



Jan Moling

BAU UND VERMESSUNG EINES TT-HORNLAUTSPRECHERS

Bachelorarbeit

eingereicht an der

Technischen Universität Graz

Signal Processing and Speech Communication Laboratory

Betreuer

Dipl.-Ing. Dr.techn. Werner Weselak

Graz, Juli 2021

Inhaltsverzeichnis

1	Auswahl des Hornlautsprecherprinzips	4
1.1	Funktionsweise von Hornlautsprechern	4
1.2	Mini Scoop	5
1.3	Design	6
1.4	Berechnungen	8
2	Simulationen	10
2.1	Treiber für Hornlautsprecher	10
2.2	Efficiency Bandwidth Product (EBP)	11
2.3	Parametereingabe	13
2.4	Simulationsergebnisse	15
2.4.1	Prinzipskizze	16
2.4.2	Schallpegelverlauf	16
2.5	Auswahl zweier Treiber	22
3	Konstruktion	26
3.1	Schnittplan	26
3.2	Zusammenbau	29
4	Messungen	31
4.1	Messaufbau	32
4.1.1	Equipment	32
4.1.2	Messort	33
4.1.3	Messpunkte	35
4.1.4	Kalibration	36
4.2	Messergebnisse	37
4.2.1	Vergleichsmessung zweier Treiber	37
4.2.2	Vergleichsmessung indoor/outdoor	37
4.2.3	Vergleich mit Ground Plane Messung	38
4.2.4	Vergleich Simulation und Messung	39
4.2.5	Schalldruckabnahme vs. Entfernung	40
4.2.6	Richtcharakteristik	41

Literatur

- [1] W. Maurer, *Projektarbeit - Entwurf und Aufbau eines Basshornlautsprechersystems*. Institut für Breitbandkommunikation Technische Universität Graz, 2004.
- [2] D. B. Keele, *Low-Frequency Horn Design Using Thiele/Small Driver Parameters*. Audio Engineering Society Convention Preprint, 1977.
- [3] B. Speakers. „LF Driver 18DS100.“ (), Adresse: <https://www.bcspeakers.com/en/products/lf-driver/18-0/8/18DS100-8>.
- [4] P. System. „Wie funktionieren Hornlautsprecher?“ (18. Mai 2005), Adresse: <https://www.professional-system.de/basics/hornlautsprecher-basics/>.
- [5] Hifi-Forum.de. „Treiberauswahl für Basshorn - welche Kriterien?“ (28. Sep. 2005), Adresse: <http://www.hifi-forum.de/viewthread-104-4736.html>.
- [6] G. Graber und W. Weselak, *Elektroakustik*. SPSC, 2018.
- [7] M. Zollner und E. Zwicker, *Elektroakustik*. Springer Verlag, 1993.
- [8] H. Fleischer, *Zum Wirkungsgrad von Hornlautsprechern*. Deutsche Gesellschaft für Akustik, 1995.
- [9] M. Gaedtke, *Das Lautsprecher-Jahrbuch 1989*. HIFISOUND LSV Münster, 1989.
- [10] M. Engelbogen, *Masterarbeit - There is nothing like a soundsystem*. FH Joanneum und Institut für elektronische Musik und Akustik, 2017.
- [11] P. Newell und K. Holland, *Loudspeakers: For Music Recording and Reproduction*. Audio Engineering Society, 2018.
- [12] Speakerplans. „Speakerplans Forum.“ (), Adresse: <https://forum.speakerplans.com/forums.html>.
- [13] M. J. King. „Quarter Wavelength Loudspeaker Design.“ (17. Juli 2002), Adresse: <http://www.quarter-wave.com/>.
- [14] H. Plans. „Plan Staiper MS-18(Mini Scooper).“ (28. Sep. 2005), Adresse: <http://hornplans.free.fr/ms18.html>.
- [15] A. Jost, *AJHorn 7 Handbuch*. AJ-Systems, 2021.
- [16] R. H. Small, *Suitability of Low-Frequency Drivers for Horn-Loaded Loudspeaker Systems*. Audio Engineering Society Convention Preprint, 1977.
- [17] H. A. Design. „Calculate Efficiency Bandwidth Product.“ (2021), Adresse: http://www.mh-audio.nl/Calculators/calculate_EBP.html.
- [18] P. Strassacker. „Bassabstimmung mit den Thiele und Small Parametern.“ (2004), Adresse: https://www.lautsprechershop.de/hifi/inter_ps_tus.htm.
- [19] Fullfataudio. „FFA-10000.“ (), Adresse: <http://www.fullfataudio.com/products/ffa-10000/>.

Auswahl des Hornlautsprecherprinzips

Das Ziel war es, einen Lautsprecher zu bauen, der tiefe Frequenzen (ab 40Hz) mit einem Kennschalldruckpegel von 100dB (bei 1 Watt Eingangsleistung, in 1 Meter Abstand) in einer möglichst kompakten Bauweise wiedergeben kann. Nach den Erkenntnissen aus persönlichen Erfahrungen, Recherchen und Gesprächen mit erfahrenen Technikern, wurde entschieden, das Projekt mit der Hornbauweise zu verwirklichen. Es wurde auf die Bauweise "Mini Scoop" gezielt. Um die Funktion eines Mini Scoops zu erklären, muss zuerst auf die Funktionsweise von Hornlautsprechern eingegangen werden.

1.1 Funktionsweise von Hornlautsprechern

Ein Horn ist ein Trichter mit stetig zunehmendem Querschnitt im Schallkanal, den man vor einen Lautsprecher setzt. Das Horn wirkt als Transformator. Es wird die kleine Membranfläche des Treibers auf die größere Mundfläche des Horns transformiert. Damit wird die Strahlungsresistenz erhöht. Durch diese verbesserte Anpassung des Lautsprechers an die Schallkennimpedanz der Luft wird der Wirkungsgrad erhöht. Während typische HiFi-Lautsprecher einen Wirkungsgrad von 0,1 bis 2% haben, erreichen gut dimensionierte Hornlautsprecher einen Wirkungsgrad von bis zu 50% [9].

Die Grenzfrequenzen eines Horns (siehe Absatz 1.4) bestimmen den Übergang von ineffizienter zu effizienter Schallübertragung. Diese Grenzfrequenzen hängen stark von der Länge, der Halsfläche, der Mundfläche und vom Öffnungswinkel des Horns ab.

Hornkontur

Eine Schallwelle, die sich in einem Horn ausbreitet, ist abhängig von der Charakteristik der Öffnung zwischen Hornhals und Hornmund. Man unterscheidet grundsätzlich folgende Arten der Hornkontur: konisch, exponentiell, Traktrix (Schleppkurve) und hyperbolisch (Kettenlinie). Die verschiedenen Hornkonturen sind in Abbildung 1.1 dargestellt.

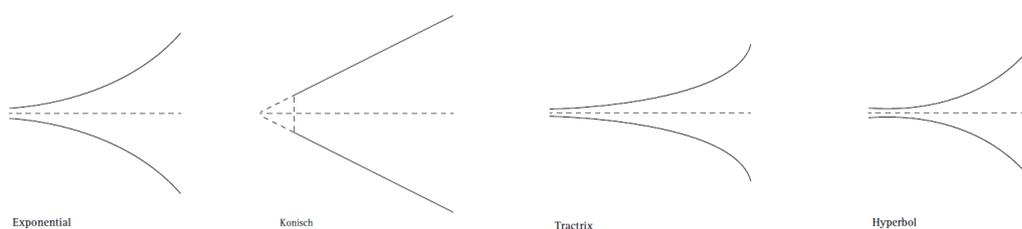


Abbildung 1.1: Hornkonturen [10]

Hornhals

Durch die Halsöffnung wird das Horn an den treibenden Lautsprecher gekoppelt. Wenn die Halsfläche S_t (throat) kleiner als die Membranfläche S_d gewählt wird, ergibt sich eine Druckkammer, wodurch die Membranbelastung erhöht werden kann und damit auch der Wirkungsgrad des Gesamtsystems verbessert wird. Dies gilt nur für Wellenlängen, die um ein Vielfaches größer als die Abmessungen der Druckkammer sind. Um Luftturbulenzen und daraus resultierende Störgeräusche zu vermeiden, sollte die Halsfläche bei Basshornsystemen nicht kleiner als 50% der Membranfläche gewählt werden [1]. Das Hals-/Membran-Flächenverhältnis S_t/S_d soll also größer-gleich 0.5 sein (siehe Abbildung 2.5).

Hornmund

Durch die Mundöffnung wird das Horn an den Raum gekoppelt. Eine Schallwelle die sich durch den Hornmund ausbreitet erfährt eine plötzliche Veränderung der akustischen Impedanz. Ein Teil der Welle wird dabei in das Horn zurück reflektiert und verursacht ein stehendes Wellenfeld. Das kann zu unerwünschten Kamm-Filter-Effekten führen. Um starke Reflexionen zu vermeiden muss also der Mund groß genug sein um effektiv tiefe Frequenzen abstrahlen zu können [11].

Hornlänge

Die Hornlänge des Lautsprechers in dieser Arbeit entspricht 1,85m.

1.2 Mini Scoop

Ein Scoop ist ein rückgeladenes gefaltetes konisches Horn mit Vorkammer (Kammer zwischen Treiber und Hornhals). Der Lautsprecher strahlt direkt über die Membranvorderseite und indirekt über das Horn ab.

Ein Mini Scoop ähnelt der Bauweise eines Scoops, in der Höhe ist dieses im Vergleich etwas kleiner und hat damit auch eine kürzere Hornlänge und eine kleinere Mundfläche. Daher kommt auch der Name. Das erste Design wurde, laut Angaben von einem der ersten Mini Scoop Designer, im Jahr 2005 auf dem Forum "Speakerplans" veröffentlicht [12].

Ein Vergleich des simulierten Schalldruckpegelverlaufs eines Scoops und eines Mini Scoops ist in Abbildung 2.15 ersichtlich. Mit der Vorkammer lässt sich, zusätzlich zu den bereits beschriebenen Parametern, die untere Grenzfrequenz bestimmen. Wird die Vorkammer des Mini Scoops größer gemacht, sinkt zwar die Grenzfrequenz nach unten, doch dabei verringert sich auch der Schalldruckpegel bis etwa 80Hz (siehe Abbildung 2.13). Es muss daher ein Kompromiss gefunden werden.

1.3 Design

Das Modell des Lautsprechers wurde mit der Software Sketchup erstellt. Diese ist eine sehr intuitive Software zur Erstellung von dreidimensionalen Modellen. Basierend auf dem Plan von Stipe Ergovic “MS-18 MKIII“ [14], wurde ein eigenes Modell erstellt. Folgende Änderungen am Plan wurden vorgenommen:

- Die Vorkammer wurde dem, angesichts der Simulationsergebnisse (siehe Kapitel 2.4), ausgewählten Treiber angepasst. Die erste Reflexionsfläche nach dem Treiber (Abbildung 1.3, Buchstabe K) wurde um 20 mm nach hinten gesetzt. Damit ist genug Platz für den Treiber vorhanden und es gibt noch 12 mm Abstand zwischen Magnet des Treibers und Reflexionsfläche damit Luft zirkulieren kann.
- Die nach hinten gerückte Reflexionswand vergrößert das Volumen der Vorkammer. Es wurde ein Winkel in der oberen linken Ecke der Vorkammer eingesetzt, um diese Volumensteigerung zu kompensieren.
- An der Unterseite des Rückens des Lautsprechergehäuses wurde der Winkel ausgespart um Rollen für den Transport montieren zu können. Dieser Winkel wurde noch verstärkt.

Nähere Details zur Konstruktion des Gehäuses sind in Kapitel 3 beschrieben.

Jeder einzelne Teil des erstellten Plans auf Sketchup wurde als eigene Komponente gegliedert. Jede Komponente lässt sich beim Programm ein- und ausblenden. Dies erleichtert die Erstellung des Schnittplans und die Konstruktion. Die Vorder- und Seitenansicht des Modells samt Maßen sind in Abbildung 1.2 bzw in Abbildung 1.3 dargestellt. Die Buchstaben in der Seitenansicht entsprechen den Bezeichnungen laut Schnittplan (siehe Abbildung 3.1 bzw. Abbildung 3.2).

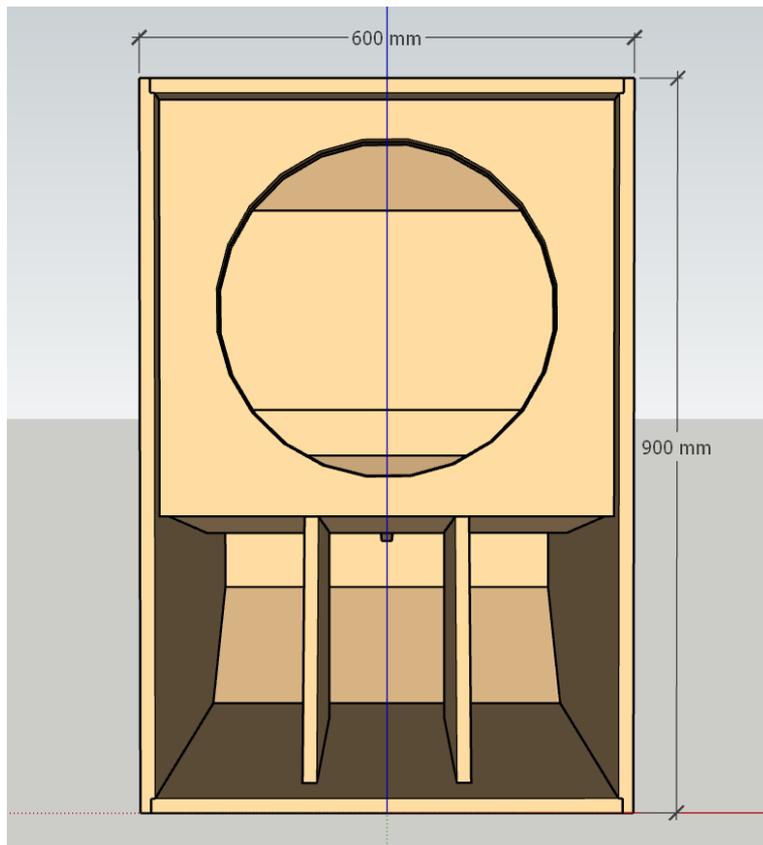


Abbildung 1.2: Vorderansicht des Modells

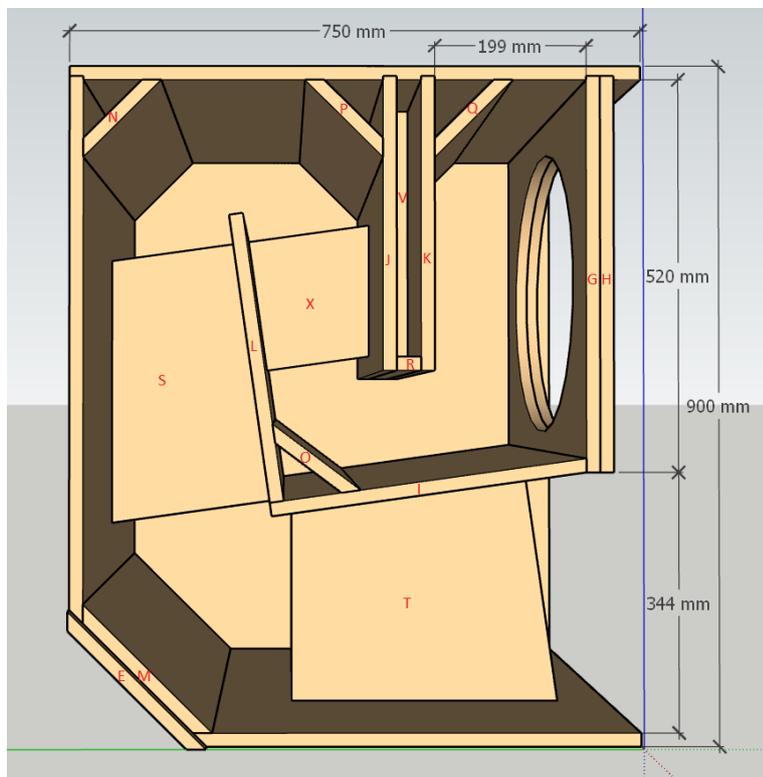


Abbildung 1.3: Seitenansicht des Modells mit ausgeblendeter Seitenwandkomponente

1.4 Berechnungen

Berechnungen für ein Konushorn:

$$A_H = \text{Halsfläche des Horns: } 0,0806m^2$$

$$A_M = \text{Mundfläche des Horns: } 0,194m^2$$

Radius des Trichterhalses:

$$r_{TH} = \sqrt{\frac{A_H}{\pi}} = \sqrt{\frac{0,0806m^2}{\pi}} = 0,16m \quad (1.1)$$

Radius des Trichtermundes:

$$r_{TM} = \sqrt{\frac{A_M}{\pi}} = \sqrt{\frac{0,194m^2}{\pi}} = 0,25m \quad (1.2)$$

Die Mündungsreflexionen nehmen bei tiefen Frequenzen zu. Die reflektierte Welle läuft zum Trichterhals zurück, wird an der Membran wieder reflektiert, usw. Es bildet sich somit eine stehende Welle im Trichter aus. Stehende Wellen sind durch entsprechende Wahl von kr_{TM} und der Hornkontur weitgehend zu vermeiden [6]. Bei sehr einfachen Anlagen kann mit $kr_{TM} = 0,5$ gerechnet werden.

Trichtermündungsgrenzfrequenz [6]:

$$f_{TM} = \frac{c}{4\pi r_{TM}} = \frac{343m/s}{4\pi 0,25m} \approx 109Hz \quad (1.3)$$

Der relevante Frequenzbereich des Lautsprechers befindet sich zwar unter der Trichtermündungsgrenzfrequenz. Trotzdem sind keine Mündungsreflexionen im gemessenen Schalldruckpegelverlauf sichtbar (siehe Abbildung 4.8).

Über die Webster-Gleichung lässt sich, mit Hilfe der Kugelwellentheorie und dem Ansatz $k\eta_{TH} = 2$, die Trichterhalsgrenzfrequenz bestimmen [6]:

$$f_{TH} = \frac{c(r_{TM} - r_{TH})}{\pi l_H r_{TH}} = \frac{343m/s(0,25m - 0,16m)}{\pi 1,85m 0,16m} \approx 33Hz \quad (1.4)$$

Unterhalb von f_{TH} entstehen Reflexionen schon am Hornhals, die wiederum zu stehenden Wellen und resonanzartigen Verfälschungen des Lautsprecherfrequenzganges führen können. Die Trichterhalsgrenzfrequenz zeigt sich als untere Grenzfrequenz des gemessenen Schalldruckpegelverlaufs (siehe Abbildung 4.8).

Abstände η_{TH} und η_{TM} (siehe Abbildung 1.4) [6]:

$$\eta_{TH} = \frac{l_H r_{TH}}{r_{TM} - r_{TH}} = \frac{1,85m 0,16m}{0,25m - 0,16m} = 3,28m \quad (1.5)$$

$$\eta_{TM} = \frac{l_H r_{TM}}{r_{TM} - r_{TH}} = \frac{1,85m 0,25m}{0,25m - 0,16m} = 5,14m \quad (1.6)$$

Öffnungswinkel des Konustrichters (siehe Abbildung 1.4):

$$\alpha = \operatorname{atan} \frac{r_{TH}}{\eta_{TH}} \cdot \frac{180}{\pi} = \operatorname{atan} \frac{0,16m}{3,28m} \cdot \frac{180}{\pi} = 2,74^\circ \quad (1.7)$$

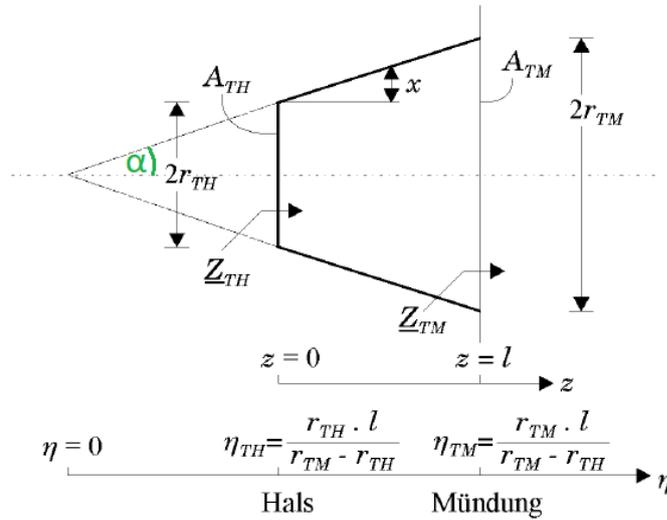


Abbildung 1.4: Maße und Bezeichnungen bei einem Konustrichter[6]

Hals-/Membran-Flächenverhältnis [9]:

$$\frac{S_t}{S_d} = \frac{0,0806m^2}{0,121m^2} = 0,66 \quad (1.8)$$

Durch die Auslöschung der beiden Wellen von der Treiber Vorder- und Rückseite (mit Umweg über das gesamte Horn) kommt es bei einem rückgeladenen Hornlautsprecher zu einem kammfilterartigen Frequenzgang mit einem ersten Einbruch bei 152Hz laut folgender Berechnung:

$$f_a = \frac{c}{\lambda} = \frac{c}{l+d} = \frac{343m/s}{1,85m+0,4m} \approx 152Hz \quad (1.9)$$

f_a = tiefste Frequenz wo sich die beiden Wellen auslöschung

l = Hornlänge

d = Abstand zwischen Mittelpunkt des Hornmundes und Membranzentrum

Der gemessene Frequenzbereich erstreckt sich von 40Hz bis 110Hz (siehe Abbildung 4.8). Dies deckt sich recht gut mit den Berechnungsergebnissen.

2

Simulationen

Heutzutage wird ein Lautsprecher üblicherweise mit Hilfe eines Simulationsprogramms berechnet und dimensioniert. Außerdem kann, mittels der Simulationsergebnisse, ein für ein bestimmtes Gehäuse geeigneter Treiber ausgewählt werden.

In dieser Arbeit wurde das Simulationsprogramm AJHorn von Armin Jost verwendet, welches sich insbesondere auf Hornlautsprecher und Transmissionlines spezialisiert hat [15]. Zu erwähnen ist, dass AJHorn die Hornbereiche (Hornhals bis Hornmund) kreisförmig simuliert. Der Schallpegelverlauf ist somit in der Praxis, bei einem realen gefalteten Horn mit rechteckigem Hornhals, rechteckigen Hornsegmenten und rechteckigem Hornmund, welliger als bei der Simulation.

Im folgenden Kapitel werden die Anforderungen eines Treibers erklärt, damit dieser für ein Horn geeignet ist.

2.1 Treiber für Hornlautsprecher

Lautsprecher-Chassis werden durch die Thiele-Small-Parameter beschrieben. Diese geben Aufschluss über die Eigenschaften eines elektrodynamischen Lautsprechers. An dieser Stelle soll kurz auf die Eigenschaften der in diesem Zusammenhang wichtigsten TS-Parameter für Lautsprecher eingegangen werden:

- Bl - Antriebsfaktor des elektrodynamischen Systems zum Antrieb der Membran: der Kraftfaktor soll groß sein, denn dieser soll die auftretenden Trägheitskräfte gut überwinden.
- Q_{es} - elektrische Güte: Je größer der Antriebsfaktor, desto kleiner ist Q_{es} . Dieser Wert soll also möglichst klein sein. Formel für Q_{es} [9]:

$$Q_{es} = \frac{2\pi f_s M_{ms} R_e}{B^2 l^2} \quad (2.1)$$

- Q_{ms} - mechanische Güte: Dieser Wert soll wiederum möglichst groß sein, denn das bedeutet geringe Verluste bei der mechanischen Aufhängung (Sicke und Zentrierspinne) des Lautsprechers.
- Q_{ts} - Gesamtgüte: Wie Q_{es} , soll auch Q_{ts} klein sein. Für Hörner am besten unter 0,3 (siehe EBP).
- X_{max} - maximale Auslenkung der Schwingspule: X_{max} soll bei einem Lautsprecher möglichst groß sein.

2.2 Efficiency Bandwidth Product (EBP)

Dieser Wert gilt als wichtiges Beurteilungskriterium für die Eignung von Treibern in verschiedenen Lautsprechergehäusen. Er wurde von Richard H. Small eingeführt und setzt sich aus der massenbedingten oberen Grenzfrequenz des Treibers f_H (high frequency) und dem Wirkungsgrad η_T (throat) zusammen [16]:

$$EBP = f_H \eta_T \quad (2.2)$$

η_T ist das Verhältnis der akustischen Leistung am Hornhals zur elektrisch zugeführten Leistung am Treiber und errechnet sich nach Small aus dem zusammengefassten Ersatzschaltbild in Abbildung 2.1 [16]:

$$\eta_T = \frac{R_{ME}}{R_{ME} + R_{MD} + R_{M2}} \cdot \frac{R_{MD}}{R_{MD} + R_{M2}} \quad (2.3)$$

$$R_{ME} = \frac{B^2 l^2}{R_E} \quad (2.4)$$

$$R_{MD} = \frac{S_d}{S_t} \rho_0 c S_d \quad (2.5)$$

R_{ME} = mechanischer Widerstand der Treiberspule [$N \cdot s/m$]

R_{MD} = mech. Wid. durch Luft an der Membranvorderseite (Druckkammer + Horn) [$N \cdot s/m$]

R_{M2} = Summe aus R_{MB} und R_{MS}

R_{MB} = mechanischer Widerstand durch Luft an der Membranrückseite [$N \cdot s/m$]

R_{MS} = mechanischer Widerstand der Membranaufhängung [$N \cdot s/m$]

R_E = Widerstand der Treiberspule [Ω]

ρ_0 = Luftdichte bei 0°C: $1,29 kg/m^3$

e_G = an den Treiberanschlüssen angelegte Spannung

C_{M2} = zusammengefasste Nachgiebigkeiten C_{MB} und C_{MS}

C_{MB} = mechanische Nachgiebigkeit des Luftvolumens an der Membranrückseite [mm/N]

C_{MS} = mechanische Nachgiebigkeit der Membranaufhängung [mm/N]

M_{M2} = Summe aus M_{MB} und M_{MD}

M_{MB} = mechanische Luftmasse auf der Membranrückseite [kg]

M_{MD} = mechanische Masse von Membran und Schwingspule [kg]

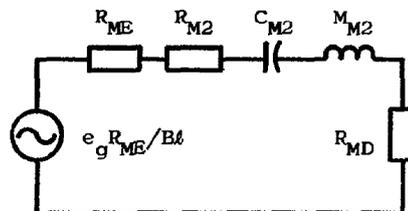


Abbildung 2.1: Ersatzschaltbild eines Hornlautsprechers

Die massenbedingte obere Grenzfrequenz ist wie folgt definiert [16]:

$$f_H = \frac{R_{ME} + R_{MD} + R_{M2}}{2\pi M_{M2}} \quad (2.6)$$

$$EBP = f_H \eta_T = \frac{R_{ME}}{2\pi M_{M2}} \cdot \frac{R_{MD}}{R_{MD} + R_{M2}} \quad (2.7)$$

Die Summe der Verlustwiderstände in R_{M2} ist gewöhnlich so klein, dass der Wert vernachlässigt werden kann. Damit vereinfacht sich der Ausdruck für das Wirkungsgrad-Bandbreiten-Produkt (EBP) zu [9]:

$$EBP = \frac{R_{ME}}{2\pi M_{M2}} \quad (2.8)$$

Mit Gleichung (2.1) und (2.4) folgt [16]:

$$EBP = \frac{f_s}{Q_{es}} \quad (2.9)$$

Das EBP ist also lediglich von Parametern des Treibers abhängig. Es ist ein Wert, der den Kompromiss zwischen Effizienz und Bandbreite eines Treibers zeigt. Maximale Effizienz impliziert minimale Bandbreite, andersrum führt eine große Bandbreite zu einem geringen Wirkungsgrad. Durch das EBP lässt sich feststellen, für welches Prinzip ein Treiber geeignet ist [16][17]:

- $EBP < 50\text{Hz}$: Treiber ist geeignet für geschlossene Box
- $EBP = 50\text{Hz}-100\text{Hz}$: Treiber ist geeignet für geschlossene Box oder Bassreflex
- $EBP = 100\text{Hz}-130\text{Hz}$: Treiber ist geeignet für Bassreflex oder Horn
- $EBP > 130\text{Hz}$: Treiber ist geeignet für Horn

Das EBP ist also von der elektrischen Güte abhängig und damit auch vom Kraftfaktor Bl (siehe Gleichung 2.1). Für Hornlautsprecher soll, wie bereits erklärt, der Kraftfaktor groß sein. Das bedeutet eine geringe elektrische Güte und somit einen hohen EBP-Wert. Das EBP hängt also direkt mit dem Bl -Wert des Treibers zusammen. Lautsprecherentwickler Dr. Peter Strassacker definiert die Eignung der Lautsprecher für verschiedene Gehäuse wie folgt, ausgedrückt durch die Gesamtgüte (Q_{ts} wird vor allem von Q_{es} bestimmt) [18]:

Wert von Q_{ts}	Beschreibung	Eignung des Lautsprechers für
0,2-0,4	sehr starker Antrieb	Hörner
0,3-0,5	starker Antrieb	Bassreflexboxen, Hörner
0,4-0,6	mittlerer Antrieb	geschlossene Boxen
0,5-0,7	schwacher Antrieb	Transmissionline-Boxen, Dipole
> 0,7	sehr schwacher Antrieb	Dipole, Einbau in Auto-Hutablage

Abbildung 2.2: Eignung des Lautsprechers für verschiedene Gehäuse [18]

Folgende Tabelle zeigt die Treiber, die aufgrund der TS-Parameter für einen Hornlautsprecher in Frage kamen und somit für die Simulationen ausgewählt wurden:

Marke	Modell	f_s [Hz]	Bl [Tm]	Q_{es}	Q_{ms}	Q_{ts}	X_{max} [mm]	EBP [Hz]	f_H [Hz]	η_T [%]
B&C	18DS100	34	30	0.30	9.5	0.29	14.5	113	160	70
B&C	18DS115	30	39	0.21	4.3	0.20	16.5	142	185	76
B&C	18SW100	35	26.1	0.40	5.9	0.38	12.5	87	148	60
B&C	18SW115	32	30.3	0.32	5.6	0.30	14	100	144	69
Void	V18-1000	35	34.9	0.22	7.6	0.22	10.5	157	213	73
Precision Devices	PD1850	33	31	0.24	15.4	0.24	11.1	138	195	70
Eighteensound	18LW2400	35	25.6	0.32	7.2	0.31	9.5	109	171	58
Oberton	18NXB1600	32	29.6	0.33	5.1	0.30	13.5	97	177	54
RCF	LF18N405	30	26.5	0.34	7.0	0.32	14	88	135	65
RCF	LF18G401	33	24.6	0.30	7.6	0.29	9	110	179	61

Tabelle 2.1: Simulierte Treiber

Zu erwähnen ist, dass X_{max} als +/- Wert angegeben wird. Dieser Wert entspricht also der linearen Auslenkung der Membran in nur einer Richtung. Die maximale nichtlineare Auslenkung der Membran kann viel höher liegen. Wie ersichtlich, sind in der Tabelle auch Treiber dabei, die einen geringeren EBP-Wert als 100 haben. Da diese aber trotzdem oft in Basshörner eingesetzt werden, wurden Simulationen auch mit ihnen durchgeführt.

2.3 Parametereingabe

Bei der Benutzeroberfläche gibt es vier Menüabschnitte, wo Daten eingegeben werden können: Treiber, Horn, Frequenzweiche, Achsen. Die Thiele-Small-Parameter werden beim Menüabschnitt Treiber eingegeben. Abbildung 2.3 zeigt ein Beispiel des Menüabschnittes für die Parametereingabe für den Treiber.

Die elektrischen Impedanzen des Lautsprechers bei den Frequenzen von 1kHz und 10kHz wurden aus dem Impedanzverlauf der jeweiligen Treiber herausgelesen und in den entsprechenden Feldern $Z1k$ bzw. $Z10k$ eingetragen. U_e ist die elektrische Eingangsspannung. Für eine Simulation eines 8 Ohm Treibers muss bei 1W Eingangsleistung eine Spannung von 2,83V, bei 100W Eingangsleistung eine Spannung von 28,3V eingegeben werden [15].

Im Menüabschnitt Horn hingegen werden die Dimensionen des Horns, der Horntyp und die Hornkontur angegeben. Abbildung 2.4 zeigt den Menüabschnitt für die Dateneingabe vom Hornverlauf.

Bei dem Mini Scoop Design wurde "rearloaded horn" als Horntyp und "konisch" als Kontur ausgewählt. AH ist die Halsfläche, also die Fläche am Anfang des Horns bei Länge 0. Die Länge des Horns L ist der Abstand zwischen Hals und Mund. H und B sind die Mundhöhe und Mundbreite des Horns an seiner Austrittsöffnung (siehe Abbildung 2.5 für die Hornbezeichnungen). Es soll angemerkt sein, dass AJHorn immer nur die Fläche in Abhängigkeit der Länge simuliert. Die Eingabe von Mundhöhe und Mundbreite ist nur für die erleichterte Bedienung des Programms nötig. Mit den Koeffizienten β_1 und β_2 kann der Einfluss von Dämpfungsmaterial angegeben werden. Die Treiberposition $xT1$ ist der mittlere Abstand vom Treiber bis zum Hornanfang (Hals). Wenn sich die Vorkammer zwischen Treibermembran und Hornanfang befindet, soll $xT1$ gleich 0 sein. Bei der Vorkammer benötigt AJHorn die Eingabe des Volumens VVK , der Länge LVK und der eventuellen Dämpfung βVK dieser Kammer. Ein rearloaded Horn unterscheidet sich vom frontloaded Horn dadurch, dass die Rückkammer entfällt. Deswegen bleiben die

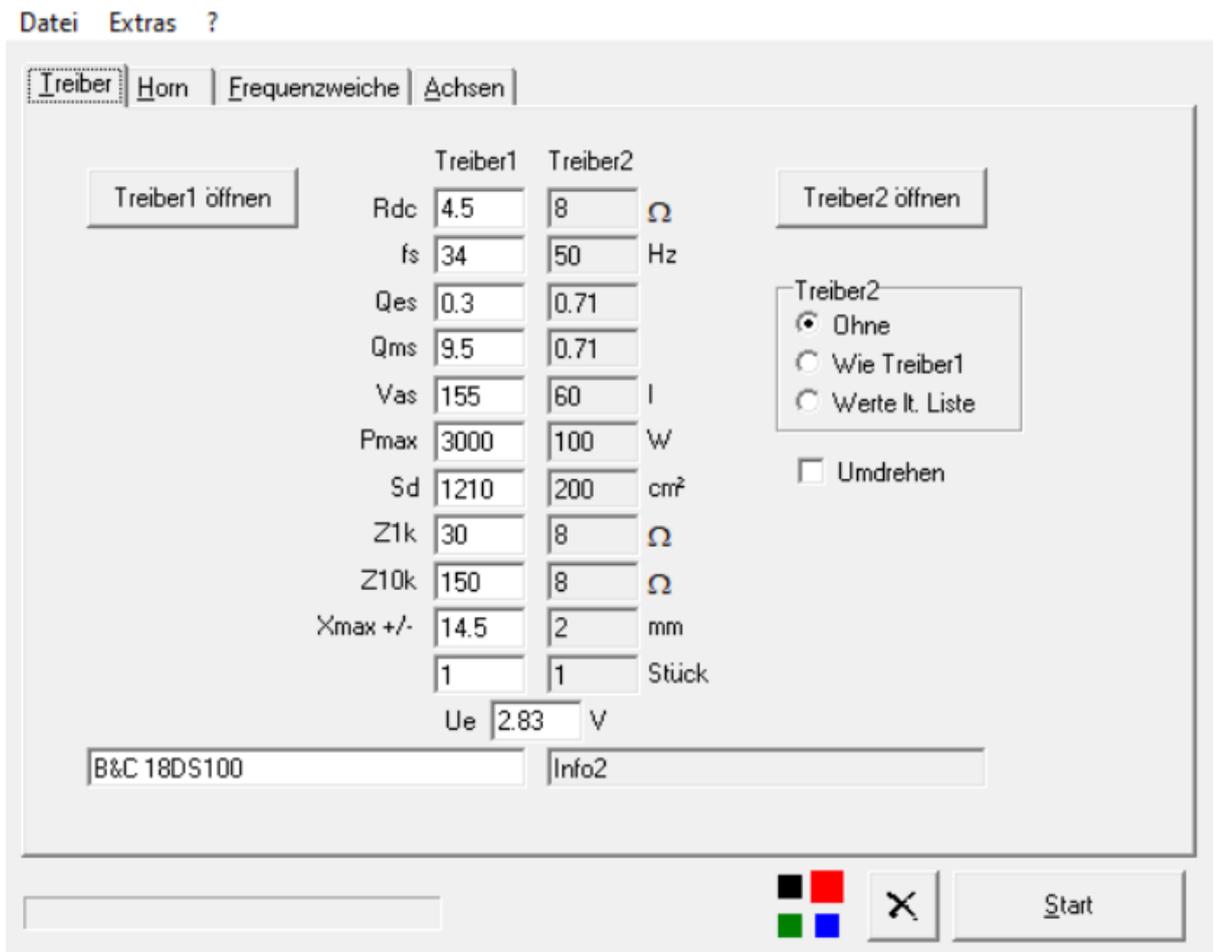


Abbildung 2.3: AJHorn Menüabschnitt Treiber

Eingabedaten der Rückkammer unberücksichtigt. Beim Menüpunkt "Aufstellung" werden die Daten der Raumposition angegeben, denn diese haben natürlich einen großen Einfluss auf den Wirkungsgrad und die Frequenzganglinearität. Die Aufstellungsvariante Halbraum wurden auch den Berechnungen von Thiele und Small zugrunde gelegt. In einem Halbraum gibt es eine Begrenzungsfläche (siehe Abbildung 4.4). Der Abstand von 1m ist der Abstand zwischen Membran und Messmikrofon. Dieser Abstand ist für spätere Messungen wichtig, denn es soll ein direkter Vergleich mit den gleichen Bedingungen möglich sein. $dL1$ ist die Differenzlänge zwischen Hornmund und Membran, welche beim Mini Scoop gleich 0 ist (siehe Abbildung 1.3).

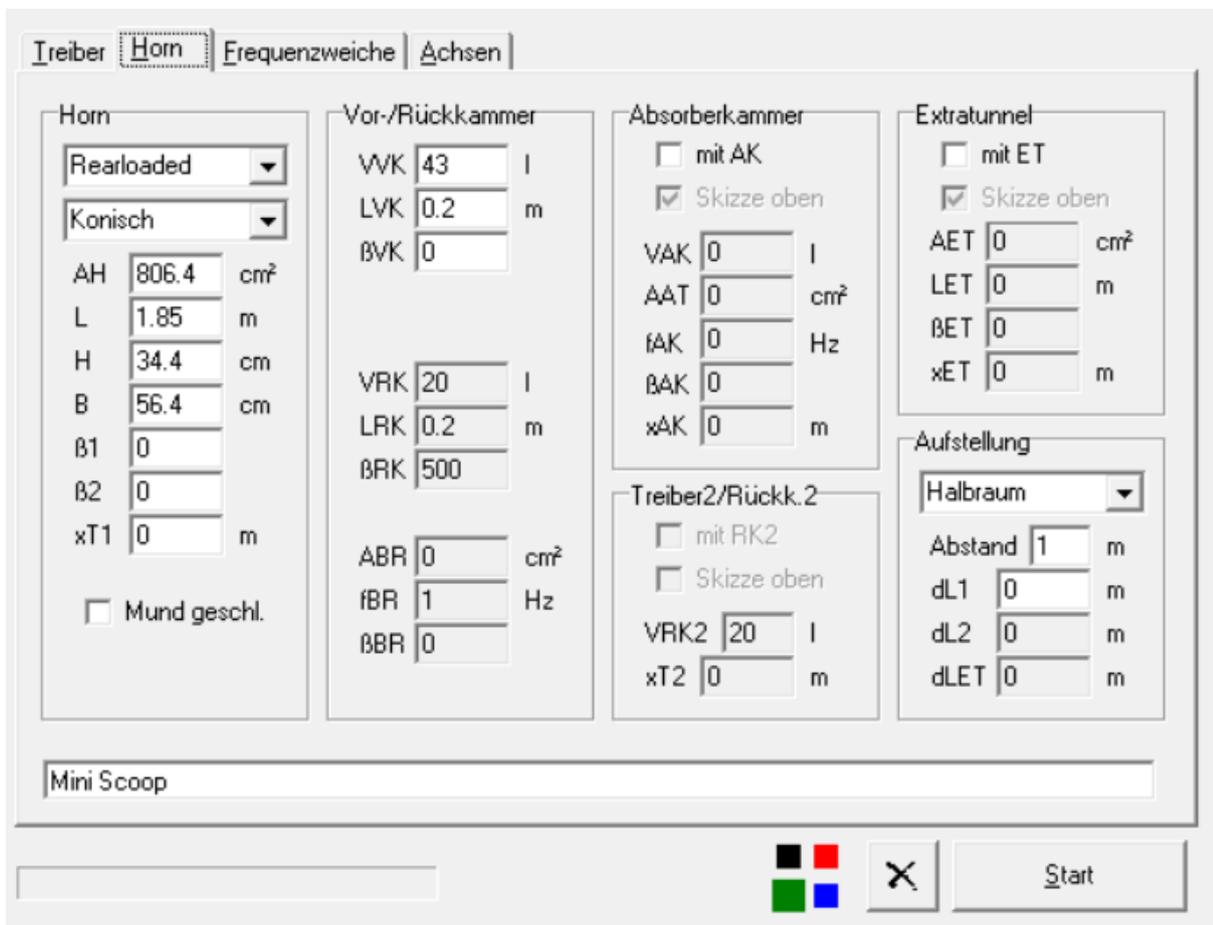


Abbildung 2.4: AJHorn Menüabschnitt Horn

2.4 Simulationsergebnisse

Nach dem Simulationsstart öffnet AJHorn folgende Fenster, in denen die verschiedenen Simulationsergebnisse dargestellt werden:

- SPL (Schalldruck)
- Prinzipskizze
- Elektrische Impedanz
- Membranamplitude (Frequenzgang des Effektivwerts der Membranauslenkung in mm)
- SPLmax (linearer Maximalschalldruck)
- Pmax (erforderliche elektrische Leistung in Watt für den Maximalschalldruck)
- Akustische Phase (Wird benötigt um festzustellen, ob zwei verschiedene Treiber in einem gewissen Frequenzbereich betrieben werden können, z.B. bei Mehrweglautsprechern)
- Akustische Impedanz vor der Membran

Da eine Beschreibung der Ergebnisse aller Fenster über den Rahmen dieser Arbeit hinausgehen würde, ist lediglich auf die Prinzipskizze und auf den Schallpegelverlauf, der auch für den direkten Vergleich mit den Messungen relevant ist, eingegangen worden.

2.4.1 Prinzipskizze

Die Abbildung 2.5 zeigt die schematische Darstellung des Hornverlaufs, simuliert mit AJHorn. Das Programm vereinfacht die Hornkontur, indem die Öffnungskonstante zwischen Hornhals und Hornmund gleich bleibt, denn bei der Parametereingabe ist nur eine Angabe der Halsfläche und Mundgröße möglich. In der Realität ist die Hornkontur zwischen Hornhals und Hornmund nicht stetig. Durch die Faltung des Horns in einem Gehäuse besteht das Horn aus einzelnen Segmenten mit verschiedenen großen Öffnungskonstanten. Der reale entfaltete Hornverlauf ist in Abbildung 2.6 dargestellt.



Abbildung 2.5: Prinzipskizze AJHorn

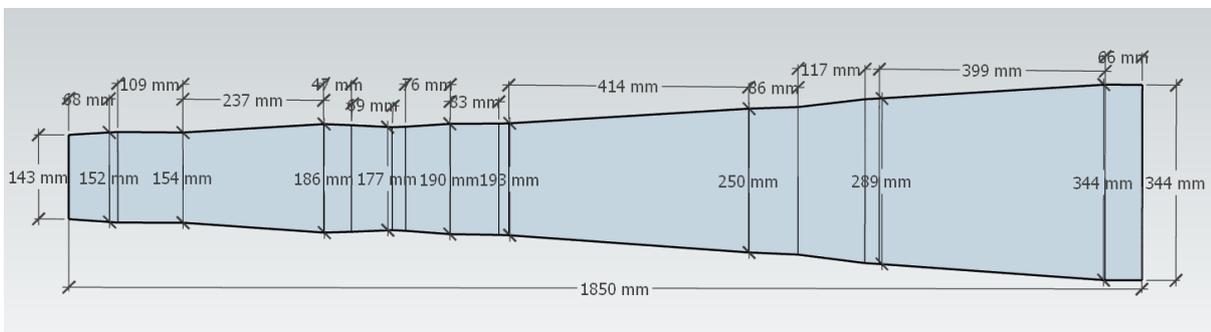


Abbildung 2.6: Realer entfalteter Hornverlauf (rechteckiger Querschnitt mit $B = 564\text{ mm}$)

2.4.2 Schallpegelverlauf

In diesem Kapitel werden die Ergebnisse des simulierten Schallpegelverlaufs verschiedener Treiber (siehe Tabelle 2.1) präsentiert. Die Simulationen zeigen den Schalldruckpegel der jeweiligen Treiber, eingebaut im Gehäuse, in Abhängigkeit der Frequenz. AJHorn erlaubt bis zu 4 verschiedene Simulationsverläufe in einem Diagramm darzustellen. Es werden daher die Ergebnisse der Schallpegelverläufe der simulierten Treiber in mehreren Abbildungen gezeigt. Abbildung 2.7 zeigt die Schallpegelverläufe der 4 B&C Treiber. Abbildung 2.8 zeigt die Schallpegelverläufe der Treiber von Void, Precision Devices, Eighteensound und Oberton. Abbildung 2.9 zeigt die Schallpegelverläufe der 2 RCF-Treiber.

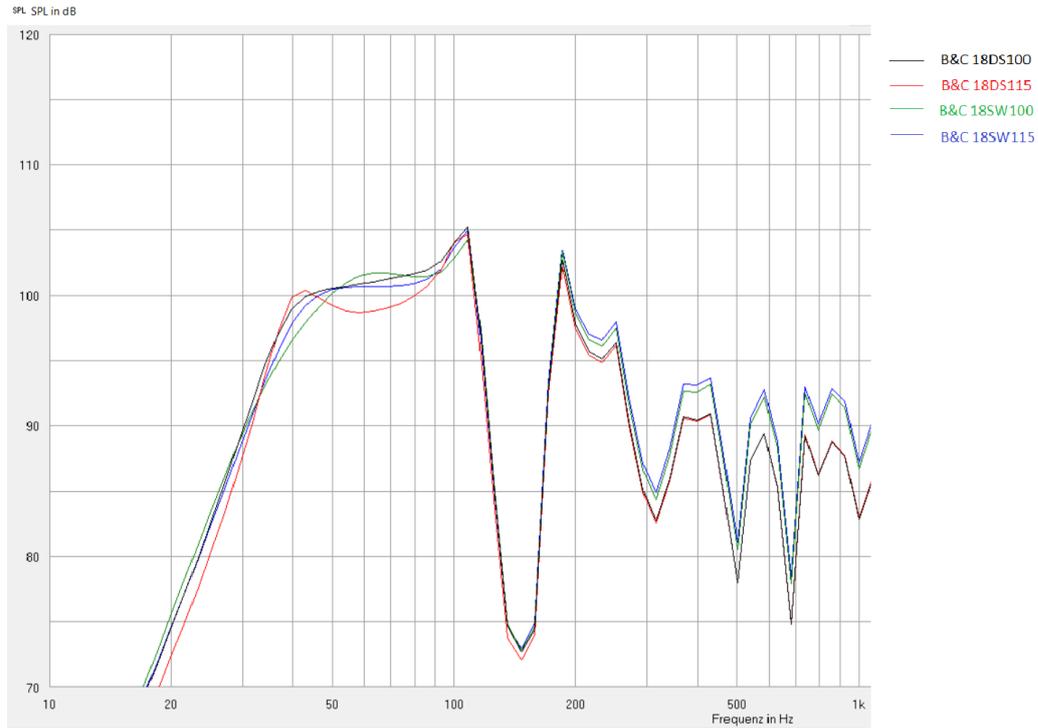


Abbildung 2.7: Simulierter Schallpegelverlauf 1

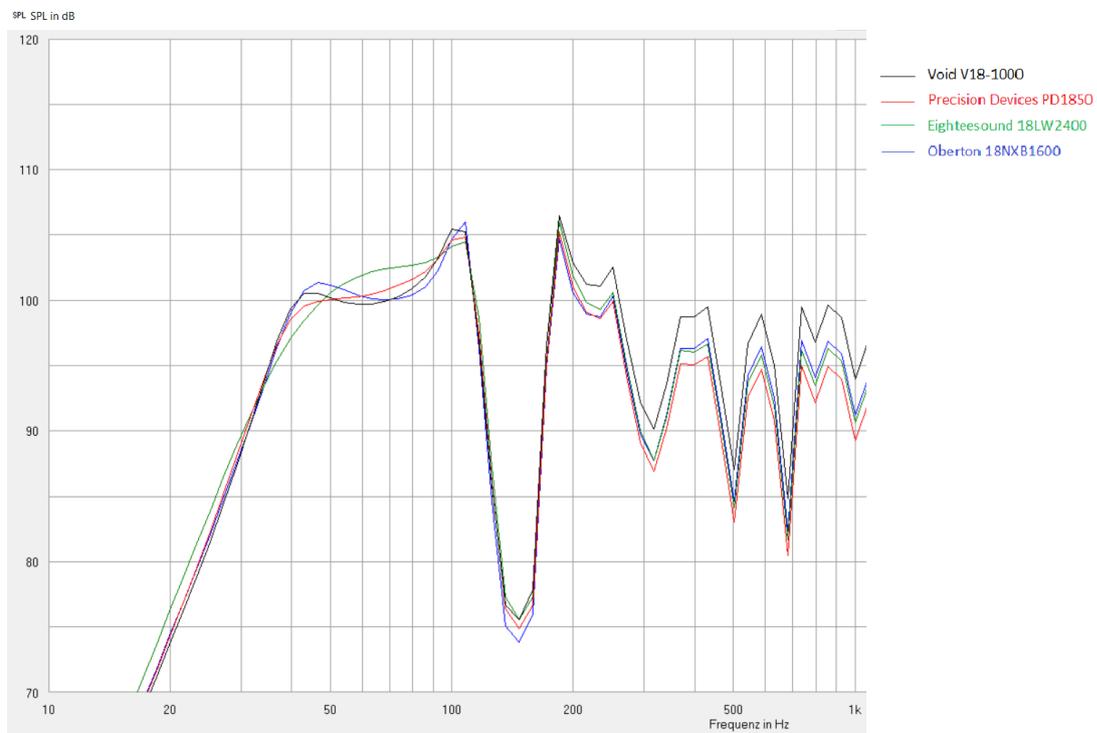


Abbildung 2.8: Simulierter Schallpegelverlauf 2

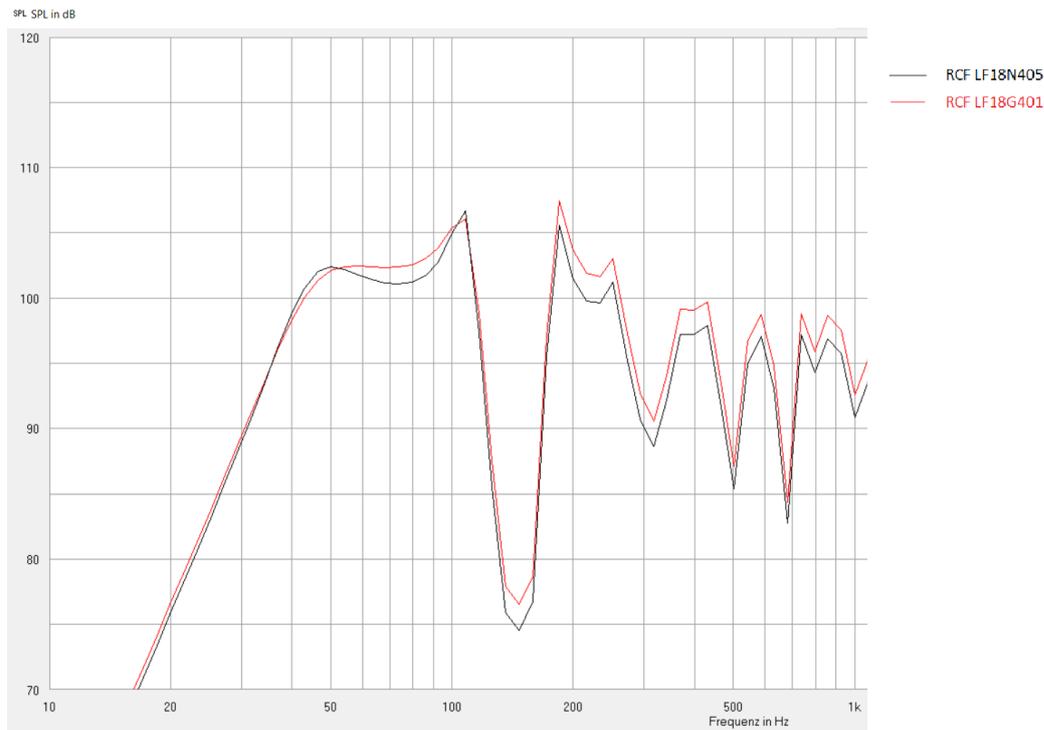


Abbildung 2.9: Simulierter Schallpegelverlauf 3

Die Ziele der Simulation des Schallpegelverlaufs waren, einen möglichst wenig ausgeprägten Hängebauch im Bereich zwischen 50Hz und 100Hz und möglichst viel Pegel im tiefen Frequenzbereich zu erhalten. Anhand der Simulationsergebnisse der Schallpegelverläufe und auch anhand der TS-Parameter soll dann die Entscheidung für den geeigneten Treiber getroffen werden.

Abbildung 2.10 zeigt den simulierten Schalldruckpegelverlauf, den der Lautsprecher (mit Treiber B&C 18DS100) maximal erzeugen könnte. Die Höhe des Maximalschalldrucks ist begrenzt durch den Effektivwert von X_{max} und durch die el. Belastbarkeit des Treibers [15].

Abbildung 2.11 gibt den Frequenzgang der benötigten Leistung für den linearen Maximalschalldruck beim Treiber B&C 18DS100 an [15].

Zum Vergleich wurde das selbe Gehäuse mit den gleichen Treiberparametern als geschlossene Box simuliert. Laut AJHorn ist ein geschlossenes Gehäuse ein Frontloaded Horn, bei dem das Vorkammervolumen VVK und die Hornlänge L gleich Null ist. Die Halsfläche AH entspricht ebenso wie die Mundfläche $H \cdot B$ der Membranfläche Sd des Treibers [15]. Abbildung 2.12 zeigt diesen Vergleich mit Treiber B&C 18DS100.

Abbildung 2.13 zeigt den simulierten Schalldruckpegelverlauf mit zwei unterschiedlichen Vorkammergrößen und einmal ohne Vorkammer. Treiberdaten (B&C 18DS100) und sonstige Horn-LS-Abmessungen sind bei allen drei ident.

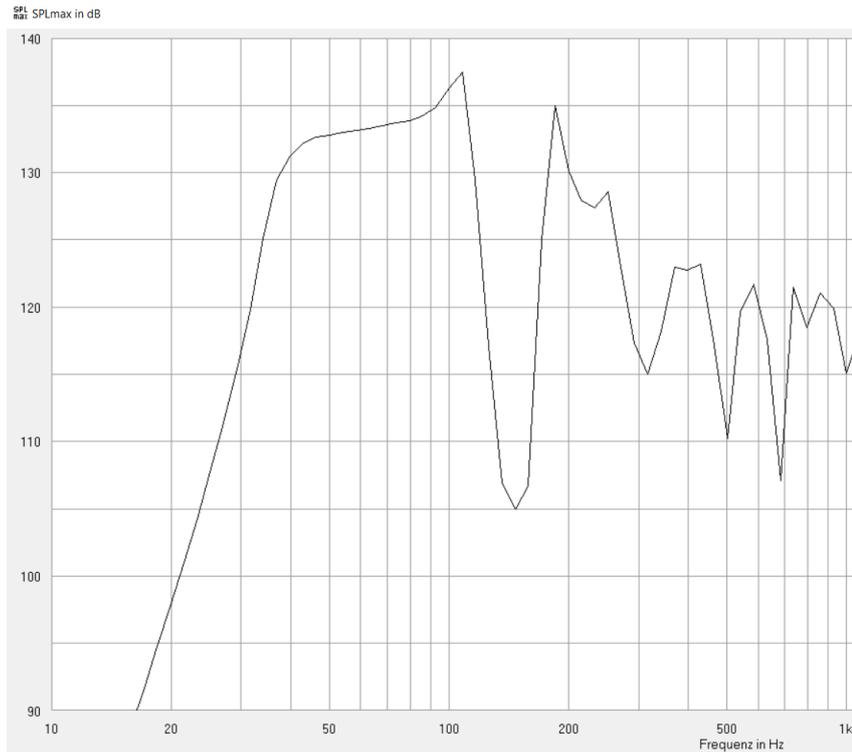


Abbildung 2.10: SPL_{max} - linearer Maximalschalldruck (B&C 18DS100)

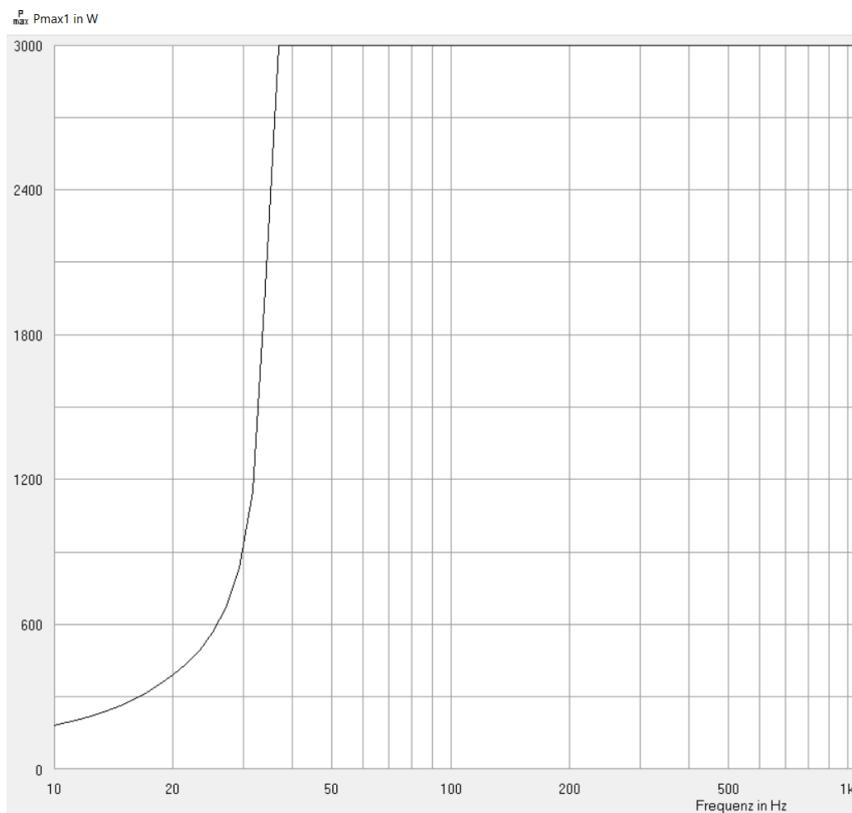


Abbildung 2.11: P_{max} - erforderliche elektrische Leistung für den Maximalschalldruck (B&C 18DS100)

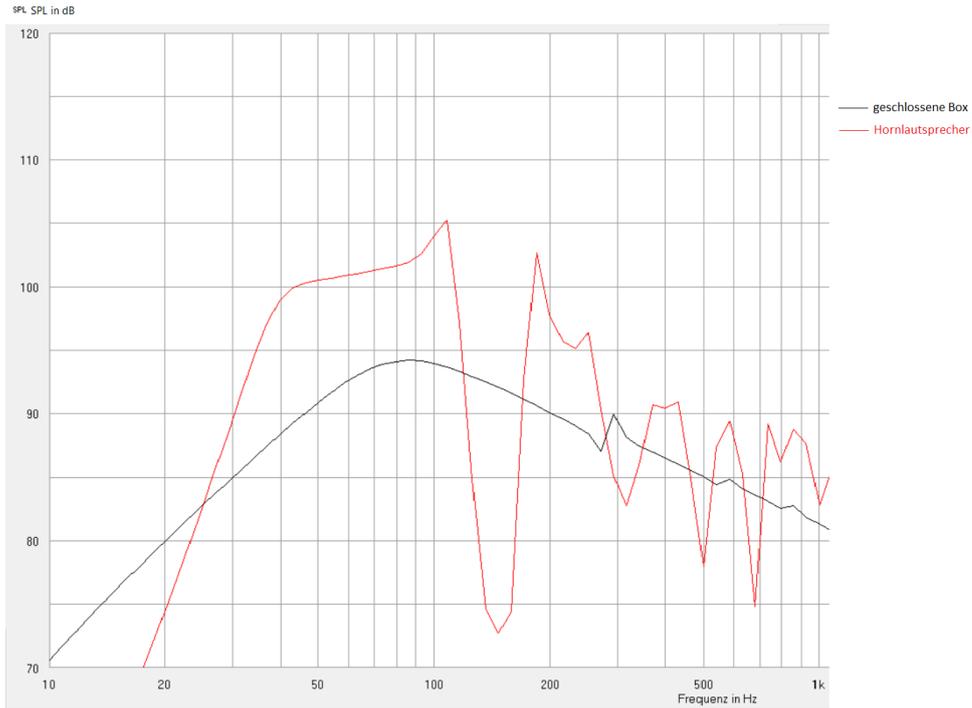


Abbildung 2.12: Simulierter Schallpegelverlauf Hornlautsprecher und geschlossene Box (B&C 18DS100)

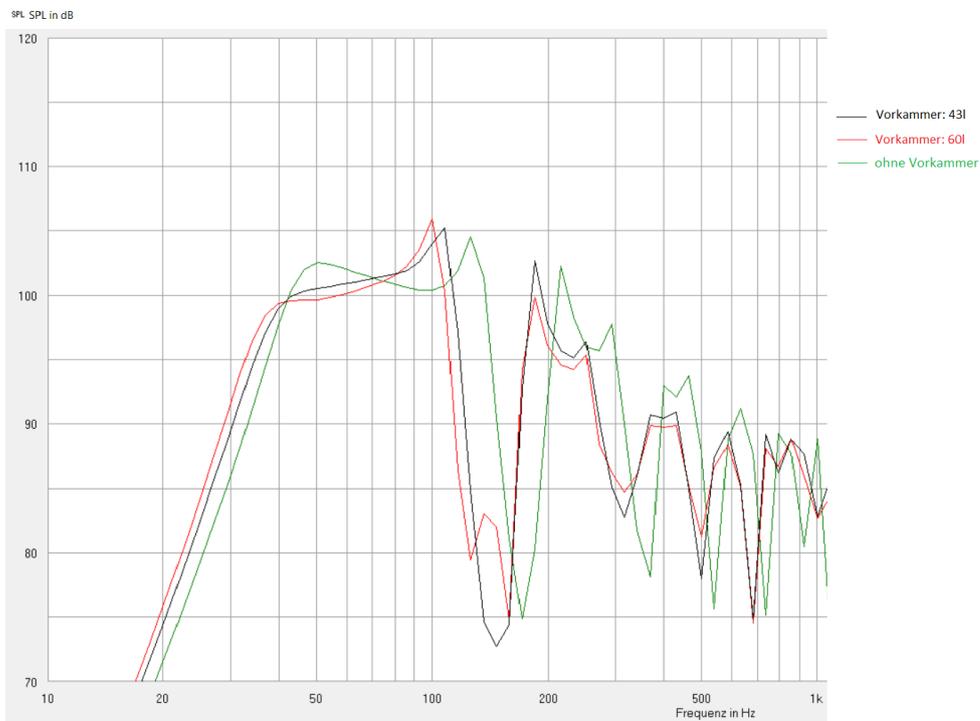


Abbildung 2.13: Simulierter Schallpegelverlauf mit unterschiedlichen Vorkammergrößen und ohne Vorkammer (B&C 18DS100)

Abbildung 2.14 zeigt den Vergleich des simulierten Schallpegelverlaufs eines rearloaded und eines frontloaded horn. Die Rückkammer beim frontloaded horn ist sehr groß gewählt worden. Der Einbruch im Frequenzgang, hervorgerufen durch die Auslöschung der beiden Wellen von der Treiber Vorder- und Rückseite, findet, wie ersichtlich, beim frontloaded horn nicht statt.

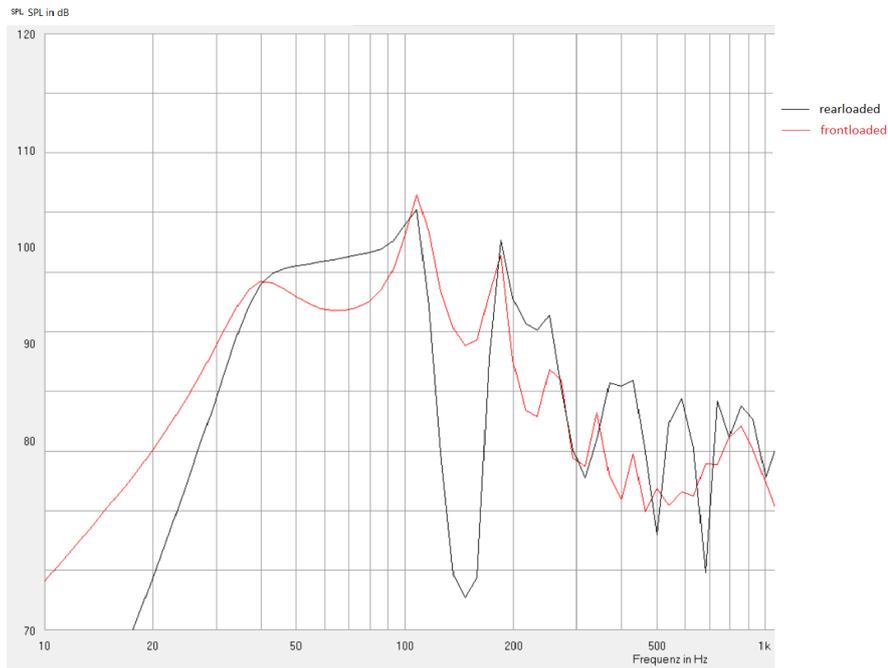


Abbildung 2.14: Simulierter Schallpegelverlauf eines rearloaded und eines frontloaded horn (B&C 18DS100)

Abbildung 2.15 zeigt den Vergleich des simulierten Schallpegelverlaufs eines Scoops (Mogale Super Scoop [10]) und eines Mini Scoops mit angegebenen Größen für die Halsfläche AH , Mundfläche AM und Hornlänge L . Beide Simulationen wurden mit dem gleichen Treiber (B&C 18DS100) und mit gleicher Vorkammergröße durchgeführt.

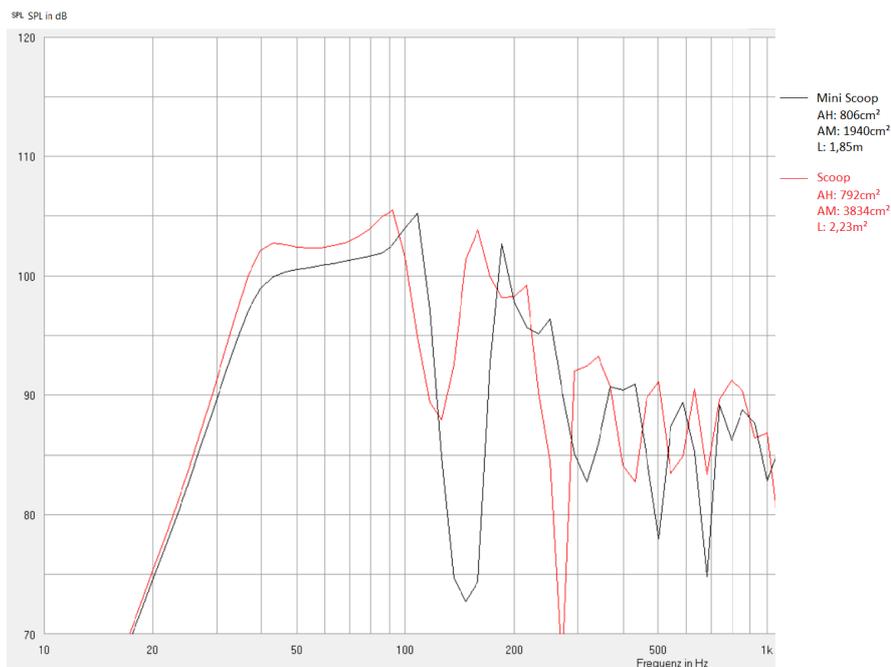


Abbildung 2.15: Simulierter Schallpegelverlauf eines Scoops und eines Mini Scoops (B&C 18DS100)

2.5 Auswahl zweier Treiber

Nach den Simulationen waren die beiden Favoriten der B&C 18DS100 und der B&C 18DS115. Der Treiber B&C 18DS100 hat, im Vergleich zu den anderen Treibern, eine große Membranauslenkung, eine kleine el. Güte und einen großen Antriebsfaktor. Der simulierte Schallpegelverlauf überzeugt durch den linearen Verlauf im relevanten Frequenzbereich. Der B&C 18DS115 hingegen hat den größten Wert für die Membranauslenkung, die kleinste elektrische und Gesamtgüte, den größten Antriebsfaktor und die größte el. Leistung verglichen mit den anderen simulierten Treibern. Beim simulierten Schallpegelverlauf hat dieser Treiber den höchsten Pegel bei der unteren Grenzfrequenz. Ein Nachteil ist das tiefe Tal beim Frequenzgang zwischen 45 Hz und 100 Hz. Es wurden beide B&C Treiber bestellt, um einen Vergleich in der Praxis durchzuführen. Die Entscheidung für den letztendlich ausgewählten Treiber, der im Mini Scoop eingebaut und eingesetzt werden soll, wird dann anhand der Messergebnisse getroffen.

Die folgenden Daten und Abbildungen wurden aus den offiziellen Datenblättern von B&C entnommen. Der Hersteller gibt leider nicht an, wie die Messung des SPL-Frequenzganges des Treibers durchgeführt worden ist. Es wurde davon ausgegangen, dass sich der Treiber in einer unendlichen Schallwand befindet.

Abbildung 2.16 zeigt die technischen Details samt TS-Parameter, Abbildung 2.17 den SPL-Frequenzgang und Abbildung 2.18 den elektrischen Impedanzverlauf des Treibers B&C 18DS100.

SPECIFICATIONS		DESIGN		PARAMETERS ⁴	
Nominal Diameter	460 mm (18.0 in)	Surround Shape	Triple Roll	Resonance Frequency	34 Hz
Nominal Impedance	8 Ω	Cone Shape	Radial	Re	4.5 Ω
Minimum Impedance	6.1 Ω	Magnet Material	Neodymium Inside Slug	Qes	0.3
Nominal Power Handling ¹	1500 W	Spider	Double Silicone	Qms	9.5
Continuous Power Handling ²	3000 W	Pole Design	T-Pole	Qts	0.29
Sensitivity ³	97.5 dB	Woofers Cone Treatment	TWP Waterproof Both Sides	Vas	155.0 dm ³ (5.47 ft ³)
Frequency Range	34 - 1000 Hz	Recommended Enclosure	200.0 dm ³ (7.06 ft ³)	Sd	1210.0 cm ² (187.55 in ²)
Voice Coil Diameter	100 mm (4.0 in)	Recommended Tuning	35 Hz	η ^o	2.1 %
Winding Material	Aluminium			Xmax	± 14.5 mm
Former Material	Glass Fibre			Xvar	± 14.0 mm
Winding Depth	36.5 mm (1.44 in)			Mms	278.0 g
Magnetic Gap Depth	16.0 mm (0.63 in)			Bl	30.0 Txm
Flux Density	0.7 T			Le	4.4 mH
				EBP	113 Hz

1. 2 hours test made with continuous pink noise signal within the range Fs-10Fs. Power calculated on rated minimum impedance. Loudspeaker in free air.
2. Power on Continuous Program is defined as 3 dB greater than the Nominal rating.
3. Applied RMS Voltage is set to 2.83 V for 8 ohms Nominal Impedance.
4. Thiele-Small parameters are measured after a high level 20 Hz sine wave preconditioning test.

Abbildung 2.16: Datenblatt B&C 18DS100

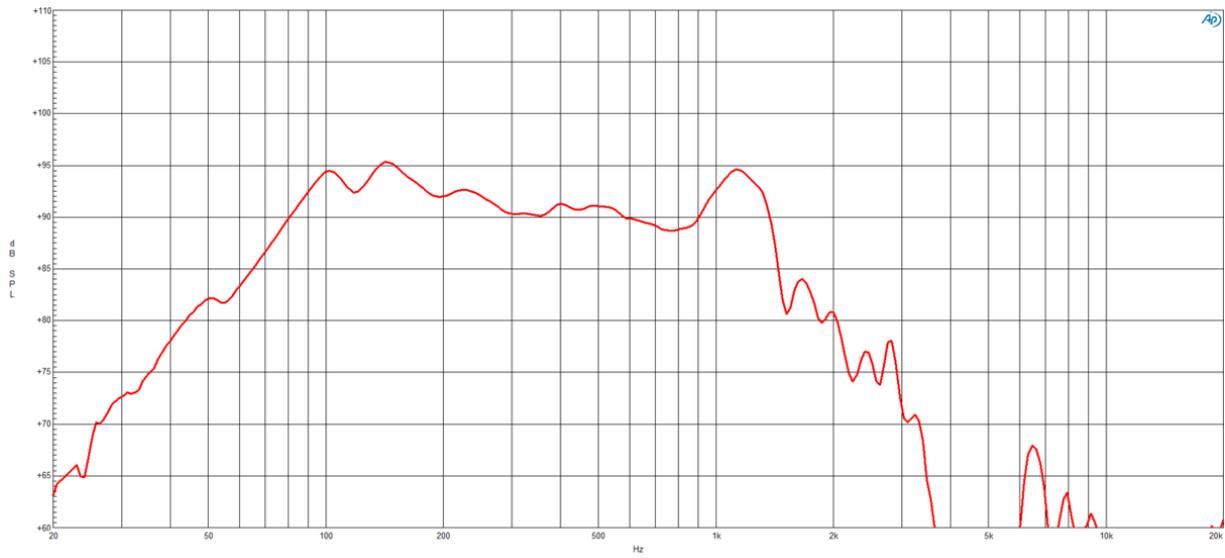


Abbildung 2.17: Schallpegelverlauf B&C 18DS100

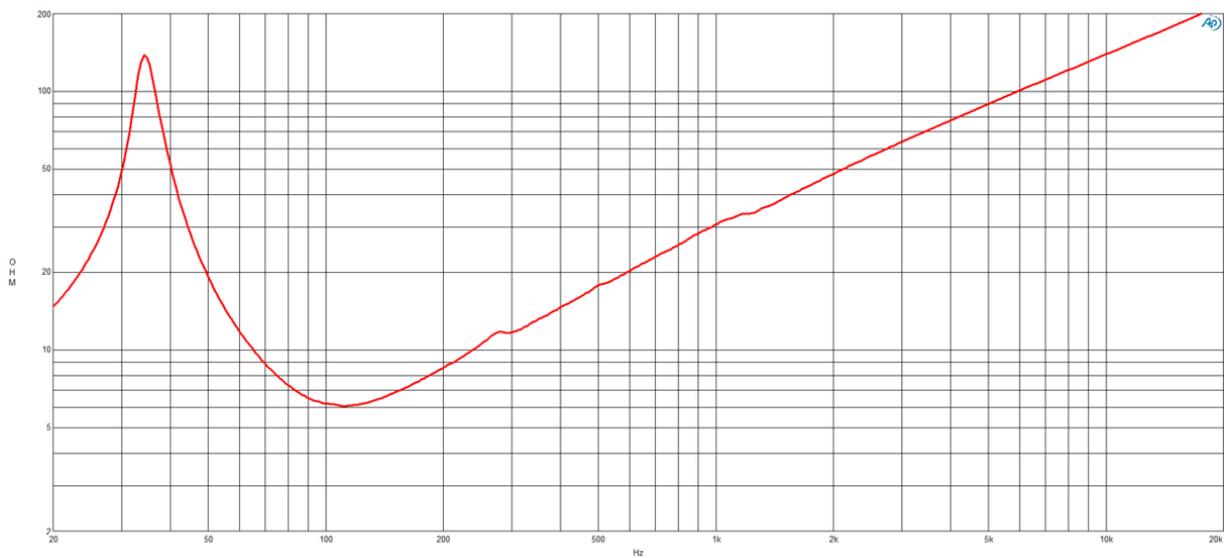


Abbildung 2.18: Elektrische Impedanz B&C 18DS100

Abbildung 2.19 zeigt die technischen Details samt TS-Parameter, Abbildung 2.20 den SPL-Frequenzgang und Abbildung 2.21 den elektrischen Impedanzverlauf des Treibers B&C 18DS115.

SPECIFICATIONS		DESIGN		PARAMETERS ⁴	
Nominal Diameter	460 mm (18.0 in)	Surround Shape	Triple Roll	Resonance Frequency	30 Hz
Nominal Impedance	8 Ω	Cone Shape	Radial	Re	5.0 Ω
Minimum Impedance	7.0 Ω	Magnet Material	Neodymium Inside Slug	Qes	0.21
Nominal Power Handling ¹	1700 W	Spider	Double Silicone	Qms	4.3
Continuous Power Handling ²	3400 W	Pole Design	T-Pole	Qts	0.2
Sensitivity ³	98.0 dB	Woofers Cone Treatment	TWP Waterproof Both Sides	Vas	168.0 dm ³ (5.93 ft ³)
Frequency Range	30 - 500 Hz	Recommended Enclosure	100.0 dm ³ (3.53 ft ³)	Sd	1210.0 cm ² (187.55 in ²)
Voice Coil Diameter	116 mm (4.5 in)	Recommended Tuning	40 Hz	η°	2.2 %
Winding Material	Aluminium			Xmax	± 16.5 mm
Former Material	Glass Fibre			Xvar	± 14.0 mm
Winding Depth	40.0 mm (1.57 in)			Mms	330.0 g
Magnetic Gap Depth	14.0 mm (0.55 in)			Bl	39.0 Txm
Flux Density	0.8 T			Le	3.85 mH
				EBP	142 Hz

1. 2 hours test made with continuous pink noise signal within the range Fs-10Fs. Power calculated on rated minimum impedance. Loudspeaker in free air.
2. Power on Continuous Program is defined as 3 dB greater than the Nominal rating.
3. Applied RMS Voltage is set to 2.83 V for 8 ohms Nominal Impedance.
4. Thiele-Small parameters are measured after a high level 20 Hz sine wave preconditioning test.

Abbildung 2.19: Datenblatt B&C 18DS115

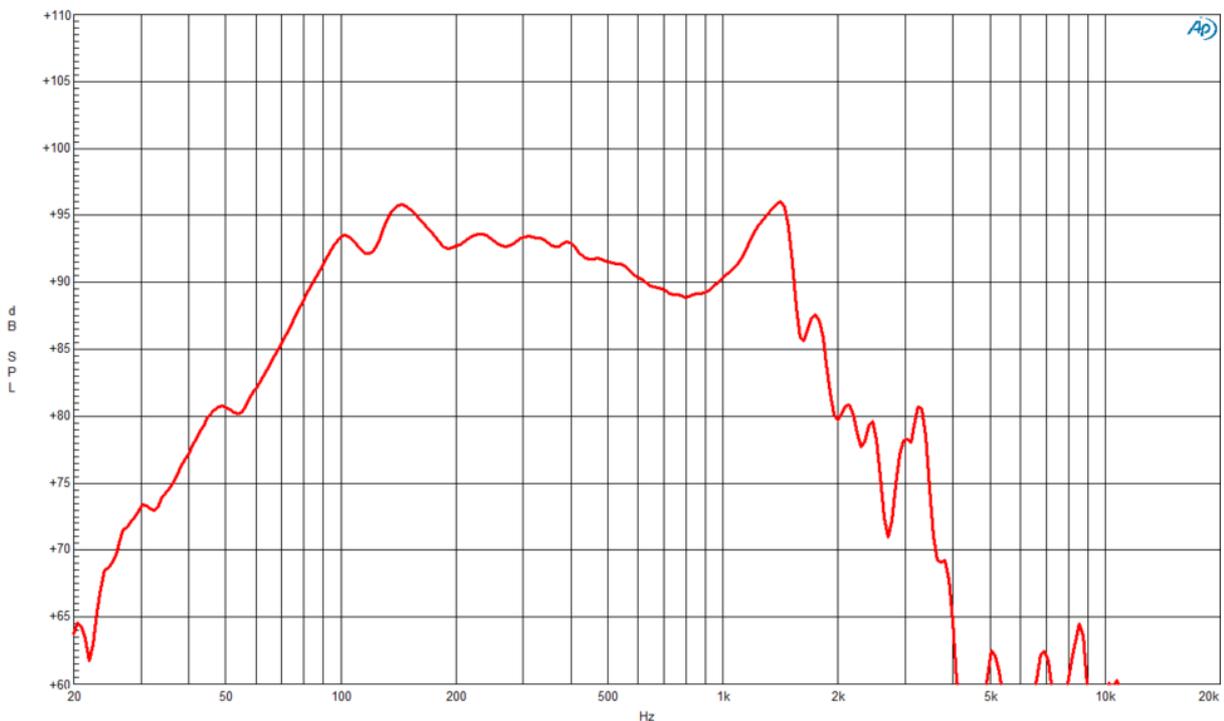


Abbildung 2.20: Schallpegelverlauf B&C 18DS115

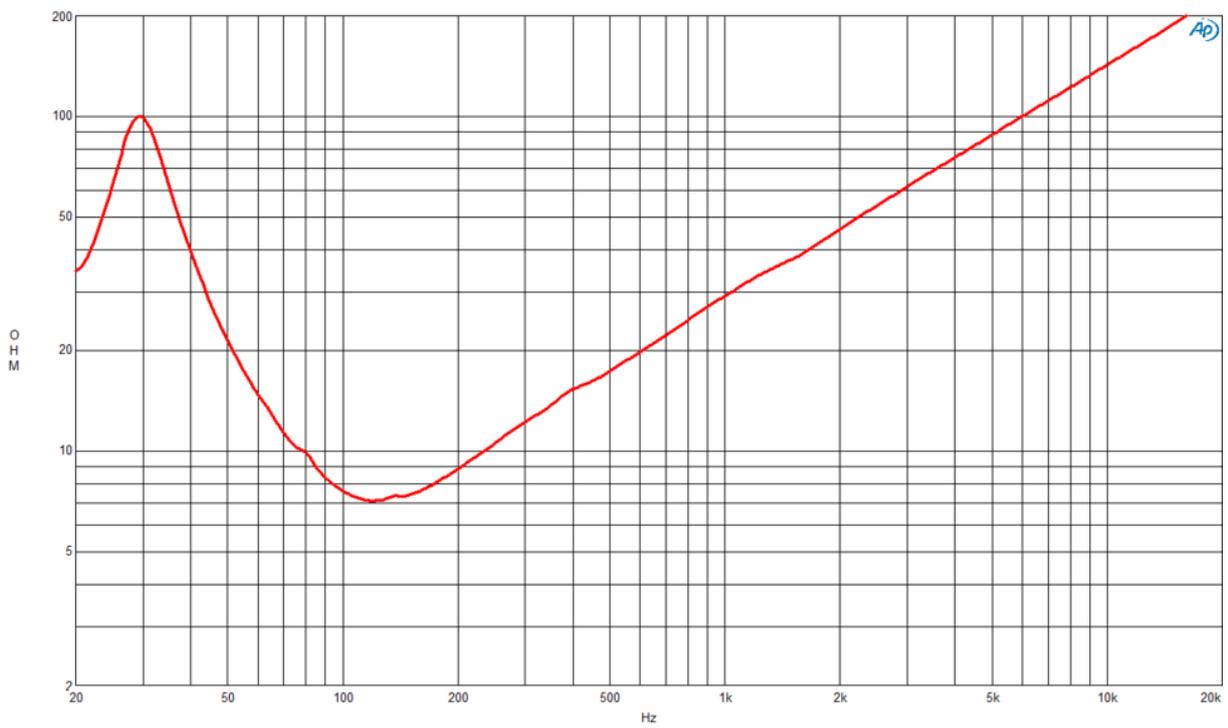


Abbildung 2.21: Elektrische Impedanz B&C 18DS115

3

Konstruktion

Nach der Auswahl des Hornlautsprecherprinzips, der Planung und Zeichnung des Modells und den Simulationen wurde mit dem Bau des Mini Scoops gestartet. Dieses Kapitel soll einen kurzen Einblick in die Konstruktion eines solchen Lautsprechers geben.

Als Konstruktionsmaterial wurden 18mm dicke Multiplexplatten aus Birkenholz gewählt. Diese bestehen aus 13 Schichten, die jeweils quer zur Faserrichtung der vorigen Schicht fest verleimt sind. Diese Art von Holz eignet sich besonders gut für den Bau eines Tieftonlautsprechers, denn es ist stabil genug um den Vibrationen standzuhalten, es verzieht sich nicht mit der Zeit und es quillt nicht auf wenn das Holz in Kontakt mit Wasser kommt (anders als bei MDF). Es wurden drei Platten bei einem Holzhändler im 1,5m x 3m Maß gekauft. Damit ist genug Holz vorhanden für den Bau von zwei Mini Scoops. Der zweite Mini Scoop wird zu einem späteren Zeitpunkt gebaut.

3.1 Schnittplan

Die Software Sketchup bietet eine Erweiterung, mit der man Schnittpläne erstellen kann: Open-CutList. Diese Erweiterung platziert die einzelnen Komponenten des Plans bestmöglich auf den Platten. Dabei wird die Sägeblattdicke und die Randabfallbreite mitberücksichtigt. Abbildung 3.1 bzw. 3.2 zeigen den Schnittplan (siehe auch Abbildung 1.3) . Eine bewusste und gewissenhafte Herangehensweise beim Anzeichnen der Teile für den Zuschnitt ist entscheidend. Es hat sich bewährt mit Stahllineal und Minenbleistift zu zeichnen.

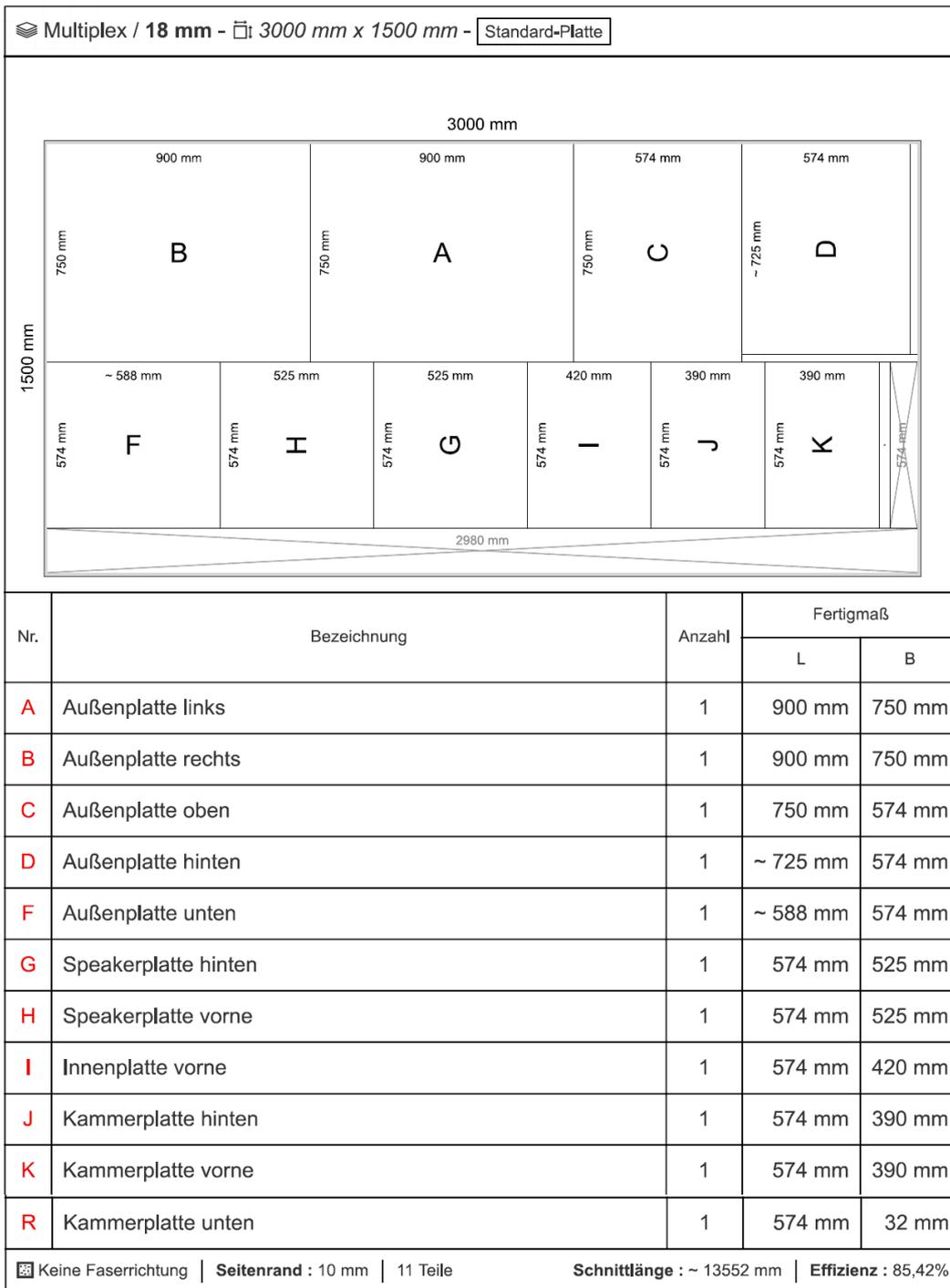


Abbildung 3.1: Schnittplan Platte 1

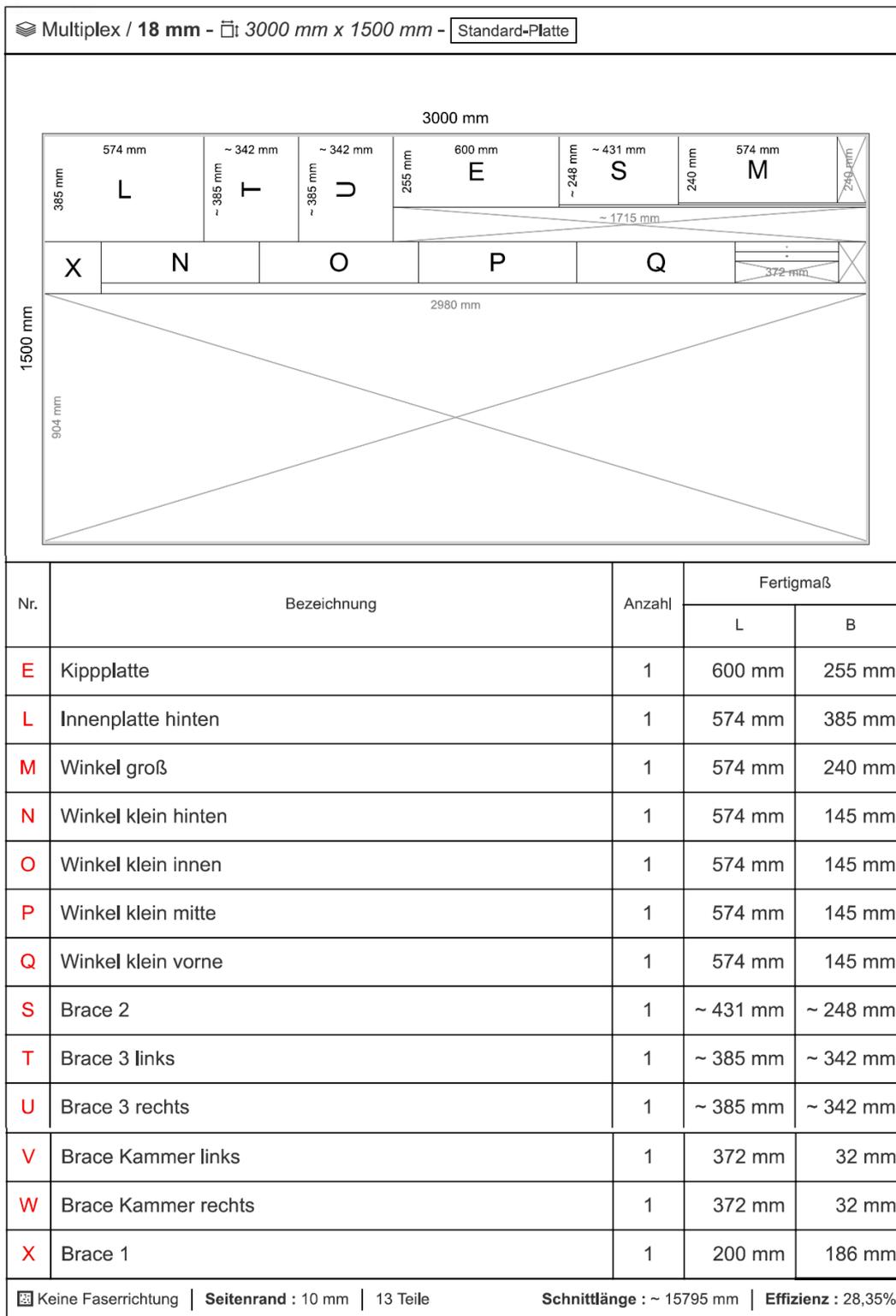


Abbildung 3.2: Schnittplan Platte 2

3.2 Zusammenbau

Da der Lautsprecher ein komplexes Innenleben hat, wurde eine Frässchablone erstellt. Die Wände wurden mit der Schablone gefräst, um die Innenteile 5mm darin zu versenken. Das bringt zusätzliche Stabilität und vereinfacht später das Zusammenstellen der Teile. Die Erstellung der Schablone und Fräsung der Wände muss jedoch äußerst genau erfolgen, damit die Teile zusammenpassen. Anschließend wurden alle Innenteile zugeschnitten und nach und nach zusammengebaut. Für Griffe und Anschlusspanel wurden auch Frässchablonen angefertigt. Für noch mehr Robustheit des Gehäuses wurde die Außenkante der Seitenteile, nach dem System der einfachen Überplattung, 5mm tief und 18mm breit eingefräst. Die Deckplatte wurde ebenfalls gefräst. Für den Teil, wo der Treiber befestigt wird (auch als Baffle bezeichnet), wurden zwei Platten zusammen verleimt. Das Loch im Baffle wurde mit Hilfe einer Oberfräse und eines Fräszirkels angefertigt. Für den erleichterten Transport des Lautsprechers wurden Rollen an der 45° Schräge des Rückens befestigt.

Es folgen einige Bilder zur Dokumentation der Konstruktion.



Abbildung 3.3: Gefräste Wände des Lautsprechers



Abbildung 3.4: "Innenleben" des Lautsprechers



Abbildung 3.5: Fertiger Mini Scoop

4

Messungen

Nach der Planung, Zeichnung, Simulation und Konstruktion des Lautsprechers fehlt nur mehr ein Schritt zur Vervollständigung des Projekts: die Messungen. Es soll untersucht werden, wie der Lautsprecher den Schall wiedergibt und welche Wirkung das Gehäuse darauf hat.

Für die korrekte Messung von Lautsprechern ist ein reflexionsarmer Raum vorgesehen. Dieser Raum sollte keine Begrenzungsflächen oder reflektierenden Objekte innerhalb der halben Wellenlänge der tiefsten zu reproduzierenden Frequenz haben [10]. Dies entspricht laut folgender Berechnung einem Abstand von der Schallquelle von 10m bei einer Frequenz von 17Hz:

$$\lambda = \frac{c}{f} = \frac{343m/s}{17Hz} \approx 20m \quad (4.1)$$

Für die Messung der Frequenz von 17Hz ist also ein Raum notwendig, der mindestens 20m lang, 20m breit und 20m hoch ist. Da kein reflexionsarmer Raum mit diesen Maßen zur Verfügung stand, ist eine Messung durchgeführt worden, bei der annähernd Bedingungen wie im Halbfreifeld herrschten. Zum Vergleich wurde auch eine Messung in einer Halle gemacht. Zur Unterdrückung der Bodenreflexionen wurden auch Messungen mit dem Messmikrofon am Boden durchgeführt. Die Ziele der Messungen waren die Bestimmung von:

- Schalldruckpegelverlauf von 10Hz bis 1kHz
- Schalldruckabnahme vs. Entfernung
- Richtcharakteristik

4.1 Messaufbau

4.1.1 Equipment

Folgendes Equipment wurde vom SPSC ausgeliehen und bei den Messungen verwendet:

- Messmikrofon: NTi Audio MA220
- Prüfschallquelle: Brüel & Kjaer Type 4231 Kl. 0,3
- Windschutz für Messmikrofon
- Thermohygrometer: testo 610
- Laserentfernungsmesser: Bosch DLE 70
- Audio interface: RME Fireface UCX

Der Mono-Vollverstärker FFA-10000 (2 x 1500 Watt an 8 Ohm) [19] wurde vom Verein “Dub der guten Hoffnung“ ausgeliehen. Weiterhin wurde noch ein Laptop (Lenovo Thinkpad) mit der Messsoftware Room Eq Wizard V5.19 (Freeware) verwendet.



Abbildung 4.1: Messequipment

4.1.2 Messort

Als Messort wurde der Vorplatz der Stahlhalle Eberhardt in der Waagner-Biro-Straße 45 in Graz gewählt. Abbildung 4.2 zeigt ein Satellitenbild vom Messort mit eingezeichneten Messpunkten und Abstand zu der sich am nächsten befindenden Reflexionsfläche. Der Vorplatz war zum Zeitpunkt der Messung leergeräumt. Es gab also keine Fahrzeuge oder Gegenstände, anders als auf dem Bild erkennbar.



Abbildung 4.2: Satellitenbild von Google Maps, Vorplatz Stahlhalle Eberhardt

Abbildung 4.3 zeigt ein Foto des Messaufbaus in der Halle und Abbildung 4.4 zeigt ein Foto des Messaufbaus am Vorplatz der Halle.



Abbildung 4.3: Messung in der Halle



Abbildung 4.4: Messung am Vorplatz

4.1.3 Messpunkte

Abbildung 4.5 zeigt die Messpunkte für die Messung der Entfernungsabhängigkeit des Schalldruckes. Das Messmikrofon wurde bei den Messpunkten 1 bis 5 im Zentrum des Treibers positioniert, wobei die Entfernung immer verdoppelt wurde. Bei den Messpunkten 6 bis 10 wurde das Messmikrofon am Boden positioniert. Das Mikrofon wurde dabei immer in Richtung Lautsprecher ausgerichtet. Die Messpunkte 5 und 10 sind aus Anschaulichkeitsgründen nicht in maßstabgetreuer Distanz dargestellt.

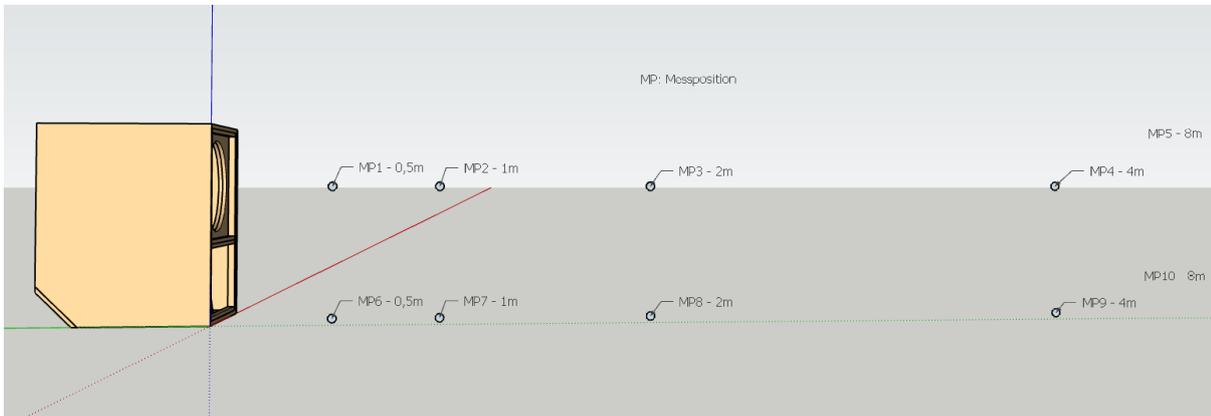


Abbildung 4.5: Messpositionen für das Messen der Entfernungsabhängigkeit des Schalldruckes

Abbildung 4.6 zeigt die Messpunkte für die Messung der Richtcharakteristik des Lautsprechers. Das Messmikrofon wurde immer in 30° Schritten im Kreis um den Lautsprecher herum positioniert. Als Mittelpunkt wurde auch hier die Mitte des Treibers gewählt. Alle Messpunkte sind 1 Meter vom Membranmittelpunkt entfernt. Es wurden nur die Messpunkte in einem Halbkreis gemessen (Symmetrie).

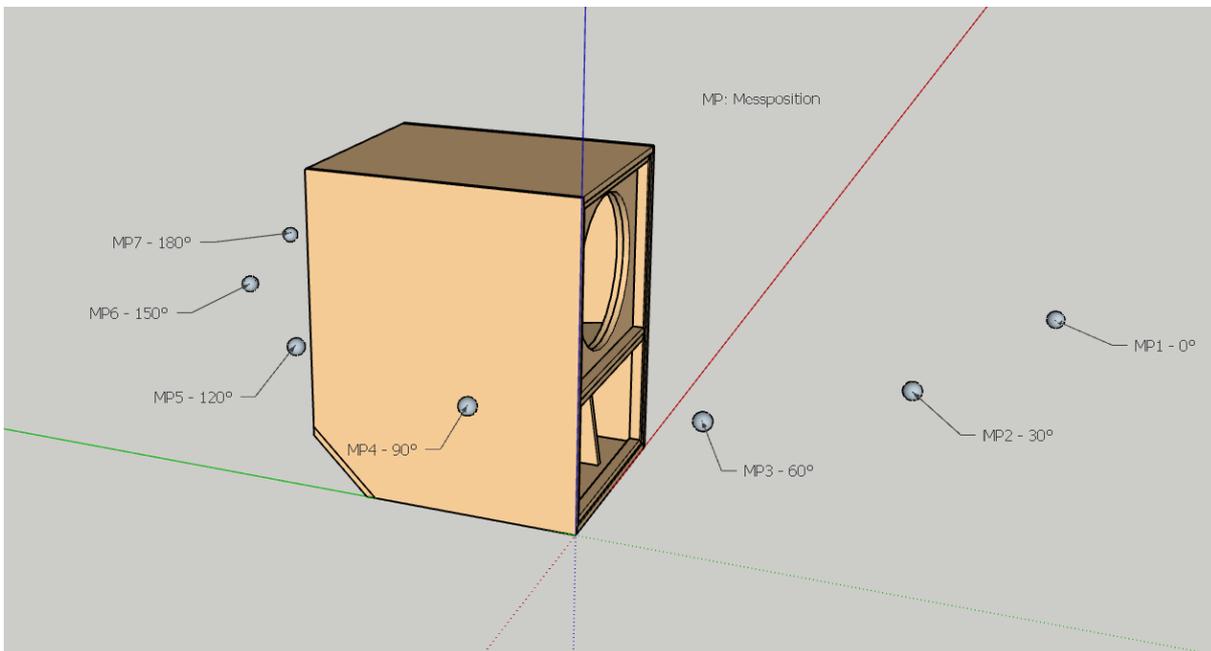


Abbildung 4.6: Messpositionen für die Messung der Richtcharakteristik

4.1.4 Kalibration

Mit der Messsoftware Room Eq Wizard (kurz REW) wurde zuerst die Soundkarte kalibriert. Anschließend wurde ein Testsignal über den Lautsprecher abgespielt und die Verstärkung vom Messsignal (Messmikrofon) beim Audio Interface auf ein verzerrungsfreies Signal eingestellt. Dann wurde die Prüfschallquelle auf das Messmikrofon aufgesetzt. Um das Signal-Rausch-Verhältnis (SNR) zu erhalten wurde zuerst das Fremdgeräusch, also das Umgebungsgeräusch bei ausgeschaltetem Lautsprecher, dann ein Sweep gemessen. Es wurde ein "noise" Anteil von 55dB und ein "signal" Anteil von 105dB gemessen. Das ergibt 50dB SNR. Zum Schluss wurde der Frequenzbereich, der gemessen werden soll, im "measurement" Fenster von REW eingestellt (siehe Abbildung 4.7). Um einen größeren Schalldruckpegel zu erhalten, wurde der Volume-Regler beim Verstärker soweit aufgedreht, bis ein zehnfaches der bei den Simulationen gewählten el. Eingangsspannung erreicht wurde. Das entspricht eine Leerlaufspannung von 28,3V am Ausgang des Verstärkers und eine zugeführte el. Leistung von 100W. Es wurden jeweils vier Sweeps gemessen, welche REW automatisch mittelt.

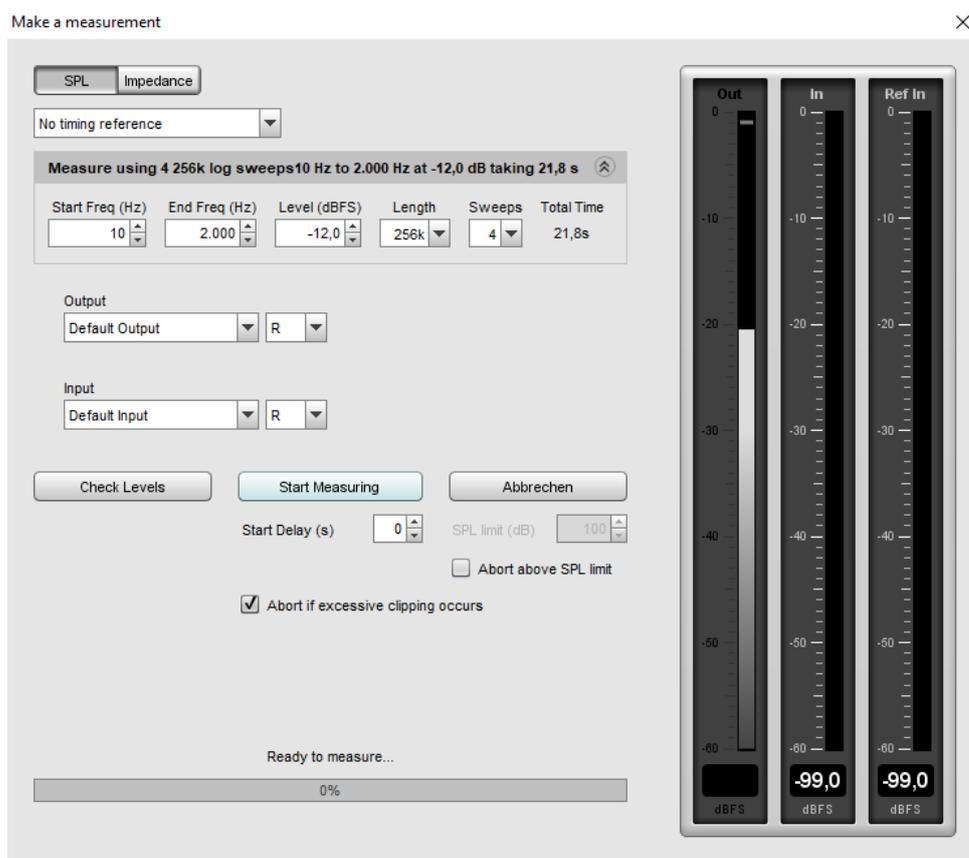


Abbildung 4.7: REW Fenster für die Messung

4.2 Messergebnisse

Die dB-Angaben in den Legenden der Abbildungen entsprechen dem Schalldruck bei einer Frequenz von 40Hz.

4.2.1 Vergleichsmessung zweier Treiber

Abbildung 4.8 zeigt den Vergleich der zwei Treiber. Bei beiden Messungen befand sich das Messmikrofon auf Höhe des Treibers mit 1m Entfernung vom Zentrum der Lautsprechermembran (MP2 in Abbildung 4.5). Der Treiber 18DS115 hat zwar mehr Pegel bei der unteren Grenzfrequenz (in etwa 1,2 dB), dafür hat dieser mehr Abfall zwischen 44Hz und 90Hz. Aufgrund dessen wurde die Entscheidung getroffen, das Projekt mit dem Treiber 18DS100 zu realisieren, dieser ist des Weiteren wesentlich günstiger.

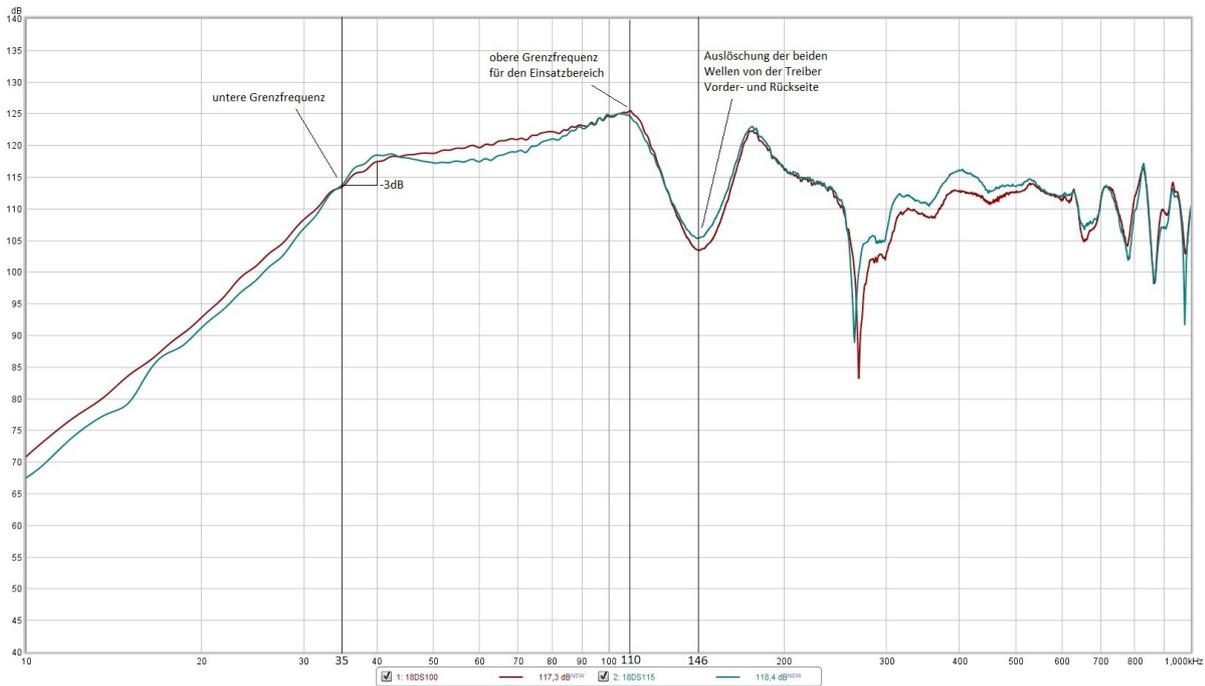


Abbildung 4.8: Vergleich der beiden Treiber

4.2.2 Vergleichsmessung indoor/outdoor

Am Anfang wurde eine Testmessung in der Halle durchgeführt. Diese Messung sollte als Vergleich für die Halbfreifeldmessungen am Vorplatz dienen. Wie schon vor der Messung erwartet, ist aufgrund der vielen Reflexionen der Raumbegrenzungsflächen der Frequenzgang der Hallenmessung wellig. Abbildung 4.9 zeigt den Vergleich zwischen der Messung in der Halle und der Halbfreifeldmessung. Beide Messungen sind auf Höhe des Membranzentrums des Treibers in einem Meter Entfernung durchgeführt worden.

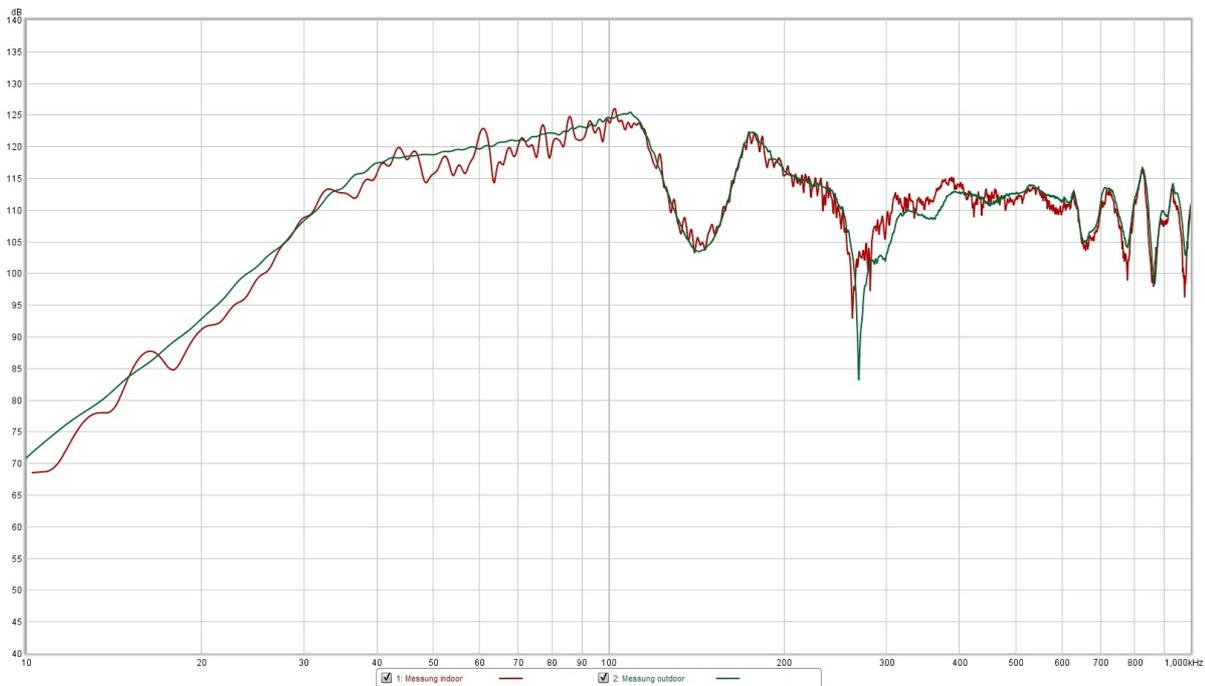


Abbildung 4.9: Vergleich Messung Halle und Vorplatz

4.2.3 Vergleich mit Ground Plane Messung

Um die Bodenreflexionen bei der Messung zu unterdrücken, wurde eine sogenannte “ground plane“ Messung am Vorplatz durchgeführt. Dabei wurde das Messmikrofon am Boden hingelegt, ausgerichtet in Richtung des Lautsprechers. Erwartet wurde bei der Messung eine Verstärkung von einigen wenigen dB, hervorgerufen durch den üblichen Druckstau an Begrenzungsflächen, hier am Boden.

Abbildung 4.10 zeigt den Vergleich der Messung auf Höhe der Membran und am Boden, mit einem Abstand zum Lautsprecher von 0,5m bzw. 8m. Wie ersichtlich, ist der Schallpegel bei der Messung am Boden bei einem Abstand von 0,5m und einer Frequenz von 40 Hz um 3,1dB höher als bei der Messung auf Höhe des Treibers. Der Unterschied der beiden Messpunkte nimmt mit größerer Entfernung ab. Bei einem Abstand von 8m ist der Schalldruckpegelverlauf in etwa gleich.

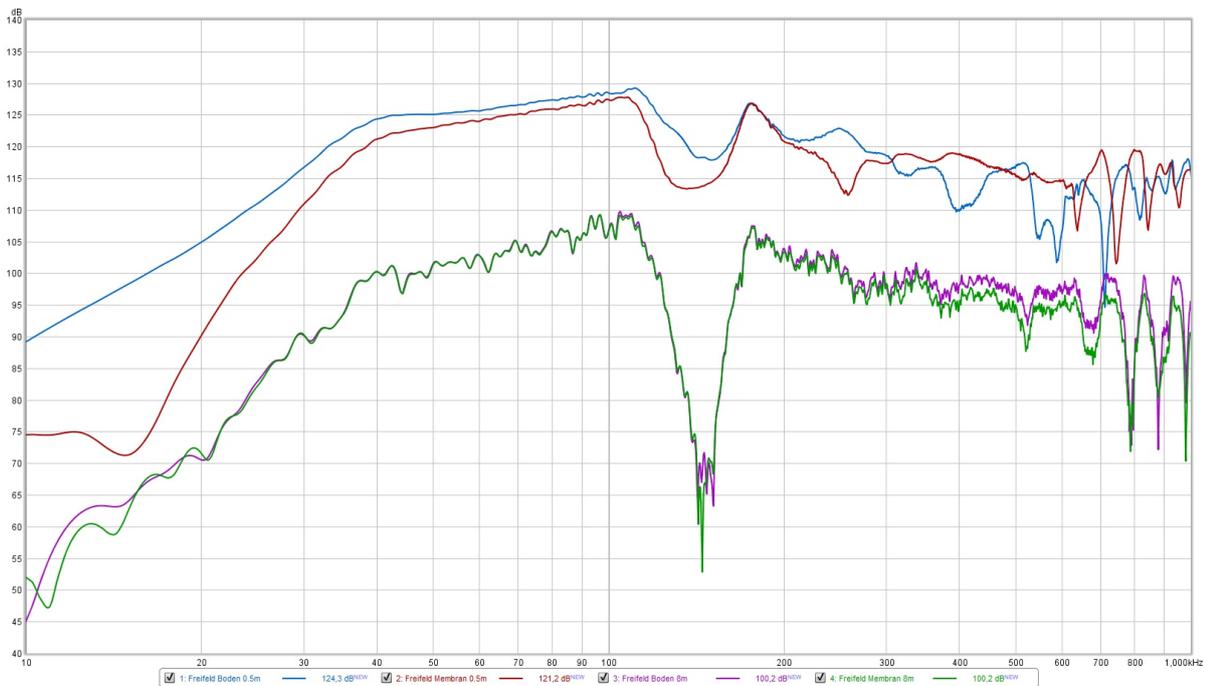


Abbildung 4.10: Vergleich Messung Membranzentrum und Boden, Abstand 0,5m und 8m

4.2.4 Vergleich Simulation und Messung

Abbildung 4.11 zeigt den Vergleich der Messung zur Simulation. Die Daten der Simulation von AJHorn wurden exportiert und in REW importiert. Sowohl die Simulation als auch die Messung sind unter den gleichen Bedingungen durchgeführt worden: Eingangsspannung von 28,3V, elektrische Leistung von 100W und Messmikrofon auf Höhe des Treibers mit 1m Entfernung vom Zentrum der Lautsprechermembran. Wie ersichtlich, ist die Messung, wegen den nicht idealen Messbedingungen, etwas welliger als die Simulation.

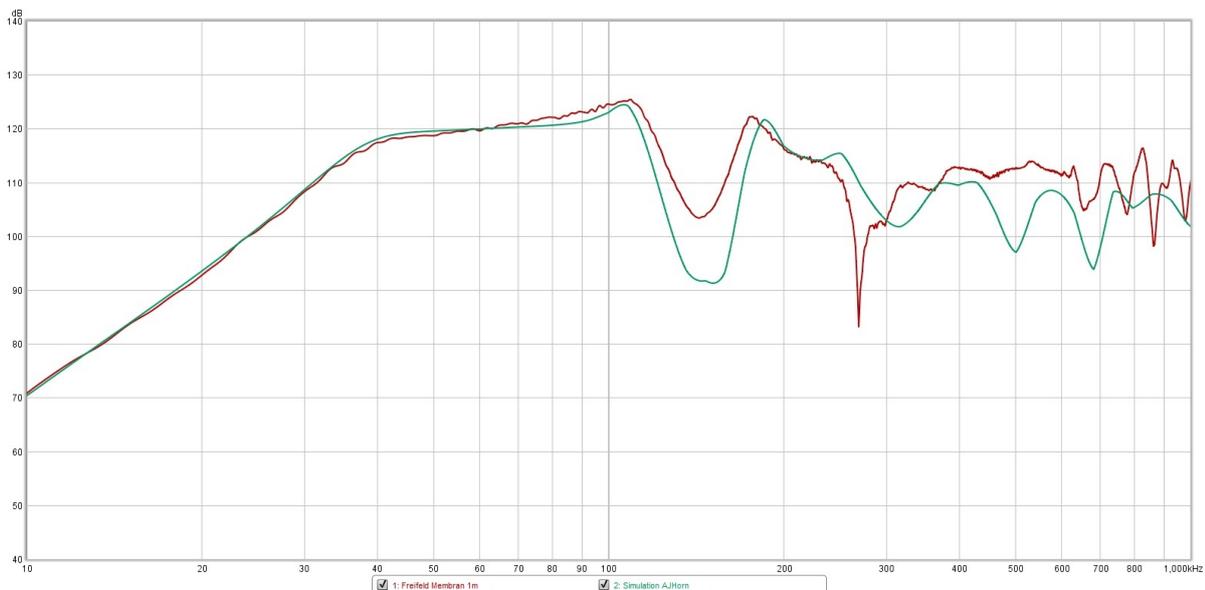


Abbildung 4.11: Vergleich Messung und Simulation

4.2.5 Schalldruckabnahme vs. Entfernung

Bei tiefen Frequenzen wurde aufgrund der Kolbenmembrantheorie und des Beugungsverhaltens des Schalls erwartet, dass der Lautsprecher wenig bis gar keinen Schall bündelt. Es sollte bei dieser Messung überprüft werden, ob der Schallpegel beim Hornlautsprecher weniger als die, für Punktschallquellen üblichen, 6dB bei Entfernungsverdopplung abnimmt. Die Messpositionen am Vorplatz entsprechen den in der Abbildung 4.5 dargestellten Messpositionen MP1 bis MP5.

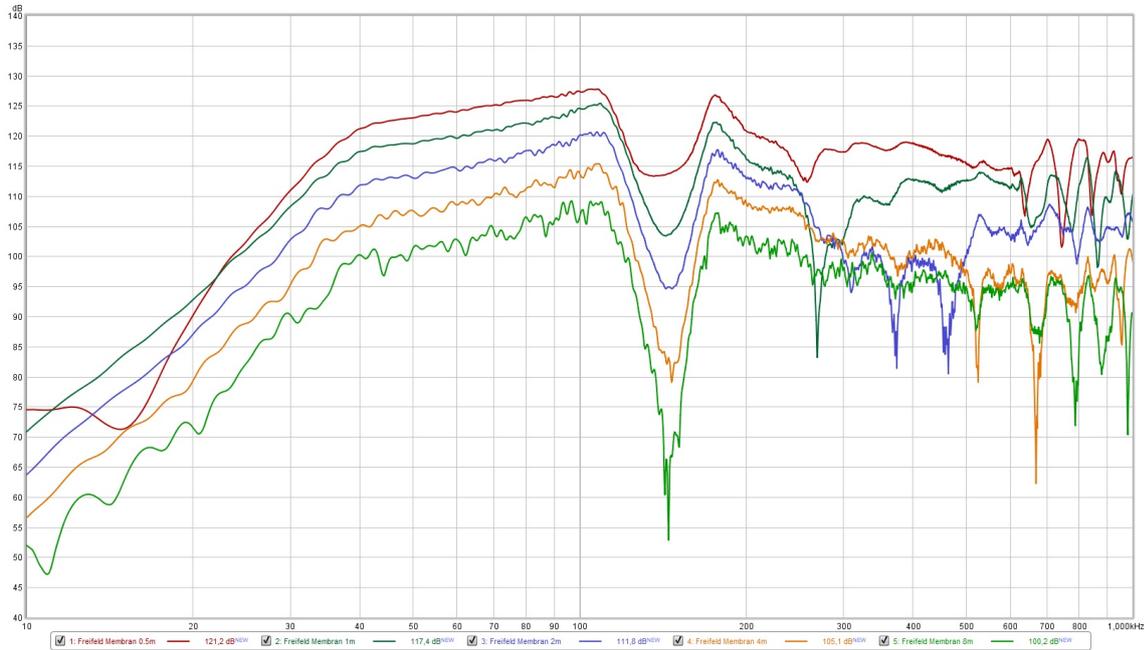


Abbildung 4.12: Messung der Schalldruckabnahme vs. Entfernung

Abbildung 4.13 zeigt die Schalldruckabnahme beim Lautsprecher bei einer Frequenz von 80 Hz, verglichen mit der üblichen 6dB-Abnahme bei Entfernungsverdopplung. Wie ersichtlich, fällt die Abnahme des Schalldruckes beim Hornlautsprecher geringer aus.

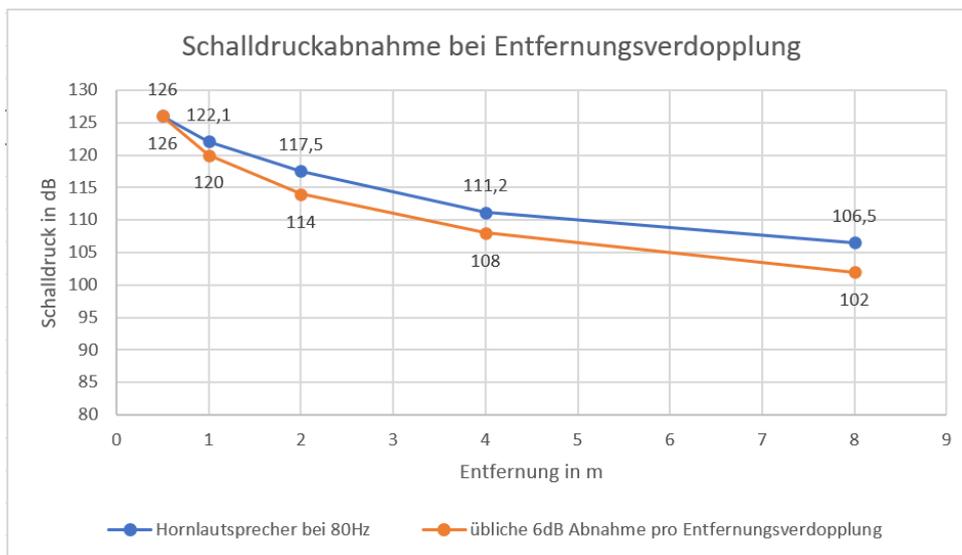


Abbildung 4.13: Darstellung der Schalldruckabnahme bei Entfernungsverdopplung

4.2.6 Richtcharakteristik

Zusätzlich sollte überprüft werden, wie das Abstrahlverhalten des Lautsprechers sich auf den Seiten und nach hinten verhält. Deshalb wurden die Messungen in einem Halbkreis um den Lautsprecher herum vorgenommen, wie im Abschnitt Messpunkte beschrieben. Die Messpositionen entsprechen den in der Abbildung 4.6 dargestellten Messpositionen MP1 bis MP7.

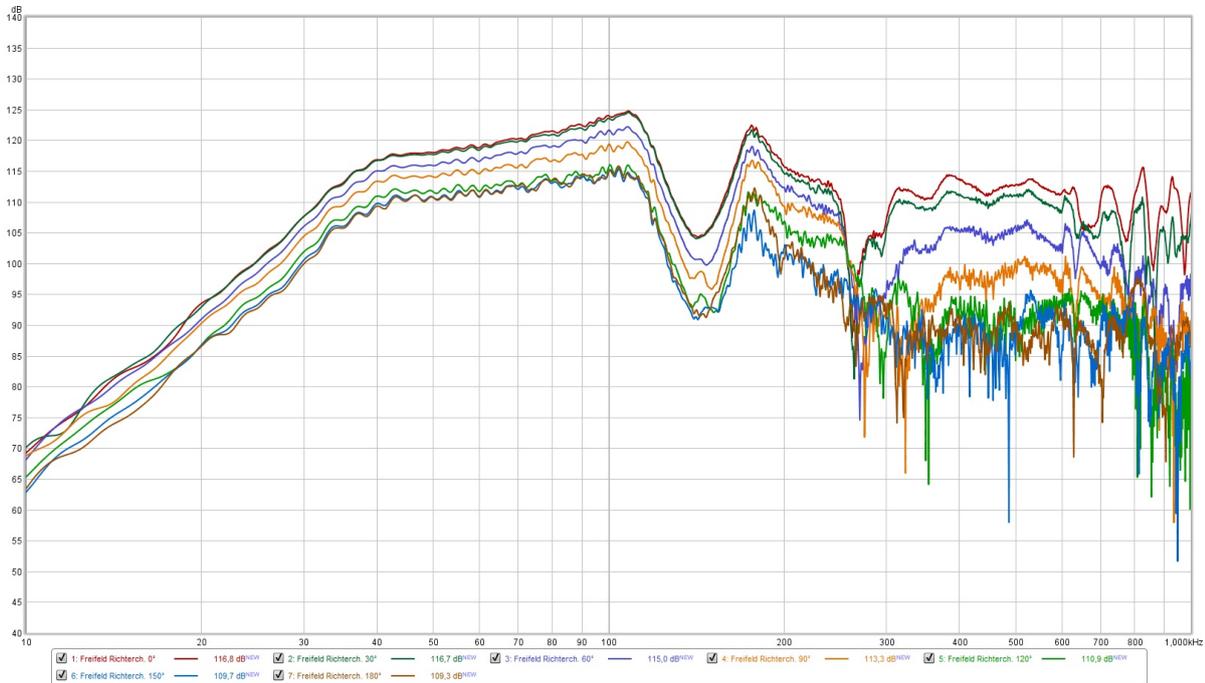


Abbildung 4.14: Messung der Richtcharakteristik

Wie ersichtlich, ist der Frequenzgang bei 0° und bei 30° bzw. bei 150° und 180° in etwa gleich. Nach vorne hin strahlt der Lautsprecher recht gleichmäßig ab, auf den Seiten gibt es einen durchschnittlichen Abfall von etwa 2dB pro 30° und nach hinten ist die Abstrahlung wieder gleichmäßig, jedoch mit einem Abfall von etwa 9 dB. Abbildung 4.15 zeigt das Polardiagramm mit der Richtcharakteristik des Lautsprechers bei drei verschiedene Frequenzen. Die Werte auf der senkrechten Achse entsprechen den dB-Werten.

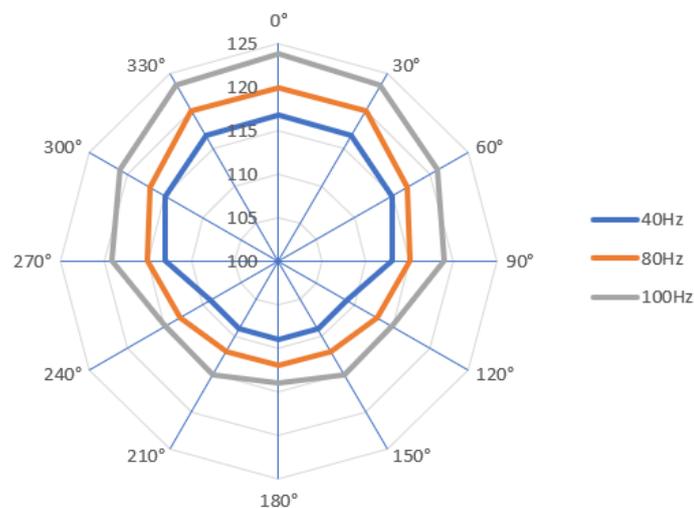


Abbildung 4.15: Polardiagramm Richtcharakteristik