquellen aus Schalldruckmessungen – Verfahren der Genauigkeitsklasse 1 für reflexionsarme Räume und Halbräume, 2017-10-15.
- [4] Austrian Standards International, EN ISO 3744: Akustik – Bestimmung der Schalleistungs- und Schallenergiepegel von Geräuschquellen aus Schalldruckmessungen – Hüllflächenverfahren der Genauigkeitsklasse 2 für ein im Wesentlichen freies Schallfeld über einer reflektierenden Ebene, 2011-03-01.

# 1 Einleitung

Der Ausgangspunkt dieser Arbeit ist der Entwurf eines Referenzlautsprechers nach ISO 6926 [1]. Dieses Lautsprechersystem soll in dieser Arbeit präzise geplant, aufgebaut, und anschließend akustisch vermessen werden. Nach der Planung in einer CAD-Software wird der Lautsprecher aufgebaut. Es folgen akustische Messungen im Tonstudio des SPSC. Anhand der Messergebnisse soll überprüft werden, ob dieses Lautsprechersystem tatsächlich den normativen Anforderungen gerecht wird.

In Kapitel 2 werden zunächst in einem 3D-CAD-Programm sämtliche Bauteile so gezeichnet, dass eine Fertigung möglich ist. Diese Teile werden dann gefertigt und zusammengefügt. Das Gehäuse des Lautsprechers besteht aus MDF, die weiteren Teile werden mit einem 3D-Drucker hergestellt.

Kapitel 3 dokumentiert den Entwurf einer passiven Frequenzweiche, die notwendig ist, um das Eingangssignal, das dem Lautsprechersystem zugeführt werden soll, auf die Hoch- und Tieftreiber aufzuteilen.

Die akustischen Messungen und die dazugehörigen Messmethoden und -konfigurationen finden sich in Kapitel 4, wobei zwei Messsysteme verschiedener Hersteller verwendet werden. Die Messergebnisse werden in Kapitel 5 präsentiert, wobei der Fokus darauf liegt, jene Größen darzustellen, die Aufschluss darüber geben, ob die Anforderungen nach ISO 6926 eingehalten werden.



## 2 Aufbau des Lautsprechersystems

Das Lautsprechersystem besteht aus einem tetraederförmigen Korpus aus 19 mm starken MDF-Platten. In diesen werden ein geschlossenes Gehäuse für einen Hochtton-Lautsprecher sowie ein darauf aufgesetztes inverses Horn eingebracht. Beide Teile sowie ein Verschluss an der Oberseite des Tetraeders und drei Stück Eckenschutz werden mittels 3D-Druck hergestellt. Die folgende Abbildung zeigt den Entwurf in dem CAD-Programm *Autodesk Fusion 360*.

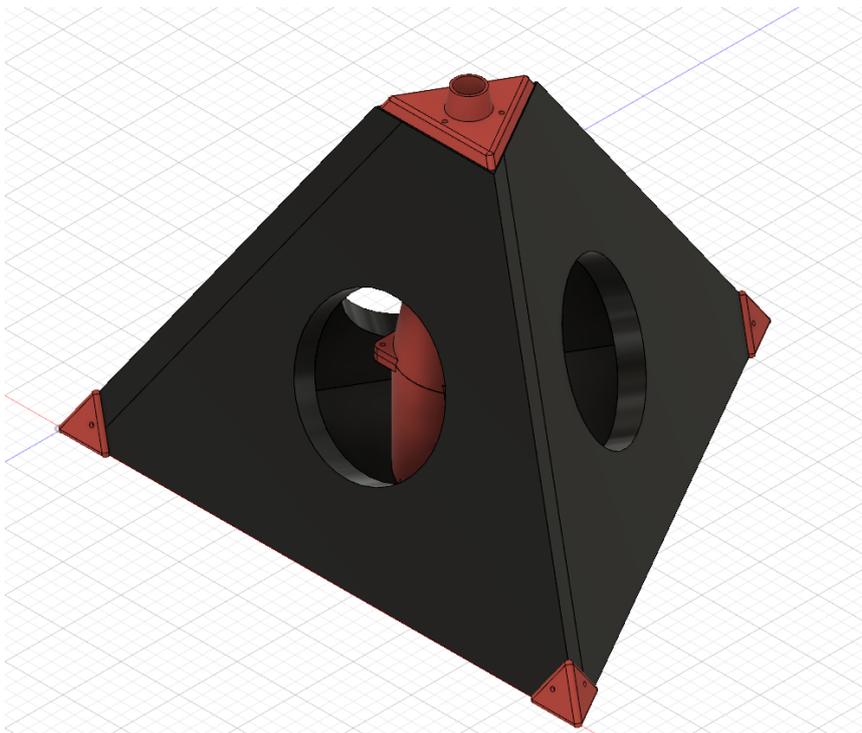


Abbildung 1: 3D-Skizze des Lautsprechersystems

## 2.1 Tetraeder-Grundkonstruktion

Die Grundkonstruktion besteht aus einer Bodenplatte und drei Seitenplatten. Die folgenden Abbildungen zeigen die Pläne, anhand derer die Platten gefertigt werden.

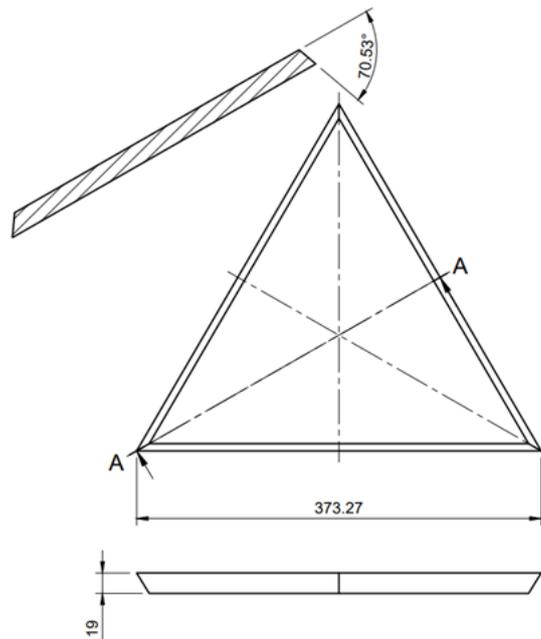


Abbildung 2: Tetraeder – Bodenplatte Zeichnung

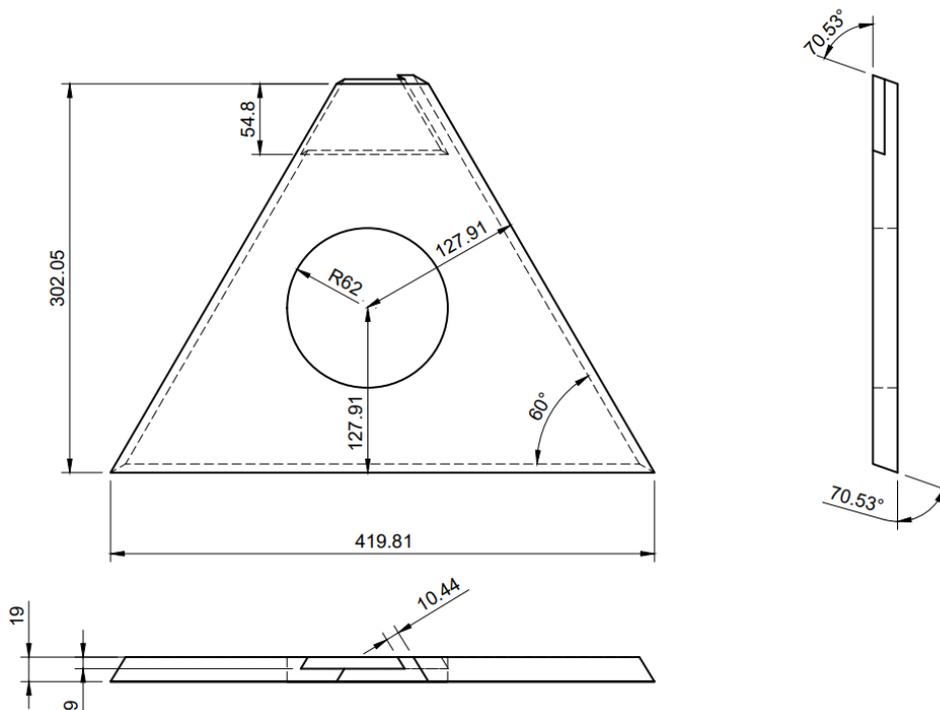
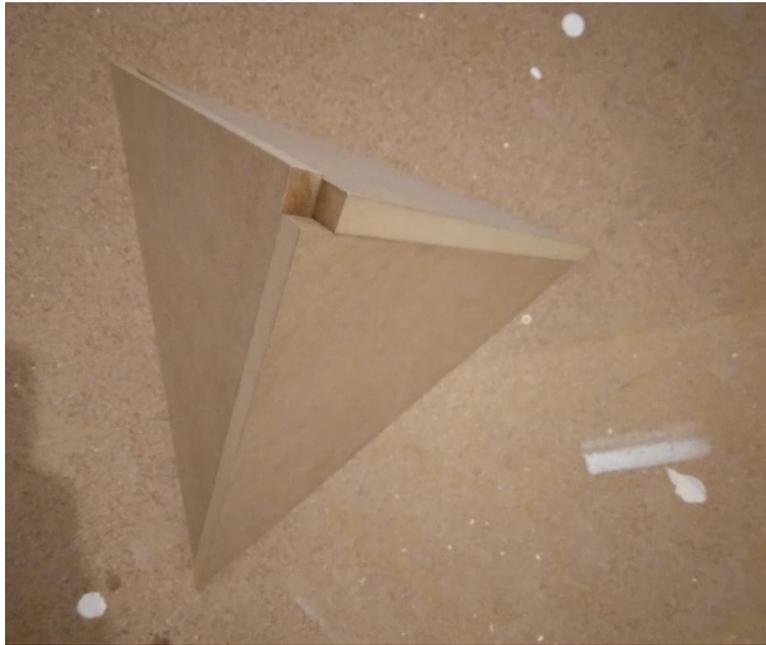


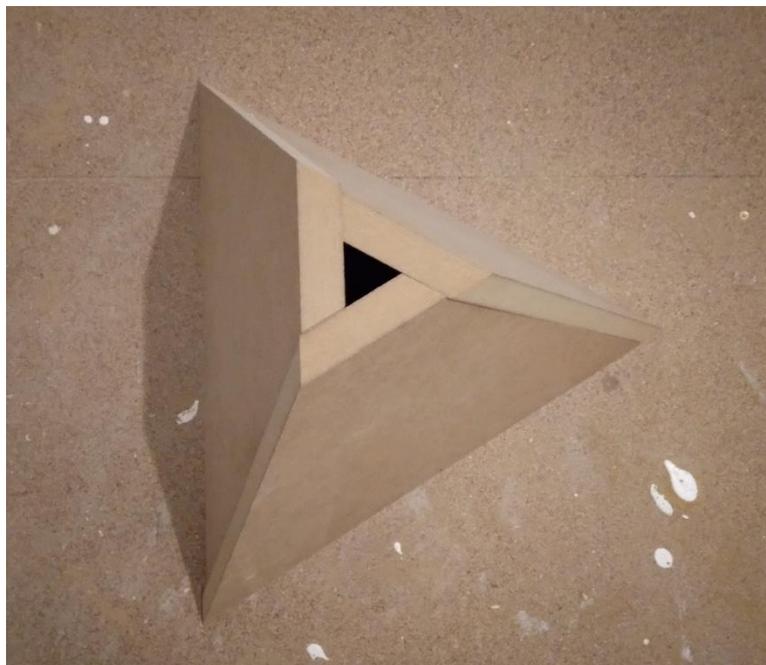
Abbildung 3: Tetraeder – Seitenplatten (3x) Zeichnung

Zunächst werden die drei Seitenplatten sowie die Bodenplatte mittels einer Kreissäge zugeschnitten, deren Sägeblatt geneigt wird. Das Ergebnis zeigt das folgende Bild.



**Abbildung 4: Tetraeder – zugeschnittene Platten**

Nun muss oben ein Ausschnitt für die Hornmündung des inversen Hornes eingebracht werden.



**Abbildung 5: Tetraeder – zugeschnittene Platten mit Ausschnitt für die Hornmündung**

Da diese Öffnung noch zu klein ist, müssen gemäß dem Plan die drei Seitenplatten oben etwas verjüngt werden, was mit einer Oberfräse realisiert wird. Zusätzlich werden mit einer Stichsäge kreisförmige Ausnehmungen für den zukünftigen Einbau der Tiefton-Lautsprecher auf den drei Seitenplatten ausgesägt.



**Abbildung 6: Tetraeder – mit vergrößertem Ausschnitt und Lautsprecher-Ausnehmungen**

Nun werden die drei fertiggestellten Seitenplatten miteinander verleimt und verschraubt.



**Abbildung 7: Tetraeder – Verleimung und Verschraubung der Seitenplatten**

Damit ist die Grundkonstruktion fertiggestellt.

## 2.2 3D-Druck-Teile

Für den inversen Hornlautsprecher, welcher in das Tetraeder-Gehäuse eingebracht wird, sind ein geschlossenes Gehäuse, das inverse Horn selbst, sowie eine Dichtung an der Hornmündung und des Weiteren drei Stück Eckenschutz notwendig, welche mittels 3D-Druck gefertigt werden. Die folgenden Abbildungen zeigen die Pläne der jeweiligen Teile.

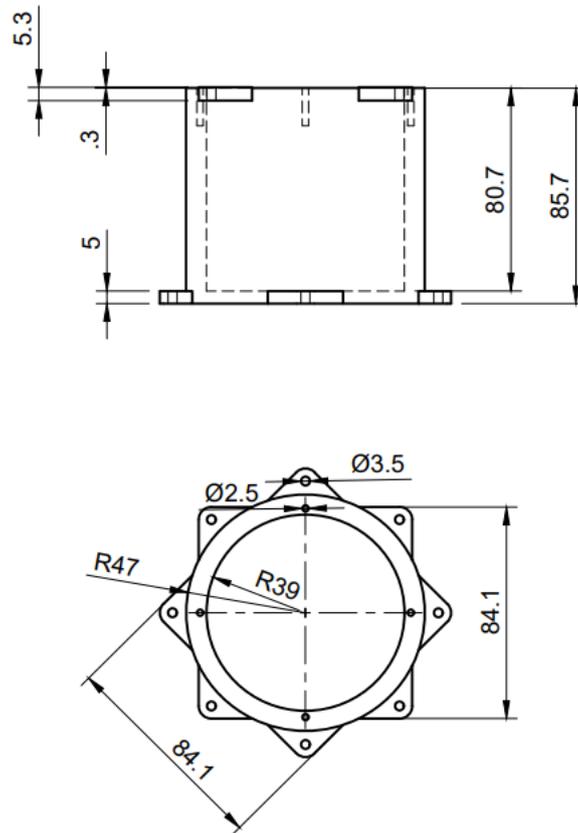


Abbildung 8: 3D-Druck – Geschlossenes Gehäuse Zeichnung

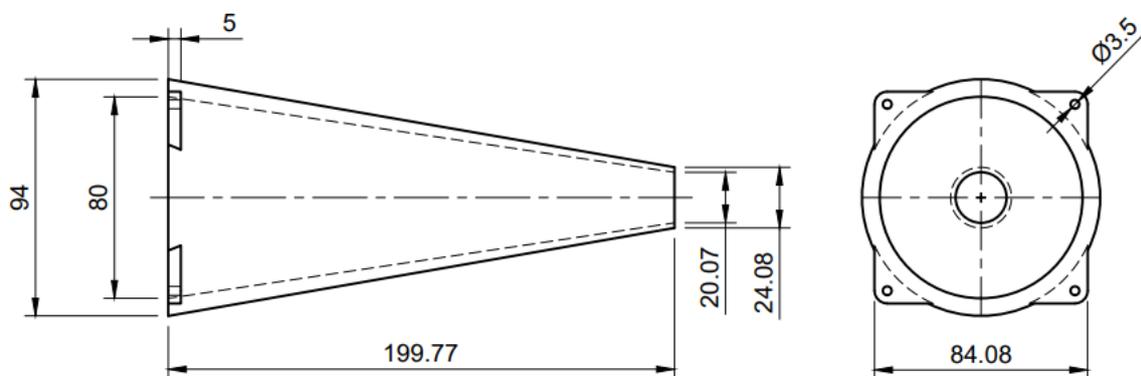


Abbildung 9: 3D-Druck – Inverses Horn Zeichnung

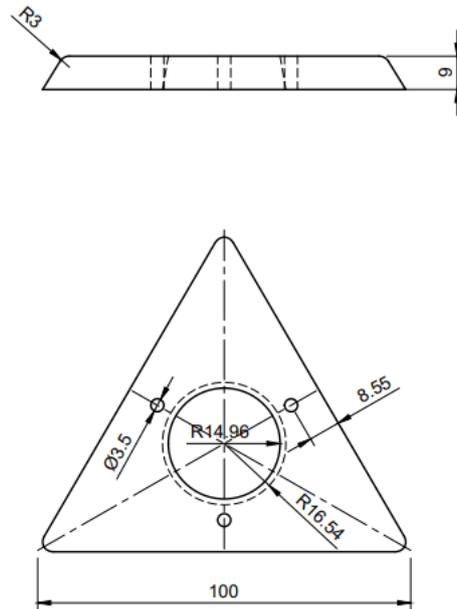


Abbildung 10: 3D-Druck – Hornmündungsdichtung Zeichnung

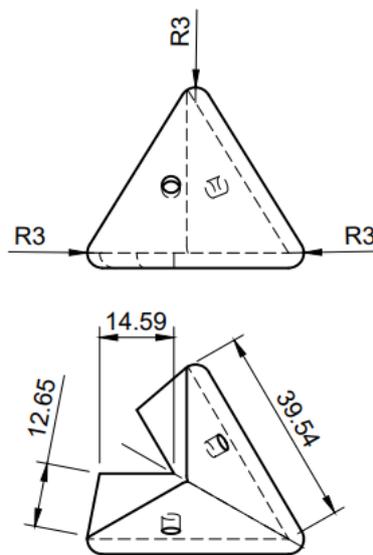


Abbildung 11: 3D-Druck – Eckenschutz (3x) Zeichnung

Für den 3D-Druck wird eine Wandstärke der Objekte von 0,8 mm (Standardeinstellung) verwendet. Die Teile werden nicht massiv, sondern mit einem Viereckmuster im Inneren hergestellt. Der zugehörige G-Code wird mit der Software *Creativity Print 3.1* anhand der Exportdateien (\*.stl) aus *Autodesk Fusion 360* erzeugt. Als Filament wird PLA der Farbe „bordeauxrot“ verwendet. In den folgenden Fotos ist der 3D-Drucker *Creativity Ender 3 V3 SE* während des Druckvorganges von geschlossenem Gehäuse und inversem Horn ersichtlich.

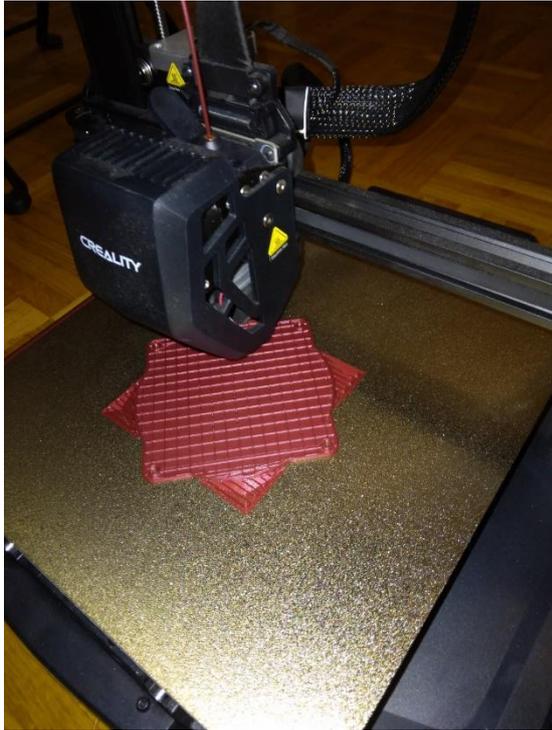


Abbildung 12: 3D-Drucker – Geschlossenes Gehäuse



Abbildung 13: 3D-Drucker – Inverses Horn

Der Druck des geschlossenen Gehäuses dauert etwa sechs Stunden, der des inversen Hornes zirka acht Stunden. Die Dichtung für die Hornmündung nimmt etwa eine, und je eine Ecke eine dreiviertel Stunde in Anspruch. Die Tetraeder-Konstruktion wird zur ansprechenderen Optik und Haptik mit schwarzem Lautsprecherbespannstoff verkleidet. Werden die bisher gefertigten Teile zusammengefügt, so ergibt sich das folgende Bild:



Abbildung 14: Bespannte Grundkonstruktion mit 3D-Druckteilen

## 2.3 Zusammenbau der Komponenten

In das geschlossene Gehäuse wird ein kleines Loch zur Kabeldurchführung gebohrt, und anschließend wird es an die Bodenplatte mithilfe der vorgesehenen Ösen geschraubt. Sogleich wird auch der Hochton-Lautsprecher an das Gehäuse geschraubt, wobei an diesen vorab Kabel zur Versorgung gelötet wurden.



Abbildung 15: Geschlossenes Gehäuse mit eingebautem Hochton-Lautsprecher

Auf das geschlossene Gehäuse wird das inverse Horn aufgesetzt und mit M3-Schrauben (Länge 20 mm) und -Muttern an den Ösen befestigt.



Abbildung 16: Geschlossenes Gehäuse mit aufgesetztem Inversen Horn

In die Konstruktion der Seitenplatten werden nun an den entsprechenden Ausnehmungen die drei mit angelöteten Kabeln (Parallelschaltung) versehenen Tiefton-Lautsprecher eingebaut und mit schwarzen Schrauben befestigt. Ebenso werden die Dichtung der Hornmündung und die drei Stück Eckenschutz verschraubt. Damit die Bodenplatte befestigt werden kann, sind Montagewinkel notwendig, auf die M4-Muttern angeklebt werden.



**Abbildung 17: Montagewinkel**

Es wird eine SpeakOn-Buchse an einer Seitenplatte befestigt und mit den Versorgungsleitungen für die Lautsprecher verlötet, um dem Lautsprecher ein Audiosignal einspielen zu können. Als letzter Schritt wird das Gehäuse mit Dämmmaterial gefüllt und verschlossen, indem die Bodenplatte mit drei M4-Schrauben an den Montagewinkeln befestigt wird. Der fertiggestellte Tetraeder-Lautsprecher mit Inversem Hornlautsprecher ist in der folgenden Abbildung zu begutachten.



**Abbildung 18: Lautsprechersystem**

## 2.4 Stückliste

Die folgende Tabelle zeigt die Liste aller Materialien, die für den Aufbau des Lautsprechersystems notwendig sind. Zusätzlich zu Filament, MDF-Platten, Chassis und Bespannstoff kommen noch die Leitungen sowie Schrauben zur Montage der Teile dazu. Auch die vierpolige SpeakOn-Buchse zur Versorgung mit einem Audiosignal ist angeführt.

Bezeichnung	Modell	Händler	Stk.	Preis einzeln	Preis gesamt
Tieftöner-Chassis	Visaton WF 130 ND	<a href="http://thomann.de">thomann.de</a>	3	€ 111.00	€ 333.00
Hochtöner-Chassis	Visaton FRS 8 M	<a href="http://thomann.de">thomann.de</a>	1	€ 14.40	€ 14.40
3D-Druck-Filament	PLA rot	<a href="http://amazon.de">amazon.de</a>	1	€ 25.01	€ 25.01
Gehäuseplatten MDF	19x420x330 mm	-	4	-	-
Bespannstoff	schwarz	-	1	-	-
SpeakOn-Buchse	NL4MPXX-3	<a href="http://mouser.at">mouser.at</a>	1	€ 2.78	€ 2.78
div. Kabelmaterial	-	-	1	-	-
M3 Schrauben	20 mm	-	4	-	-
M3 Muttern	-	-	4	-	-
M4 Muttern	-	-	3	-	-
Linsenkopfschrauben	schwarz, 3x16 mm	-	27	-	-
Linsenkopfschrauben	schwarz, 3x12 mm	-	2	-	-
Spanplattenschrauben	4x40 mm	-	15	-	-
Spanplattenschrauben	4x16 mm	-	3	-	-
Montagewinkel	-	-	3	-	-
				<b>Gesamt (inkl. USt)</b>	<b>€ 372.41</b>

Tabelle 1: Stückliste Lautsprechersystem

## 3 Passive Frequenzweiche

Das folgende Kapitel dokumentiert den Entwurf einer passiven Frequenzweiche (Zweiwegesystem), welche dafür sorgt, dass der Hochtöner-Lautsprecher möglichst nur Frequenzen oberhalb der Übernahmefrequenz des Zweiwegesystems erhält, während die drei Tieftöner-Lautsprecher lediglich mit Frequenzen darunter beaufschlagt werden. Dies dient der Einhaltung der Anforderung betreffend die Richtwirkung, da auf diese Weise der Hochtöner in Kombination mit dem inversen Horn für eine möglichst ungerichtete Abstrahlung bei hohen Frequenzen sorgt, sowie die drei Tieftöner – angeordnet als Tetraeder – für eine halbkugelartige Abstrahlung bei tiefen Frequenzen.

### 3.1 Übernahmefrequenz

Die Übernahmefrequenz bzw. Grenzfrequenz des Zweiwegesystems wurde in [1, p. 35] mit  $f_g = 1$  kHz festgelegt. Versuche haben gezeigt, dass ein Tetraeder-Tieftonsystem bis zu dieser Frequenz nahezu ungerichtet abstrahlt. Auch eine Simulation des vorliegenden Entwurfes zeigt dies.

### 3.2 Schaltplan

Die Frequenzweiche besteht aus einem Tiefpass und einem Hochpass, deren Grenzfrequenzen je  $f_g = 1$  kHz sind. Der Tiefpass wird als Filter zweiter Ordnung mit Blindelementen (Induktivität und Kapazität) ausgeführt. Für das Hochpassfilter ist ein Filter dritter Ordnung in Form eines T-Glieds ratsam, um den Hochtöner-Lautsprecher möglichst vor der Wiedergabe tiefer Frequenzen zu bewahren. Dies dient dazu, dass er seine begrenzte Leistung ganz den höheren Frequenzen widmen kann.

Für die Dimensionierung wird der Hochtöner *Visaton FRS 8 M* als eine Serienschaltung seines Serienwiderstandes  $R_{S,HT} = 7,2 \Omega$  und seiner Serieninduktivität  $L_{S,HT} = 300 \mu\text{H}$  angenommen. Diese Werte entstammen dem Datenblatt des Herstellers.

Das Tieftonsystem besteht aus drei parallel verschalteten Tieftönern *Visaton WF 130 ND*. Diese haben gemeinsam einen Serienwiderstand  $R_{S,TT} = 6,7 \Omega \cdot \frac{1}{3} = 2,23 \Omega$  und eine Serieninduktivität  $L_{S,TT} = 760 \mu\text{H} \cdot \frac{1}{3} = 253 \mu\text{H}$ .

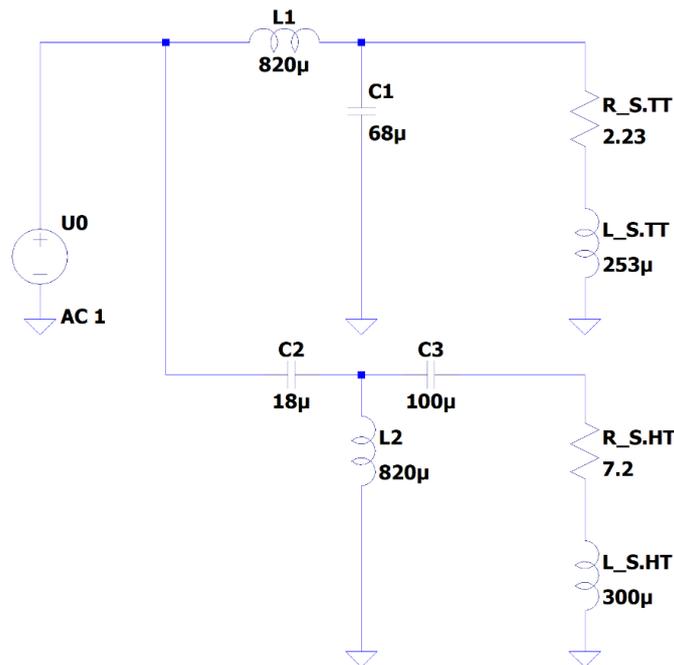


Abbildung 19: Schaltplan Frequenzweiche

Abbildung 19 zeigt den Schaltplan.  $U_0$  ist die Spannungsquelle, mit der das Lautsprechersystem betrieben wird.  $L_1$  und  $C_1$  bilden den Tiefpass zweiter Ordnung, und  $R_{S,TT}$  sowie  $L_{S,TT}$  repräsentieren die parallel geschalteten Tieftöner.  $C_2$ ,  $C_3$  und  $L_2$  sind das Hochpassfilter (T-Glied) für den Hochtöner, der durch  $R_{S,HT}$  und  $L_{S,HT}$  abgebildet wird.

### 3.3 Dimensionierung

Für die Dimensionierung wird zunächst die Übertragungsfunktion als Verhältnis jener Spannung, die an der Serienschaltung aus Serienwiderstand und Serieninduktivität anliegt, zu der Eingangsspannung berechnet. Im Anschluss wird diese Übertragungsfunktion durch die Wahl der Bauteilwerte der Filter so angepasst, dass die Grenzfrequenz bei  $f_g = 1$  kHz liegt und eine Butterworth-Filtercharakteristik erreicht wird. Letztere soll für einen möglichst flachen Spannungsverlauf im Durchlassbereich sorgen sowie dafür, dass im Übergangsbereich keine Spannungsüberhöhung auftritt.

#### 3.3.1 Tiefpass

Die Übertragungsfunktion  $H_{TP}(s)$  wird wie folgt gebildet.  $\underline{Z}_1$  ist eine Hilfsgröße und repräsentiert die Zusammenschaltung von  $R_{S,TT}$ ,  $L_{S,TT}$  und  $C_1$ .

$$\underline{Z}_1 = \frac{(R_{S,TT} + sL_{S,TT}) \cdot \frac{1}{sC_1}}{R_{S,TT} + sL_{S,TT} + \frac{1}{sC_1}} = \frac{R_{S,TT} + sL_{S,TT}}{sR_{S,TT}C_1 + s^2L_{S,TT}C_1 + 1} \quad (3.1)$$

$$H_{TP}(s) = \frac{\underline{Z}_1}{sL_1 + \underline{Z}_1} = \frac{R_{S,TT} + sL_{S,TT}}{R_{S,TT} + sL_{S,TT} + s^2 R_{S,TT} L_1 C_1 + s^3 L_1 L_{S,TT} C_1 + sL_1} \quad (3.2)$$

Damit die  $-3$  dB-Grenzfrequenz auf  $1$  kHz fällt, muss die Übertragungsfunktion auf einen Betrag von  $\frac{1}{\sqrt{2}}$  und eine Phase von  $-90^\circ$  (Filter zweiter Ordnung) gesetzt werden.

$$H_{TP}(j \cdot 2\pi \cdot f_g) = H_{TP}(j \cdot 2\pi \cdot 1 \text{ kHz}) \stackrel{!}{=} \frac{1}{\sqrt{2}} \angle -90^\circ = -\frac{j}{\sqrt{2}} \quad (3.3)$$

Dies entspricht zwei Gleichungen (Real- und Imaginärteil) mit zwei Unbekannten ( $L_1$  und  $C_1$ ). Eine numerische Lösung liefert Werte von  $757 \mu\text{H}$  und  $67,2 \mu\text{F}$ . Es werden die nächstliegenden Werte aus der E12-Reihe gewählt:

$$L_1 = 820 \mu\text{H}$$

$$C_1 = 68 \mu\text{F}$$

### 3.3.2 Hochpass

Auch in diesem Fall wird zunächst eine Hilfsgröße  $\underline{Z}_2$  eingeführt, welche  $L_2$ ,  $C_3$ ,  $R_{S,HT}$  und  $L_{S,HT}$  zusammenfasst.

$$\underline{Z}_2 = \frac{\left(R_{S,HT} + sL_{S,HT} + \frac{1}{sC_3}\right) \cdot sL_2}{R_{S,HT} + sL_{S,HT} + \frac{1}{sC_3} + sL_2} \quad (3.4)$$

Nun wird die Übertragungsfunktion  $H_{HP}(s)$  ermittelt.

$$\begin{aligned} H_{HP}(s) &= \frac{\underline{Z}_2}{\frac{1}{sC_2} + \underline{Z}_2} \cdot \frac{R_{S,HT} + sL_{S,HT}}{R_{S,HT} + sL_{S,HT} + \frac{1}{sC_3}} \\ &= \frac{\left(R_{S,HT} + sL_{S,HT} + \frac{1}{sC_3}\right) \cdot sL_2}{\left(R_{S,HT} + sL_{S,HT} + \frac{1}{sC_3}\right) sL_2 + \left(R_{S,HT} + sL_{S,HT} + \frac{1}{sC_3} + sL_2\right) \frac{1}{sC_2}} \cdot \frac{R_{S,HT} + sL_{S,HT}}{R_{S,HT} + sL_{S,HT} + \frac{1}{sC_3}} \end{aligned} \quad (3.5)$$

Bei  $f \rightarrow 0$  hat diese Übertragungsfunktion einen Phasenwinkel von  $-90^\circ$  (siehe Abbildung 20), bei  $f \rightarrow \infty$  eine Phase von  $-360^\circ$  (Hochpass dritter Ordnung). Die Übertragungsfunktion wird also bei der  $-3$  dB-Grenzfrequenz von  $1$  kHz auf einen Betrag von  $\frac{1}{\sqrt{2}}$  sowie eine Phase von  $-225^\circ$  gesetzt:

$$H_{HP}(j \cdot 2\pi \cdot f_g) = H_{HP}(j \cdot 2\pi \cdot 1 \text{ kHz}) \stackrel{!}{=} \frac{1}{\sqrt{2}} \angle -225^\circ = -\frac{1}{2} + \frac{j}{2} \quad (3.6)$$

Diese Gleichsetzung beinhaltet zwei Gleichungen (Real- und Imaginärteil) für drei Unbekannte ( $C_2$ ,  $C_3$  und  $L_2$ ). Daher werden für  $C_2$  verschiedene E12-Werte im Bereich von 10  $\mu\text{F}$  bis 100  $\mu\text{F}$  gewählt, die übrigen Bauteilwerte mittels numerischer Lösung der Gleichung bestimmt, und die Ergebnisse in Form einer Simulation betrachtet. Nicht für jeden Wert von  $C_2$  ergeben sich plausible Werte der übrigen Bauteile, lediglich im Bereich zwischen 12  $\mu\text{F}$  und 18  $\mu\text{F}$ . Der flachste Verlauf der Übertragungsfunktion ergibt sich mit den Werten:

$$C_2 = 18 \mu\text{F}$$

$$C_3 = 100 \mu\text{F}$$

$$L_2 = 820 \mu\text{H}$$

### 3.4 Simulation

Eine Schaltungssimulation der Frequenzweiche (AC Analysis mittels *LTspice*) liefert das folgende Bode-Diagramm für die Spannungs-Übertragungsfunktionen der beiden Filter, welche die Frequenzweiche ausmachen:

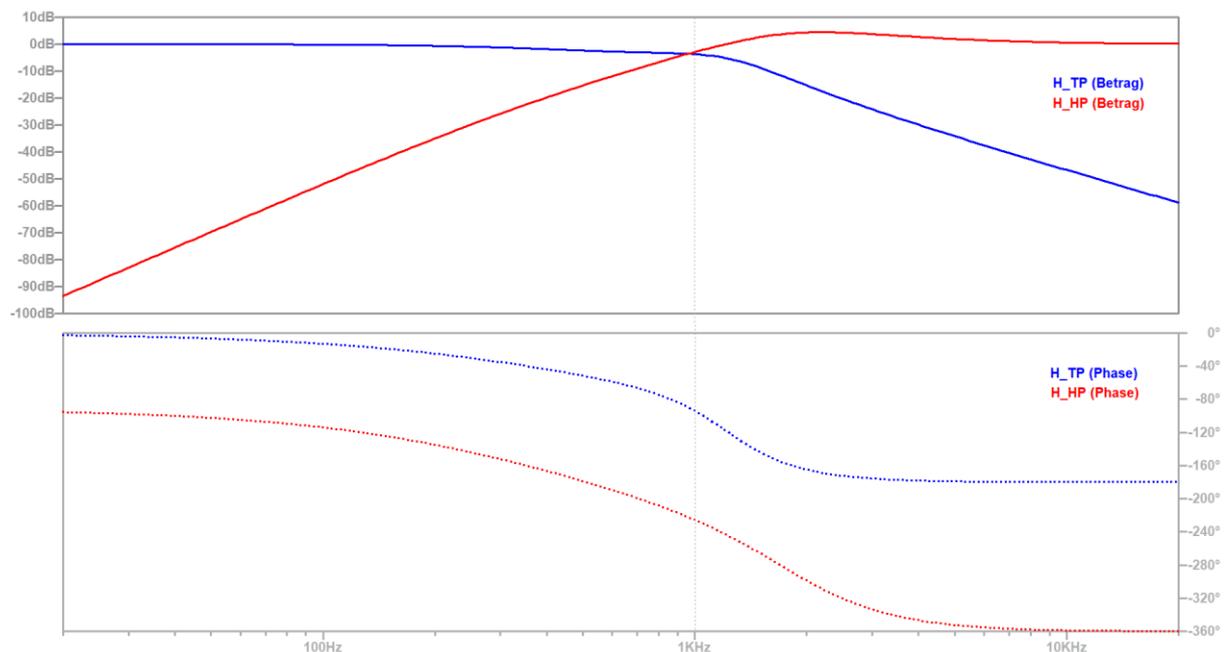


Abbildung 20: Bode-Diagramm der Spannungsübertragungsfunktionen (Tiefpass, Hochpass)

Man sieht, dass sich die beiden Übertragungsfunktionen – wie beabsichtigt – betragsmäßig bei 1 kHz schneiden, wo sie beide ihre  $-3$  dB-Grenzfrequenz haben. Dies wird auch aus der Phase ersichtlich, deren Verlauf im weitesten Sinne punktsymmetrisch um 1 kHz verläuft.  $C_2$  wurde so gewählt, dass die leichte, in dieser Konfiguration unvermeidbare Spannungsüberhöhung der roten Kurve oberhalb der Trennfrequenz minimiert wird.

## 3.5 Aufbau

Im Folgenden wird dokumentiert, wie die Schaltung der Frequenzweiche tatsächlich aufgebaut und in ein Gehäuse eingebaut wird.

### 3.5.1 Gehäuse

Das Gehäuse wird im selben Design wie das Gehäuse des Lautsprechersystems ausgeführt, also tetraederförmig. Ein Maßstab, bei dem alle Komponenten der Frequenzweiche untergebracht werden können, ist 1: 2,5. Das Gehäuse besteht aus drei Komponenten, dem Korpus, einer Abdeckung oben, die aus fertigungstechnischen Gründen nachträglich mit dem Korpus verklebt wird und einem Boden, der von unten an den Korpus angeschraubt wird, sodass das Gehäuse wieder geöffnet werden kann. Die folgende Abbildung zeigt den Korpus, der mit dem 3D-Drucker gefertigt wurde:

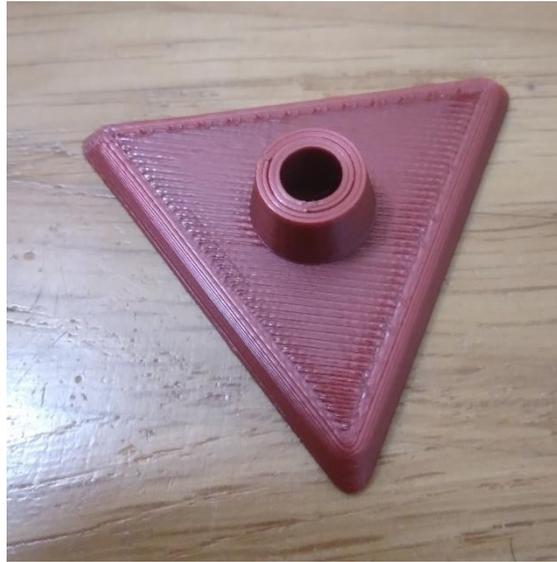


**Abbildung 21: Frequenzweiche – Korpus**

Auf der Vorderseite sind oben Ausnehmungen für die SpeakOn-Buchse vorgesehen, über die das gefilterte Signal bzw. die beiden Signale für Hoch- und Tieftonsystem dem Lautsprecher zugeführt werden. Weiter unten sind zwei Löcher für die 4 mm-Bananenbuchsen angebracht, über die ein Signal eingespeist wird.

Oben wird auf den Korpus eine Abdeckung aufgeklebt. Aufgrund des Fertigungsprozesses mit dem 3D-Drucker kann diese nicht ohne Weiteres in einem mit dem Korpus gefertigt werden, da sie überhängende Teile hätte. Zudem erleichtert ein Zugriff in den Korpus von oben die Montage der SpeakOn-Buchse erheblich.

Folgendes Foto zeigt die Abdeckung, die ebenfalls jener des Lautsprechersystems nachempfunden ist:



**Abbildung 22: Frequenzweiche – Abdeckung**

Der dritte Teil ist der Boden, an dem in weiterer Folge die Platine mit den elektrischen Bauteilen befestigt wird.

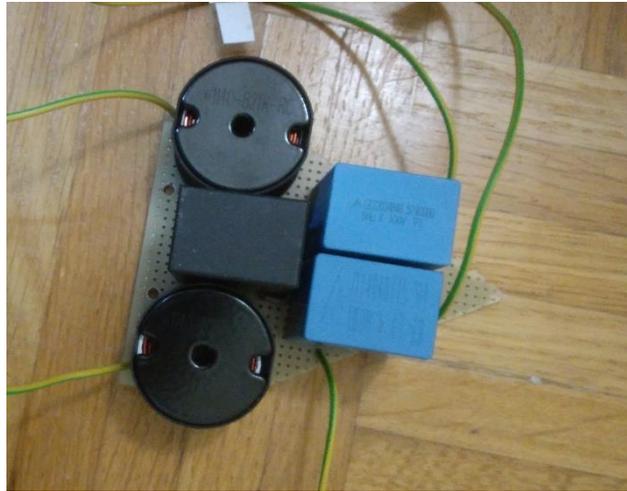


**Abbildung 23: Frequenzweiche – Boden**

An den drei Ecken sind Löcher zu sehen, an denen der Boden mit drei M3-Schrauben an dem Korpus befestigt wird. Weiter innen sind nochmals drei Löcher mit zusätzlichen Erhöhungen als Abstandhalter, auf denen die Platine mit drei M3-Schrauben und -Muttern angebracht wird. Diese Schrauben und die dazugehörigen Muttern sind aus Kunststoff, um sicherzustellen, dass keine leitende Verbindung zur Platine besteht.

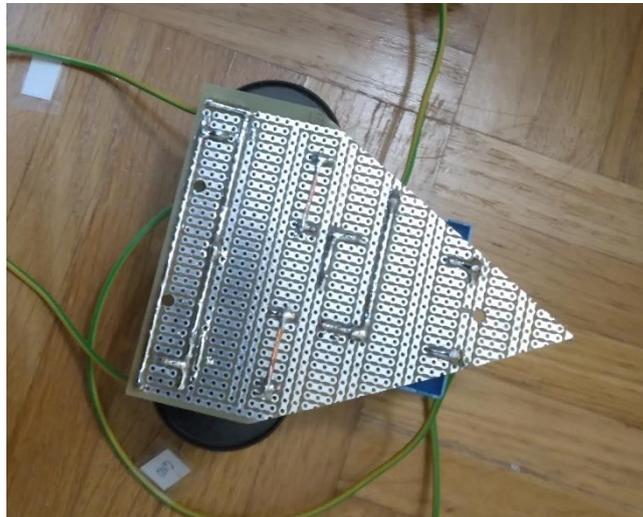
### 3.5.2 Platine

Die Leiterplatte ist als Streifenraster-Platine ausgeführt. Die Bauteile werden dabei so platziert, dass sie im Gehäuse gut Platz finden und nicht mit den Steckverbindern kollidieren. Zusätzlich werden Leitungen angelötet, die mit den Steckverbindern verbunden werden.



**Abbildung 24: Frequenzweiche – Platine (oben)**

Man sieht auch die Montagebohrungen, die zur Befestigung an der Bodenplatte dienen. Eine Ansicht der Platine von unten ist der folgenden Abbildung zu entnehmen.



**Abbildung 25: Frequenzweiche – Platine (unten)**

### 3.6 Zusammenbau der Komponenten

Für den Zusammenbau werden zunächst die Steckverbinder mit Leitungen verlötet und in den Korpus eingebaut, also die SpeakOn-Buchse, die mit zwei M3-Schrauben und -Muttern befestigt wird, sowie die beiden Bananbuchsen, welche mit den mitgelieferten Muttern von der Frontplattenrückseite angebracht werden.



Abbildung 26: Frequenzweiche – Zusammenbau Platine und Korpus

Die Platine wird im Anschluss mit der Bodenplatte verschraubt (Kunststoffschrauben), und der Boden samt Platine wird unten in den Korpus geschraubt. Die Abdeckung wird mit 2-Komponenten-Epoxidkleber oben am Korpus angebracht, und der Korpus wird für einheitliches Design schwarz verkleidet. Die fertiggestellte Frequenzweiche ist in der folgenden Abbildung dargestellt.



Abbildung 27: Frequenzweiche

### 3.7 Stückliste

Die Stückliste zeigt zunächst alle elektrischen Bauteile (Kondensatoren, Spulen) sowie Steckverbinder und die Platine (PCB ... Printed Circuit Board), und diverses Montage- und Kabelmaterial. Das Filament für den 3D-Drucker ist dasselbe wie das für das Lautsprechersystem, weswegen hier keine zweite Filamentspule aufscheint.

Bezeichnung	Modell	Händler	Stk.	Preis einzeln	Preis gesamt
Folienkondensator	100 $\mu$ F, 63 V	<a href="http://mouser.at">mouser.at</a>	1	€ 16.41	€ 16.41
Folienkondensator	68 $\mu$ F, 100 V	<a href="http://mouser.at">mouser.at</a>	1	€ 8.40	€ 8.40
Folienkondensator	18 $\mu$ F, 600 V	<a href="http://mouser.at">mouser.at</a>	1	€ 4.27	€ 4.27
Leistungsinduktivität	820 $\mu$ H, 7,2 A	<a href="http://mouser.at">mouser.at</a>	2	€ 10.77	€ 21.54
SpeakOn-Buchse	NL4MPXX-3	<a href="http://mouser.at">mouser.at</a>	1	€ 2.78	€ 2.78
Bananenbuchse rot	563-0500	<a href="http://mouser.at">mouser.at</a>	1	€ 0.97	€ 0.97
Bananenbuchse sw	563-0100	<a href="http://mouser.at">mouser.at</a>	1	€ 0.95	€ 0.95
PCB	SBB2808-1	<a href="http://mouser.at">mouser.at</a>	2	€ 3.43	€ 6.86
M3 Schrauben	20 mm	-	3	-	-
M3 Muttern	-	-	3	-	-
M3 Schrauben	30 mm, Kunststoff	-	3	-	-
M3 Muttern	Kunststoff	-	3	-	-
div. Kabelmaterial	-	-	1	-	-
<b>Gesamt (inkl USt.)</b>					<b>€ 62.18</b>

Tabelle 2: Stückliste Frequenzweiche



## 4 Messungen

Zur Verifikation der Konformität des Lautsprechersystems nach ISO 6926 werden akustische Messungen durchgeführt. Diese sollen in einem reflexionsarmen Halbraum über einem reflektierenden Boden durchgeführt werden. Hierfür wird das SPSC-Tonstudio verwendet, welches bis auf den Flügel und einige Trennwände/Absorber und das unbedingt notwendige Equipment leergeräumt wird. Als reflektierender Boden fungieren zwei 2 cm starke Siebdruckplatten, die zusammen ein Quadrat mit 1,5 m Seitenlänge bilden. Der Mittelpunkt dieses Quadrats wird so platziert, dass die kleinste Distanz zu einer Begrenzungsfläche maximiert wird, auf 2,7 m. Außen wird der Studiovorhang bis auf ein 50 cm breites Sichtfenster zugezogen, um die Grenzflächen möglichst absorbierend zu gestalten. Die Klimaanlage wird während der Messungen ausgeschaltet, um den Fremdgeräuschpegel möglichst gering zu halten.

Das Ziel der Messungen ist die Ermittlung jener Größen (Bündelungsmaß, Schalleistungspegel, Standardabweichung), die notwendig sind, um die Anforderungen von ISO 6926 überprüfen zu können. Für die Ermittlung des Bündelungsmaßes wird zunächst versucht, Messungen mit dem *Klippel*-Messsystem und einem *Outline*-Drehteller durchzuführen. Sämtliche externe Berechnungen werden mit MATLAB R2022a durchgeführt.

Im Anschluss werden Messungen mit dem *PAK*-Messsystem durchgeführt.

### 4.1 Klippel DA 2 und Outline Drehteller

Diese Messungen mit dem *Klippel*-Messsystem und dem Drehteller sollen die Möglichkeit bieten, teilautomatisiert die Richtwirkung und das Spektrum des Lautsprechersystems erfassen zu können. Es soll eine gedachte obere Halbkugel mit dem Radius 1 m mit konstanten Intervallen ( $10^\circ$ ) für den Elevations- und Azimutwinkel abgetastet werden. Messsignal ist ein exponentieller Sweep. Der Elevationswinkel wird durch die Aufstellung des Messmikrofons variiert, der Azimutwinkel automatisiert durch den Drehteller mittels der von *Klippel* zur Verfügung stehenden Software *Robotics*. Somit soll zunächst der Elevationswinkel manuell eingestellt werden, und anschließend führt die Software festgelegte Schritte für den Azimutwinkel durch und macht je eine Messung, bis eine vollständige Umdrehung passiert ist, und nun wieder manuell der Elevationswinkel verstellt wird.

### 4.1.1 Messaufbau

Die folgende Grafik zeigt schematisch den Messaufbau:

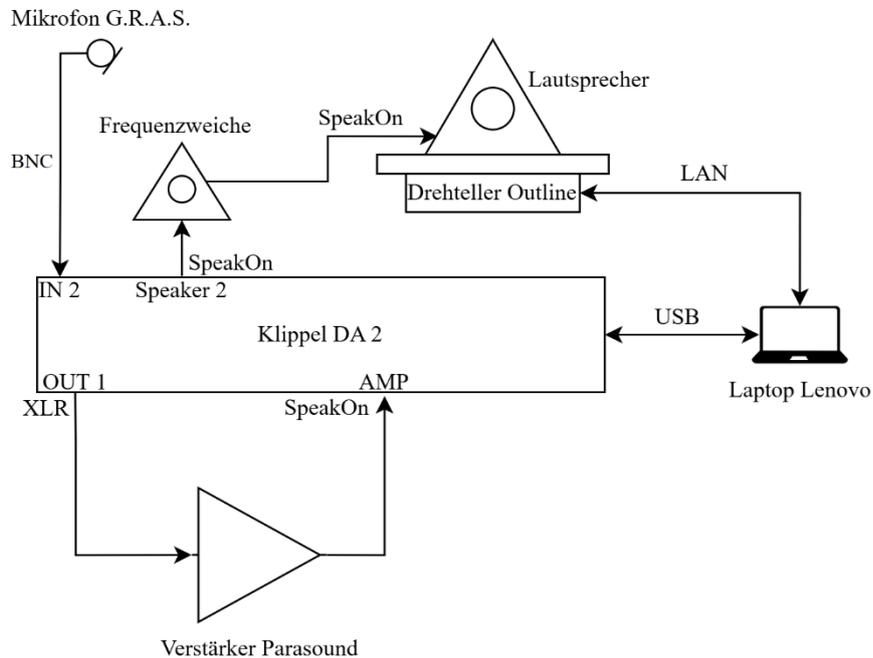


Abbildung 28: Messaufbau Klippel

Per USB wird das Klippel Messsystem mit dem Laptop gesteuert. Der DA 2 erzeugt an OUT 1 ein Audiosignal, welches verstärkt und an AMP zurückgeführt wird. Intern leitet der DA 2 das verstärkte Signal an Speaker 2 weiter, an welchem die Frequenzweiche angeschlossen ist. Diese filtert das Signal und erzeugt je ein Signal für das Tieftonsystem und den Hochtöner des zu vermessenden Lautsprechersystems. Das Lautsprechersystem wird auf dem via LAN mit dem Laptop verbundenen Drehteller platziert. Ein Messmikrofon wird mit einem Stativ aufgestellt und an IN 2 angeschlossen. Die folgenden Fotos dokumentieren diesen Aufbau:



Abbildung 29: Klippel-Messung – DA 2 und Amp

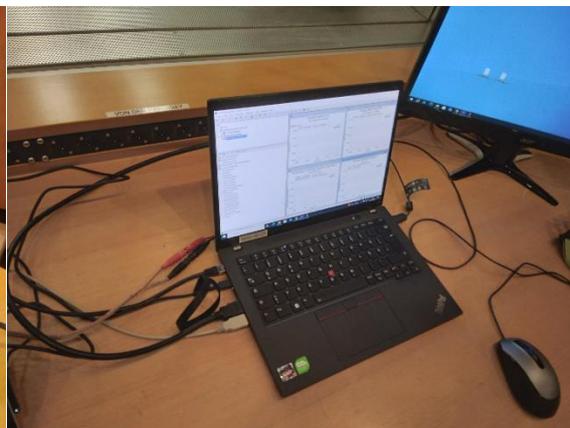


Abbildung 30: Klippel-Messung – Messlaptop



Abbildung 31: Klippel-Messung – Steckfeld RP1    Abbildung 32: Klippel-Messung – Steckfeld RP1



Abbildung 33: Klippel-Messung – Steckfeld AR

Das zu vermessende Lautsprechersystem, mittig platziert auf dem Drehteller, ist auf dem folgenden Foto dargestellt:



Abbildung 34: Klippel-Messung – Lautsprechersystem in 0°-Richtung auf dem Drehteller

## 4.1.2 Softwareeinstellungen

### 4.1.2.1 Robotics

In *Robotics* wird die erste Achse als manuelle Achse festgelegt, und als zweite Achse kommt der *Outline* Drehteller zum Einsatz. Der am Boden platzierte *Outline* Drehteller entspricht jenem Drehteller, der in der folgenden Abbildung als „Dimension 2“ bezeichnet wird, und Dimension 1 wird manuell durch die Mikrofonaufstellung variiert. Das bedeutet, dass die tatsächliche Aufstellung der um 90° gedrehten Abbildung entspricht.  $\mathbf{n}_{ref}$  zeigt somit in Richtung des Zenits (nach oben) mit dem Elevationswinkel  $\vartheta = 0^\circ$ , und  $\mathbf{o}_{ref}$  repräsentiert jene Richtung mit  $\vartheta = 90^\circ$  (horizontal) und dem Azimutwinkel  $\varphi = 0^\circ$ .

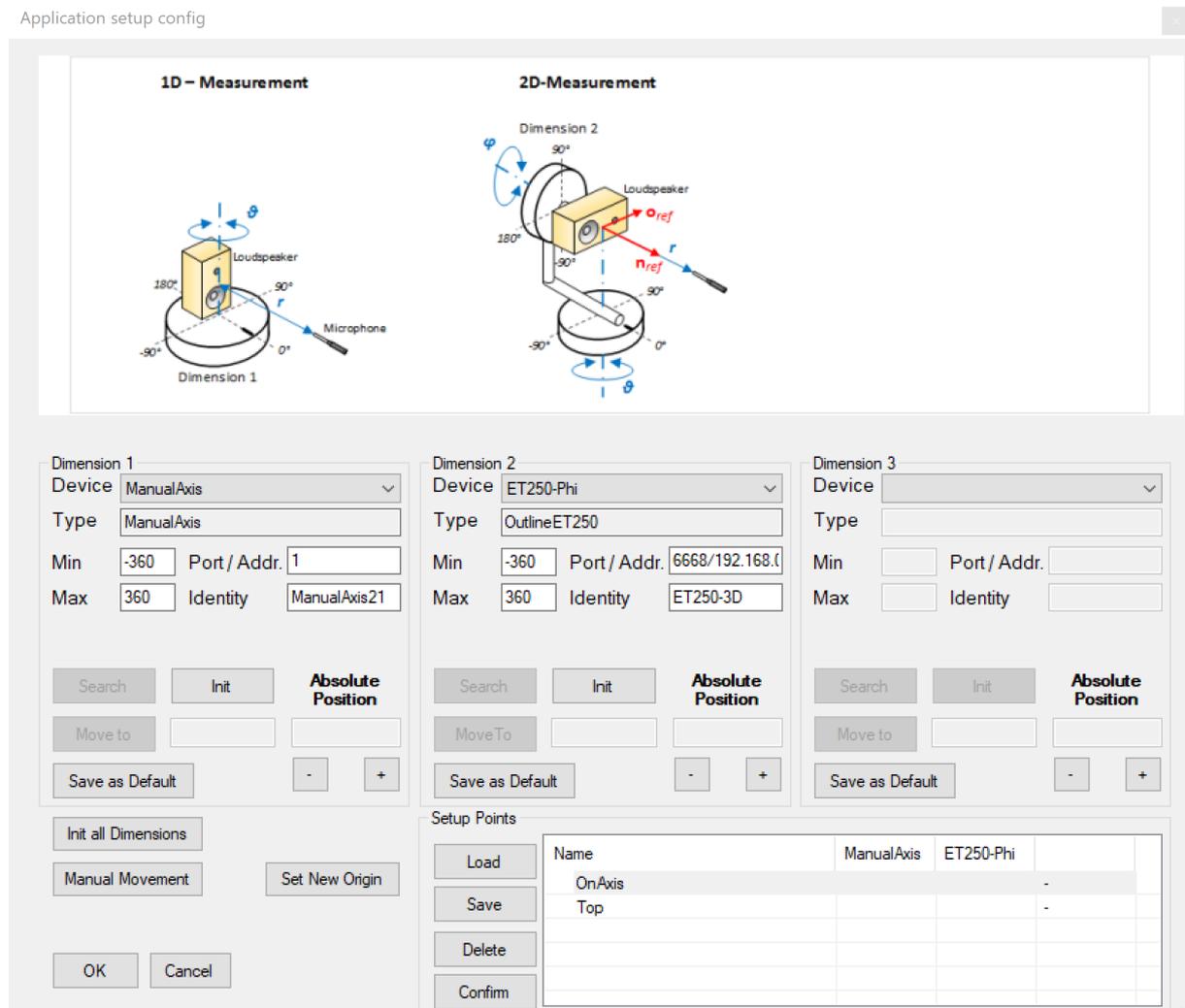


Abbildung 35: Einstellungen Robotics

### 4.1.2.2 TRF-Modul

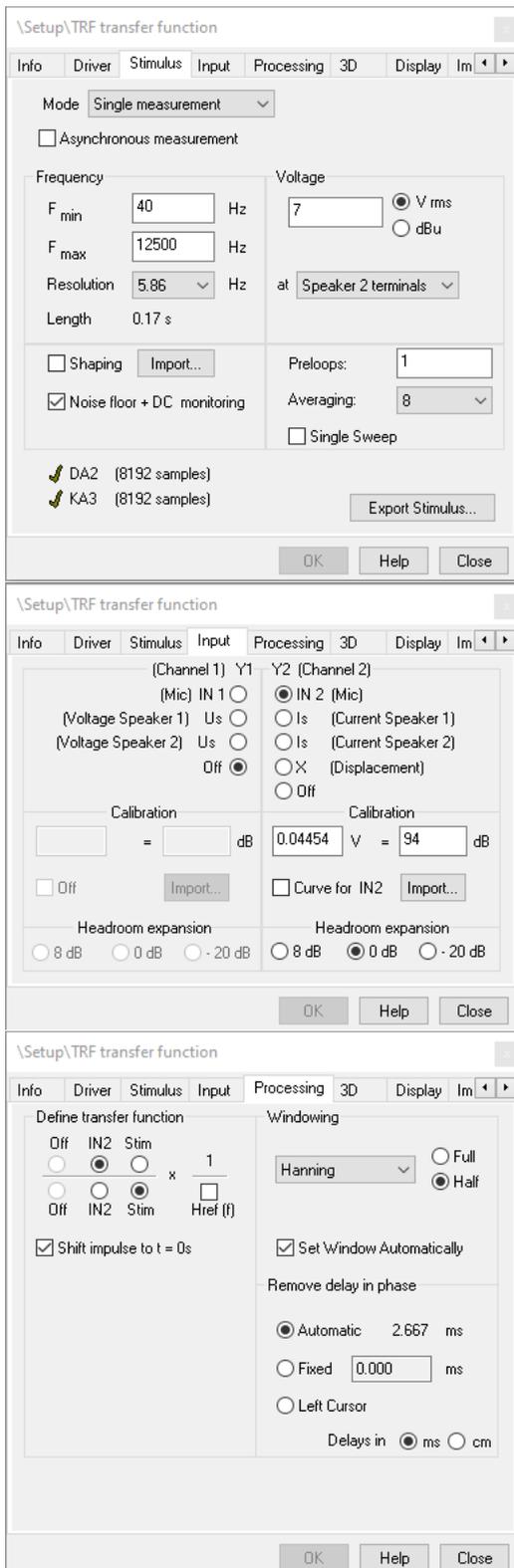


Abbildung 36: Einstellungen TRF-Modul

Zunächst werden Einstellungen für das Messsignal, den exponentiellen Sweep, getroffen.  $F_{min}$  wird auf 40 Hz gesetzt, um das 50 Hz-Terzband vollständig abzubilden, und  $F_{max}$  wird auf 12500 Hz eingestellt, um das 10000 Hz-Terzband vollständig abzubilden. Die Auflösung wird so gewählt, dass die Länge des Sweep so kurz ist, dass das automatisch gesetzte Fenster etwa 10 ms lang ist. Dieser Wert resultiert aus der Rechnung 
$$\frac{2 \cdot \min. \text{ Abstand zu Wand} - 2 \cdot \text{Radius}}{c} = \frac{2 \cdot 2,7 \text{ m} - 2 \cdot 1 \text{ m}}{343 \text{ m/s}} = 10 \text{ ms}$$
 und soll Wandreflexionen ausblenden. 7 V haben sich als praktikabel herausgestellt, und es werden je acht Messungen gemittelt.

Für die Übertragungsfunktion wird das via IN 2 eingespeiste Mikrofonsignal benötigt. Channel 1 wird nicht benötigt. Es wird der Kalibrierwert für das verwendete Mikrofon eingetragen.

Die Übertragungsfunktion ist der Quotient aus dem Mikrofonsignal und dem Stimulus. Es wird ein halbes von-Hann-Fenster („Hanning“) verwendet, dessen Länge automatisch gesetzt wird

### 4.1.3 Einfluss durch den Drehteller und die Platte

Um festzustellen, ob die Erhöhungen durch den Drehteller und/oder die Platte einen Einfluss auf die Richtwirkung und den spektralen Verlauf haben, werden zunächst drei Messungen durchgeführt:

- ohne Drehteller und ohne Platte
- ohne Drehteller und mit Platte
- mit Drehteller und Platte

Die Messpunktdichte wird hierbei reduziert auf eine vertikale Halbkreisbahn in 22,5°-Schritten (9 Messpunkte) für den Elevationswinkel  $\vartheta$  mit einem Radius  $r = 1$  m. Diese liegt über dem Lautsprecher bei einem Azimuthwinkel  $\varphi$  von 0°.

Aus den Messdaten errechnet die *Klippel* Software das Bündelungsmaß in der vertikalen Halbkreisbahn. Die folgende Abbildung zeigt exemplarisch den Schalldruckpegel für den Fall „ohne Drehteller und ohne Platte“:

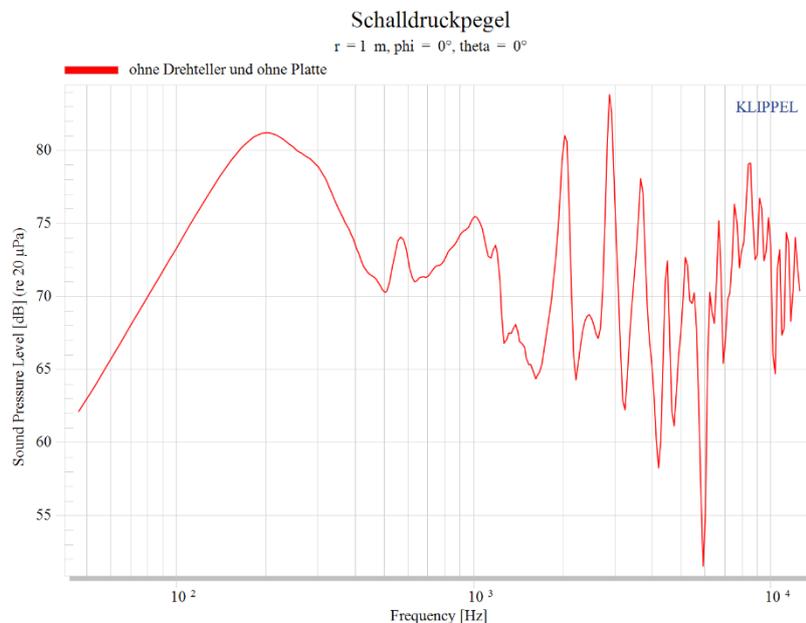
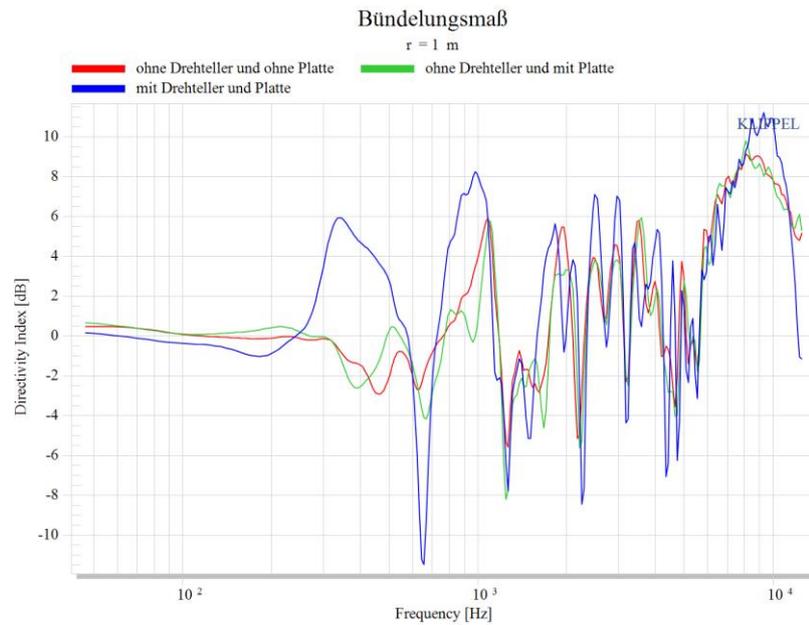


Abbildung 37: Klippel-Messung – Schalldruckpegel

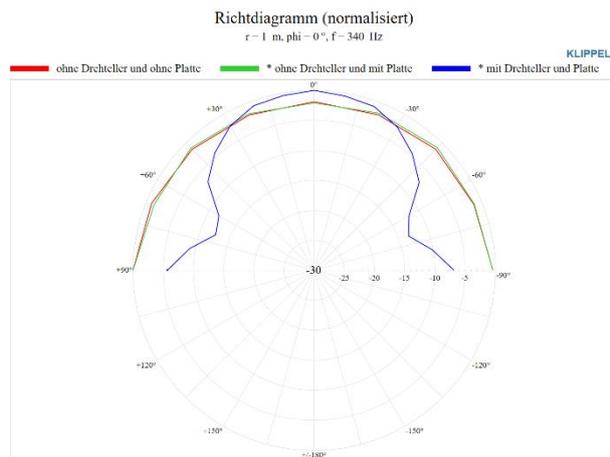
Bei 2022 Hz, 2865 Hz, 3651 Hz, ... treten Resonanzen auf, die von dem inversen Horn stammen. Diese Resonanzfrequenzen stimmen mit den in [1, p. 40] berechneten Resonanzfrequenzen von 2024 Hz, 2841 Hz und 3663 Hz überein.

Die folgende Abbildung zeigt das von *Klippel* errechnete Bündelungsmaß für alle betrachteten drei Fälle. Dies soll Aufschluss darüber geben, ob Drehteller und/oder Platte einen Einfluss auf die Richtwirkung ausüben.

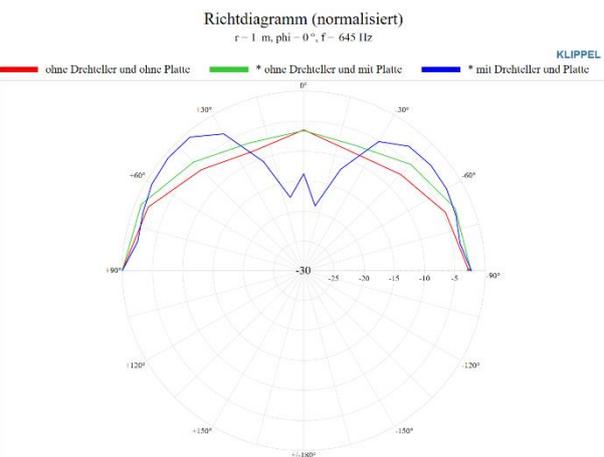


**Abbildung 38: Klippel-Messung – Bündelungsmaß**

Die Fälle „ohne Drehteller und ohne Platte“ und „ohne Drehteller und mit Platte“ verlaufen durchaus ähnlich, was darauf schließen lässt, dass die Anwesenheit der Platte die Richtwirkung nicht maßgeblich beeinflusst. Hingegen zeigt die Kurve „mit Drehteller und Platte“ einen wesentlichen Unterschied zu den anderen beiden Kurven. Dies zeigt sich vor allem unterhalb von 1 kHz, wo die drei Tieftontreiber aktiv sind. Die Erhöhung des Bündelungsmaßes im Bereich 300 Hz ... 500 Hz sowie der Einbruch bei 645 Hz sind durch Reflexions- und Beugungsmuster zu erklären, die durch die Geometrie der Kombination von Lautsprechersystem und Drehteller gegeben ist. Der Unterschied, den der Drehteller verursacht, wird aus den beiden folgenden Richtdiagrammen ersichtlich, die die Erhöhung des Bündelungsmaßes in 0°-Richtung (mit Drehteller) bei 340 Hz und den entsprechenden Einbruch bei 645 Hz zeigen:



**Abbildung 39: Richtdiagramm 340 Hz**



**Abbildung 40: Richtdiagramm 645 Hz**

## 4.1.4 Fazit

Es zeigt sich in den Probemessungen, dass der Drehteller einen signifikanten Einfluss auf die Richtwirkung hat. Trotz der Vorteile einer teilautomatisierten Messung und die somit geringe Anzahl an Vorgängen zur Mikrofonverstellung, ist diese Messmethode mit dem *Klippel* Messsystem und dem Drehteller für den vorgesehenen Zweck nicht geeignet und es ist eine alternative Messmethode zu verwenden.

## 4.1.5 Equipment

Für die Messungen mit dem *Klippel*-Messsystem wird das folgende Equipment verwendet:

- Mikrofon: *G.R.A.S. Type 46AE*
- Messsystem: *Klippel Distortion Analyzer 2.4*
- Verstärker: *Parasound HCA-800ii*
- Drehteller: *Outline ET 250*
- Laptop: *Lenovo P14s Gen4, AMD\_Zen4, WIN10 mit Klippel-Software*

## 4.2 PAK Mobile MKII

Das *PAK*-Messsystem ist ein Mehrkanal-Messsystem. Es unterstützt zehn Mikrofoneingänge für Schalleistungsmessungen. In ISO 6926 ist vorgeschrieben, dass Schalleistungsmessungen für zu untersuchende Referenzschallquellen mit fixen Positionen 40 Mikrofone benötigen, weswegen vier Messungen zu einer kombiniert werden. Es sei angemerkt, dass zwar die Mikrofonpositionen nach ISO 3745 gewählt werden, aber kein Messraum der Genauigkeitsklasse 1 zur Verfügung steht, weswegen die Verwendung einer Referenzschallquelle (Radiallüfter) notwendig ist. Die Messung wird also teilweise in Konformität mit ISO 3745, und teilweise nach ISO 3744 durchgeführt.

Neben den Messungen der Schalleistung kann auch die Richtwirkung anhand der Terzband-Schalldruckpegel der einzelnen Mikrofone untersucht werden.

### 4.2.1 Messaufbau

Die folgende Grafik zeigt schematisch den Messaufbau:

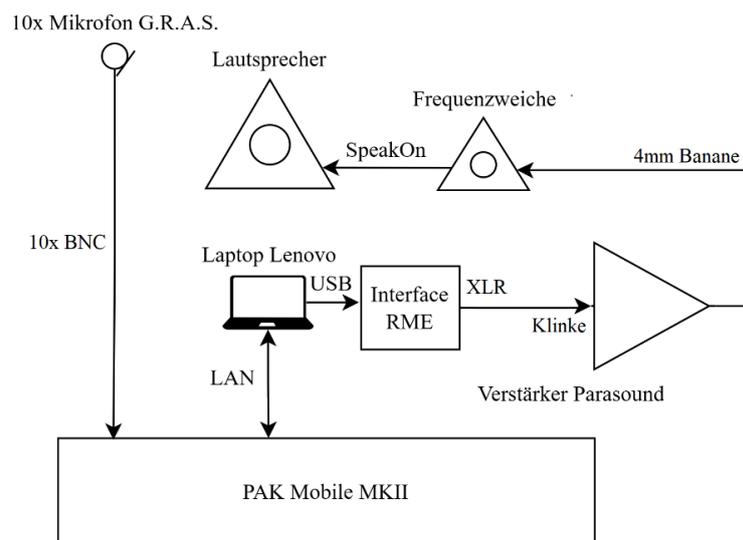


Abbildung 41: Messaufbau PAK

Der Laptop wird mittels LAN mit dem *PAK*-Messsystem verbunden. Außerdem spielt er mit einem Wave-Player (*Windows Medienwiedergabe*) ein Signal an das USB-Audio-Interface. Dieses Signal wird verstärkt und der Frequenzweiche zugeführt. Diese teilt das Signal auf in je ein Signal für den Hochtontreiber und ein Signal für die drei Tieftontreiber. Zehn Mikrofone werden aufgestellt und an das Messsystem angeschlossen. Abbildung 42 zeigt das Interface sowie die Beschaltung des Verstärkers.

Bevor die Messungen an dem Lautsprechersystem durchgeführt werden, werden zunächst der Fremdgeräuschpegel und der Schalleistungspegel der Referenzschallquelle gemessen. Die Messdauer beträgt für jede Messung 60 s. Die Temperatur während der Messungen beträgt 22,6 °C und die relative Luftfeuchte 46 %.



Abbildung 42: Verstärker *Parasound* und Interface *RME*

### 4.2.2 Mikrofonpositionen

Für die Mikrofonpositionen verweist ISO 6926 [2, p. 9] auf die Norm ISO 3745. Für fixe Mikrofonpositionen soll jene Aufstellung verwendet werden, die in Anhang E1 in ISO 3745 festgelegt ist [3, p. 52]. Es werden zunächst die Positionen 1-10 aufgebaut. Durch Drehung des Messobjekts ergeben sich relativ zum Objekt die Positionen 21-30. Anschließend werden die Mikrofone auf die Positionen 11-20 umgebaut. Abermals ergeben sich die Positionen 31-40 durch Drehung des Messobjekts um 180°. Die folgende Tabelle listet die Mikrofonpositionen auf:

Mikrofon	$x$ in m	$y$ in m	$z$ in m	Mikrofon	$x$ in m	$y$ in m	$z$ in m
1	-1,000	0,000	0,025	21	1,000	0,000	0,025
2	0,499	-0,864	0,075	22	-0,499	0,864	0,075
3	0,496	0,859	0,125	23	-0,496	-0,859	0,125
4	-0,492	0,853	0,175	24	0,492	-0,853	0,175
5	-0,487	-0,844	0,225	25	0,487	0,844	0,225
6	0,961	0,000	0,275	26	-0,961	0,000	0,275
7	0,000	0,947	0,320	27	0,000	-0,947	0,320
8	-0,803	-0,464	0,375	28	0,803	0,464	0,375
9	0,784	-0,453	0,425	29	-0,784	0,453	0,425
10	0,762	0,440	0,475	30	-0,762	-0,440	0,475
11	-0,737	0,426	0,525	31	0,737	-0,426	0,525
12	0,000	-0,818	0,575	32	0,000	0,818	0,575
13	0,781	0,000	0,625	33	-0,781	0,000	0,625
14	-0,369	0,639	0,675	34	0,369	-0,639	0,675
15	-0,344	-0,596	0,725	35	0,344	0,596	0,725
16	0,316	-0,547	0,775	36	-0,316	0,547	0,775
17	0,283	0,489	0,825	37	-0,283	-0,489	0,825
18	-0,484	0,000	0,875	38	0,484	0,000	0,875
19	0,000	-0,380	0,925	39	0,000	0,380	0,925
20	0,192	0,111	0,975	40	-0,192	-0,111	0,975

Tabelle 3: Mikrofonpositionen

In der folgenden Abbildung sind die Mikrofonpositionen in 3D dargestellt, von 1 bis 20 und von 21 bis 40. Die  $0^\circ$ -Richtung ( $\varphi = 0^\circ$ ) für den Lautsprecher ist dadurch definiert, dass der Lautsprecher mit jener Seite, an der der SpeakOn-Anschluss ist, in positive y-Richtung zeigt.

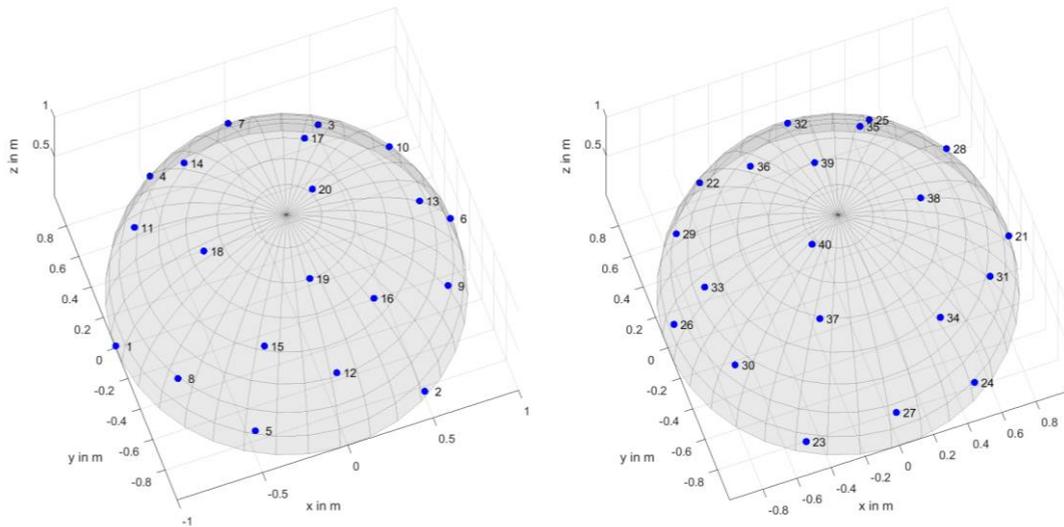


Abbildung 43: Mikrofonpositionen 1 bis 20 und 21 bis 40

Die tatsächlichen Mikrofonaufstellungen sind in der folgenden Abbildung zu sehen:



Abbildung 44: Mikrofonpositionen 1 bis 10 und 11 bis 20

### 4.2.3 Eingangssignal und Shaping

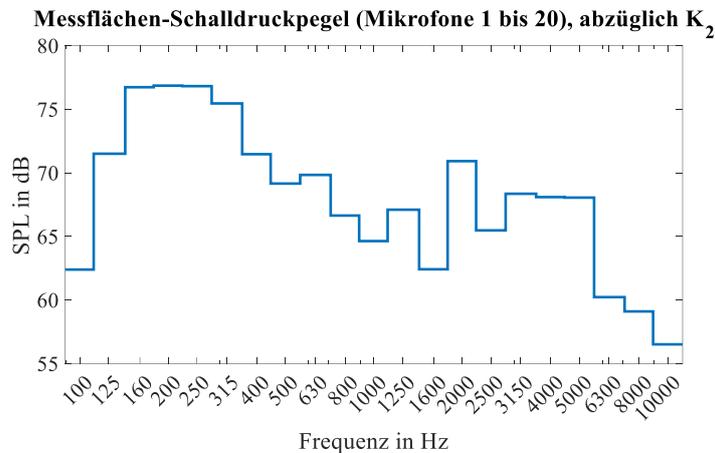
Das Eingangssignal soll so gewählt werden, dass der gemessene Schallleistungspegel in jedem Terzband möglichst gleich groß ist. Hierfür werden zunächst Messungen mit den Mikrofonen 1 bis 10 und 11 bis 20 mit einem rosa Rauschen als Eingangssignal über alle Terzbänder von 100 Hz bis 10 kHz durchgeführt.

Die beiden gemessenen Messflächen-Schalldruckpegel  $\overline{L'_{p,1\dots 10}}(f_k)$  und  $\overline{L'_{p,11\dots 20}}(f_k)$ , je abzüglich der Umgebungskorrektur  $K_2(f_k)$  (siehe Kapitel 4.2.6), werden nun linear gemittelt (siehe Abbildung 45) und der Reziprokwert dessen wird gebildet (Entzerrung). Anschließend wird das rosa Rauschen mit der Amplitude  $1/\sqrt{f}$  und einer zufälligen Phase von  $0^\circ$  bis  $360^\circ$  im Frequenzbereich dazu multipliziert:

$$\underline{X}(f) = \left\{ \frac{2}{10^{\frac{\overline{L'_{p,1\dots 10}}(f_k) - K_2(f_k)}{20 \text{ dB}}} + 10^{\frac{\overline{L'_{p,11\dots 20}}(f_k) - K_2(f_k)}{20 \text{ dB}}}} \cdot \frac{1}{\sqrt{f}} \cdot e^{j \cdot \text{rand}(0,2\pi)} \right\} \quad (4.1)$$

Hierbei liegen die Größen  $\overline{L'_{p,1\dots 10}}(f_k)$ ,  $\overline{L'_{p,11\dots 20}}(f_k)$  und  $K_2(f_k)$  in Terzband-Auflösung vor, während der kontinuierliche Frequenzvektor  $f$  mit einer Auflösung von  $\frac{1}{T_E} = \frac{1}{90}$  Hz im Bereich von 0 Hz bis zur halben Abtastfrequenz  $\frac{f_s}{2} = \frac{48 \text{ kHz}}{2} = 24 \text{ kHz}$  definiert ist.  $T_E$  ist die Dauer des Eingangssignals, welches 90 s lang sein soll, um die Messdauer von 60 s jedenfalls zu überschreiten.  $\text{rand}(0,2\pi)$  bezeichnet einen für jede Frequenz  $f$  zufällig erzeugten Wert zwischen 0 und  $2\pi$  (Gleichverteilung).

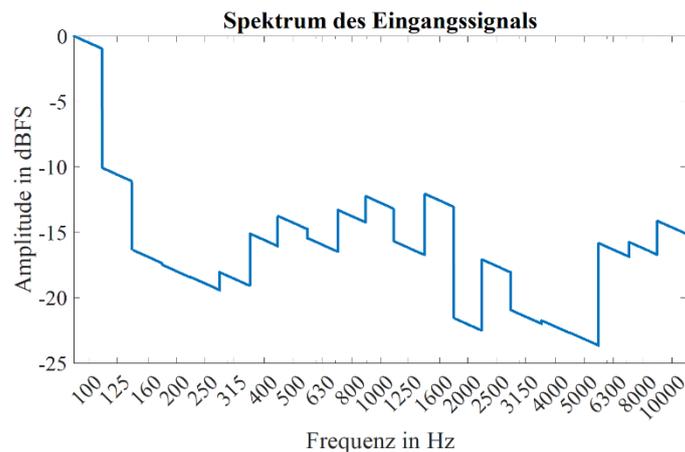
Die folgende Abbildung zeigt den gemittelten Messflächen-Schalldruckpegel abzüglich der Umgebungskorrektur:



**Abbildung 45: Messflächen-Schalldruckpegel**

Es zeigt sich ein reduzierter Schalldruckpegel in den niedrigsten beiden Terzbändern, der durch die durch das geringe Innenvolumen des Tetraeder-Gehäuses erhöhte Resonanzfrequenz der drei Tieftöner-Chassis (steifere akustische Feder) erklärt werden kann. Zudem ergeben sich größere Schwankungen über 1 kHz durch die Trichter-Resonanzfrequenzen des inversen Hornlautsprechers (vgl. Abbildung 37) und ein genereller Abfall des Pegels hin zu höheren Frequenzen.

Der Betrag  $X(f)$  des Eingangssignals im Frequenzbereich ist im folgenden Bild dargestellt:



**Abbildung 46: Betragsspektrum des Eingangssignals**

Außerhalb des dargestellten Bereichs ist die Amplitude 0 bzw.  $-\infty$  dBFS.

Das Zeitsignal  $\hat{x}(t)$  ergibt sich aus der inversen Fouriertransformation  $\hat{x}(t) = \text{IFFT}\{\underline{X}(f)\}$ , und das Eingangssignal  $x(t) = \hat{x}(t) / \max_t \hat{x}(t)$  ist zusätzlich auf 1 normiert.

Damit für jede Messung dieselbe Verstärkung für das Eingangssignal verwendet wird, wird ein Kalibrierton (Sinuston) mit einer Frequenz von 100 Hz festgelegt. Der Lautstärkeregler des Verstärkers muss nun vor der Messung so eingestellt werden, dass bei Wiedergabe des Kalibriertons am Ausgang des Verstärkers ein RMS-Wert von 6 V anliegt. Dies wird zwischen Messungen immer wieder überprüft, und der Wert von 6 V bleibt während allen Messungen konstant.



**Abbildung 47: Ausgangsspannung (RMS) des Verstärkers bei abgespieltem Kalibrierton**

### 4.2.4 Hornaufsätze

Zur Beeinflussung der Richtwirkung in Richtung halbkugelförmiger Abstrahlung werden fünf Aufsätze entworfen, die auf die Hornmündung aufgesteckt werden können. Gemeinsam mit dem Fall „ohne Aufsatz“ ergeben sich sechs mögliche Aufsatzkonfigurationen, die in weiterer Folge verglichen werden können. Die folgende Tabelle zeigt die Bezeichnungen mit einer Kurzbeschreibung, sowie je eine 3D-Skizze und ein Foto. Bei den drei Dämpfern wird die Unterseite mit Stoff verkleidet, um besser absorbieren zu können. Alle Aufsätze werden mittels 3D-Druck hergestellt.

<p><b>Aufsatz 360:</b> 6 Öffnungen in einer horizontalen Ebene um die Hornmündung, im 60°-Abstand. Die Summe der Flächen ist der Querschnitt der Hornmündung.</p>		
<p><b>Aufsatz:</b> Drei Auslässe in Richtung der Kanten des Tetraeders, und eine nach oben. Die Summe der Öffnungsflächen ist der Querschnitt der Hornmündung.</p>		
<p><b>Dämpfer 3x7:</b> Gleich wie „Aufsatz“, aber mit einem Dämpfer mit einem Durchmesser von 7 cm, 3 cm über dem oberen Auslass, zur Dämpfung in Zenitrichtung.</p>		
<p><b>Dämpfer 5x7:</b> Gleich wie „Aufsatz“, aber mit einem Dämpfer mit einem Durchmesser von 7 cm, 5 cm über dem oberen Auslass, zur Dämpfung in Zenitrichtung.</p>		
<p><b>Dämpfer 5x9:</b> Gleich wie „Aufsatz“, aber mit einem Dämpfer mit einem Durchmesser von 9 cm, 5 cm über dem oberen Auslass, zur Dämpfung in Zenitrichtung.</p>		
<p><b>ohne Aufsatz</b></p>		

Tabelle 4: Hornaufsätze

## 4.2.5 Messkonfigurationen

Im Folgenden werden alle Konfigurationen vorgestellt, mit denen Messungen durchgeführt werden.

Es stehen sechs Möglichkeiten für die Aufsätze auf die Hornmündung zur Verfügung:

- Aufsatz 360
- Aufsatz
- Dämpfer 3x7
- Dämpfer 5x7
- Dämpfer 5x9
- ohne Aufsatz

Da das PAK-Messsystem bei der Messung der Schalleistung auf zehn Mikrofone beschränkt ist, und 40 Mikrofonpositionen vorgesehen sind, müssen mehrere Messungen kombiniert werden. Hierbei wird der Umstand genutzt, dass die Positionen 21 ... 40 den um  $180^\circ$  um die z-Achse gedrehten Positionen 1 ... 20 entsprechen. Somit müssen zwei Mikrofonarrays mit je zehn Mikrofonen aufgebaut werden, und die anderen beiden ergeben sich durch Drehung des Messobjektes um  $180^\circ$ . Es gibt also zwei Arrays:

- Mikrofone 1-10
- Mikrofone 11-20

Neben der  $0^\circ$ - und der  $180^\circ$ -Ausrichtung werden weitere Messungen in  $90^\circ$ - und  $270^\circ$ -Ausrichtung getätigt (positiver Winkel: gegen den Uhrzeigersinn), um das Verhalten bei unterschiedlicher Ausrichtung untersuchen zu können. Für die  $0^\circ$ - und die  $180^\circ$ -Ausrichtung werden je drei Messungen hintereinander durchgeführt, um die zeitliche Stabilität erfassen zu können. Daraus ergeben sich acht Messungen:

- $0^\circ$  (3x)
- $90^\circ$
- $180^\circ$  (3x)
- $270^\circ$

Daraus ergeben sich  $6 \cdot 2 \cdot 8 = 96$  Messungen, die durchgeführt werden. Zusätzlich werden auch einzelne Messungen ohne die schallharte Platte unter der Schallquelle durchgeführt. In den Messdaten werden die Messungen wie folgt benannt:

*Aufsatz\_Winkel\_Messungsnummer\_Mikrofone\_Platte\_Shaping20*

Z.B.: ohne Aufsatz\_090\_1\_11-20\_Platte\_Shaping20

Als Suffix wird noch die Bezeichnung Platte\_Shaping20 angefügt, um zu kennzeichnen, dass die Messung mit der Platte und mit Shaping (über 20 Mikrofone) durchgeführt wird.

Die Messungen mit  $0^\circ$  und  $180^\circ$  werden in den Messergebnissen (Kapitel 5) kombiniert als  $0^\circ$ -Messung bezeichnet (40 Mikrofonpositionen). Ebenso werden die Messungen mit  $90^\circ$  und  $270^\circ$  kombiniert als  $90^\circ$ -Messung bezeichnet (40 Mikrofonpositionen).

### 4.2.6 Berechnung der Schalleistung

Die Software *PAK* liefert den örtlich über je 10 Mikrofonpositionen gemittelten Messflächen-Schalldruckpegel in Terzbändern. Dieser wird in Folge als  $\overline{L'_{p(ST),m}}$  für den Lautsprecher (ST ... Source under Test) und als  $\overline{L'_{p(RSS),m}}$  für die Referenzschallquelle (RSS ... Reference Sound Source) bezeichnet, wobei  $m$  für die zehn Mikrofonpositionen steht, für die dieser Pegel jeweils ermittelt wird, also 1 ... 10 bis 31 ... 40. Alle folgenden Berechnungen werden für alle Terzbänder durchgeführt.

Die über alle 40 Mikrofonpositionen gemittelten Messflächen-Schalldruckpegel  $\overline{L'_{p(ST)}}$  und  $\overline{L'_{p(RSS)}}$  werden daraus wie folgt ermittelt:

$$\overline{L'_{p(ST)}} = 20 \cdot \lg \left( \frac{1}{4} \cdot \sum_m 10^{\overline{L'_{p(ST),m}}/(20 \text{ dB})} \right) \text{ dB} \tag{4.2}$$

$$\overline{L'_{p(RSS)}} = 20 \cdot \lg \left( \frac{1}{4} \cdot \sum_m 10^{\overline{L'_{p(RSS),m}}/(20 \text{ dB})} \right) \text{ dB} \tag{4.3}$$

Für die Berechnung des Schalleistungspegels des Lautsprechersystems sind noch die Fremdgeräuschkorrektur  $K_1$  sowie die Umgebungskorrektur  $K_2$  notwendig.

Der Messflächen-Schalldruckpegel des Fremdgeräusches ist der folgenden Abbildung für die Mikrofone 1...10 sowie 11...20 zu entnehmen:

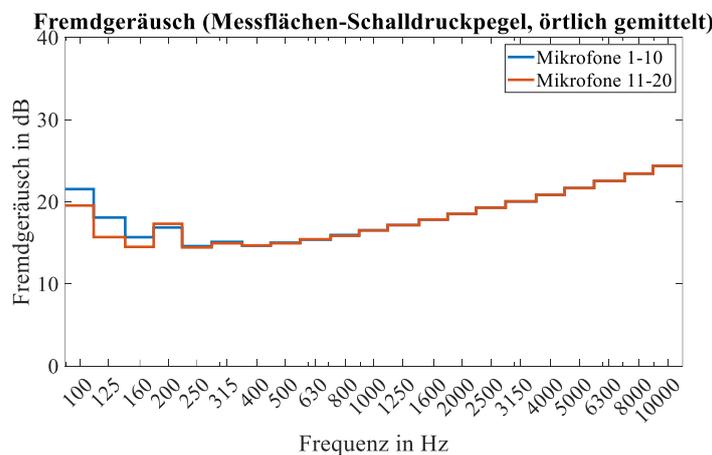


Abbildung 48: Fremdgeräusch

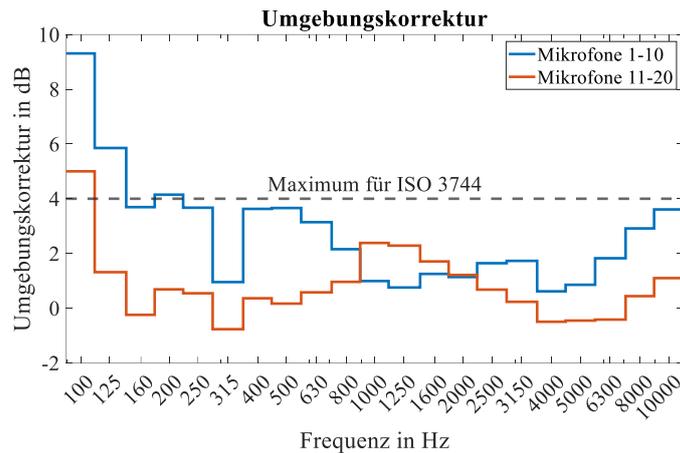
Da der maximale Messflächen-Schalldruckpegel des Fremdgeräusches von 24,4 dB den zu messenden Messflächen-Schalldruckpegel des Lautsprechersystems (im Bereich von 70 dB) um mindestens 15 dB unterschreitet, ist keine Fremdgeräuschkorrektur notwendig. Es gilt also:

$$K_1 = 0 \text{ dB} \tag{4.4}$$

Für die Berechnung von  $K_2$  sind die Messfläche  $S = 2\pi \cdot r^2 = 2\pi \cdot (1 \text{ m})^2 = 6,283 \text{ m}^2$  sowie die Referenzfläche  $S_0 = 1 \text{ m}^2$  vonnöten.  $L_{W,r}$  ist der bekannte Schallleistungspegel der Referenzschallquelle.

$$K_2 = \overline{L'_{p(\text{RSS})}} + 10 \cdot \lg\left(\frac{S}{S_0}\right) \text{ dB} - L_{W,r} \quad (4.5)$$

Die Umgebungskorrektur wird in der folgenden Abbildung für die Mikrofone 1...10 und 11...20 dargestellt, wobei der obere Grenzwert von 4 dB für ISO 3744 eingezeichnet ist:



**Abbildung 49: Umgebungskorrektur**

Dass die Umgebungskorrektur im tieffrequenten Bereich den Grenzwert überschreitet, deutet darauf hin, dass die Messungen bis etwa 160 Hz mit einer Unsicherheit behaftet sind. Darüber hinaus ist der verwendete Raum (Tonstudio) eine ausreichend gute Messumgebung. Die hohe Umgebungskorrektur bei tiefen Frequenzen ist auf Raummoden zurückzuführen. Bei den Mikrofonen 11...20, welche höher über dem Boden sind, ist dieser Effekt geringer.

Der Schallleistungspegel des Lautsprechersystems wird schlussendlich gemäß [4, p. 29] wie folgt berechnet:

$$L_W = \overline{L'_{p(\text{ST})}} + 10 \cdot \lg\left(\frac{S}{S_0}\right) \text{ dB} - K_1 - K_2 \quad (4.6)$$

## 4.2.7 Equipment

Für die Messungen mit dem *PAK*-Messsystem wird das folgende Equipment verwendet:

- Mikrofon: 10 Stk. *G.R.A.S. Type 46AE*
- Messsystem: *PAK Mobile MKII*
- Verstärker: *Parasound HCA-800ii*
- Referenzschallquelle: *Bruel & Kjaer Type 4204*
- Schallkalibrator: *Bruel & Kjaer Type 4231*
- Audio-Interface: *RME Babyface*
- Multimeter: *Fluke 117*
- Laptop: *Lenovo P14s Gen4, AMD\_Zen4, WIN10 mit Klippel-Software*

## 4.2.8 MATLAB-Skripten

Die Erzeugung des Eingangssignals (rosa Rauschen mit Shaping) wird mit dem *MATLAB*-Skript „*shaping\_pink.m*“ vorgenommen.

Für die Auswertung und Darstellung (Graphen, Ballondiagramme) der Messergebnisse wird das Skript „*PAK\_3745\_processing.m*“ erstellt.

Diese Skripten werden in *MATLAB R2022a* ausgeführt.

## 5 Messergebnisse

Die Messergebnisse werden aus den Messdaten der *PAK*-Messungen gebildet. Ziel ist es, jene Größen darzustellen, die zur Überprüfung auf Konformität mit ISO 6926 notwendig sind. Gemäß [1, p. 9] sollen die folgenden fünf Anforderungen überprüft werden, wobei die letzte bereits durch die Konstruktion erfüllt wird:

1. Wiederhol-Standardabweichung:

$$\sigma_{r,f_k} \leq 0,8 \text{ dB für } 50 \text{ Hz} \leq f_k \leq 80 \text{ Hz}$$

$$\sigma_{r,f_k} \leq 0,4 \text{ dB für } 100 \text{ Hz} \leq f_k \leq 160 \text{ Hz}$$

$$\sigma_{r,f_k} \leq 0,2 \text{ dB für } 200 \text{ Hz} \leq f_k \leq 20 \text{ kHz}$$

2. Maximale Schwankungsbreite des Schallleistungspegels über alle Frequenzen:

$$\max_{f_k}\{L_{W,f_k}\} - \min_{f_k}\{L_{W,f_k}\} \leq 12 \text{ dB für } 100 \text{ Hz} \leq f_k \leq 10 \text{ kHz und}$$

$$\max_{f_k}\{L_{W,f_k}\} - \min_{f_k}\{L_{W,f_k}\} \leq 16 \text{ dB für } 50 \text{ Hz} \leq f_k \leq 20 \text{ kHz}$$

3. Maximale absolute Differenz der Schallleistungspegel benachbarter Terzbänder:

$$\left| L_{W,f_k} - L_{W,f_{k-1}} \right| \leq 3 \text{ dB für } 100 \text{ Hz} < f_k \leq 10 \text{ kHz und}$$

$$\left| L_{W,f_k} - L_{W,f_{k-1}} \right| \leq 4 \text{ dB für } 50 \text{ Hz} < f_k \leq 20 \text{ kHz}$$

4. Maximales Bündelungsmaß über alle Frequenzen:

$$D_{li,f_k} = L_{pi,f_k} - \overline{L_p} \leq 6 \text{ dB für } 100 \text{ Hz} \leq f_k \leq 10 \text{ kHz und alle Richtungen } i$$

5. Geometrische Abmessungen in horizontaler und vertikaler Richtung:

$$l_h \leq 0,8 \text{ m und}$$

$$l_v \leq 0,5 \text{ m}$$

## 5.1 Zeitliche Stabilität (Anforderung 1)

Für die zeitliche Stabilität (Anforderung 1) legt ISO 6926 fest, dass die Standardabweichung  $\sigma_r$  dreier Messergebnisse für den Schalleistungspegel für die Terzbänder von 100 Hz bis 160 Hz höchstens 0,4 dB betragen darf, und für alle Terzbänder darüber höchstens 0,2 dB. Gemäß [2, p. 11] wird die Standardabweichung wie folgt berechnet:

$$\sigma_r = \sqrt{\frac{1}{N-1} \cdot \sum_{j=1}^N (L_{W,j} - \overline{L_W})^2} \tag{5.1}$$

Hierbei ist  $N = 3$  die Anzahl der Messungen (selbe Konfiguration),  $L_{W,j}$  ist der in der Messung  $j$  ermittelte Schalleistungspegel, und  $\overline{L_W}$  ist der energiemäßig gemittelte Schalleistungspegel der  $N$  Messungen.

Die folgenden Abbildungen zeigen die Standardabweichung für die sechs Aufsatzvarianten. Der Lautsprecher ist hierbei in der 0°-Position. Zusätzlich ist in jeder Grafik die durch ISO 6926 maximal zulässige Standardabweichung eingezeichnet.

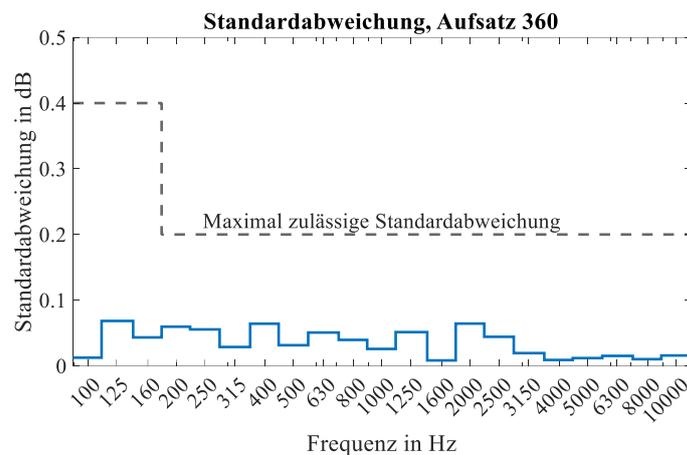
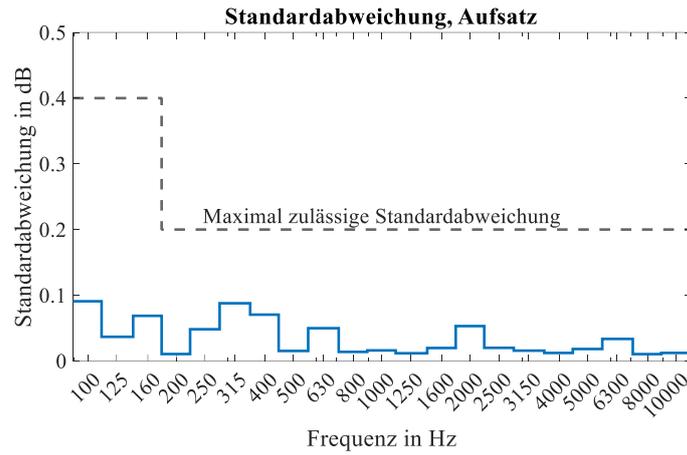
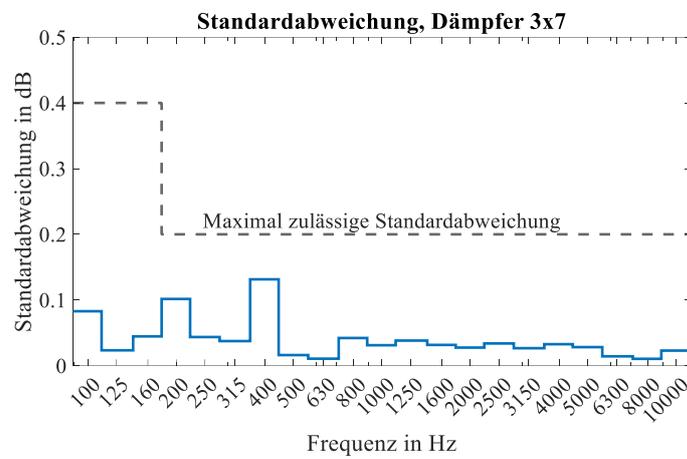


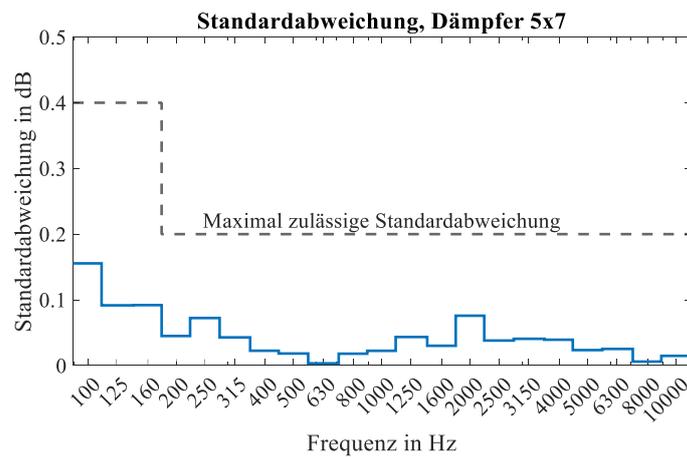
Abbildung 50: Standardabweichung mit „Aufsatz 360“



**Abbildung 51: Standardabweichung mit „Aufsatz“**



**Abbildung 52: Standardabweichung mit „Dämpfer 3x7“**



**Abbildung 53: Standardabweichung mit „Dämpfer 5x7“**

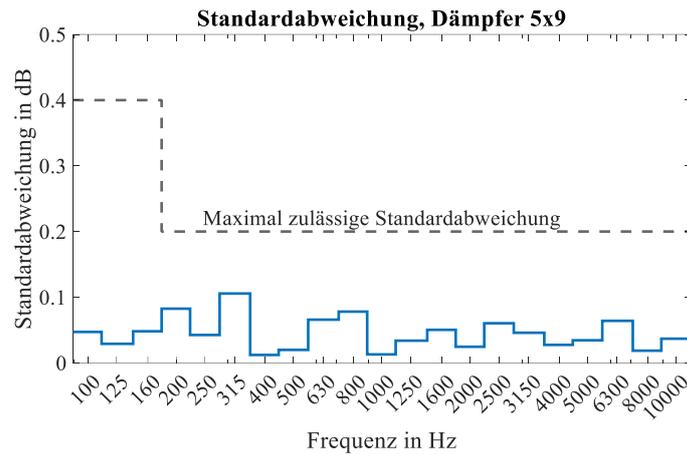


Abbildung 54: Standardabweichung mit „Dämpfer 5x9“

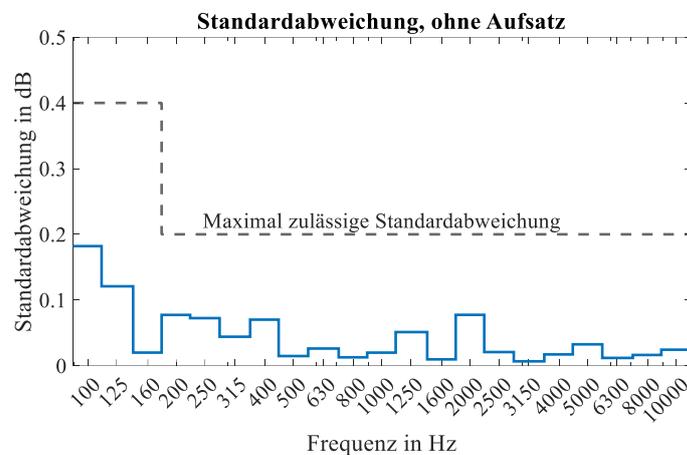


Abbildung 55: Standardabweichung „ohne Aufsatz“

Es zeigt sich, dass die Standardabweichung zwar zwischen den verschiedenen Aufsätzen variiert, aber bei keinem Aufsatz die Standardabweichung in die Nähe der maximal zulässigen Standardabweichung reicht. Dies entspricht der generellen Erwartung an elektroakustische Wandler, die in einem Bereich betrieben werden, bei dem mit keiner hohen Hitzeentwicklung oder gar Ermüdung zu rechnen ist. Daher wird Anforderung 1 in jedem betrachteten Fall erfüllt.

## 5.2 Spektrale Eigenschaften (Anforderungen 2 und 3)

Für die Überprüfung der Anforderungen 2 und 3 ist es notwendig, sich das Terzband-Spektrum des Schallleistungspegels anzuschauen. Anforderung 2 legt fest, dass die maximale Schwankungsbreite, also die Differenz von maximalem und minimalem Schallleistungspegel über die Terzbänder von 100 Hz bis 10 kHz höchstens 12 dB betragen darf. In Anforderung 3 ist festgelegt, dass sich benachbarte Terzbänder in diesem Frequenzbereich im Schallleistungspegel höchstens um 3 dB unterscheiden dürfen.

Die folgenden Abbildungen zeigen für alle sechs Aufsätze den Schallleistungspegel, mit dem Lautsprecher in 0°-Ausrichtung (blau) und in 90°-Ausrichtung (orange strichliert). Zusätzlich sind für diese beiden Ausrichtungen in jedem Diagramm die maximalen Sprünge zwischen benachbarten Terzbändern durch eine vertikale, punktierte Linie eingezeichnet. In der Legende finden sich die maximale Schwankungsbreite sowie der Summen-Schallleistungspegel  $L_{W,sum} = 10 \cdot \lg(\sum_{f_k} 10^{L_W(f_k)/(10 \text{ dB})})$  dB über alle Terzbänder  $f_k$ .

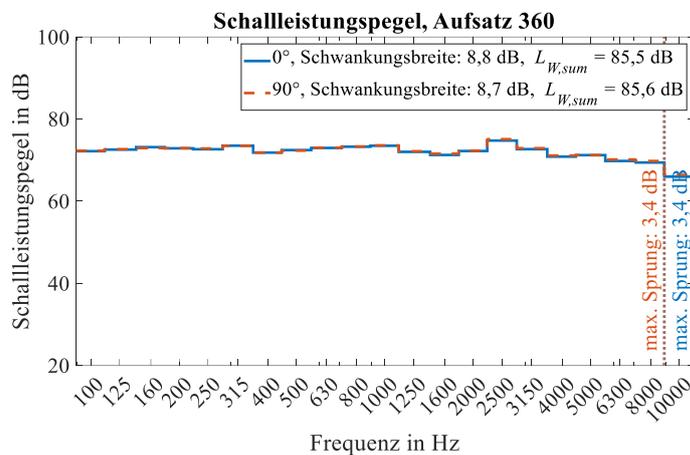


Abbildung 56: Schallleistungspegel mit „Aufsatz 360“

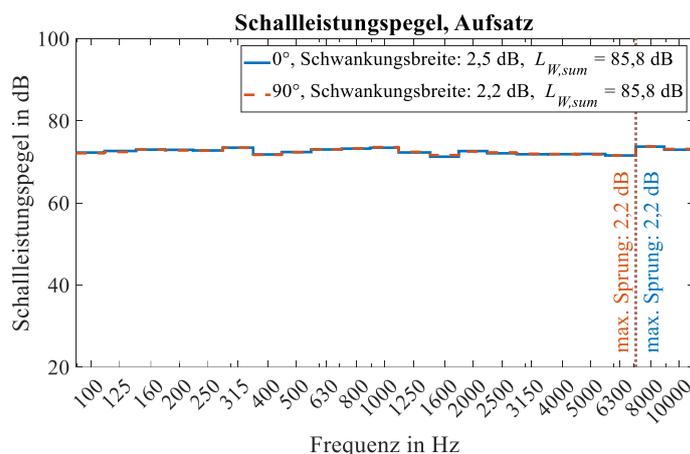


Abbildung 57: Schallleistungspegel mit „Aufsatz“

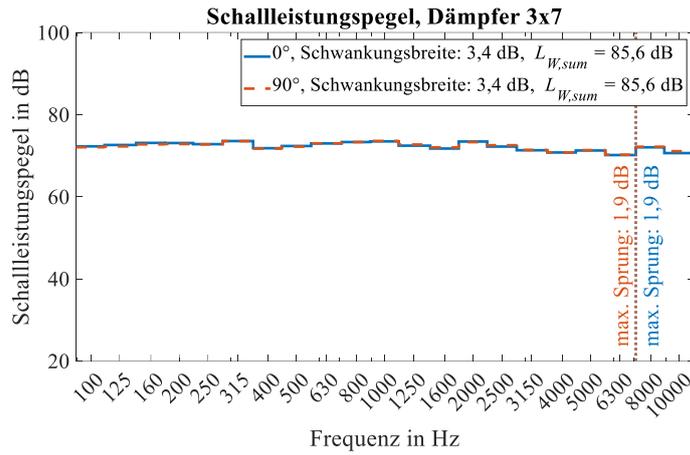


Abbildung 58: Schallleistungspegel mit „Dämpfer 3x7“

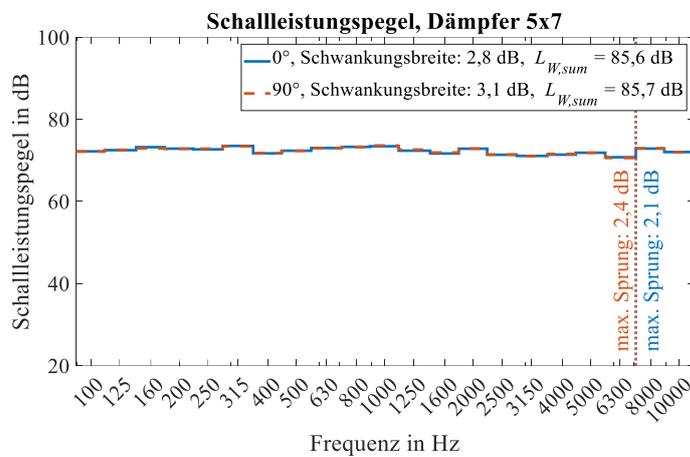


Abbildung 59: Schallleistungspegel mit „Dämpfer 5x7“

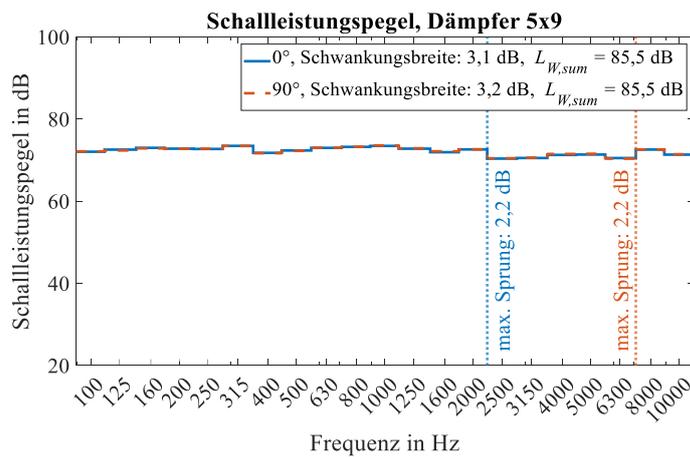


Abbildung 60: Schallleistungspegel mit „Dämpfer 5x9“

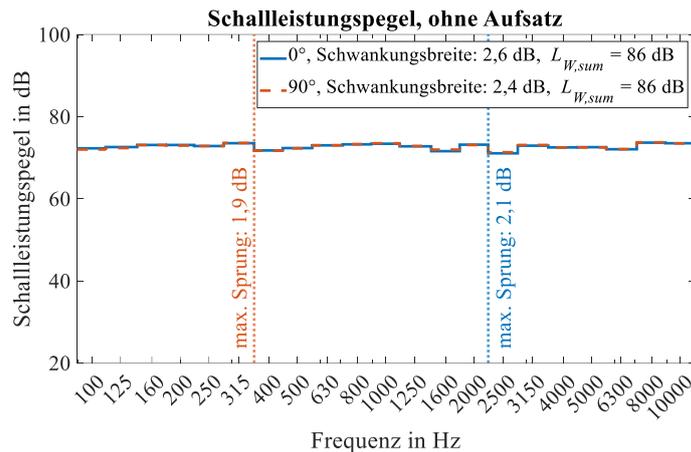


Abbildung 61: Schalleistungspegel „ohne Aufsatz“

Vergleicht man die  $0^\circ$ -Ausrichtung mit der  $90^\circ$ -Ausrichtung, so erkennt man, dass die Ausrichtung keinen maßgeblichen Einfluss auf den Verlauf der Schalleistung über die Terzbänder hat. Das bedeutet, dass mit 40 Mikrofonpositionen das Schallfeld gut genug abgetastet wird, um die gesamte abgestrahlte Schalleistung über die Halbkugeloberfläche ermitteln zu können.

Anforderung 2 wird von allen Aufsätzen mit beiden Ausrichtungen erfüllt. Bei „Aufsatz 360“ ergibt sich die höchste Schwankungsbreite von 8,8 dB, während die verbleibenden Aufsätze einen deutlich flacheren Verlauf mit höchstens 3,4 dB Schwankungsbreite haben. Dies ist das Ergebnis des Shapings, welches das Eingangssignal so generiert, dass der Pegelverlauf der Schalleistung möglichst flach ist. Der flachste Verlauf ist gegeben durch den „Aufsatz“, dicht gefolgt von dem Fall „ohne Aufsatz“. Auf Basis des letztgenannten wurde das Shaping durchgeführt, der „Aufsatz“ beeinflusst den Verlauf der Schalleistung am wenigsten.

Die Anforderung 3 wird von „Aufsatz 360“ verfehlt, da zwischen den Terzbändern 8 kHz und 10 kHz ein Sprung von 3,4 dB nach unten vorliegt, welcher das vorgegebene Maximum von 3 dB überschreitet. Dies ist zurückzuführen darauf, dass das Shaping für den Fall „ohne Aufsatz“ vorgenommen wurde, und „Aufsatz 360“ die Abstrahlung höherer Frequenzen dämpft. Mit einem auf „Aufsatz 360“ maßgeschneiderten Shaping wäre dies vermeidbar, und so könnte auch für diesen Aufsatz Anforderung 3 eingehalten werden.

Zusammenfassend lässt sich sagen, dass durch Shaping des Eingangssignals bei elektroakustischen Wandlern mit einfachen Mitteln die Einhaltung von Anforderung 2 und 3 herbeizuführen ist. Eine nachträgliche Optimierung des Shapings ist jederzeit möglich, um einen noch flacheren Verlauf erzielen zu können.

### 5.3 Richtwirkung (Anforderung 4)

Anforderung 4 betrifft die Richtwirkung der Referenzschallquelle und bestimmt ein oberes Limit von 6 dB für das maximale Bündelungsmaß. Daher wird das Bündelungsmaß aus den Messdaten für alle Aufsätze bestimmt und auf Einhaltung von Anforderung 4 überprüft. Im Anschluss werden Ballon-Diagramme erstellt, um die Richtwirkung des Lautsprechersystems mit den verschiedenen Aufsätzen zu visualisieren.

#### 5.3.1 Bündelungsmaß

Das Bündelungsmaß für Mikrofon  $i$   $D_{Ii}$  wird gemäß [2, p. 3] wie folgt für jedes Terzband berechnet:

$$D_{Ii} = L_{pi} - \overline{L_p} \tag{5.2}$$

Hierbei bezeichnet  $i$  die  $i$ -te Mikrofonposition,  $L_{pi}$  ist der zeitlich gemittelte Schalldruckpegel des  $i$ -ten Mikrofons, und  $\overline{L_p}$  ist der über alle Mikrofone (örtlich) gemittelte Schalldruckpegel. Nun wird über alle Mikrofonpositionen das Maximum gesucht, um das Bündelungsmaß  $D_I = \max_i D_{Ii}$  zu erhalten.

In den folgenden Abbildungen wird das Bündelungsmaß für jeden Aufsatz in einem Diagramm über der Frequenz (Terzbänder) dargestellt. Jedes Diagramm enthält die Ergebnisse für die 0°-Ausrichtung sowie für die 90°-Ausrichtung. In der jeweiligen Legende sind für diese beiden Fälle je das Maximum des Bündelungsmaßes  $D_{I,max}$  über alle Terzbänder angeführt.

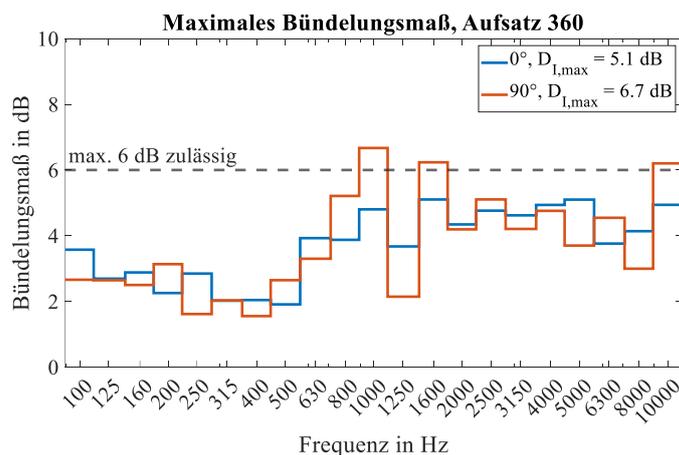


Abbildung 62: Bündelungsmaß mit „Aufsatz 360“

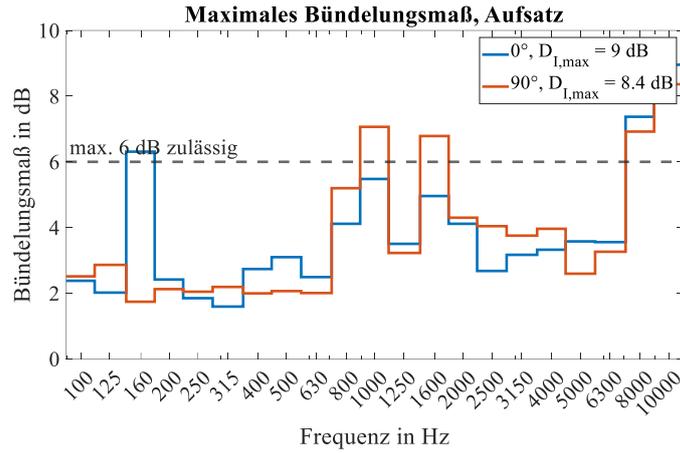


Abbildung 63: Bündelungsmaß mit „Aufsatz“

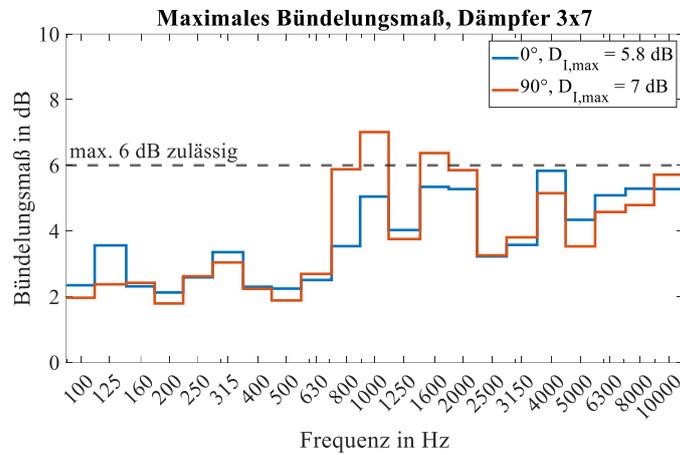


Abbildung 64: Bündelungsmaß mit „Dämpfer 3x7“

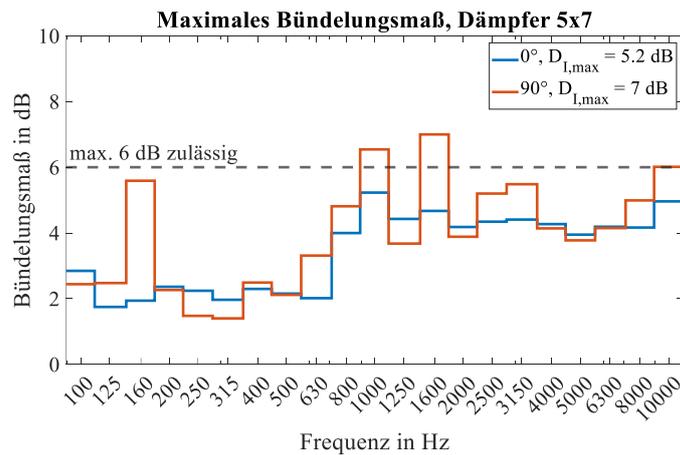


Abbildung 65: Bündelungsmaß mit „Dämpfer 5x7“

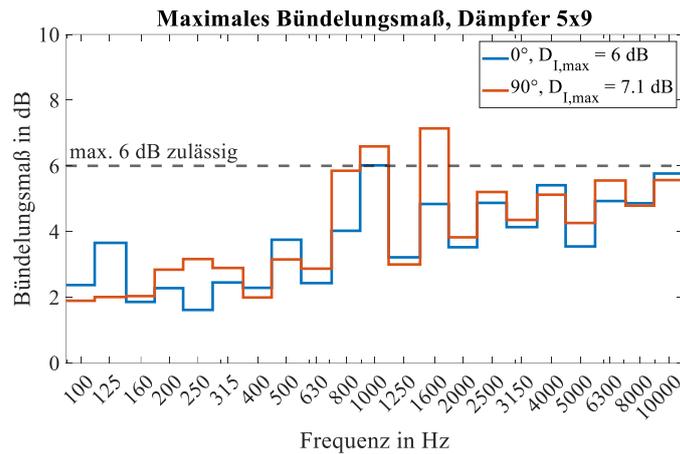


Abbildung 66: Bündelungsmaß mit „Dämpfer 5x9“

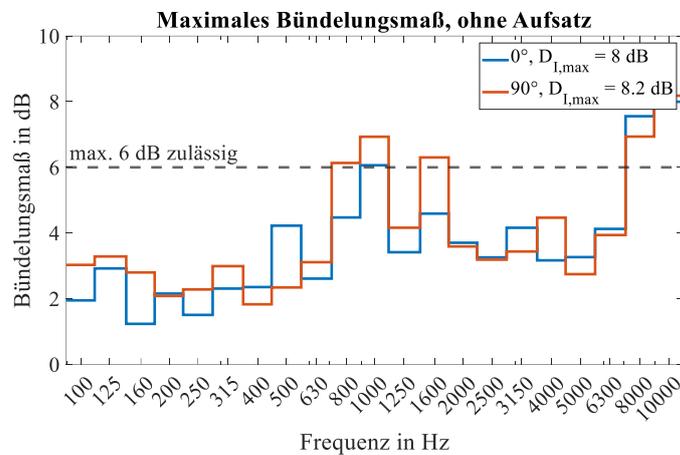


Abbildung 67: Bündelungsmaß „ohne Aufsatz“

Der Fälle „Aufsatz“ und „ohne Aufsatz“ überschreiten in beiden Ausrichtungen das vorgeschriebene Maximum von 6 dB. Hingegen erfüllen „Aufsatz 360“, „Dämpfer 3x7“, „Dämpfer 5x7“ und „Dämpfer 5x9“ die Anforderung 4, solange das Lautsprechersystem auf 0° ausgerichtet ist. „Aufsatz 360“ hält das maximale Bündelungsmaß am geringsten mit 5,1 dB.

Vergleicht man das Bündelungsmaß in 90°-Ausrichtung mit jenem in 0°-Ausrichtung, so zeigt sich in allen Fällen eine Differenz. Mit Ausnahme des Falles „Aufsatz“ ist das Bündelungsmaß in 90°-Ausrichtung höher als jenes in 0°-Ausrichtung. Diese Differenzen können durch die Kombination eines nicht-idealen reflexionsarmen Messraumes (Tonstudio, Genauigkeitsklasse 2) mit einem nicht rotationssymmetrischen Lautsprecher erklärt werden. Um die Einhaltung der Anforderung 4 zu konkretisieren, sind Messungen in einem Raum der Genauigkeitsklasse 1 notwendig.

### 5.3.2 Ballon-Diagramme

Die Richtwirkung des Lautsprechersystems für die einzelnen Aufsätze wird mit Ballon-Diagrammen in 3D visualisiert. Hierfür werden die Schalldruckpegel der 40 Mikrofonpositionen verwendet und interpoliert. Es werden fünf Terzbänder dargestellt, die den Frequenzbereich von Interesse abdecken.

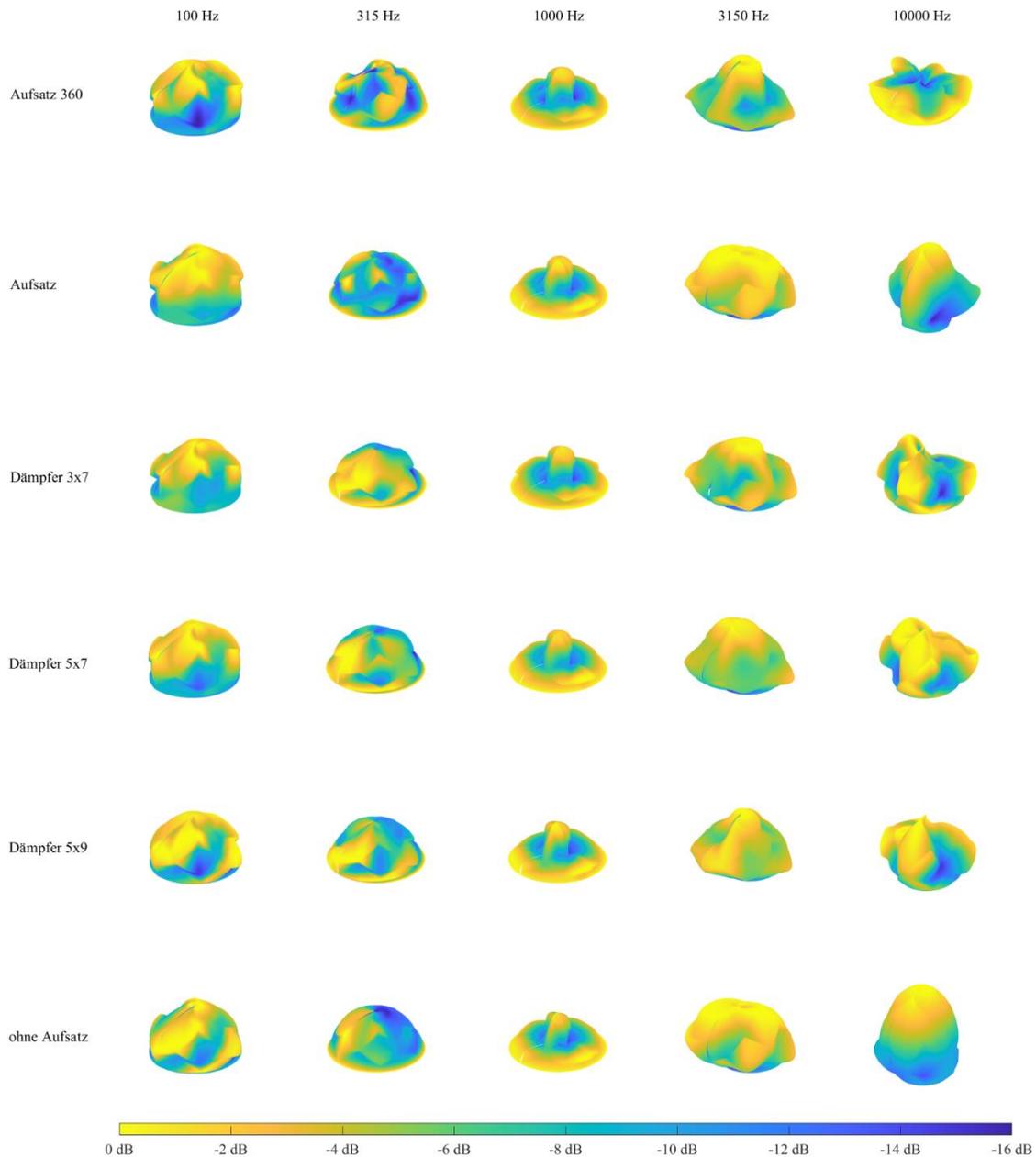
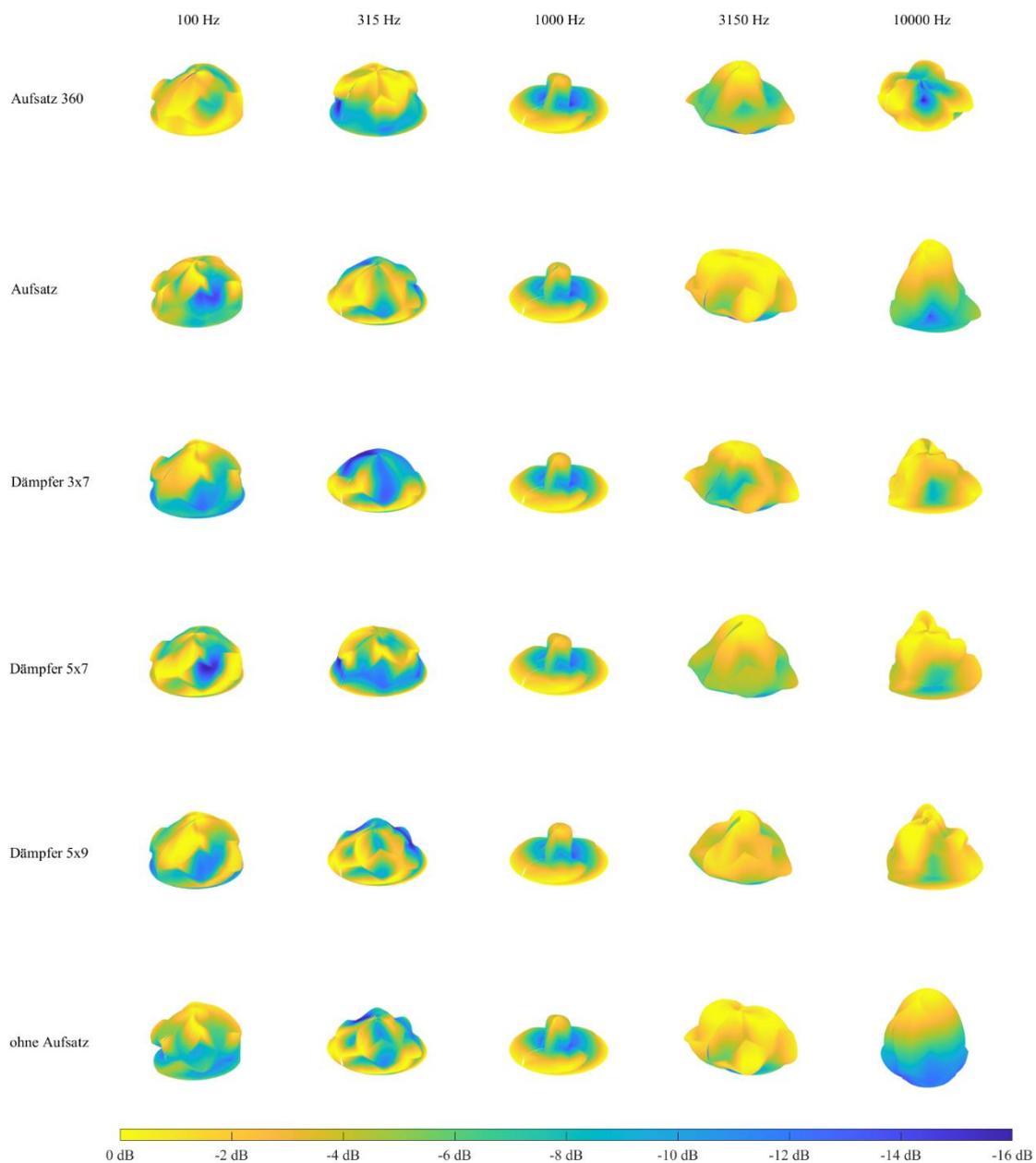


Abbildung 68: Ballon-Diagramme, 0°-Ausrichtung

Es zeigt sich erwartungsgemäß eine ähnliche Form für alle Aufsätze bis 1 kHz, da in diesem Bereich lediglich die Tieftontreiber aktiv sind, und somit die Wahl des Aufsatzes keine Rolle spielt. Bei 10 kHz zeigt sich, dass in den Fällen „ohne Aufsatz“ und „Aufsatz“ die Hauptstrahlrichtung im Zenit ist, also über der Hornmündung des inversen Hornlautsprechers, was zu

einem höheren Bündelungsmaß (vgl. Abbildung 63 und Abbildung 67) führt als bei den anderen Aufsätzen. Der „Aufsatz“ hat zusätzlich leichte Richtwirkung in Richtung seiner drei horizontalen Öffnungen.

Durch die drei Dämpfer wird die nach oben zeigende Richtwirkung wie erwartet eingeschränkt, was zu einer gleichmäßigeren Aufteilung der gelben Fläche, und somit zu einem reduzierten Bündelungsmaß führt. Der „Aufsatz 360“ zeigt eine Richtwirkung in Richtung seiner sechs Öffnungen entlang einer horizontalen Ebene, und nur kleine dunkelblaue Flächen auf der Oberseite, was zu dem geringsten maximalen Bündelungsmaß aller Aufsätze führt (vgl. Abbildung 62)



**Abbildung 69: Ballon -Diagramme, 90°-Ausrichtung**

Die 90°-Ausrichtung liefert ähnliche Bilder, jedoch sind leichte Variationen, vor allem bei 10 kHz, bemerkbar, welche von den relativ zum Messobjekt geänderten Mikrofonpositionen stammen. Diese Variationen machen sich auch im Bündelungsmaß bemerkbar (vgl. Kapitel 5.3.1).

### **5.3.3 Fazit**

Es zeigt sich, dass der Aufsatz die Richtwirkung über 1 kHz, also in dem Frequenzbereich, in dem der inverse Hornlautsprecher aktiv ist, maßgeblich bestimmt. Die Geometrie des Aufsatzes ist entscheidend für die Einhaltung von Anforderung 4. „Aufsatz 360“ erfüllt Anforderung 4 am besten. Durch weitere Versuche mit unterschiedlichen Konstruktionen für Aufsätze könnte das Bündelungsmaß weiter gesenkt werden.



## 6 Diskussion

Die folgende Tabelle fasst zusammen, welche Konfigurationen welche Anforderungen der Norm erfüllen:

Anforderung	1	2	3	4	5
Aufsatz 360	erfüllt	erfüllt	(nicht) erfüllt	erfüllt	erfüllt
Aufsatz	erfüllt	erfüllt	erfüllt	nicht erfüllt	erfüllt
Dämpfer 3x7	erfüllt	erfüllt	erfüllt	erfüllt	erfüllt
Dämpfer 5x7	erfüllt	erfüllt	erfüllt	erfüllt	erfüllt
Dämpfer 5x9	erfüllt	erfüllt	erfüllt	erfüllt	erfüllt
ohne Aufsatz	erfüllt	erfüllt	erfüllt	nicht erfüllt	erfüllt

**Tabelle 5: Konformität mit ISO 6926**

Es zeigt sich, dass ein Aufsatz notwendig ist, um die Anforderung 4, welche die Richtwirkung betrifft, einhalten zu können. Mit vier verschiedenen Aufsätzen können alle normativen Anforderungen erfüllt werden. Die Fälle „Aufsatz“ und „ohne Aufsatz“ scheitern an der Hürde, dass das Bündelungsmaß einen Grenzwert von 6 dB nicht überschreiten darf, und bieten demnach keine ausreichend ungerichtete Abstrahlcharakteristik.

Der Fall „Aufsatz 360“ erfüllt die Anforderung 4 am besten und bietet zudem gegenüber den Dämpfern den Vorteil, dass er eine kompakte Bauweise verkörpert. Dass bei diesem Aufsatz Anforderung 3 nicht erfüllt wird, da im Terzspektrum ein Sprung von über 3 dB zwischen benachbarten Terzbändern vorhanden ist, kann durch maßgeschneidertes Shaping kompensiert werden. Im vorliegenden Fall wurde das Shaping für den Fall „ohne Aufsatz“ vorgenommen, und für die Messungen mit allen Aufsätzen verwendet. Da der „Aufsatz 360“ das Spektrum stärker beeinflusst als die verbleibenden Aufsätze, er aber gleichzeitig die beste ungerichtete Abstrahlung bietet, lohnt es sich, das Shaping neu vorzunehmen. Nach diesem Vorgang ist zu erwarten, dass „Aufsatz 360“ der am besten geeignete Aufsatz wäre, aufgrund seiner kompakten Form und der ungerichteten Abstrahlung.

Zusammenfassend lässt sich sagen, dass es durchaus möglich ist, mit einem Lautsprechersystem den Anforderungen von ISO 6926 gerecht zu werden. Diese Technologie bietet den Vorteil, das abgestrahlte Geräusch variieren zu können, um dem Geräusch der zu vermessenden Maschine ähneln zu können. Die ungerichtete Abstrahlung kann noch weiter optimiert werden, durch die Konstruktion eines noch besser geeigneten Aufsatzes.

Einer Erweiterung des Frequenzbereichs nach unten auf 50 Hz und nach oben bis 20 kHz steht nichts im Wege, da zu erwarten ist, dass die Anforderungen 2 und 3 durch Shaping erfüllt werden können, und Anforderung 4 für den erweiterten Bereich nicht relevant ist. Somit könnte ein Lautsprechersystem geschaffen werden, welches sich in eine Klasse mit den Radiallüftern einreihen kann.