

Toningenieur-Projekt

Lautsprecherentwicklung für das Elektroakustik Labor

Verfasser:

Benjamin Dietze & Daniel Deboy

Institut für Breitbandkommunikation
Technische Universität Graz

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



Betreuer:

Ao. Univ.-Prof. Dipl.-Ing. Dr. techn. Gerhard Graber
Dipl.-Ing. Holger Hiebel

Graz, den 10. Mai 2009

Einleitung

An der TU-Graz ist diese Lehrveranstaltung seit Wintersemester 2007 ein Pflichtfach für den Master Studiengang Elektrotechnik-Toningenieur. Sie ist als zwei-stündige Laborübung vorgesehen und wird als Block abgehalten. Inhalte der Laborübung sind die elektrische und akustische Messung an Lautsprecherchassis, der Entwurf und die Simulation von geschlossenen und ventilerten Lautsprechergehäusen, sowie einfacher Frequenzweichen.

Nach persönlichem Besuch der Laborübung im Wintersemester 2007 wurde uns angeboten den kompletten Laboraufbau in Form einer Projektarbeit zu erneuern. Die Arbeit beinhaltet folgende Punkte:

- Optimierung und Anpassung der Messumgebung auf die Messung mit der ARTA Software
- Auswahl neuer Laborchassis
- Entwurf und Konstruktion passender Laborgehäuse
- Konzeption eines Mehrwegesystems
- Einführung und Integration der Simulationssoftware LspCAD Pro
- Erneuerung des Laborskripts

Die vorliegende Dokumentation der Projektarbeit beginnt mit einem groben Überblick über die notwendigen theoretischen Grundlagen der Lautsprecherentwicklung. Anschließend wird die verwendete Messumgebung vorgestellt. Nach Beschreibung der Laborchassis folgt die Berechnung und Konstruktion der Gehäuse. Entsprechende Referenzmessungen wurden angefertigt.

Im weiteren Verlauf findet eine Diskussion des Mehrwegesystems statt. Hierbei wurde ein praktischer Ansatz gewählt, der nicht alle Ideale aus der Theorie zulässt.

Abschließend folgt eine Beschreibung der beiden Softwarepakete ARTA und LspCAD Pro.

Wir danken Herrn Prof. Graber und DI Holger Hiebel für die fachliche Unterstützung und diverse gedankliche Anregungen, sowie für die unkomplizierte organisatorische Abwicklung.



Wir wünschen dem Leser viel Vergnügen!

Inhaltsverzeichnis

I	Thiele-Small Parameter	1
1	Modell eines Lautsprecherchassis	1
2	Ersatzschaltbild unter Freiluftbedingungen	3
2.1	Elektrische Domäne	3
2.2	Mechanische Domäne	3
2.3	Akustische Domäne	3
2.4	Gesamtes Ersatzschaltbild unter Freiluftbedingungen	4
3	Impedanz-Frequenzgang	5
3.1	Betrag und Phase des Impedanz-Frequenzgangs	5
3.2	Gütefaktoren	6
3.2.1	Mechanische Güte $Q_{m,Mk}$	6
3.2.2	Elektrische Güte $Q_{e,Mk}$	6
3.2.3	Gesamtgüte der Membrankonstruktion $Q_{g,Mk}$	7
4	Liste der Modellparameter	8
5	Bestimmung der Parameter	8
5.1	Gleichstromwiderstand der Schwingspule R_s	8
5.2	Spuleninduktivität L_s	8
5.3	Freiluftresonanzfrequenz f_{oS}	8
5.4	Bestimmung der Gütefaktoren $Q_{m,Mk}$, $Q_{e,Mk}$, $Q_{g,Mk}$	9
5.5	Nachgiebigkeit der Membranaufhängung $C_{m,Ma}$	10
5.6	Äquivalenzvolumen der Membranaufhängung $V_{ä,Ma}$	10
5.7	Methoden zur Bestimmung von $m_{g,oS}$, $C_{m,Ma}$, $V_{ä,Ma}$	10
5.7.1	Methode der Zusatzmasse	11
5.7.2	Methode des Zusatzvolumens	12
II	Impedanz- und SPL-Messung	14
6	Messaufbau	14
6.1	Verwendete Hardware	14
6.1.1	Audio-Schnittstelle und Vorverstärker	14
6.1.2	Mess-Mikrofon	14
6.1.3	Leistungsverstärker	15
6.1.4	Messbox	15
6.1.5	Roundtrip Zeit	16
6.2	Referenzspannung für Messung	18
6.3	Einspielen des Lautsprechers	18
7	Impedanz-Frequenzgang-Messung	20
7.1	Messkette zur Impedanz-Frequenzgang-Messung	20
7.2	Lage und Befestigung des Chassis	20

8	Schalldruck-Frequenzgang-Messung	21
8.1	Messkette zur Schalldruck-Frequenzgang-Messung	21
8.2	Messprinzip - Zweikanalmessung	21
8.3	Raumakustische Einflüsse	21
8.4	Kombinierte Nah- und Fernfeldmessung	22
8.4.1	Fernfeldmessung mit Zeitfenster	22
8.4.2	Nahfeldmessung	23
8.4.3	Zusammenfügen von Fern- und Nahfeldmessung	23
8.5	Korrekturen	23
8.5.1	Skalierung auf Normabstand	23
8.5.2	Anpassen einer Bassreflexöffnung an Chassismembran	23
8.5.3	Nahfeldmessung an Fernfeld anpassen	24
8.5.4	Beugung an der Schallwand	24
III	Laborchassis	25
9	Visaton 20 cm Tieftöner GF200	25
9.1	Abmessungen	25
9.2	Thiele-Small Parameter	25
9.3	SPL-Frequenzgang	26
10	Visaton 17 cm Tiefmitteltöner AL170	27
10.1	Abmessungen	27
10.2	Thiele-Small Parameter	27
10.3	SPL-Frequenzgang	28
11	Visaton 25 mm Hochtוןkalotte G25FFL	29
11.1	Abmessungen	29
12	Vergleich mit dem Herstellerdatenblatt	29
13	Messung in der DIN-Schallwand	29
13.1	Visaton 20 cm Tieftöner GF200	30
13.2	Visaton 17 cm Tiefmitteltöner AL170	30
IV	Entwurf von Gehäusen	31
14	Geschlossene Gehäuse	31
14.1	Abstimmung des Gehäusevolumens	31
14.1.1	Kleines geschlossenes Gehäuse (hoher Güte)	32
14.1.2	Geschlossenes Gehäuse mittlerer Größe	32
14.1.3	Großes geschlossenes Gehäuse (geringer Güte)	33
14.2	Konstruktion der Laborgehäuse	35
14.2.1	Kleines geschlossenes Gehäuse (hoher Güte)	35
14.2.2	Geschlossenes Gehäuse mittlerer Größe	43
14.2.3	Großes geschlossenes Gehäuse (geringer Güte)	50
14.3	Berücksichtigung des Chassiseigen volumens	58
14.3.1	Kleines geschlossenes Gehäuse (hoher Güte)	59
14.3.2	Geschlossenes Gehäuse mittlerer Größe	59

14.3.3	Großes geschlossenes Gehäuse (geringer Güte)	60
15	Bassreflexgehäuse	61
15.1	Wiedergabeeigenschaften	61
15.2	Abstimmung/Fehlabstimmung	62
15.3	Alignments	64
15.4	Abstimmung des Laborgehäuses	65
15.5	Tunnelabmessung	66
15.5.1	Ideale Betrachtung	66
15.5.2	Realisierung in der Laborbox	67
15.6	Konstruktion des Laborgehäuses	69
V	Messung der Laborgehäuse	70
16	Geschlossene Gehäuse	70
16.1	Impedanzmessungen	70
16.1.1	Kleines geschlossenes Gehäuse (hoher Güte)	70
16.1.2	Geschlossenes Gehäuse mittlerer Größe	71
16.1.3	Großes geschlossenes Gehäuse (geringer Güte)	72
16.2	SPL - Messungen	72
16.2.1	Kleines geschlossenes Gehäuse (hoher Güte)	72
16.2.2	Geschlossenes Gehäuse mittlerer Größe	73
16.2.3	Großes geschlossenes Gehäuse (geringer Güte)	74
16.3	Einfluss von Dämmmaterial	75
16.3.1	Impedanzfrequenzgang bei „mitteldichter“ Dämmung	75
16.3.2	SPL - Frequenzgang bei „mitteldichter“ Dämmung	76
16.3.3	Impedanzfrequenzgang bei „hoher“ Dämmung	76
16.3.4	SPL - Frequenzgang bei „hoher“ Dämmung	77
17	Bassreflexgehäuse	79
17.1	Impedanzmessungen des Bassreflexgehäuses	79
17.1.1	Tunnellänge 15cm	79
17.1.2	Tunnellänge 25cm	80
17.1.3	Einfluss von Dämmmaterial	81
17.2	SPL - Messungen des Bassreflexgehäuses	83
17.2.1	Tunnellänge 15cm	83
17.2.2	Tunnellänge 25cm	84
17.2.3	Einfluss von Dämmmaterial	85
VI	Entwurf eines Mehrwegesystems	87
18	Planungsprozess	87
18.1	Entwurfskriterien	87
18.2	Chassiswahl	87
18.3	Gehäuseabstimmung	88
18.3.1	Abmessungen	88
18.3.2	Stopfen mit Dämmwolle	88
18.3.3	Bassreflex­tunnel	88

18.4	Passive Frequenzweiche	88
18.4.1	Berechnung von Butterworth Filtern 1. Ordnung	89
18.4.2	Berechnung von Butterworth Filtern 2. Ordnung	89
18.4.3	Berechnung der Übergangsfrequenzen	89
18.4.4	Berechnung von Schwingspulen-Impedanzkorrekturen	90
18.4.5	Berechnung von Saugkreisen	90
19	Aufbau des Systems in Boxsim	90
19.1	Projekt erstellen	91
19.2	Chassisdaten laden	91
19.3	Eintragen der Gehäusedimensionen	92
19.4	Bassreflex tunnel	94
19.5	Passive Frequenzweiche	95
19.5.1	Hoch- und Tiefpass 1. Ordnung	96
19.5.2	Vorwiderstand zur Dämpfung des Hochtöners	97
19.5.3	Impedanzkorrektur für den AL170	98
19.5.4	Saugkreis für die Resonanz der Membran des Al170	99
19.5.5	Hoch- und Tiefpass 2. Ordnung	100
19.5.6	Vergleich Weiche 1. und 2. Ordnung	102
20	Konstruktion	102
20.1	Gehäuse	102
20.2	Frequenzweiche	110
20.2.1	Schaltplan der fertigen Frequenzweiche	110
20.2.2	Aufbau der Weiche	110
21	Messungen	111
21.1	Frequenzgang der Frequenzweiche	111
21.2	SPL Verlauf der einzelnen Chassis im Gehäuse	112
21.3	SPL Verlauf des Systems mit Frequenzweiche	112
21.3.1	Hoch- und Tiefpass 1. Ordnung	113
21.3.2	Hoch- und Tiefpass 2. Ordnung	114
21.3.3	Filter 1. Ordnung vs. 2. Ordnung	114
21.3.4	Impedanzkorrektur für den AL170	115
21.3.5	Saugkreis für die Resonanz der Membran des Al170	116
21.3.6	Vorwiderstand zur Dämpfung des Hochtöners	116
21.4	Gestopft vs. Ungestopft	117
21.5	Richtcharakteristik	117
21.6	Polardiagramm	118
21.7	Sonogramm	119
22	Simulation des Systems in LspCAD Pro	120
22.1	Simulationsaufbau	120
22.1.1	Hochtonzweig	120
22.1.2	Tiefmitteltonzweig	121
22.2	Simulationsergebnisse	122
22.2.1	Simulation ohne Weiche	122
22.2.2	Simulation der Impedanzkorrektur	123
22.2.3	Simulation des Saugkreises	123
22.2.4	Simulation mit Hoch- und Tiefpass 1. Ordnung	124

22.2.5	Simulation mit Hoch- und Tiefpass 2. Ordnung	125
VII	Messen mit ARTA	126
23	LIMP - Impedanz	126
23.1	Messmethode	126
23.2	Einstellungen	126
23.3	Kalibrierung	128
23.4	Messung	128
23.5	Berechnung der Thiele-Small Parameter	128
23.5.1	Methode der Zusatzmasse	129
23.5.2	Methode des Zusatzvolumens	129
23.5.3	Tabelle der berechneten Parameter	130
23.6	Exportieren der Messdaten	131
24	ARTA - Impulsantwort und SPL Verlauf	132
24.1	Kalibrierung	132
24.1.1	Mikrofonkalibrierungsdatei	132
24.1.2	Kalibrierung des Messaufbaus	133
24.1.3	Verstärkungsfaktoren	135
24.2	Messung der Impulsantwort	135
24.3	Analyse und Bearbeitung	136
24.3.1	Einstellen des Zeitfensters für die Impulsantwort	136
24.3.2	DFT Analyse der Impulsantwort	137
24.3.3	Summieren mehrerer Messungen	137
24.3.4	Pegel skalieren	138
24.3.5	Beugungskorrektur (Baffle Step Korrektur)	138
24.3.6	Zwei Messungen im Frequenzbereich zusammenschneiden	138
24.3.7	Erstellen von Polardiagrammen und Sonogrammen	140
24.4	Exportieren von Messdaten	142
VIII	Simulation mit LspCAD Pro	143
25	Einführung	143
25.1	Das Hauptfenster „Main“	144
25.2	Das Projektfenster „Schema“	145
25.3	Das grafische Ausgabefenster „Graphs“	146
26	Simulation mittels Thiele & Small Parametern	147
26.1	Eingabe der T/S Parameter	150
26.2	Defintion des Gehäusevolumens	152
26.3	Änderung der Simulationseigenschaften	154
26.4	Gehäusemodellierung	155
27	Simulation mit Messdaten	160
27.1	Treibereinstellungen	162
28	Realisierung elektrischer Filter	164

Teil I

Thiele-Small Parameter

Zunächst möchten wir uns mit der Modellierung eines realen, dynamischen Wandlers beschäftigen. Dieses Wandlerprinzip ist seit vielen Jahren unverändert geblieben und bildet einen Standard in der Lautsprecherentwicklung. Andere physikalische Prinzipien, wie zB. der elektrostatische Wandler, sind als tatsächlich Bauform nur relativ selten zu finden. Lediglich der “Air Motion Transformer“ (AMT), eine Spezialform des elektrostatischen Prinzips, findet zunehmend Beliebtheit. Wir beschränken uns im Rahmen dieser Projektarbeit dennoch ausschließlich auf dynamische Wandler.

Neville Thiele und Richard Small haben mit der Veröffentlichung ihres Papers 1961 (Thiele, 1961) in Australien zum ersten Mal eine Konstruktionsvorschrift für die Dimensionierung von Lautsprechergehäusen anhand eines physikalischen Modells vorgestellt. Erst 1971 wurde das Paper international bekannt und bewirkte innerhalb kurzer Zeit einen Umschwung in der Lautsprecherindustrie. Sowohl die Chassishersteller als auch Entwickler kompletter Lautsprechersysteme setzen seitdem auf die von Thiele und Small zusammengefassten Parameter zur Beschreibung des Lautsprechers, um die physikalischen und klanglichen Eigenschaften zu optimieren.

1 Modell eines Lautsprecherchassis

Um objektive Aussagen über die Eigenschaften eines Lautsprechers machen zu können, ist es sinnvoll ein mathematisches Modell aufzustellen, welches zum Einen leicht verständlich ist und zum Anderen die Physik des Lautsprechers möglichst gut annähert. Erst durch die Parametrisierung eines Modells wird es möglich Simulationen durchzuführen und vorauszusagen, wie sich ein Lautsprecher verhalten wird. Generell gilt, je besser das Modell die Realität abbildet, desto näher werden die Simulationsergebnisse an der Realität liegen. Im Rahmen der Projektarbeit gehen wir von einem rudimentären Modell aus, wie es im Elektroakustik Skriptum (Graber, WS 2006/07) beschrieben wird.

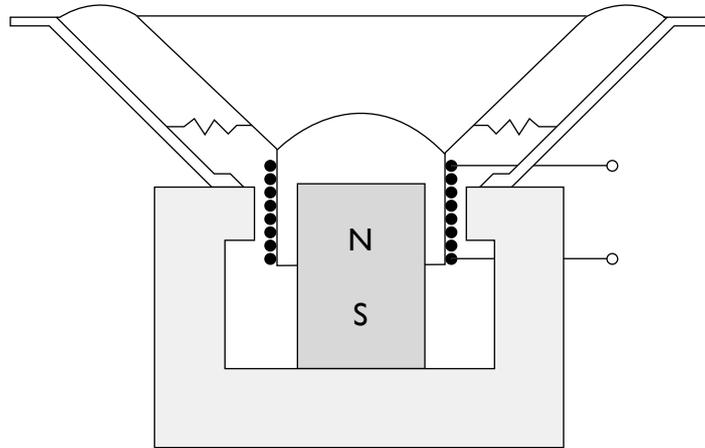


Abbildung 1: Skizze eines dynamischen Wandlers

In Abb. 1 ist der Querschnitt eines typischen Tiefton/Mittelton Lautsprecherchassis skizziert. Eine Schwingspule S liegt im Magnetfeld \vec{B} eines Permanentmagneten. Fließt ein Strom I durch die Spule, so wirkt auf sie eine Lorentzkraft F_{Lorentz} . An der Spule ist eine konusförmige Membran angebracht, die von Sicke und Spinne elastisch in Position gehalten wird. In der Mitte befindet sich meist eine Staubschutzkalotte, in manchen koaxial angeordneten Mehrwegesystemen wird hier der Hochtöner eingebaut, einige Hersteller bringen hier auch Radiatoren an, die die Abstrahlungseigenschaften verbessern sollen. Die mechanischen Eigenschaften der Membrankonstruktion lassen sich durch eine mechanische Masse m_{Mk} , die Federsteifigkeit der Membranaufhängung $s_{m,Ma}$, bzw. ihrem Kehrwert, einer Nachgiebigkeit $C_{m,Ma}$, sowie dem mechanischen Widerstand R_{Mk} beschreiben.

Die Membran dient zur Ankopplung an die Luft. Abhängig von der Einbauform kommen hier weitere Parameter der akustischen Domäne zu tragen.

Magnetfeld \vec{B} und Stromrichtung \vec{I} stehen senkrecht zueinander, daher gilt für die auf die Schwingspule der Länge l wirkende Lorentzkraft:

$$F_{\text{Lorentz}} = B \cdot l \cdot I$$

Das Produkt $B \cdot l$ gibt das Übersetzungsverhältnis von Strom zu resultierender Kraft in der Schwingspule an, es wird auch als Wandlerkonstante bezeichnet und ist in den meisten Herstellerangaben zu finden.

2 Ersatzschaltbild unter Freiluftbedingungen

2.1 Elektrische Domäne

Die Schwingspule wird im Ersatzschaltbild in Abb. 2 vereinfacht durch die Induktivität L_s und den Verlustwiderstand R_s berücksichtigt. Andere physikalische Effekte, wie Skineneffekt, Wirbelstrom und Hysterese werden in diesem Modell nicht berücksichtigt.

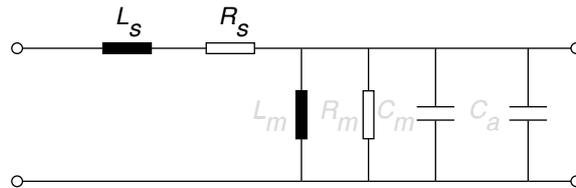


Abbildung 2: Elektrische Ersatzkomponenten der Schwingspule

2.2 Mechanische Domäne

Die mechanischen Eigenschaften der Membrankonstruktion (mechanische Masse m_{Mk} , die Nachgiebigkeit der Membranaufhängung $C_{m,Ma}$, sowie mechanischer Widerstand R_{Mk}) werden wie folgt in die elektrische Domäne übersetzt:

$$C_m = \frac{m_{Mk}}{(Bl)^2}$$

$$L_m = (Bl)^2 \cdot C_{m,Ma}$$

$$R_m = \frac{(Bl)^2}{R_{Mk}}$$

In Abb. 3 werden diese elektrischen Ersatzkomponenten der mechanischen Parameter in das Ersatzschaltbild eingesetzt.

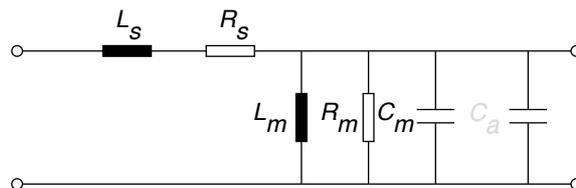


Abbildung 3: Elektrische Ersatzkomponenten der Membrankonstruktion

2.3 Akustische Domäne

Zu beachten ist, dass die Thiele-Small Parameter eines Lautsprecherchassis zunächst in einer Umgebung ohne Schallführung bestimmt werden. Dabei bewirkt die Ankopplung der Membran an die Luft eine Erhöhung der gesamten Masse der Membrankonstruktion um den Betrag der mitschwingenden Luftmasse.

$$m_{g,oS} = m_{Mk} + 2m_{oS}$$

Für die Bestimmung von m_{oS} wird eine zweite Impedanz-Frequenzgang Messung erforderlich sein, das Verfahren zur Bestimmung von m_{oS} wird in Kap. 5.7 genauer Erläutert.

In der elektrischen Ersatzschaltung (Abb. 4) kommt diese zusätzliche Masse als parallele Kapazität zum tragen.

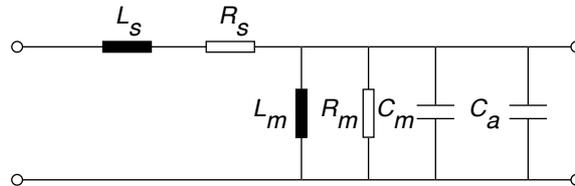


Abbildung 4: Elektrische Ersatzkomponenten der Luftankopplung

Die zusätzliche Kapazität ergibt sich zu

$$C_a = \frac{2m_{oS}}{(Bl)^2}$$

Wird das Chassis ohne Schallführung betrachtet, so kommt es hierbei zu einem akustischen Kurzschluss zwischen Vorder- und Rückseite der Membranoberflächen. Deshalb ist hier von evaneszenten Abstrahlungseigenschaften auszugehen und es entsteht kein zusätzlicher reeller Anteil einer Strahlungsimpedanz, wie dies beim Einbau in ein abgeschlossenes Volumen oder eine unendliche Schallwand der Fall wäre.

2.4 Gesamtes Ersatzschaltbild unter Freiluftbedingungen

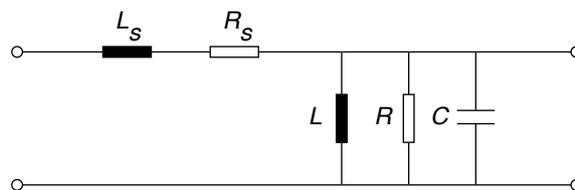


Abbildung 5: Ersatzschaltbild unter Freiluftbedingungen

Somit ergibt sich die Gesamtkapazität $C_{g,oS}$ zu

$$C = \frac{m_{g,oS}}{(Bl)^2}$$

$$L = L_m$$

$$R = R_m$$

3 Impedanz-Frequenzgang

Die Bestimmung aller Thiele-Small Parameter ist rein aus dem elektrischen Impedanz-Frequenzgang eines Lautsprechers möglich. Wir wollen deshalb als nächstes den typischen Impedanz Verlauf eines Tief- oder Mitteltonchassis betrachten, vernachlässigen hierbei zunächst nach wie vor die akustische Ankopplung an die Luft, da diese für die verschiedenen Einbauformen variiert.

3.1 Betrag und Phase des Impedanz-Frequenzgangs

Der Betrag der Eingangsimpedanz des Lautsprechers ist in Abb. 6 skizziert (Scheinwiderstand).

$$\underline{Z} = R_S + j\omega L_S + \frac{1}{\frac{1}{R} + j\omega C + \frac{1}{j\omega L}} = R_S + j\omega L_S + \frac{1}{\frac{R_{Mk}}{(Bl)^2} + \frac{j\omega m_{Mk}}{(Bl)^2} + \frac{1}{j\omega C_{m,Ma}(Bl)^2}}$$

Zu tiefen Frequenzen reduziert sich die Impedanz auf den reellen Wert des Verlustwiderstands der Schwingspule.

$$Z = R_S$$

Der Parallelschwingkreis zwischen L und C ergibt eine Resonanzfrequenz von:

$$\omega_{par.Res} = \sqrt{\frac{1}{LC}}$$

Die Impedanz an dieser Stelle ist ebenfalls reell:

$$Z = R_S + R$$

Aus L_S und C ergibt sich ein Serienschwingkreis mit einer weiteren Resonanzfrequenz

$$\omega_{ser.Res} = \sqrt{\frac{1}{L_S C}}$$

Die Impedanz ergibt sich hier wieder zu:

$$Z = R_S$$

Oberhalb $\omega_{ser.Res}$ bildet C näherungsweise einen Kurzschluss, die Impedanz ergibt sich hier also zu:

$$\underline{Z} = R_S + j\omega L_S$$

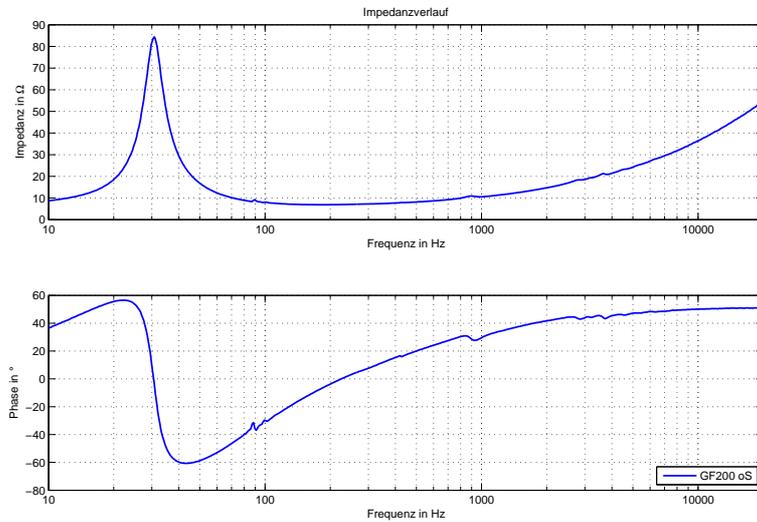


Abbildung 6: Typischer Impedanzverlauf eines Tieftonchassis

3.2 Gütefaktoren

Die Güte Q eines schwingungsfähigen Systems ist ein Verhältnismaß und gibt den Energieverlust im Verhältnis zur gespeicherten Energie jeweils pro Schwingungsperiode an (D'Appolito, 2. Auflage 2005). Wird mehr Energie pro Schwingungsperiode im System gespeichert als durch die Dämpfung verbraucht wird, dann wird der Wert für den Gütefaktor größer als 1. Für unser Lautsprechermodell bekommen wir also einen Gütefaktor für die mechanische sowie für die elektrische Seite. Die Gesamtgüte setzt sich aus diesen beiden Gütewerten zusammen.

3.2.1 Mechanische Güte $Q_{m,Mk}$

Betrachtet man nur die Reibungsverluste der Membranaufhängung, so ergibt sich die mechanische Güte der Membrankonstruktion zu:

$$Q_{m,Mk} = \frac{R}{X_m} = \omega_{oS}CR = \frac{R}{\omega_{oS}L}$$

3.2.2 Elektrische Güte $Q_{e,Mk}$

Betrachtet man nur die Spulenverluste, so ergibt sich die elektrische Güte der Membrankonstruktion zu:

$$Q_{e,Mk} = \frac{R_S}{X_m} = \omega_{oS}CR_S$$

Berücksichtigt man nun noch den gesamten Serienwiderstand $R_{seriell}$, der sich aus Innenwiderstand des Verstärkers, Widerstände der Kabel und Anschlus-

sterminals und Innenwiderstände von Bauteilen, die seriell geschaltet sind, zusammensetzt, so verändert sich die elektrische Güte wie folgt zu:

$$Q_e = Qe(1 + R_{\text{seriell}}/R_S)$$

3.2.3 Gesamtgüte der Membrankonstruktion $Q_{g,Mk}$

Die Gesamtgüte der Membrankonstruktion ergibt sich nun zu:

$$Q_{g,Mk} = \frac{Q_{e,Mk} \cdot Q_{m,Mk}}{Q_{e,Mk} + Q_{m,Mk}}$$

Bzw. mit Q_e die Gesamtgüte des Systems:

$$Q_g = \frac{Q_e \cdot Q_{m,Mk}}{Q_e + Q_{m,Mk}}$$

4 Liste der Modellparameter

In folgender Liste werden die für diese Projektarbeit benötigten Thiele-Small Parameter aufgeführt. Die Bezeichnung hält sich streng an das im Elektroakustik Skript (Graber, WS 2006/07) verwendete System. Typische internationale Bezeichnungen sind nachstehend angeführt.

$C_{m,Ma}$	Nachgiebigkeit der Membranaufhängung (C_{ms})
f_{oS}	Freiluftresonanzfrequenz (f_s)
L_s	Schwingspuleninduktivität (L_e)
m_{Mk}	Masse der Membrankonstruktion (M_{md})
m_{oS}	Masse der mitschwingenden Luft
$m_{g,oS}$	Gesamte bewegte Masse (M_{ms})
$Q_{e,Mk}$	Elektrischer Gütefaktor (Q_{es})
$Q_{m,Mk}$	Mechanischer Gütefaktor (Q_{ms})
$Q_{g,Mk}$	Gesamter Gütefaktor (Q_{ts})
R_s	Gleichstromwiderstand der Schwingspule (R_e)
R_{Mk}	Mechanischer Widerstand der Membrankonstruktion (R_{ms})
r_M	Membranradius
A_M	Effektive schallabstrahlende Membranfläche (S_d)
$V_{\dot{a},Ma}$	Luftäquivalenzvolumen (V_{AS})

5 Bestimmung der Parameter

5.1 Gleichstromwiderstand der Schwingspule R_s

Der Gleichstromwiderstand der Schwingspule ist jener Widerstand, der sich bei anlegen einer Gleichspannung U_{DC} mit dem resultierenden Strom I_{DC} zu $R_e = \frac{U_{DC}}{I_{DC}}$ ergibt. Er kann also zB. mit einem gewöhnlichem Multimeter an den Klemmen des Chassis gemessen werden. Hierbei werden auch alle Zuleitungswiderstände berücksichtigt, die in Reihe zu R_s hinzukommen. Sie sind jedoch sehr gering und können vernachlässigt werden.

5.2 Spuleninduktivität L_s

Die Schwingspuleninduktivität beeinflusst, wie wir schon gesehen haben, den Impedanz-Frequenzgang zu hohen Frequenzen maßgebend. Daher ist ihr Betrag für den weiteren Entwurf von Impedanzkorrekturen in der Frequenzweiche interessant. In der Regel wird L_S aus Betrag und Phase der Impedanzkurve bei $f = 1kHz$ bestimmt. Sie ergibt sich dort zu:

$$L_S = \frac{1}{2\pi 1000Hz} \cdot |Z_S| \cdot \sin(\varphi_{Z_S})$$

5.3 Freiluftresonanzfrequenz f_{oS}

Die Resonanzfrequenz für das Lautsprecherchassis ohne Schallführung f_{oS} ergibt sich zu:

$$f_{oS} = \frac{1}{2\pi} \sqrt{\frac{1}{LC}}$$

Sie kann direkt aus dem gemessenen Impedanz-Frequenzgang des Chassis abgelesen werden. Die Position ist leicht zu finden, wenn man den Phasengang betrachtet. An der Stelle der Resonanzfrequenz hat die Phase einen Null-Durchgang.

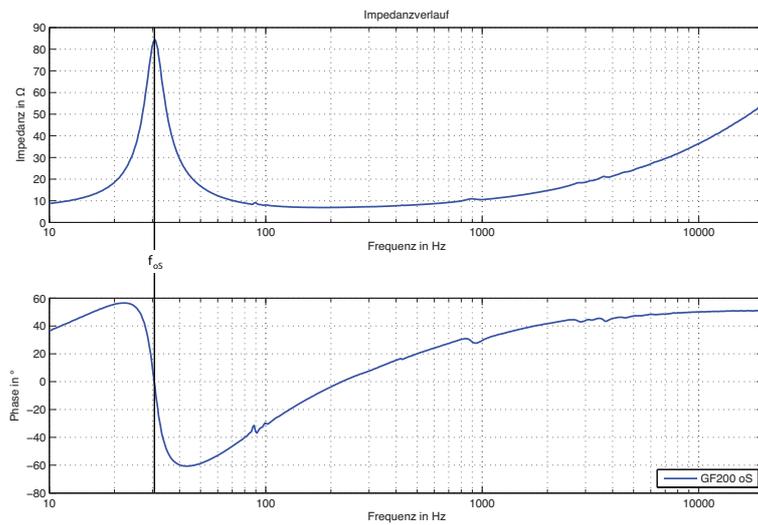


Abbildung 7: Bestimmung der Freiluftresonanzfrequenz

5.4 Bestimmung der Gütefaktoren $Q_{m,Mk}$, $Q_{e,Mk}$, $Q_{g,Mk}$

Die Gütefaktoren können aus einer Impedanz-Frequenzgang Messung nach D'Appolito (2. Auflage 2005, Kapitel 2.6) bestimmt werden.

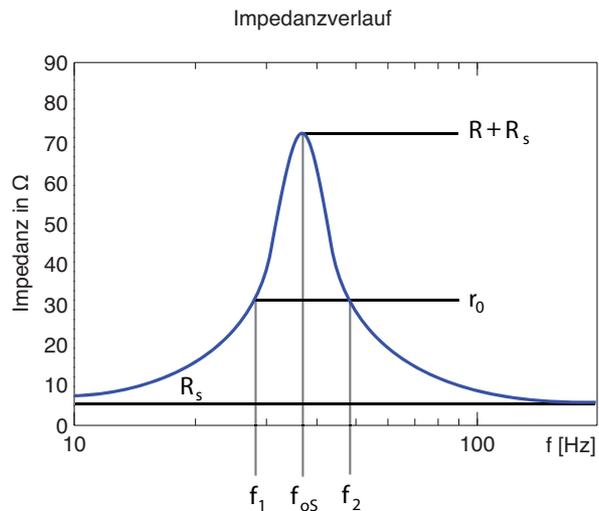


Abbildung 8: Bestimmung der Gütefaktoren

Da der Betrag der Impedanzkurve symmetrisch um Resonanzfrequenz f_{oS} ist, gilt für jedes Frequenzpaar f_1 und f_2 :

$$f_1 \cdot f_2 = f_{oS}^2$$

Wenn das Frequenzpaar so gewählt wird, dass für die Beträge der Impedanz $Z_{f_1} = Z_{f_2} = R\sqrt{r_0}$ gilt, so vereinfachen sich nach Thiele die Berechnungen für die Gütefaktoren folgendermaßen:

$$Q_{m,Mk} = \frac{f_{oS}\sqrt{r_0}}{f_2 - f_1}$$

Mit $\frac{Q_{m,Mk}}{Q_{e,Mk}} = \frac{R}{R_s}$ ergibt sich die elektrische Güte der Membrankonstruktion zu:

$$Q_{e,Mk} = \frac{Q_{m,Mk}}{r_0 - 1}$$

Für die Gesamtgüte folgt schließlich:

$$Q_{g,Mk} = \frac{Q_{m,Mk}}{r_0}$$

5.5 Nachgiebigkeit der Membranaufhängung $C_{m,Ma}$

Die Nachgiebigkeit der Membranaufhängung kann wie folgt aus der gesamten bewegten Luftmasse $m_{g,oS}$ berechnet werden:

$$C_{m,Ma} = \frac{1}{m_{g,oS} \cdot \omega_{oS}^2}$$

5.6 Äquivalenzvolumen der Membranaufhängung $V_{\ddot{a},Ma}$

Das Äquivalenzvolumen der Membranaufhängung gibt das Luftvolumen an, welches die gleiche akustische Nachgiebigkeit hat wie die Membranaufhängung. Es enthält keine neue Information, wird aber in der Industrie sehr gerne als Dimensionierungsparameter genutzt und ist deshalb meist an Stelle der Nachgiebigkeit der Membranaufhängung zu finden. Es ist definiert als:

$$V_{\ddot{a},Ma} = \rho c^2 A_M^2 C_{m,Ma}$$

5.7 Methoden zur Bestimmung von $m_{g,oS}$, $C_{m,Ma}$, $V_{\ddot{a},Ma}$

Es gibt zwei übliche Methoden, um die drei eng zusammenhängenden Parameter $m_{g,oS}$, $C_{m,Ma}$, $V_{\ddot{a},Ma}$ mit Impedanzmessungen zu bestimmen, die Methode der Zusatzmasse, bei der ein zweiter Impedanz-Frequenzgang mit einer auf der Membran angebrachten Zusatzmasse gemessen wird und die Methode des Zusatzvolumens, bei der das Chassis für eine zweite Messung in ein definiertes, luftdichtes Gehäuse montiert wird.

5.7.1 Methode der Zusatzmasse

Aus dem Ersatzschaltbild des realen Wandlers unter Freiluftbedingungen (Abb. 5) wiederholen wir noch einmal die Resonanzfrequenz des Parallelschwingkreises, der sich aus L und C bildet.

$$\omega_{oS} = \frac{1}{\sqrt{LC}} = \frac{1}{\sqrt{m_{g,oS} \cdot C_{m,Ma}}}$$

Wenn man nun eine zusätzliche Masse m_Z auf der Membran anbringt, z.B. in Form von Knetmasse, die um die Staubschutzkalotte angebracht wird, so sinkt die Resonanzfrequenz.

$$\omega_{oS,Z} = \frac{1}{\sqrt{m_{g,oS,Z} \cdot C_{m,Ma}}}$$

mit

$$m_{g,oS,Z} = m_{g,oS} + m_Z = m_{Mk} + 2m_{oS} + m_Z$$

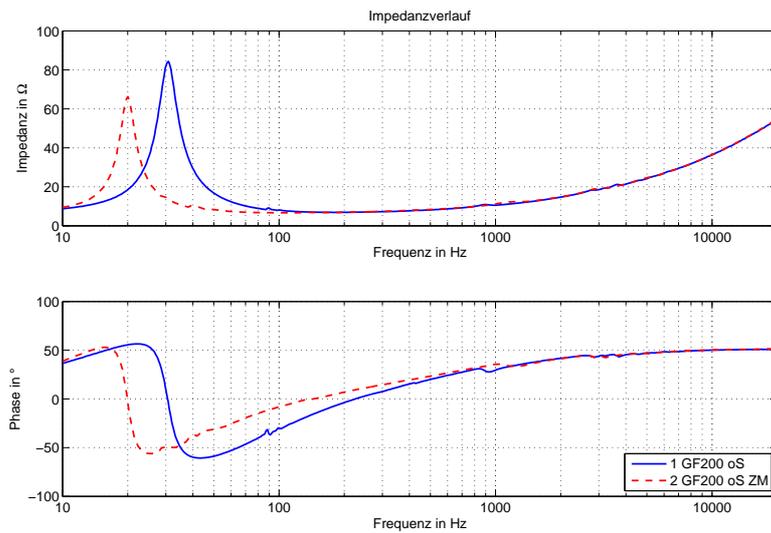


Abbildung 9: Impedanzverlauf mit Zusatzmasse

Bildet man nun das Verhältnis dieser beiden Resonanzfrequenzen, so lässt sich die gesamte bewegte Masse $m_{g,oS}$ sehr leicht berechnen.

$$\frac{\omega_{oS}}{\omega_{oS,Z}} = \frac{f_{oS}}{f_{oS,Z}} = \sqrt{\frac{M_{g,oS,Z}}{m_{g,oS}}}$$

$$\left(\frac{f_{oS}}{f_{oS,Z}}\right)^2 = \frac{m_{g,oS} + m_Z}{m_{g,oS}} = 1 + \frac{m_Z}{m_{g,oS}}$$

Für die gesamte bewegte Masse gilt:

$$m_{g,oS} = \frac{m_Z}{\left(\frac{f_{oS}}{f_{oS,Z}}\right)^2 - 1}$$

5.7.2 Methode des Zusatzvolumens

Das Lautsprecherchassis wird in ein geschlossenes Gehäuse des Volumens V_B eingebaut. Es wirkt nun zusätzlich die Federsteife des eingeschlossenen Volumens, dabei steigt die Resonanzfrequenz des Systems auf:

$$\omega_{gG} = \frac{1}{\sqrt{m_{g,gG} \cdot C_{m,g,gG}}}$$

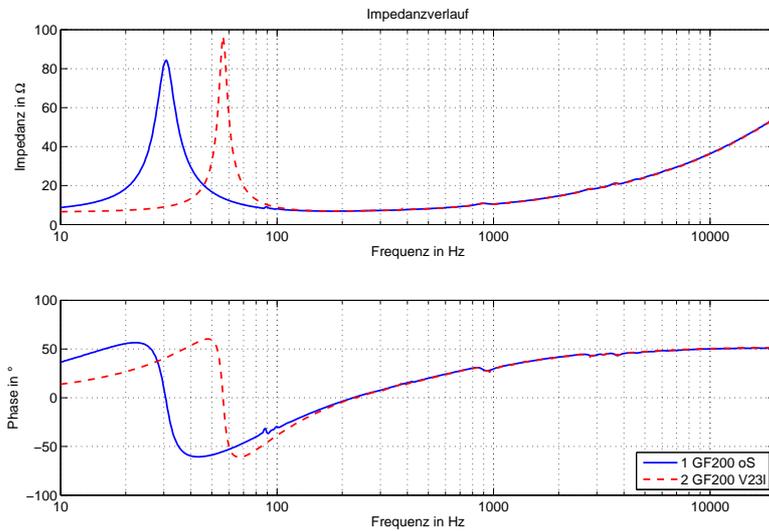


Abbildung 10: Impedanzverlauf mit Zusatzvolumen

Nach D'Appolito (2. Auflage 2005) sollte die Resonanzfrequenz gegenüber der Freiluftresonanzfrequenz um min. 50% steigen, um zuverlässige Ergebnisse zu liefern. Es gilt hier näherungsweise:

$$f_{gG} = \left(\sqrt{\frac{V_{\ddot{a},Ma}}{V_B} + 1} \right) f_{oS}$$

Somit kann diese Bedingung anhand der Herstellerangaben schnell geprüft werden.

Es werden nun zwei Impedanz-Frequenzgänge aufgezeichnet, einmal ohne Schallführung und anschließend im geschlossenen Gehäuse. Aus der Messung ohne Schallführung wird die Resonanzfrequenz f_{oS} und der elektrische Gütefaktor

$Q_{e,Mk}$ bestimmt, aus der Messung im geschlossenen Gehäuse die Resonanzfrequenz f_{gG} und der elektrische Gütefaktor $Q_{e,gG}$. Das genaue Äquivalenzvolumen ergibt sich damit zu:

$$V_{\ddot{a},Ma} = \left(\frac{f_{gG} \cdot Q_{e,gG}}{f_{oS} \cdot Q_{e,Mk}} - 1 \right) \cdot V_B$$

Wenn gewünscht, kann hieraus nun die Nachgiebigkeit der Membranaufhängung berechnet werden.

$$C_{m,Ma} = \frac{V_{\ddot{a},Ma}}{\rho c^2 A_M^2}$$

Und abschließend ebenso der Wert für die gesamte bewegte Masse:

$$m_{g,oS} = \frac{1}{C_{m,Ma} \cdot \omega_{oS}^2}$$

Teil II

Impedanz- und SPL-Messung

In diesem Kapitel werden wir die verwendete Messumgebung genauer vorstellen und einen Überblick über die verwendeten Messverfahren geben. Wir möchten dabei ebenso auf die in der Praxis auftauchenden Fragen und Probleme eingehen und untersuchen, welche Parameter in der Messkette eine ausschlaggebende Rolle spielen und welche nur wenig Einfluss auf das Messergebnis ausüben. Wir werden außerdem die für die Projektarbeit verwendete „Messnorm“ vorstellen.

6 Messaufbau

6.1 Verwendete Hardware

Sämtliche Messungen fanden rechnergestützt mit dem Software Paket ARTA unter Windows XP statt (siehe Teil VII). Für die Messung stand uns folgendes Equipment zur Verfügung:

6.1.1 Audio-Schnittstelle und Vorverstärker

Als A/D und D/A Umsetzer kam das Fireface 400 der Firma RME zum Einsatz. Es wurde als Audio-Schnittstelle über WDM Treiber direkt von ARTA angesprochen. Für die Messung von Impulsantworten wurde der interne Mikrofonvorverstärker der Schnittstelle genutzt.

6.1.2 Mess-Mikrofon

Als Messmikrofon wurde das Kleinmembran Kondensator Mikrofon TL4006 der Firma DPA verwendet. Für dieses Mikrofon steht eine aktuelle Kalibrierungskurve zur Verfügung.

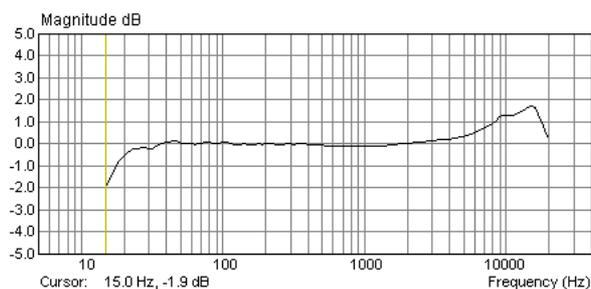


Abbildung 11: Kalibrierungskurve des TL4006 (SN 2110503)

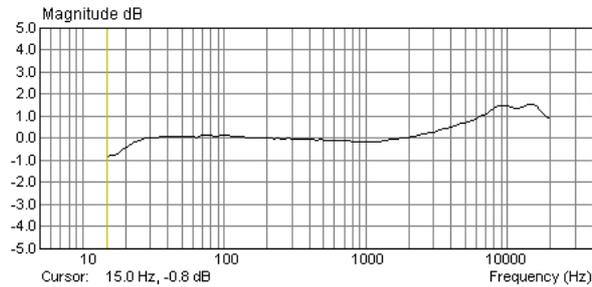


Abbildung 12: Kalibrierungskurve des TL4006 (SN 2110504)

6.1.3 Leistungsverstärker

Als Leistungsverstärker kam der regelbare Stereo Studio Verstärker RA-300 der Marke Alesis zum Einsatz.

6.1.4 Messbox

Um die Verwendung der Messumgebung zu erleichtern, wurde eine Messbox für den Betrieb mit ARTA nach einem Vorschlag des Entwicklers modifiziert und umgesetzt (Mateljan, 2006). Sie ermöglicht eine einfache Verbindung der Messhardware und stellt zudem die Möglichkeit bereit, zwischen den verschiedenen Betriebsmodi umzuschalten.

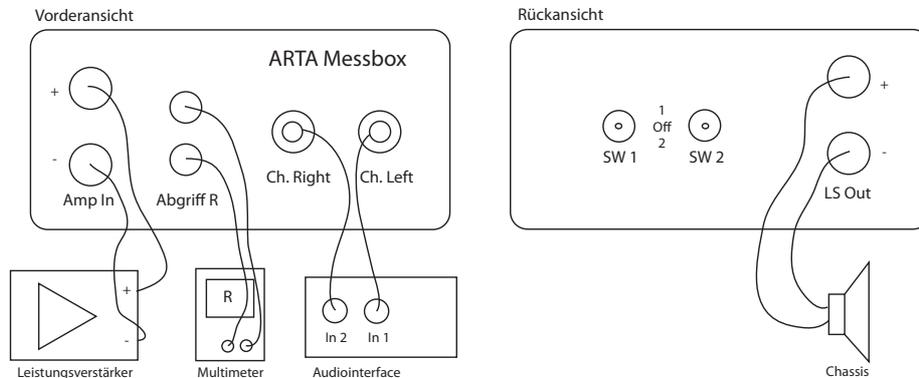


Abbildung 13: Front und Rückansicht der ARTA Messbox

- **Schalter SW1:** Schaltet zwischen Impedanzmessung (1) mit Referenzwiderstand und SPL Messung (2) um. Die Stellung **off** bewirkt ein Stummschalten des Lautsprecherausgangs.
- **Schalter SW2:** Schaltet zwischen Messung (1) und Kalibrierung (2) um. Die Stellung **off** bewirkt ein Stummschalten des linken Ausgangs. Für die SPL Messung hat dieser Schalter keine Bedeutung, da der linke Ausgang nicht genutzt wird.

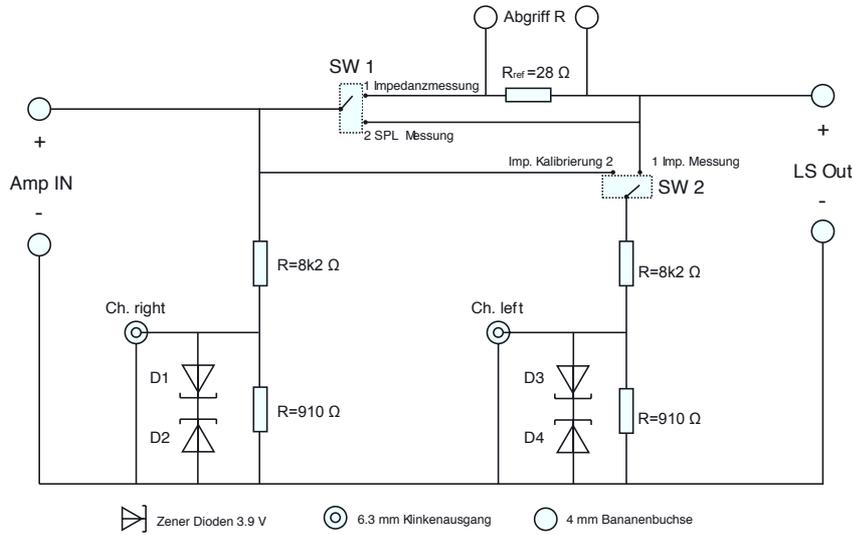


Abbildung 14: Schaltplan der ARTA Messbox

Mit den Zenerdioden $D_1 - D_4$ werden die Eingänge der Audioschnittstelle vor zu hohen Spannungen geschützt (maximal 3.9V). Die Masse des Leistungsverstärkers und der Audioschnittstelle ist durch R_m getrennt. Da der Ausgang des Leistungsverstärkers direkt in die Eingänge der Audioschnittstelle geleitet wird, wurde an diesen ein Spannungsteiler vorgeschaltet. Somit ist es möglich auch mit höheren Pegeln zu arbeiten ohne die Eingänge der Audioschnittstelle zu übersteuern.

Das Spannungsteilerverhältnis k ergibt sich aus den Widerständen R_1, R_2 bzw. R_3, R_4 und der Eingangsimpedanz Z_{in} der Audioschnittstelle, die hier mit $10k$ angenommen wurde.

$$k = \frac{R_2 \parallel Z_{in}}{R_1 + R_2 \parallel Z_{in}} = \frac{R_4 \parallel Z_{in}}{R_3 + R_4 \parallel Z_{in}} = \frac{910\Omega \parallel 10000\Omega}{8200\Omega + 910\Omega \parallel 10000\Omega} \simeq 0.0923 \quad (1)$$

Als Referenzwiderstand für die Impedanzmessung wird R_{ref} mit ca. 28Ω verwendet.

6.1.5 Roundtrip Zeit

Die Gesamtlatenz des Messsystems wurde mit Hilfe einer Loopback Messung mit folgendem Aufbau bestimmt.

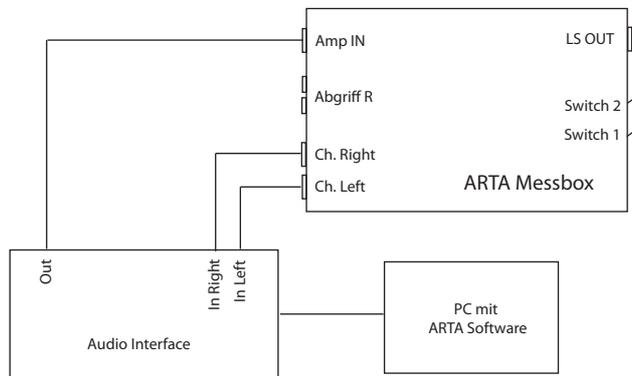


Abbildung 15: Messaufbau zur Loopback Messung

Unabhängig von der Puffereinstellung des Treibers ergab sich eine Roundtrip Zeit von $6,803ms$ bei Zweikanalmessungen und $6,848ms$ bei Einkanalmessungen in ARTA.

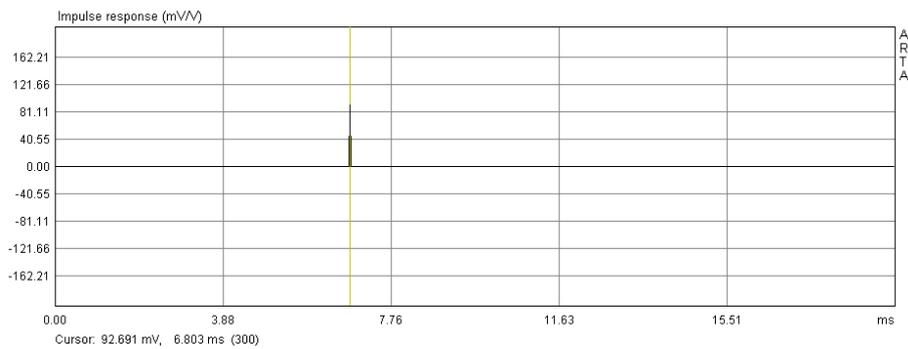


Abbildung 16: Roundtripzeit bei Zwekanalmessung

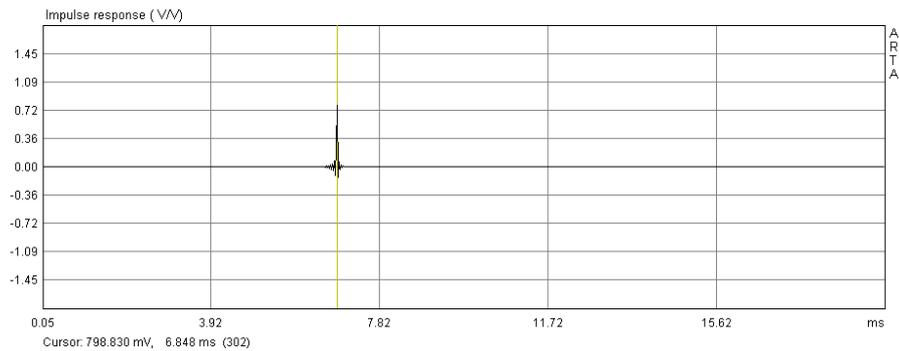


Abbildung 17: Roundtripzeit bei Einkanalmessung

6.2 Referenzspannung für Messung

Die in Teil I vorgestellten Parameter sind Kleinsignalparameter. Ein Lautsprecher agiert nur in einem sehr kleinen Hubbereich der Membran annähernd linear, dieser Bereich darf bei der Messung nicht überschritten werden, sonst würde das verwendete Modell nicht korrekt beschrieben werden. Auf der anderen Seite sollte aber auch eine realistische Situation bei der Messung nachempfunden werden, d.h. die bei der Messung angelegte Spannung sollte groß genug gewählt werden, um für eine Hörsituation brauchbare Schallpegel zu erzeugen.

Eine international festgelegte Norm für die bei einer Lautsprechermessung anzulegende Spannung existiert derzeit nicht. Wie wir rausgefunden haben hat jeder Hersteller hier seine eigene Philosophie und demzufolge auch eine eigene Messreferenz, die innerhalb des Unternehmens jedoch eingehalten werden muss, um die Vergleichbarkeit und Konsistenz der Daten zu gewährleisten.

Aus diesem Grund haben wir uns für die Projektarbeit eine einzuhaltende Messreferenz geschaffen, die für das Elektroakustik Labor an der Technischen Universität Graz ebenfalls einzuhalten ist, um die Reproduzierbarkeit unserer Messergebnisse zu gewährleisten. Sie gilt sowohl für die Impedanz- als auch Schalldruck-Frequenzgang Messung.

Es soll mit 1 Watt Leistung bezogen auf die Nennimpedanz des Chassis gemessen werden. Da im Messaufbau grundsätzlich mit dem Konstantspannungsverfahren gemessen wird, ist diese Bedingung für die angelegte Ausgangsspannung des Verstärkers bei angeschlossener Last (Widerstand) zu erfüllen.

$$U_n = \sqrt{P \cdot Z_{Nennimpedanz}} = \sqrt{1Watt \cdot Z_{Nennimpedanz}}$$

Für eine Nennimpedanz von 8Ω muss somit eine Spannung von $U_n = 2,83V$ am Verstärkerausgang erreicht werden.

6.3 Einspielen des Lautsprechers

Es ist durchaus sinnvoll das Chassis einmalig einzuspielen. Wir haben für ca. 12 Stunden einen 10 Hz Sinuston mit mittlerem Hub angelegt. Die Messung fand an einem fabrikneuen AL170 Chassis statt. Nach dem Einspielvorgang haben wir das Chassis über 2 Stunden abkühlen lassen, um einen Einfluss durch Erwärmung zu vermeiden. Die Resonanzfrequenz wanderte um ca. 4% nach unten.

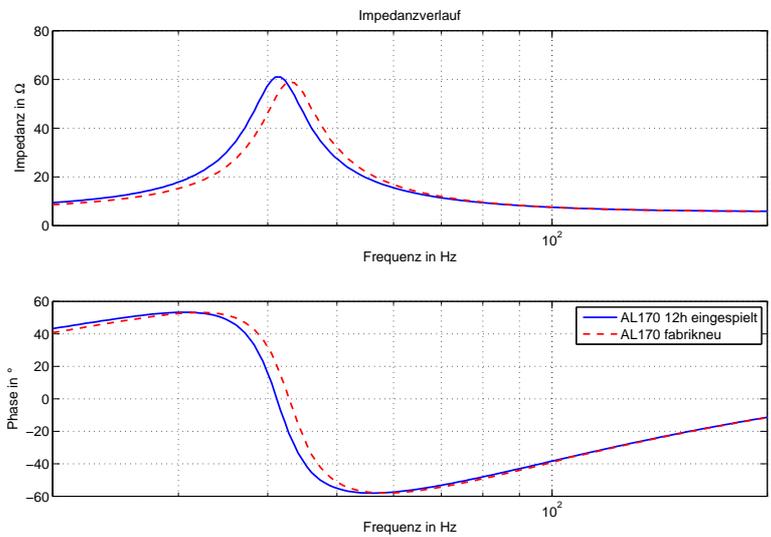


Abbildung 18: Vergleich vor und nach 12 stündigem Einspielen

Abb. 19 zeigt einen Vergleich von zwei Messungen, die vor und nach dem Einspielen von ca. 5min bei einem 10Hz Sinuston mit maximaler Auslenkung der Membran gemacht wurden.

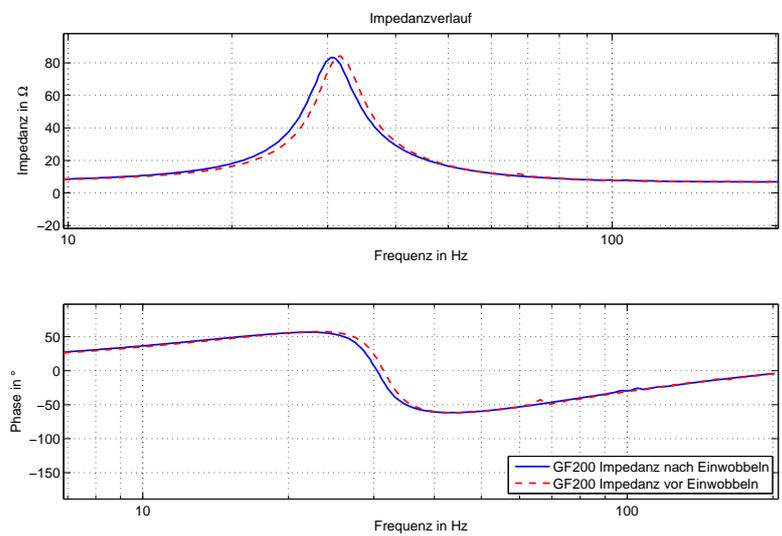


Abbildung 19: Vergleich vor und nach Einwobbelvorgang

Durch die Erwärmung des Chassis beim Einspielvorgang hat sich die Resonanzfrequenz um ca. 4% nach unten verschoben.

Es ist daher durchaus sinnvoll ein neues Chassis einmalig über einen langen Zeitraum einzuspielen. Für die Messung der T/S Parameter ist ein Einspielen von je 5 min ebenfalls praktikabel, da es der reellen Situation des Musikhörens weitaus besser entspricht, als die Messung im kalten Zustand. Eine längere Einspielphase hat zu keiner weiteren Veränderung mehr geführt.

7 Impedanz-Frequenzgang-Messung

7.1 Messkette zur Impedanz-Frequenzgang-Messung

Der Messaufbau ist gemäß folgender Abbildung herzustellen:

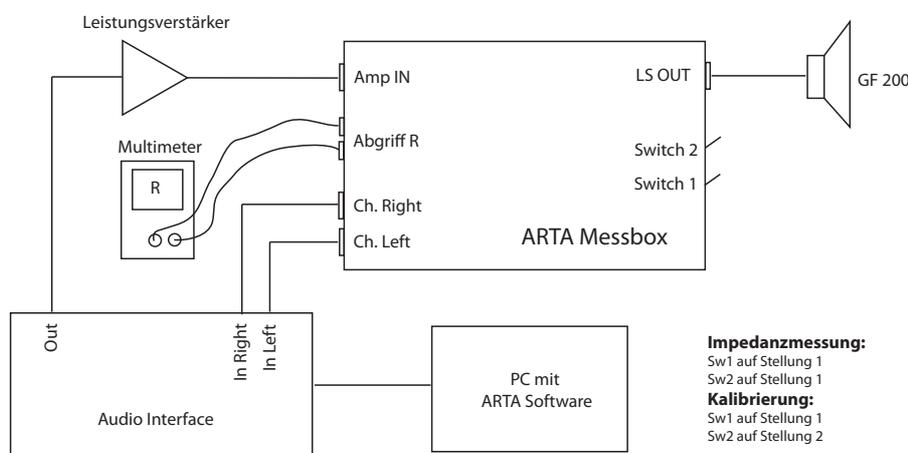


Abbildung 20: Messaufbau für Impedanzmessungen mit LIMP

Für die Messung wird die Spannung U_1 vor und U_2 nach dem Referenzwiderstand R_{ref} gemessen. Die frequenzabhängige Impedanz ergibt sich zu:

$$Z(f) = \frac{U_2(f)}{U_2(f) - U_1(f)} R \quad (2)$$

7.2 Lage und Befestigung des Chassis

Zur Impedanzmessung unter Freiluftbedingungen wurden die Lautsprecherchassis in einem Messinggestell eingespannt, so dass die Membran vertikal stand. Im Laufe der Projektarbeit wurden auch Messungen in horizontaler Position, sowie bei Auflage auf einem Schaumstoffuntergrund gemacht. Der Einfluss wurde stets überprüft und war vernachlässigbar klein. Wichtig ist, dass bei Chassis mit Ausgleichsöffnung auf der Rückseite, wie beispielsweise das GF200 von Visaton, diese freigehalten werden muss, um eine Luftzirkulation zu ermöglichen. Das Verdecken dieser Öffnung führt zu erheblichen Beeinflussungen der Messung und ist deshalb zu vermeiden.

8 Schalldruck-Frequenzgang-Messung

8.1 Messkette zur Schalldruck-Frequenzgang-Messung

Der Messaufbau ist gemäß folgender Abbildung herzustellen:

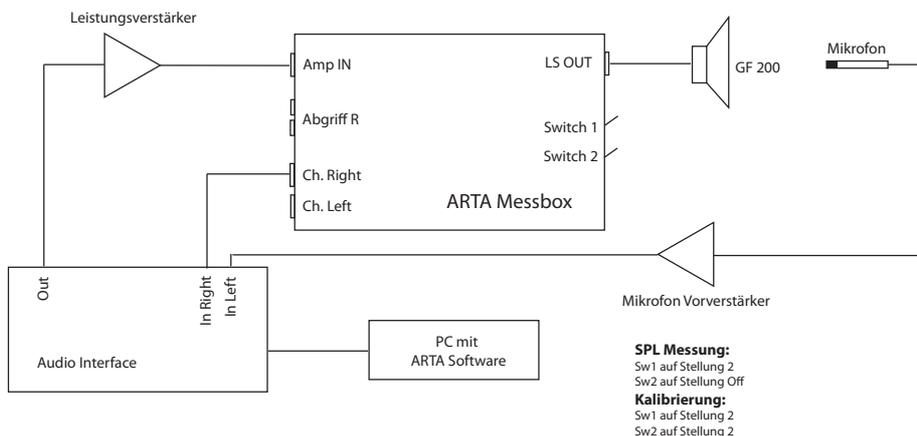


Abbildung 21: Messaufbau für die SPL Messung mit ARTA

8.2 Messprinzip - Zweikanalmessung

Um eine skalierte Messung zu erhalten, wurde als zweiter Referenzkanal das Signal des Leistungsverstärkers direkt zurückgeführt. ARTA kann dies bei Anregungssignalen wie Rauschen oder Sinussweep in einer 2 Kanalmessung berücksichtigen. Frequenzgang und Verstärkungsfaktor des Leistungsverstärkers sowie aller anderen Teile der Messkette bis zum Leistungsverstärker können so ausgeglichen werden. Nähere Informationen zu dem Messverfahren erhält man im Benutzerhandbuch von ARTA (Mateljan, 2008a).

8.3 Raumakustische Einflüsse

Die Messungen wurden im Aufnahmeraum des Tonstudios im Institut für Breitbandkommunikation gemacht. Die Raumabmessungen betragen:

$$l \times b \times h : 7,7m \times 6,3m \times 2,8m$$

Das Raumvolumen beträgt demnach $V \approx 135m^3$. Um Messungen über den gesamten Audio-Frequenzbereich ($20Hz - 20kHz$) machen zu können, die einer Freifeldmessung entsprechen, wird nach Struck (1994) eine Mindestlänge von $l_{min} = b_{min} = h_{min} = \frac{1,5c}{\lambda} = 25,8m$ für die Raumabmessungen benötigt. Des weiteren müsste die Länge eines $\lambda/4$ Keilabsorbers $l_{\lambda/4} = 4,25m$ betragen. Freifeldmessungen wie sie in einem reflexionsarmen Raum, der diese Bedingungen erfüllt, oder im Freien möglich wären, sind hier also nicht möglich. Daher wird das Verfahren der simulierten Freifeldmessung angewendet.

8.4 Kombinierte Nah- und Fernfeldmessung

Die Abdeckung des gesamten Audio-Frequenzbereichs wird bei der simulierten Freifeldmessung durch Kombination einer Nahfeldmessung und einer Fernfeldmessung erreicht, wobei die Fernfeldmessung durch ein Zeitfenster von Einflüssen durch Raumreflexionen befreit wird (Struck, 1994).

8.4.1 Fernfeldmessung mit Zeitfenster

Nach dem anlegen eines Zeitfensters auf die Messung der Impulsantwort soll nur noch das Direktsignal der Schallquelle vorhanden sein, so wie es bei einer echten Freifeldmessung der Fall wäre. Die Reflexionen werden durch das Zeitfenster ignoriert. Das Zeitfenster T wird durch die Vorgabe beschränkt, dass es das Direktsignal von der Schallquelle und die ersten Reflexionen durch den Raum trennt, es ergibt sich von der Wegdifferenz Δd von Direktschall d und 1. Reflexion d_R bei einer konstanten Schallgeschwindigkeit c zu:

$$\begin{aligned}\Delta d &= d_R - d \\ T &= \frac{\Delta d}{c}\end{aligned}$$

Die untere Grenzfrequenz, bis zu der die Messung gültig ist ergibt sich zu:

$$f_u = \frac{1}{T} = \frac{c}{\Delta d} = \frac{c}{d_R - d}$$

Lautsprecher und Messmikrofon bilden die Brennpunkte eines Rotationsellipsoids, der die nächste reflektierende Fläche tangiert. Für die Hauptachse h und die Nebenachse b gilt (ohne Herleitung):

$$\begin{aligned}b &= d_R = \sqrt{h^2 + d^2} \\ h &= \sqrt{d_R^2 - d^2}\end{aligned}$$

Eingesetzt in die Funktion für die untere Grenzfrequenz:

$$f_u = \frac{c}{\sqrt{h^2 - d^2} - d}$$

Mit der größten zu findenden Abmessung M der Schallquelle kann folgende Faustregel für den Mindestabstand einer Fernfeldmessung angegeben werden (Struck, 1994):

$$d > 3 \cdot M$$

Für die untere Grenzfrequenz gilt daher für den Grenzfall dieser Bedingung:

$$f_u = \frac{c}{\sqrt{h^2 + 9M^2} - 3M}$$

Die untere Grenzfrequenz bei der Fernfeldmessung mit Zeitfenster ist also eine Funktion der Raumgröße (nahegelegenste reflektierende Fläche) und der Schallquellenabmessung (Querdiagonale M)!

8.4.2 Nahfeldmessung

Für die Nahfeldmessung sollte das Messmikrofon sehr nah an die Membran des Lautsprechers gebracht werden. Eine Positionierung innerhalb $d = 0,11r_M$ resultiert zu Mess-Abweichungen kleiner als $1dB$.

Für ein Lautsprecherchassis in unendlicher Schallwand berechnet man die obere Grenzfrequenz für die Nahfeldmessung aus der Bedingung:

$$k \cdot r_M = 1$$
$$f_o = \frac{c}{2\pi \cdot r_M} = \frac{c}{\pi \cdot d_M}$$

Für geschlossene oder ventilierte Lautsprecher-Systeme gilt:

$$k \cdot \frac{M}{2} = 1$$
$$f_o = \frac{c \cdot 2}{2\pi \cdot M} = \frac{c}{\pi \cdot M}$$

8.4.3 Zusammenfügen von Fern- und Nahfeldmessung

Es sollte einen überlappenden Gültigkeitsbereich von Fern- und Nahfeldmessung geben ($f_u < f_o$), um die beiden Messungen nahtlos zusammenfügen zu können. Im Überlappungsbereich muss eine Übergangsfrequenz gewählt werden, an der die beiden Messungen nun zusammengefügt werden. Für die Nahfeldmessung muss zunächst noch eine Pegelkorrektur stattfinden, um sie an das Fernfeld anzupassen (siehe 8.5.3).

8.5 Korrekturen

8.5.1 Skalierung auf Normabstand

Entspricht der Abstand d der Fernfeldmessung nicht dem Normabstand $d_n = 1m$, so kann sie wie folgt an diesen angepasst werden:

$$\text{Skalierungsverhältnis} = \frac{d}{d_n}$$
$$\text{Skalierungsmaß} = 20 \log \left(\frac{d}{d_n} \right)$$

8.5.2 Anpassen einer Bassreflexöffnung an Chassismembran

Um eine Nahfeldmessung der Bassreflexöffnung mit der Öffnungsfläche $A_{BÖ}$ an die Membranfläche A_M der Chassismembran anzupassen, wird wie folgt skaliert:

$$\text{Skalierungsverhältnis} = \frac{A_{BÖ}}{A_M}$$
$$\text{Skalierungsmaß} = 20 \log \left(\frac{A_{BÖ}}{A_M} \right)$$

8.5.3 Nahfeldmessung an Fernfeld anpassen

Für Kugel-Strahler gilt (Struck, 1994, S.473):

$$\begin{aligned} \text{Skalierungsverhältnis} &= \frac{r_M}{4d} \\ \text{Skalierungsmaß} &= 20 \log \left(\frac{r_M}{4d} \right) \end{aligned}$$

Für Halbkugel-Strahler (unendliche Schallwand) gilt:

$$\begin{aligned} \text{Skalierungsverhältnis} &= \frac{r_M}{2d} \\ \text{Skalierungsmaß} &= 20 \log \left(\frac{r_M}{2d} \right) \end{aligned}$$

8.5.4 Beugung an der Schallwand

Misst man den Schalldruck-Frequenzgang eines Chassis ohne Schallführung, so treten durch den akustischen Kurzschluss ab einer unteren Grenzfrequenz f_{uG} Auslöschungen des Schalls auf. Unterhalb dieser Grenzfrequenz fällt der Schalldruckpegel mit $6dB/Oktave$ ab, solange man sich noch oberhalb der Resonanzfrequenz des Lautsprechersystems befindet (darunter würde schließlich der Pegel um $18dB/Okt$ abfallen).

Der kleinste Abstand des Lautsprechers zum Schallwandrand (Randmaß $x_{S,min}$) ist die maßgebliche Größe zur Bestimmung der unteren Grenzfrequenz f_{uG} :

$$\begin{aligned} x_{S,min} &= \frac{\lambda_{max}}{4} \\ f_{uG} &= \frac{c}{\lambda_{max}} = \frac{c}{4 \cdot x_{S,min}} \end{aligned}$$

Sollen auch die tiefsten abgestrahlten Frequenzen eines Chassis ohne Auslöschung wiedergegeben werden können, so gilt für die Abmessung einer Schallwand ohne rückseitiges Volumen:

$$M \equiv 2 * r_M$$

Dieser Effekt wird für die Messung in einer genormten Schallwand ausgenutzt, deren Abmessungen $135m \times 165m$ in der Norm DIN (2006) festgelegt sind.

Teil III

Laborchassis

9 Visaton 20 cm Tieftöner GF200

9.1 Abmessungen

Abbildung 22 zeigt die Abmessungen des verwendeten Laborchassis „GF200“ der Firma Visaton.

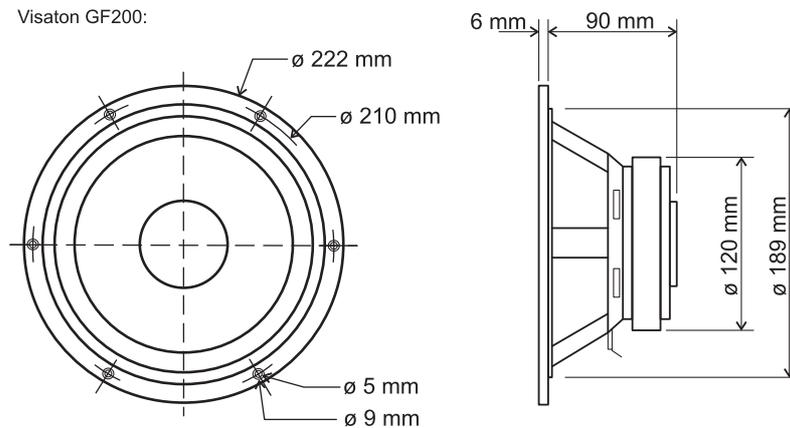


Abbildung 22: Laborchassis „Visaton GF200“

9.2 Thiele-Small Parameter

Nachfolgend ist die Impedanz-Frequenzgang Messung ohne und mit einer Zusatzmasse von $m_Z = 41,52g$ abgebildet.

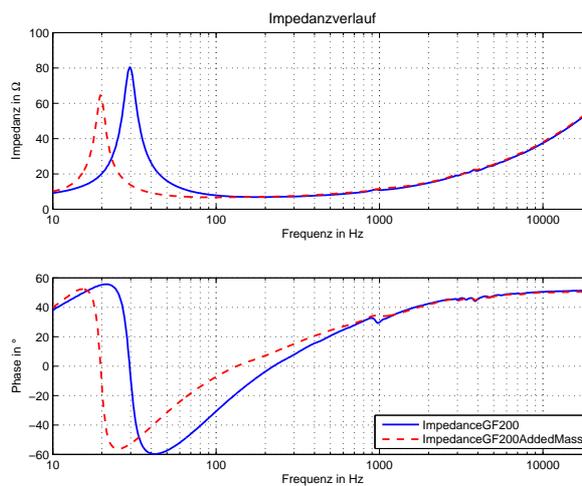


Abbildung 23: Impedanz-Frequenzgang Messung GF200, Zusatzmasse 41,52g

Tabelle 1 enthält die Ergebnisse der Thiele & Small Parameter Berechnung aus LIMP für das Laborchassis Visaton GF200:

Parameter	Messwerte	Herstellerangaben
f_{oS}	29.57 Hz	30.0 Hz
R_S	6.20 Ω	5.8 Ω
L_S	2.03649 mH	1.3 mH
$Q_{g,Mk}$	0.40	0.34
$Q_{e,Mk}$	0.43	0.37
$Q_{m,Mk}$	5.16	4.12
$m_{g,oS}$	30.96 g	25.0 g
R_{ms}	1.115637 kg/s	0.672983 kg/s
$C_{m,Ma}$	0.000935 m/N	0.001064 m/N
$V_{\ddot{a},Ma}$	60.07 l	68.0 l
A_M	213.82 cm ²	214.0 cm ²
Bl	9.099043 Tm	9.2 Tm

Tabelle 1: Thiele Small Parameter Visaton GF200

9.3 SPL-Frequenzgang

Der Frequenzgang des Chassis ohne Schallführung wurde im Fernfeld durchgeführt.

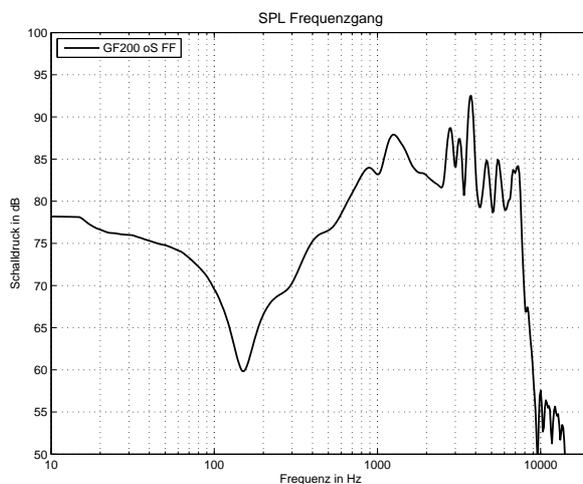


Abbildung 24: SPL-Frequenzgang GF200 ohne Schallführung

10 Visaton 17 cm Tiefmitteltöner AL170

10.1 Abmessungen

Abbildung 25 zeigt die Abmessungen des verwendeten Laborchassis „AL170“ der Firma Visaton.

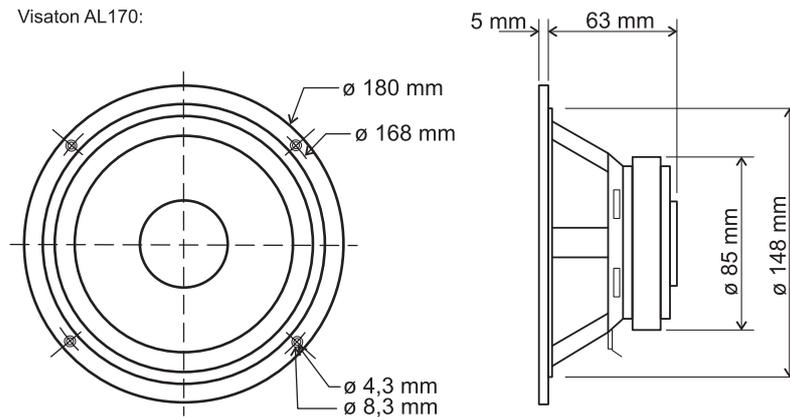


Abbildung 25: Laborchassis „Visaton AL170“

10.2 Thiele-Small Parameter

Nachfolgend ist die Impedanz-Frequenzgang Messung ohne und mit einer Zusatzmasse von $m_Z = 18,53g$ abgebildet.

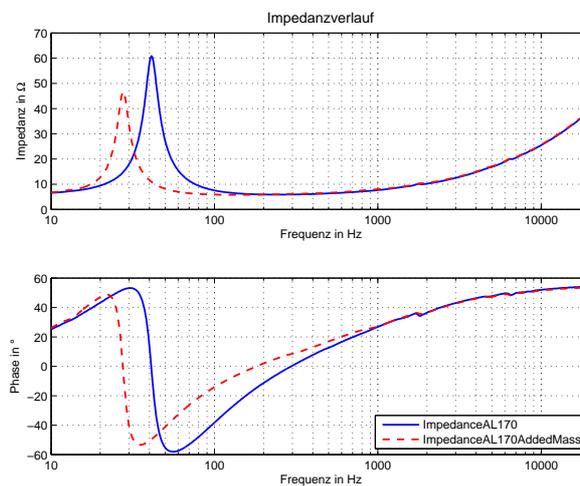


Abbildung 26: Impedanz-Frequenzgang Messung AL170, Zusatzmasse 18,53g

Tabelle 2 enthält die Ergebnisse der Thiele & Small Parameter Berechnung aus LIMP sowie den Vergleich mit den für das Laborchassis Visaton AL170:

Parameter	Messwerte	Herstellerangaben
f_{oS}	41.02 Hz	38.0 Hz
R_S	5.50 Ω	5.6 Ω
L_S	1.19606 mH	0.91 mH
$Q_{g,Mk}$	0.49	0.39
$Q_{e,Mk}$	0.54	0.43
$Q_{m,Mk}$	5.42	3.88
$m_{g,oS}$	14.15 g	13.0 g
R_{ms}	0.672983 kg/s	0.672983 kg/s
$C_{m,Ma}$	0.001064 m/N	0.001064 m/N
$V_{\dot{a},Ma}$	26.33 l	26.33 l
A_M	132.73 cm ²	132.73 cm ²
Bl	6.104248 Tm	6.9 Tm

Tabelle 2: Thiele Small Parameter Visaton AL170

10.3 SPL-Frequenzgang

Der Frequenzgang des Chassis ohne Schallführung wurde im Fernfeld durchgeführt.

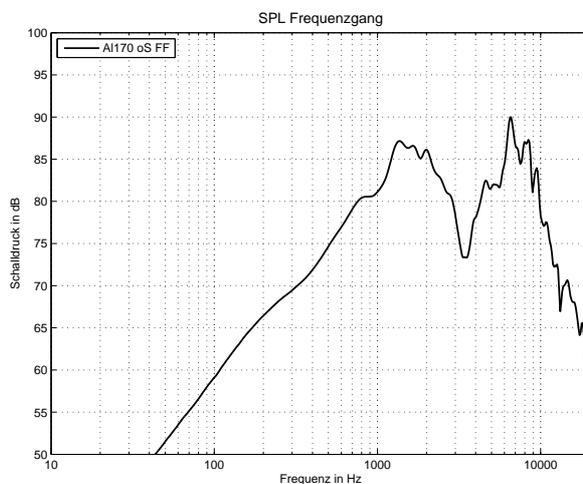


Abbildung 27: SPL-Frequenzgang Al170 ohne Schallführung

11 Visaton 25 mm Hochtönerkalotte G25FFL

11.1 Abmessungen

Abbildung 28 zeigt die Abmessungen des verwendeten Hochtöners „G25FFL“ der Firma Visaton.

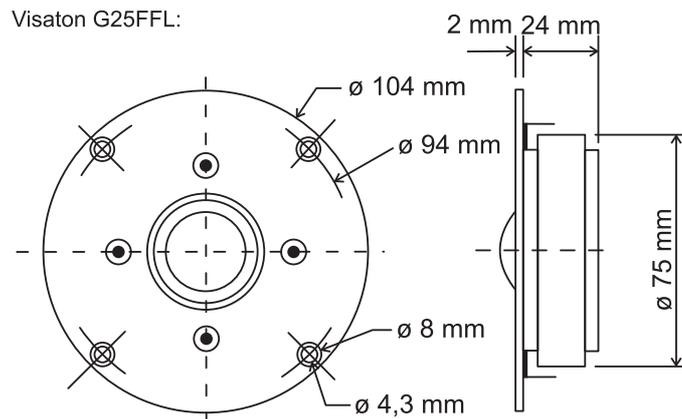


Abbildung 28: Laborchassis „Visaton G25FFL“

12 Vergleich mit dem Herstellerdatenblatt

Es zeigt sich, dass sich die aus dem Impedanzverlauf berechneten Werte stark von den Herstellerangaben unterscheiden. Allerdings ist zu beachten, dass die Parameterwerte im Einzelnen noch keine Aussage über Korrektheit einer Messung machen, da sich die Werte sehr leicht durch die Messbedingungen ändern, wie z.B. durch die angelegte Spannung. Erst im Zusammenspiel der Parameter bei den Dimensionierungsvorschriften für Gehäuse sollten sich einigermaßen reproduzierbare Werte ergeben. Es empfiehlt sich die eigens bestimmten Thiele-Small Parameter zu verwenden, da Serienstreuungen nicht unerheblich sein können. Im Vergleich zu den Herstellerwerten sollte sich bei der Dimensionierung allerdings keine grobe Abweichung ergeben.

13 Messung in der DIN-Schallwand

Zur Vermeidung des akustischen Kurzschlusses wurde die SPL-Frequenzgang Messung der beiden Chassis in einer Schallwand nach DIN (2006) wiederholt. Ein Holzeinsatz für die im Labor bestehende Wand wurde für beide Chassis konstruiert. Nachfolgend sind die SPL-Frequenzgänge im Vergleich zu den SPL-Frequenzgängen ohne Schallwand aufgeführt.

13.1 Visaton 20 cm Tieftöner GF200

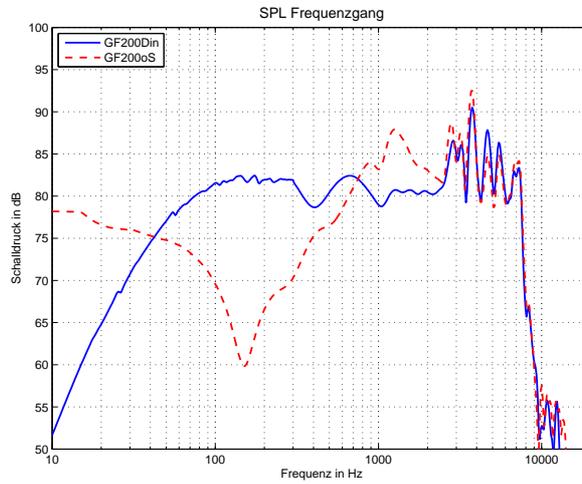


Abbildung 29: SPL-Frequenzgang GF200 in DIN Schallwand

13.2 Visaton 17 cm Tiefmitteltöner AL170

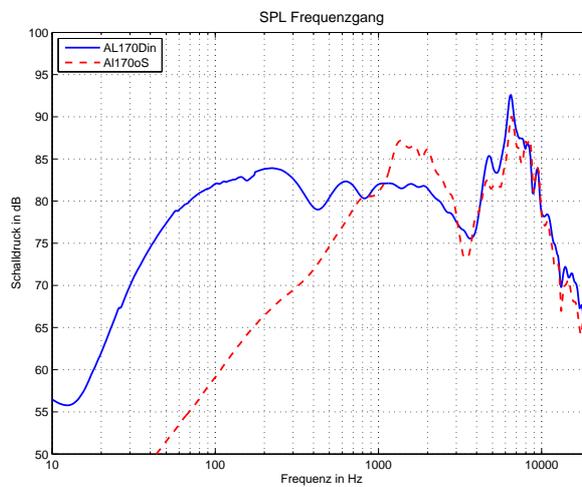


Abbildung 30: SPL-Frequenzgang Al170 in DIN Schallwand

Teil IV

Entwurf von Gehäusen

Durch die Wahl neuer Laborchassis war eine Neukonstruktion von Laborgehäusen nötig. Die Dimensionierung der vorher bestehenden Laborgehäuse hätte zum Einen nicht zu den neuen Laborchassis gepasst, zum Anderen waren die bestehenden Laborgehäuse materiell sehr abgenutzt und daher nicht mehr für einen guten Laboralltag zu gebrauchen.

14 Geschlossene Gehäuse

Unsere anfänglichen Überlegungen über neue Dimensionierungsmöglichkeiten für das Laborchassis Visaton GF200 führte uns sehr schnell zur Idee geschlossene Gehäuse/Chassis - Kombinationen verschiedener Güten zu realisieren. Der Aspekt der Erweiterung des eigenen praktischen Horizonts, sowie die daraus zu erzielende didaktischen Wirkung bei Studenten der Lehrveranstaltung Elektroakustik Labor, vor allem auch bei einem abschließenden Hörversuch der geschlossenen Gehäuse, stand dabei im Vordergrund.

Letztendlich haben wir uns für die Konstruktion dreier geschlossener Gehäuse/Chassis - Kombinationen verschiedener Gesamtgüte $Q_{g,gG}$ entschlossen.

14.1 Abstimmung des Gehäusevolumens

Grundlage folgender Berechnungen stellen die in Kapitel III in Tabelle 1 vorgestellten (selbst gemessenen) Thiele & Small Parameter dar.

Nach Graber (WS 2006/07, Kapitel 7.2) gilt für das äquivalente Luftvolumen des geschlossenen Gehäuses bei der gewünschten Gesamtgüte näherungsweise:

$$V_{\tilde{a},gG} \approx \frac{V_{\tilde{a},Ma}}{1,15 \cdot \left(\frac{Q_{g,gG}}{Q_{g,Mk}}\right)^2 - 1} \quad (3)$$

Weiters ergibt sich die Resonanzfrequenz des Chassis im geschlossenen Gehäuse aus:

$$f_{gG} \approx \frac{Q_{g,gG}}{Q_{g,Mk}} \cdot f_{uS} \quad (4)$$

Zur Vermeidung von Mehrfachresonanzen wird ein Seitenverhältnis des Gehäuses gemäß des „goldenen Schnitts“ empfohlen. Auf die drei Kantenlängen eines Quaders gerechnet ergibt sich somit folgendes Verhältnis:

$$0,681 : 1 : 1,681 \quad (5)$$

Es ist zu beachten, dass alle Volumensberechnungen folgender Kapitel reine Nettoangaben darstellen. Volumenskorrekturen und daraus resultierende Bruttovolumina nach Chassiseinbau werden bei späterer Betrachtungen in Kapitel 14.3 berücksichtigt. Dieses Vorgehen entspricht damit unseren Überlegungen bei der Gehäusekonstruktion, da wir von einer nur minimalen Veränderung der Gehäusegüte durch einen Chassiseinbau ausgegangen sind.

14.1.1 Kleines geschlossenes Gehäuse (hoher Güte)

Mit dem kleinsten geschlossenen Laborgehäuse wurde eine Gesamtgüte von $Q_{g,gG} \approx 1$ angestrebt. Diese Abstimmung entspricht der Chebychev Abstimmung zweiter Ordnung für geschlossene Gehäuse (auch C_2 genannt) (Dickason, 3. Auflage 2005, Kapitel 2). Eine warme, kräftige Wiedergabe, die von Audio - Werbefachleuten als „verkäuflich“ bezeichnet wird, ist zu erwarten. Weiters beschreibt Dickason (3. Auflage 2005, Kapitel 2), dass ein Überspringen von 1,5 dB bei der Resonanzfrequenz der Chassis/Gehäuse - Kombination zu erwarten ist. Es ist bereits hier zu erwähnen, dass die Klangqualität des Gehäuses von uns als eher „verwaschen“ und „detailarm“ kategorisiert wurde. Das kleine geschlossene Lautsprechergehäuse entspricht einer Gehäuse/Chassis - Kombination mit sogenannter „akustischer Aufhängung“, da die Nachgiebigkeit des Luftvolumens im Gehäuse um den Faktor drei oder noch geringer im Vergleich zur Membranaufhängung ist (Dickason, 3. Auflage 2005, Kapitel 2).

Nach Tabelle 1 und Formel 3 ergibt sich für das Gehäusevolumen:

$$V_{\ddot{a},gG} \approx \frac{60,07l}{1,15 \cdot \left(\frac{1,0}{0,40}\right)^2 - 1} \approx 9,7l$$

Weiterhin ist nach Formel 4 eine Resonanzfrequenz der Chassis/Gehäuse - Kombination von:

$$f_{gG} \approx \frac{1,0}{0,40} \cdot 29,57 \text{ Hz} \approx 74 \text{ Hz}$$

zu erwarten.

Die Kantenberechnung über den „goldenen Schnitt“ lässt sich zunächst über den Zwischenschritt der Berechnung der Kantenlänge eines Würfels mit $V_{\ddot{a},gG} \approx 9,7l$ ermitteln. Dabei ergibt sich eine Kantenlänge von $\sqrt[3]{9,7 \text{ dm}^3} \approx 2,133 \text{ dm}$. Die Anwendung der Formel 5 ergibt dann folgende Kantenlängen:

$$a \approx 1,318 \text{ dm} = 13,18 \text{ cm}$$

$$b \approx 2,133 \text{ dm} = 21,33 \text{ cm}$$

$$c \approx 3,452 \text{ dm} = 34,52 \text{ cm}$$

14.1.2 Geschlossenes Gehäuse mittlerer Größe

Mit dem geschlossenen Laborgehäuse mittlerer Größe wurde eine Gesamtgüte von $Q_{g,gG} \approx 0,71$ angestrebt. Diese Abstimmung entspricht nach Dickason (3. Auflage 2005, Kapitel 2) der Butterworth Abstimmung zweiter Ordnung für geschlossene Gehäuse (auch B_2 genannt). Ein maximal falcher Amplitudenverlauf mit minimaler unterer Grenzfrequenz der Gehäuse/Chassis - Kombination ist zu erwarten. Auch dieses Lautsprechergehäuse entspricht einer Gehäuse/Chassis - Kombination mit sogenannter „akustischer Aufhängung“, da die Nachgiebigkeit des Luftvolumens im Gehäuse um den Faktor drei oder noch geringer im Vergleich zur Membranaufhängung ist (Dickason, 3. Auflage 2005, Kapitel 2). In Anlehnung an die Einführung der Thiele-Small Parameter aus Kapitel 5 bedeutet dieser Sachverhalt mathematisch:

$$3 \cdot C_{m,gG} \leq C_{m,Ma}$$

Nach Tabelle 1 und Formel 3 ergibt sich für das Gehäusevolumen:

$$V_{\dot{a},gG} \approx \frac{60,07l}{1,15 \cdot \left(\frac{0,71}{0,40}\right)^2 - 1} \approx 22,9l$$

Weiterhin ist nach Formel 4 eine Resonanzfrequenz der Chassis/Gehäuse - Kombination von:

$$f_{gG} \approx \frac{0,71}{0,40} \cdot 29,57 \text{ Hz} \approx 52,5 \text{ Hz}$$

zu erwarten.

Die Kantenberechnung über den „goldenen Schnitt“ lässt sich zunächst über den Zwischenschritt der Berechnung der Kantenlänge eines Würfels mit $V_{\dot{a},gG} \approx 22,9l$ ermitteln. Dabei ergibt sich eine Kantenlänge von $\sqrt[3]{22,9 \text{ dm}^3} \approx 2,840 \text{ dm}$. Die Anwendung der Formel 5 ergibt dann folgende Kantenlängen:

$$a \approx 1,755 \text{ dm} = 17,55 \text{ cm}$$

$$b \approx 2,840 \text{ dm} = 28,40 \text{ cm}$$

$$c \approx 4,597 \text{ dm} = 45,97 \text{ cm}$$

14.1.3 Großes geschlossenes Gehäuse (geringer Güte)

Mit dem größten Laborgehäuse wurde eine Gesamtgüte von $Q_{g,gG} \approx 0,50$ angestrebt. Diese Abstimmung entspricht nach Dickason (3. Auflage 2005, Kapitel 2) der „kritisch bedämpften“ Abstimmung zweiter Ordnung für geschlossenen Gehäuse. Eine minimale untere Grenzfrequenz der Gehäuse/Chassis - Kombination mit maximaler Dynamik ist zu erwarten (Dickason, 3. Auflage 2005, Kapitel 2). Jedoch wird nach Dickason (3. Auflage 2005, Kapitel 2) der Wert $Q_{g,gG} \approx 0,50$ als übertrieben straff und überbedämpft angesehen. Dieses Lautsprechergehäuse entspricht einer Gehäuse/Chassis - Kombination nach dem Prinzip der „unendlichen Schallwand“, da die akustische Nachgiebigkeit des Luftvolumens im Gehäuse größer als die Nachgiebigkeit der Membranaufhängung ist (Dickason, 3. Auflage 2005, Kapitel 2).

Nach Tabelle 1 und Formel 3 ergibt sich für das Gehäusevolumen:

$$V_{\dot{a},gG} \approx \frac{60,07l}{1,15 \cdot \left(\frac{0,50}{0,40}\right)^2 - 1} \approx 75,4l$$

Das Volumen erschien uns allerdings zu groß und unpraktikabel zur Verwendung im Rahmen der Lehrveranstaltung Elektroakustik Labor. Weiters entstand aus der Überlegung so wenige Lautsprechergehäuse wie möglich bauen zu müssen die Idee, das größte Lautsprechergehäuse sowohl als geschlossenes Gehäuse, als auch mit annähernd gleicher Konfiguration als Bassreflexgehäuse nutzen zu können. Hierdurch entsteht die Möglichkeit des direkten Vergleichs (auch hörbar) zwischen geschlossenem Gehäuse und Bassreflexgehäuse.

Eine Möglichkeit Volumen einzusparen ist das Einbringen von Dämmmaterial in das geschlossene Gehäuse. Nach Graber (WS 2006/07, Kapitel 7.2) gilt:

$$V_{\dot{a},gG} = \kappa \cdot p_{=} \cdot A_m^2 \cdot C_{m,gG} = \frac{\kappa}{\psi} \cdot V_{gG} \quad (6)$$

,wobei $\kappa(Luft) = 1,4$ ist. Zur Berücksichtigung der Füllung des Lautsprechergehäuses gilt: $1 \leq \psi \leq 1,4$. Im Extremfall (100% Befüllung des Gehäusevolumens mit Dämmmaterial) tritt die „isotherme Nachgiebigkeit“ der Luft im Gehäusevolumen in den Vordergrund - der Faktor ψ entspricht dann $\psi \approx 1$.

Durch die Wahl des QB_3 Alignments zur Abstimmung des Volumens der Bassreflexbox (vgl. Kapitel 15) ist unser Gehäusevolumen möglichst bei $V_{gG} \approx 53,9l$ anzusiedeln (vgl. Kapitel 15.4).

Das Nettogehäusevolumen zum Erreichen der Gesamtgüte von $Q_{g,gG} \approx 0,50$ lässt sich nun laut Formel 6 durch vollständige Befüllung des Lautsprechergehäuses mit Dämmmaterial wie folgt erreichen:

$$V_{gG} = \frac{\psi}{\kappa} \cdot V_{\bar{a},gG} = \frac{\approx 1}{1,4} \cdot 75,4l \approx 53,8l$$

Nach Formel 4 ist eine Resonanzfrequenz der Gehäuse/Chassis - Kombination von:

$$f_{gG} \approx \frac{0,5}{0,40} \cdot 29,57 \text{ Hz} \approx 37 \text{ Hz}$$

zu erwarten.

Die Kantenberechnung über den „goldenen Schnitt“ lässt sich zunächst über den Zwischenschritt der Berechnung der Kantenlänge eines Würfels mit $V_{\bar{a},gG} \approx 53,8l$ ermitteln. Dabei ergibt sich eine Kantenlänge von $\sqrt[3]{53,8 \text{ dm}^3} \approx 3,775 \text{ dm}$. Die Anwendung der Formel 5 ergibt dann folgende Kantenlängen:

$$\begin{aligned} a &\approx 2,334 \text{ dm} = 23,34 \text{ cm} \\ b &\approx 3,776 \text{ dm} = 37,76 \text{ cm} \\ c &\approx 6,110 \text{ dm} = 61,10 \text{ cm} \end{aligned}$$

14.2 Konstruktion der Laborgehäuse

Nachfolgend werden die geschlossenen Lautsprechergehäuse inklusive zugehöriger Konstruktionszeichnungen vorgestellt. Alle drei geschlossenen Laborgehäuse wurden wie in Kapitel 14.1 erwähnt explizit für das Lautsprecherchassis GF200 konstruiert.

Alle seitens unserer Projektarbeit erstellten Laborgehäuse, wurden komplett aus mitteldichter Faserplatte (kurz: MDF) mit einer Materialstärke von 19mm gefertigt.

Nach Dickason (3. Auflage 2005, Kapitel 6) sollten Chassis versenkt montiert werden, um Beugungseffekte an der Schallwand zu minimieren. Dies wurde bei allen von uns erstellten Gehäusekonstruktionen verwirklicht.

Sämtliche Chassisverschraubungen wurden für die Gewährleistung einer langen Haltbarkeit der Laborgehäuse durch Gewindeverschraubungen realisiert. Die Laborgehäuse wurden dazu innen mit Einschlagmuttern versehen und diese entsprechend mit Epoxidharz fixiert.

Weiters wurden alle Laborgehäuse mit einer praktischen internen Steckverkabelung versehen. Die Kabelenden wurden mit „Bananensteckern“ entsprechender Farbe (+ rot, - schwarz) versehen, die eine schnelle und sichere Verbindung zu den Laborchassis ermöglicht. Die Laborchassis wurden dazu mit entsprechenden „Bananenbuchsen“ versehen. Die Verkabelung ist intern fix an die installierten Anschluss terminals verlötet.

14.2.1 Kleines geschlossenes Gehäuse (hoher Güte)

Das kleinste der neuen Laborgehäuse ist in Abbildung 31 zu sehen. Es fasst ein Luftvolumen von 9,7l (vgl. Kapitel 14.1). Die Innenbemaßung der Gehäuse wurde bereits bei der Abstimmung des Gehäuses in Kapitel 14.1 festgelegt.

Aus der folgend ersichtlichen Gehäusekonstruktion und der gegebenen Innenbemaßung ergibt sich folgende Außenabmessung (Höhe x Breite x Tiefe): $383mm \times 251mm \times 170mm$.

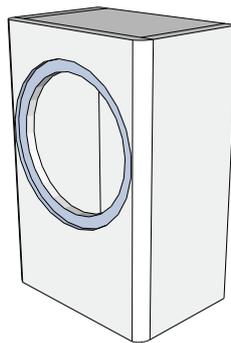


Abbildung 31: Geschlossenes 9,7l Gehäuse

Gründe für die Wahl der Gehäusekonstruktion:

- Zum Einen musste das Lautsprecherchassis auf einer der Gehäuseflächen untergebracht werden, was auf Grund des Chassis GF200 von Visaton nur auf der größten Gehäusefläche möglich war.
- Weiters wurde die Gehäusekonstruktion so gewählt, dass ein möglichst harmonischer Kantenverlauf bzw. ein symmetrischer Aufbau entsteht - eine Schallwand ohne sichtbare Stoßkanten der einzelnen Bauteile war dabei oberste Priorität.
- Aus klanglichen, optischen und haptischen Gründen wurden sämtliche Gehäusekanten abgerundet. Bedingt durch die Gehäuseabmessung war links und rechts der Schallwand eine deutlich stärkere Abrundung der Gehäusekanten möglich. Nach Dickason (3. Auflage 2005, Kapitel 6) vermindert diese Vorgehensweise die Beeinflussung der Wiedergabeeigenschaften des Lautsprechers bei Frequenzen, deren Wellenlänge die Abmessung der Schallwand erreichen.
- Die Chassisposition auf der Schallwand wurde frei gewählt, jedoch sollte die Schallwandmitte auf Grund eventueller Interferenzerscheinungen bei Schallreflexionen auf der Schallwand und Kantenbeugungen vermieden werden. Nach Dickason (3. Auflage 2005, Kapitel 6) sollte daher ein Chassis auf der Schallwand so angeordnet werden, dass es möglichst nicht gleich weit von allen Gehäusekanten entfernt ist.

Es ergibt sich dadurch die in Tabelle 3 dargestellte Schnittliste für die Einzelbauteile des Gehäuses.

Bauteil	Maße L x B [in mm]	Stückzahl
Schallwand	383 x 251	1
Rückwand	345 x 213	1
Seitenwand	383 x 151	2
Deckel/Boden	151 x 213	2

Tabelle 3: Schnittliste geschlossenes 9,7l Gehäuse

Die auf den folgenden Seiten dargestellten Konstruktionszeichnungen, dienen der grafischen Verdeutlichung des Gehäuseaufbaus.

ISO Frontansicht:

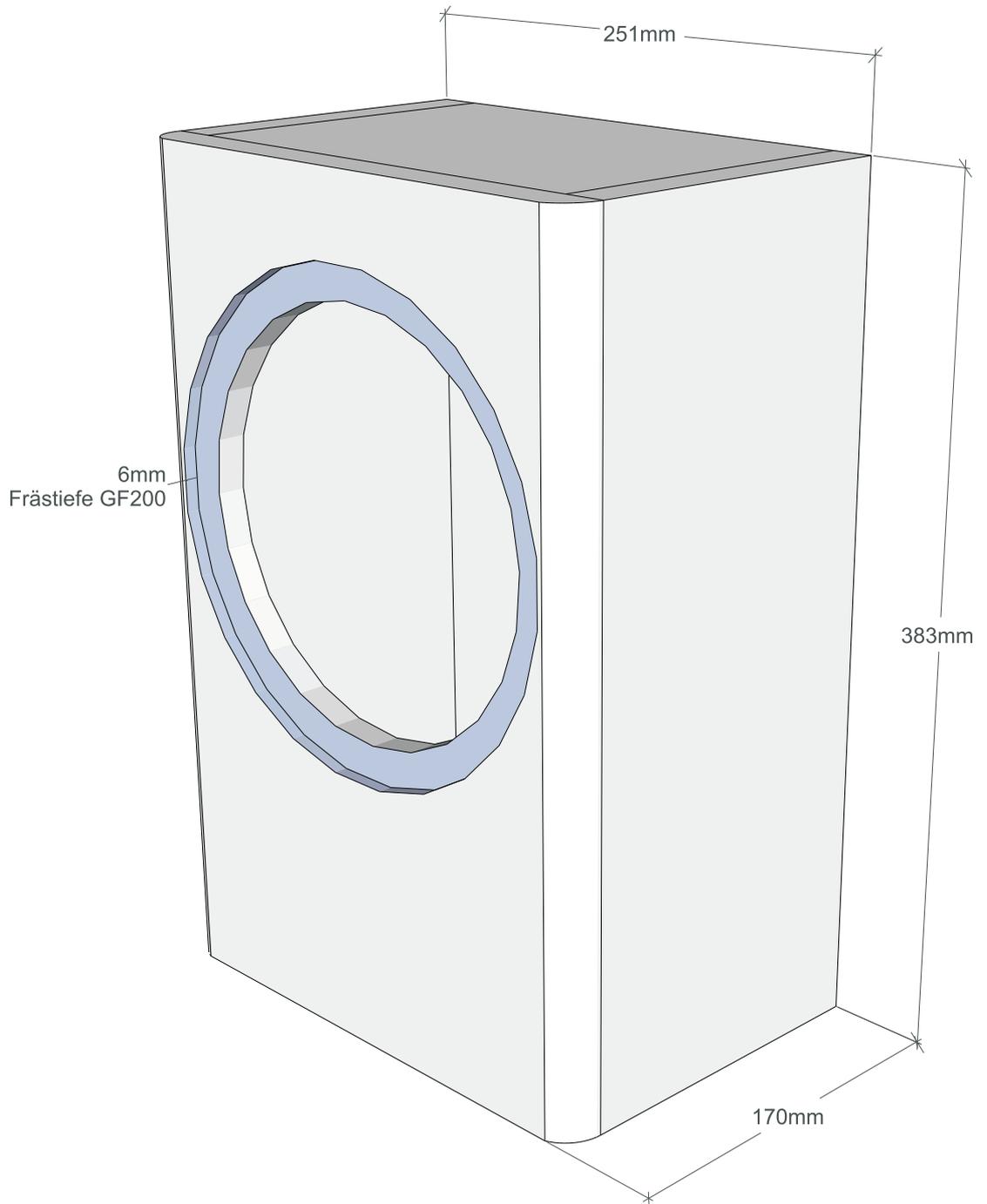


Abbildung 32: ISO Frontansicht geschlossenes 9,7l Gehäuse

ISO Rückansicht:

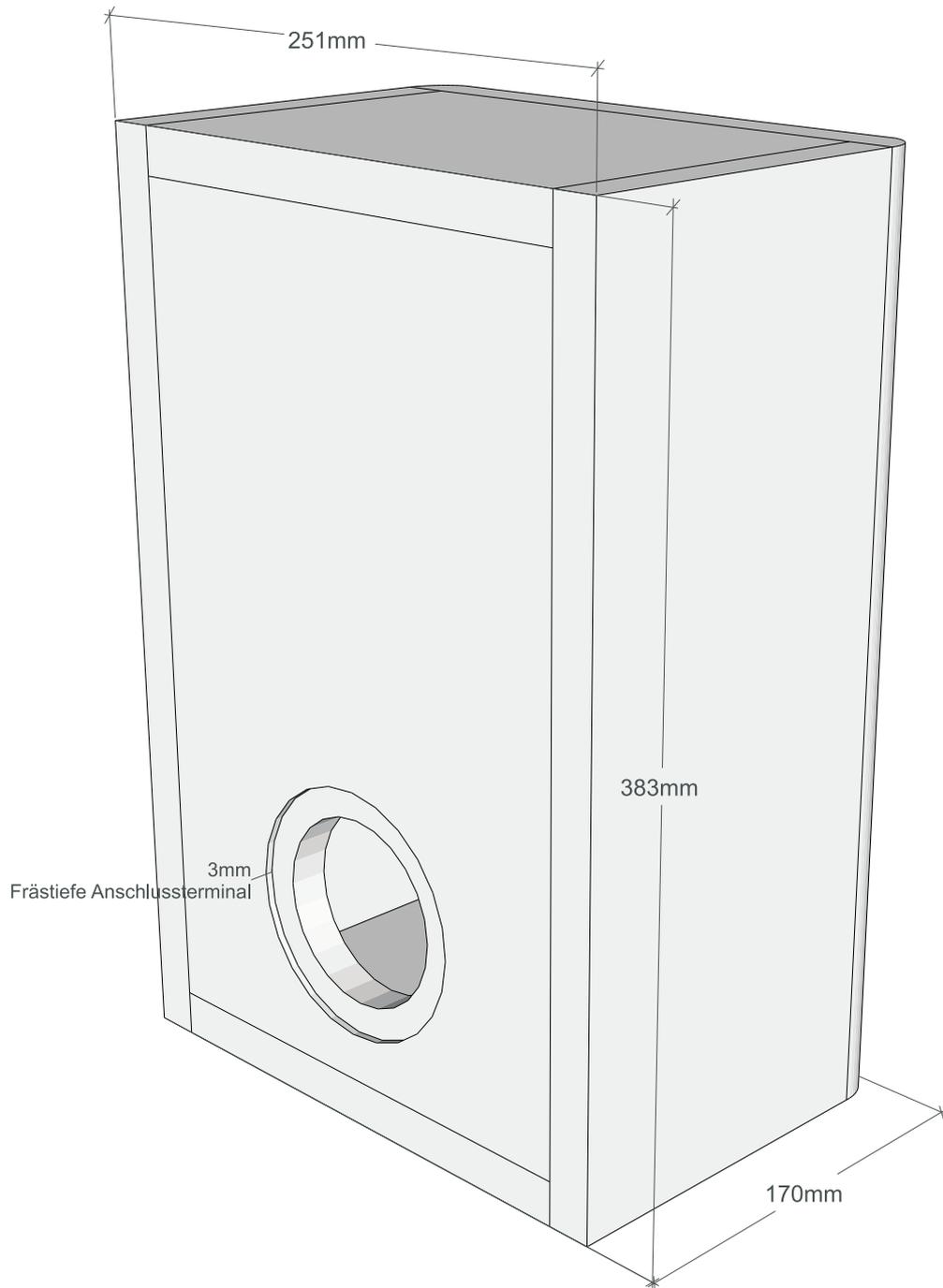


Abbildung 33: ISO Rückansicht geschlossenes 9,7l Gehäuse

Frontansicht:

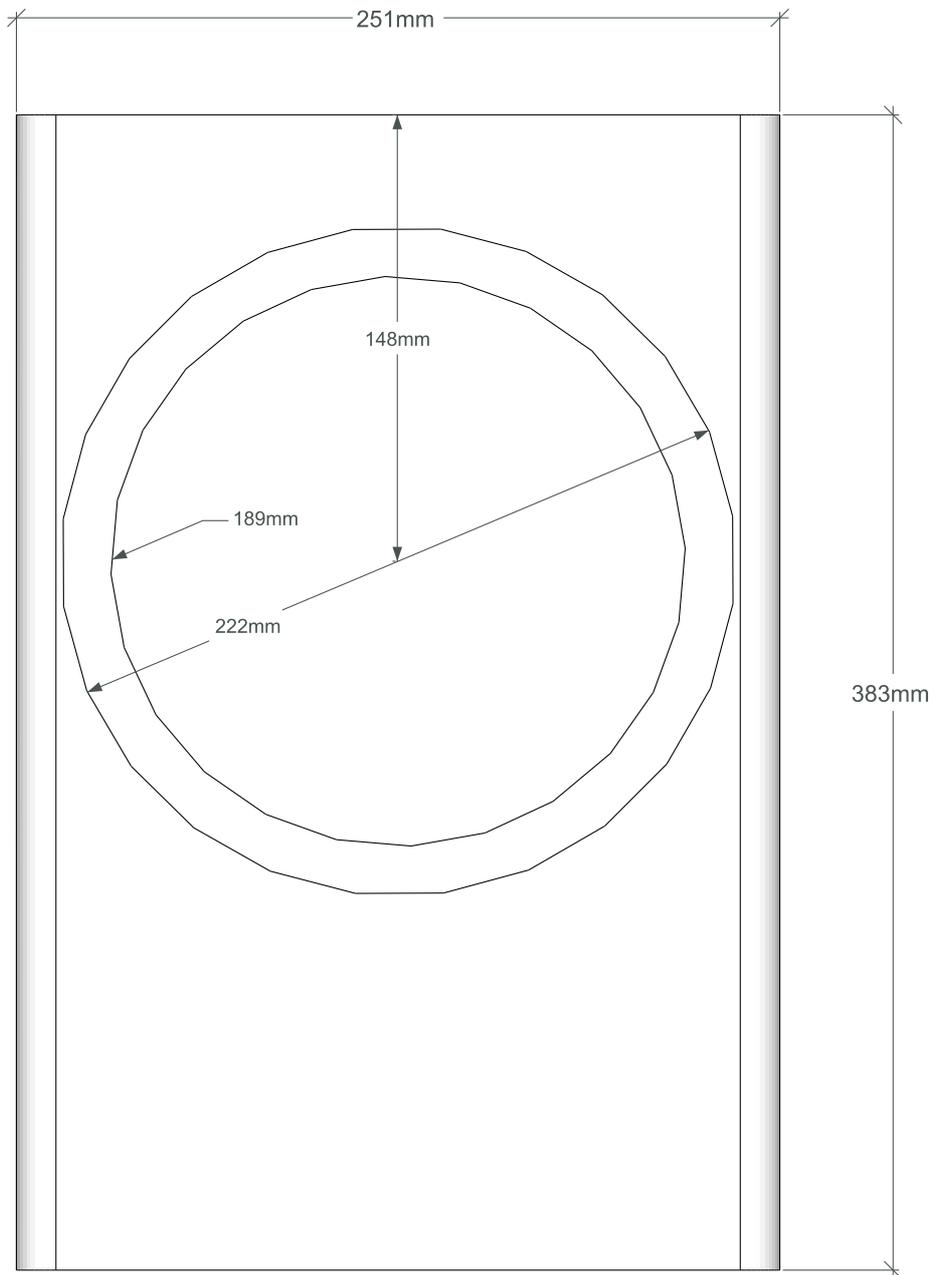


Abbildung 34: Frontansicht geschlossenes 9,7l Gehäuse

Seitenansicht:

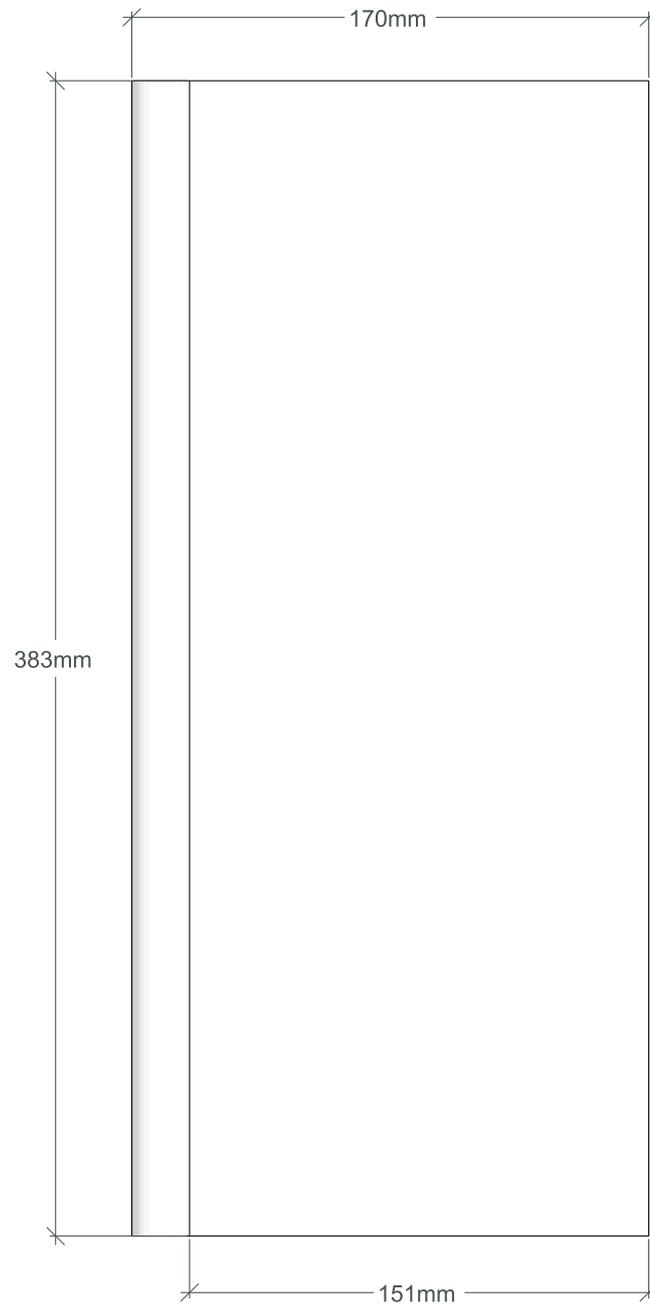


Abbildung 35: Seitenansicht geschlossenes 9,7l Gehäuse

Aufsicht:

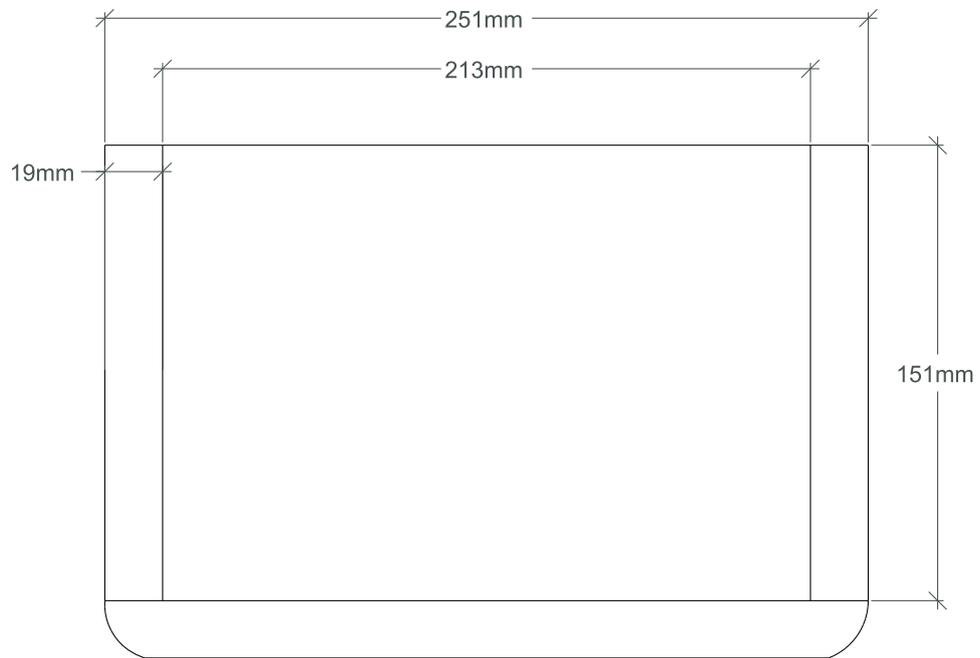


Abbildung 36: Sicht auf das geschlossene 9,7l Gehäuse

Rückansicht:

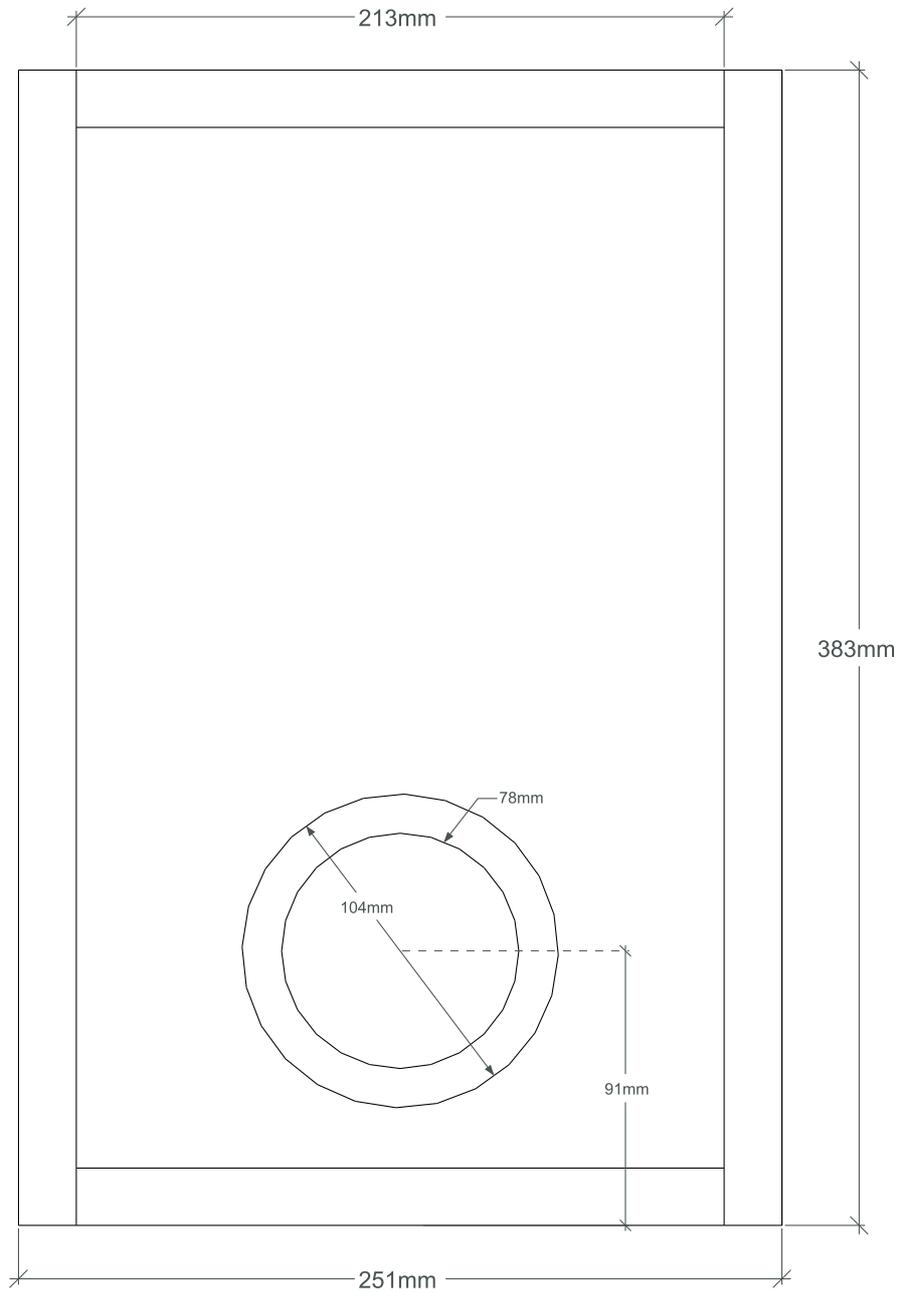


Abbildung 37: Rückansicht geschlossenes 9,7l Gehäuse

14.2.2 Geschlossenes Gehäuse mittlerer Größe

Das Laborgehäuse mittlerer Größe ist in Abbildung 38 zu sehen. Es fasst ein Luftvolumen von 22,9l (vgl. Kapitel 14.1). Die Innenbemaßung der Gehäuse wurde bereits bei der Abstimmung des Gehäuses in Kapitel 14.1 festgelegt.

Aus der folgend ersichtlichen Gehäusekonstruktion und der gegebenen Innenbemaßung ergibt sich folgende Außenabmessung (Höhe x Breite x Tiefe): 498mm x 322mm x 213mm.

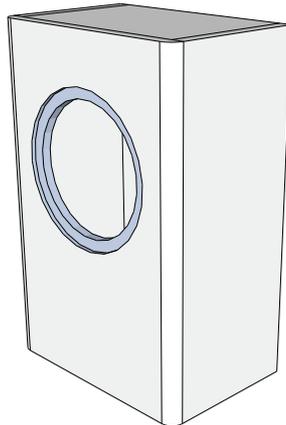


Abbildung 38: Geschlossenen 22,9l Gehäuse

Die Gehäusekonstruktion wurde entsprechend der bereits für das geschlossene Gehäuse mit 9,7l Volumen angeführten Gründe aufgebaut. Es ergibt sich dadurch die in Tabelle 4 dargestellte Schnittliste für die Einzelbauteile des Gehäuses.

Bauteil	Maße L x B [in mm]	Stückzahl
Schallwand	498 x 322	1
Rückwand	460 x 284	1
Seitenwand	498 x 194	2
Deckel/Boden	194 x 284	2

Tabelle 4: Schnittliste geschlossenes 22,9l Gehäuse

Die auf den folgenden Seiten dargestellten Konstruktionszeichnungen, dienen der grafischen Verdeutlichung des Gehäuseaufbaus.

ISO Frontansicht:

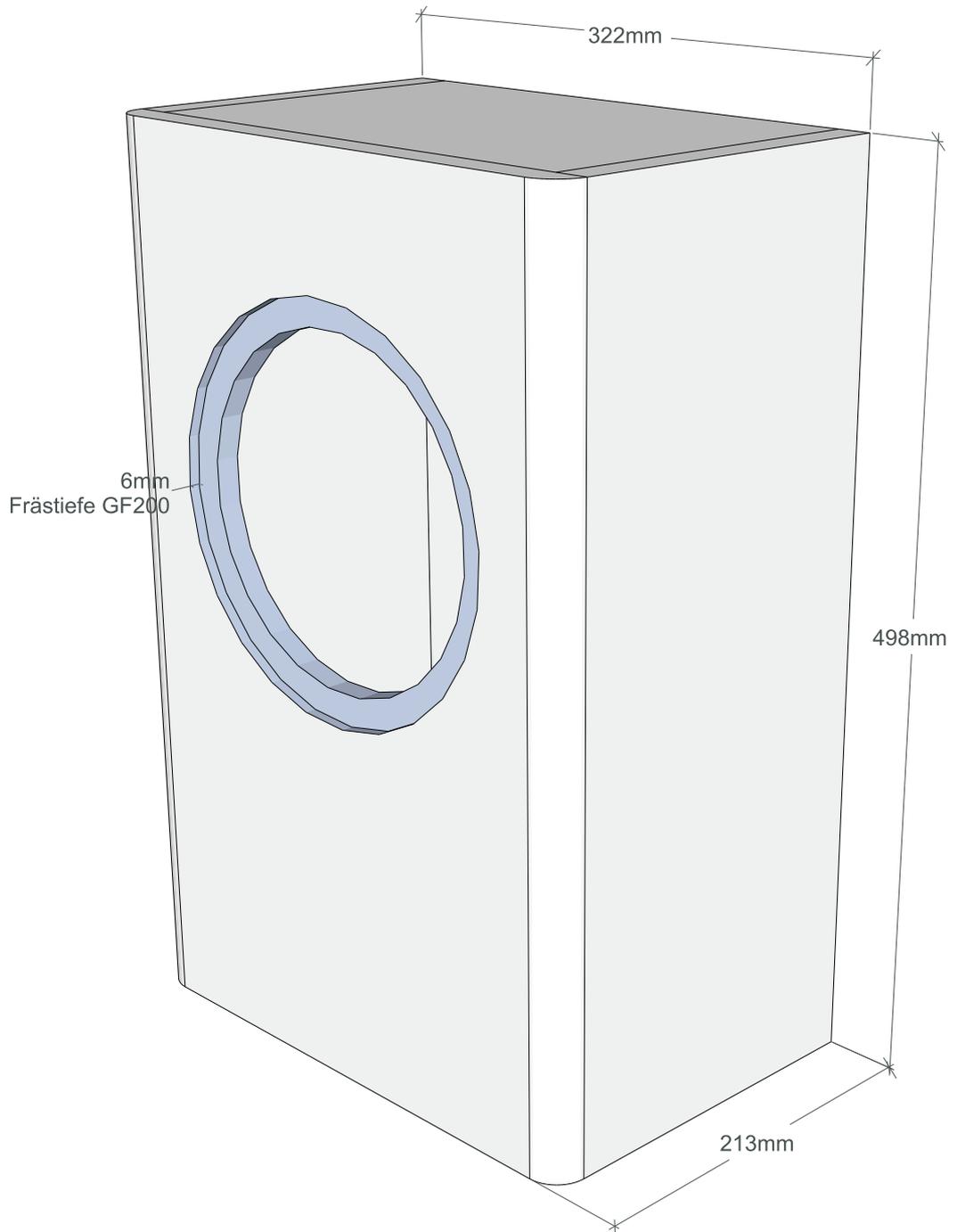


Abbildung 39: ISO Frontansicht geschlossenes 22,9l Gehäuse

ISO Rückansicht:

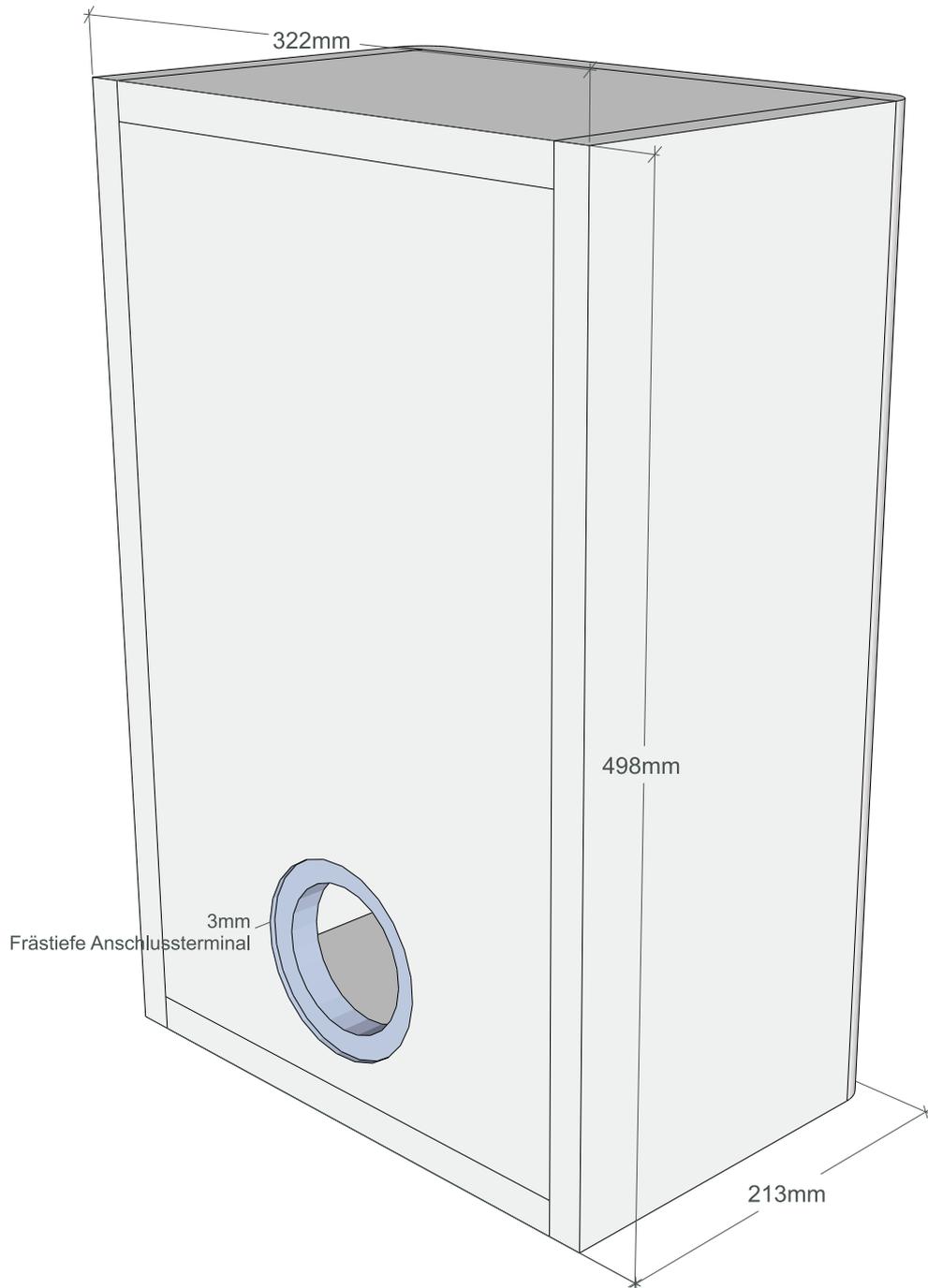


Abbildung 40: ISO Rückansicht geschlossenes 22,9l Gehäuse

Frontansicht:

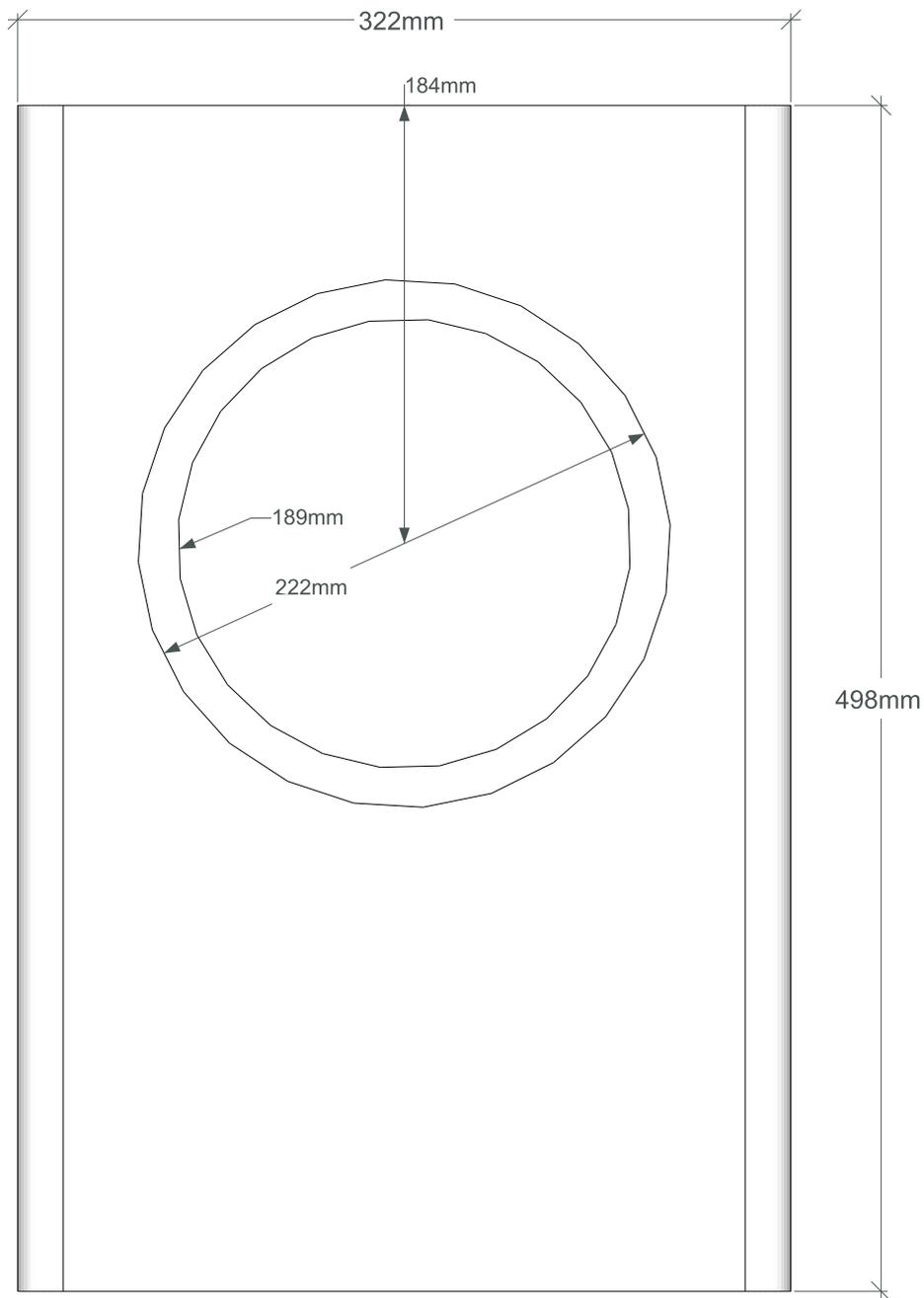


Abbildung 41: Frontansicht geschlossenes 22,9l Gehäuse

Seitenansicht:

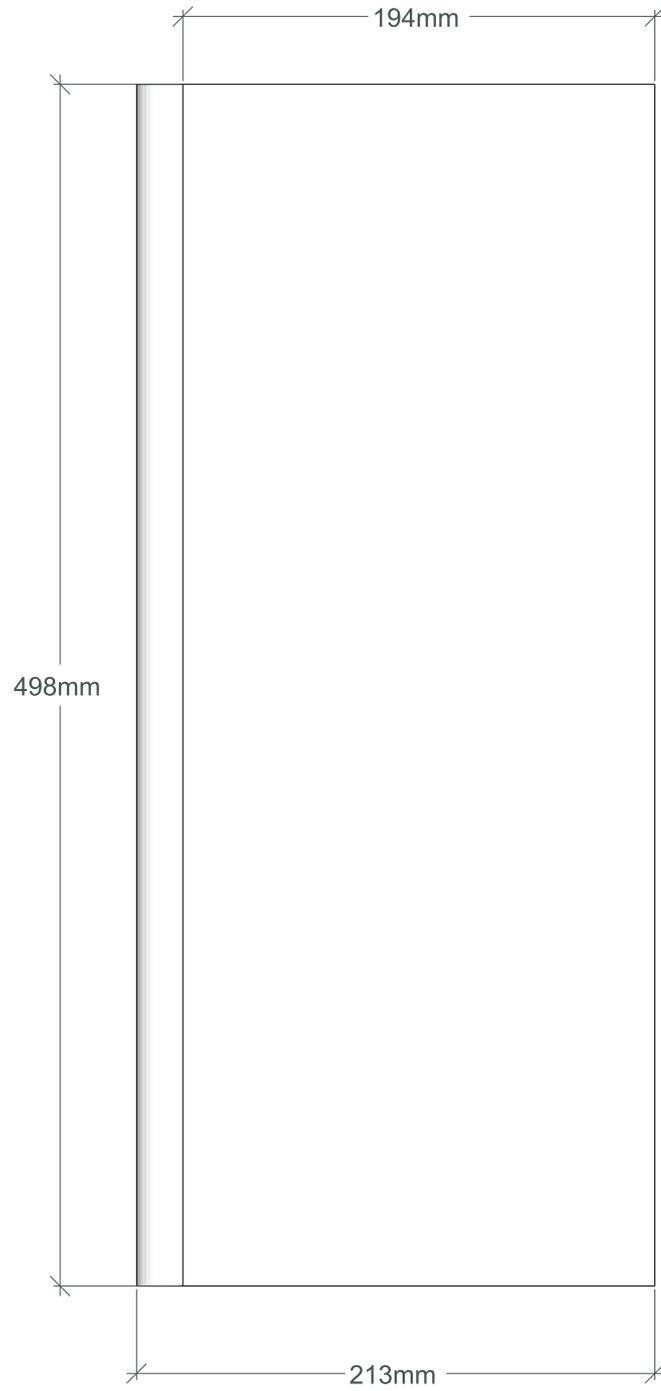


Abbildung 42: Seitenansicht geschlossenes 22,9l Gehäuse

Aufsicht:

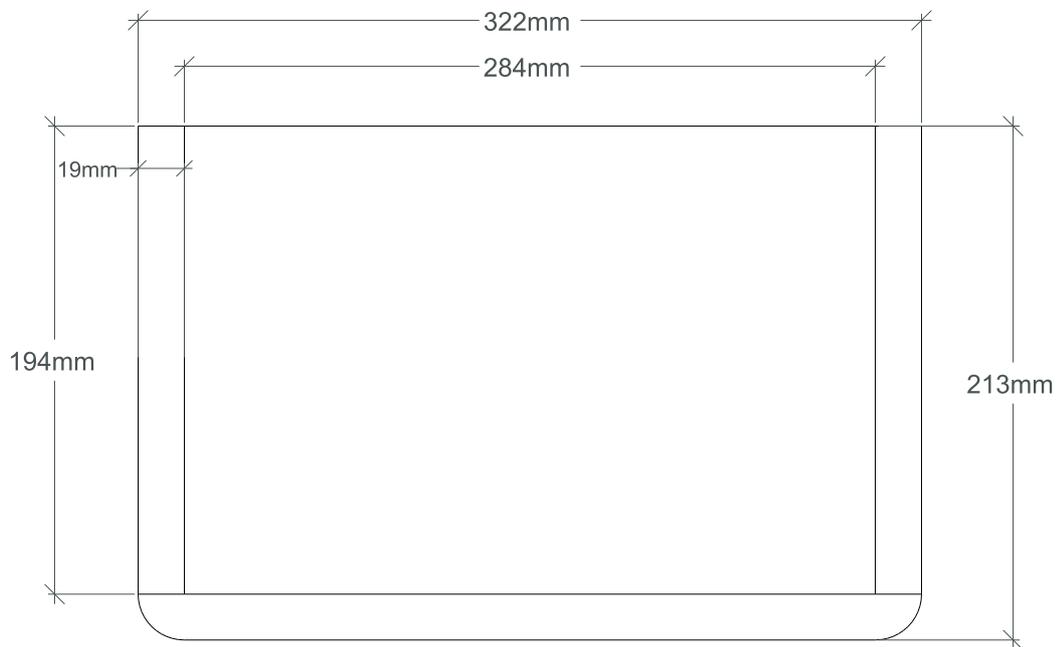


Abbildung 43: Sicht auf das geschlossene 22,9l Gehäuse

Rückansicht:

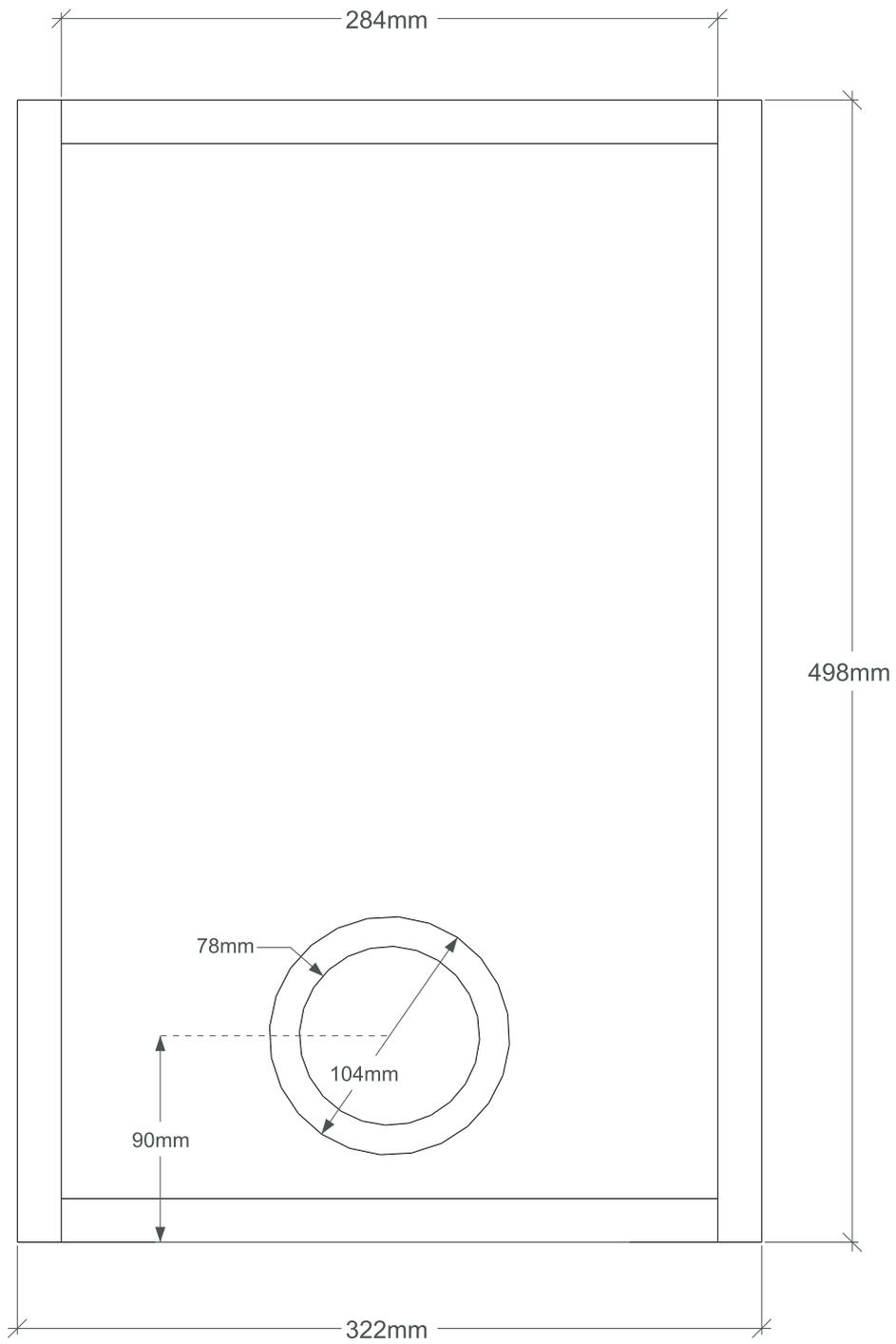


Abbildung 44: Rückansicht geschlossenes 22,9l Gehäuse

14.2.3 Großes geschlossenes Gehäuse (geringer Güte)

Das größte geschlossene Laborgehäuse ist in Abbildung 45 zu sehen. Es fasst ein Luftvolumen von etwa 53,8l (vgl. Kapitel 14.1). Die Innenbemaßung der Gehäuse wurde bereits bei der Abstimmung des Gehäuses in Kapitel 14.1 festgelegt.

Aus der folgend ersichtlichen Gehäusekonstruktion und der gegebenen Innenbemaßung ergibt sich folgende Außenabmessung (Höhe x Breite x Tiefe): 649mm x 271mm x 416mm.

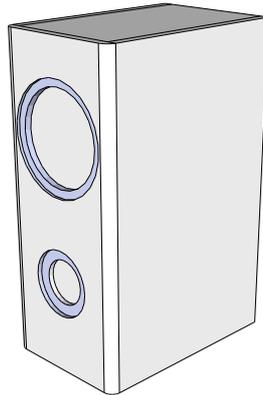


Abbildung 45: Geschlossenen 53,8l Gehäuse

Gründe für die Wahl der Gehäusekonstruktion:

- Das größte Gehäuse sollte sowohl als geschlossenes, als auch als Bassreflexgehäuse verwendet werden können. Dazu wurde auf der Schallwand des Gehäuses ein Fräsprofil erstellt. Für dieses gibt es zwei verschiedene verschraubbare Deckel, wobei der Eine einen geschlossener Deckel, der Andere ein Deckel mit intergriertem längenveränderbarem Bassreflexrohr ist (vgl. Kapitel 15).
- Das Lautsprecherchassis sollte auf einer der Gehäuseflächen untergebracht werden. Auf Grund der großen Gehäuseflächen war allerdings keine konstruktiv bedingten Platzprobleme vorhanden.

Wir entschieden uns für die abgebildete Variante, da das Lautsprechergehäuse einen deutlich „ästhetischeres Erscheinungsbild“ erhält (ähnlich einem Standlautsprecher), obwohl das Gehäuse selbst die gleichen Kantenverhältnisse aufweist wie die beiden bereits vorgestellten geschlossenen Gehäuse (vgl. Kapitel 14.1).

- Die schmale Schallwandform begünstigt eine geringere Beeinflussung des Frequenzgangs des Chassis durch Reflexionen (Dickason, 3. Auflage 2005, Kapitel 6).
- Die Gehäusekonstruktion wurde so gewählt, dass ein möglichst harmonischer Kantenverlauf bzw. ein symmetrischer Aufbau entsteht - eine Schallwand ohne sichtbare Stoßkanten der einzelnen Bauteile war dabei oberste Priorität.

- Aus klanglichen, optischen und haptischen Gründen wurden sämtliche Gehäusekanten abgerundet. Um eine optische Konstanz zu den kleineren Lautsprechergehäusen zu erreichen wurden nur die linke und rechte Gehäusekante sehr stark abgerundet. Nach Dickason (3. Auflage 2005, Kapitel 6) vermindert diese Vorgehensweise die Beeinflussung der Wiedergabeeigenschaften des Lautsprechers bei Frequenzen, deren Wellenlänge die Abmessung der Schallwand erreichen.
- Die Chassisposition auf der Schallwand wurde frei gewählt, jedoch sollte die Schallwandmitte auf Grund eventueller Interferenzerscheinungen bei Schallreflexionen auf der Schallwand und Kantenbeugungen vermieden werden. Nach Dickason (3. Auflage 2005, Kapitel 6) sollte daher ein Chassis auf der Schallwand so angeordnet werden, dass es möglichs nicht gleich weit von allen Gehäusekanten entfernt ist.

Es ergibt sich dadurch die in Tabelle 5 dargestellte Schnittliste für die Einzelbauteile des Gehäuses.

Bauteil	Maße L x B [in mm]	Stückzahl
Schallwand	649 x 217	1
Rückwand	611 x 233	1
Seitenwand	649 x 397	2
Deckel/Boden	233 x 397	2

Tabelle 5: Schnittliste geschlossenes 53, 8l Gehäuse

Die auf den folgenden Seiten dargestellten Konstruktionszeichnungen, dienen der grafischen Verdeutlichung des Gehäuseaufbaus.

ISO Frontansicht:

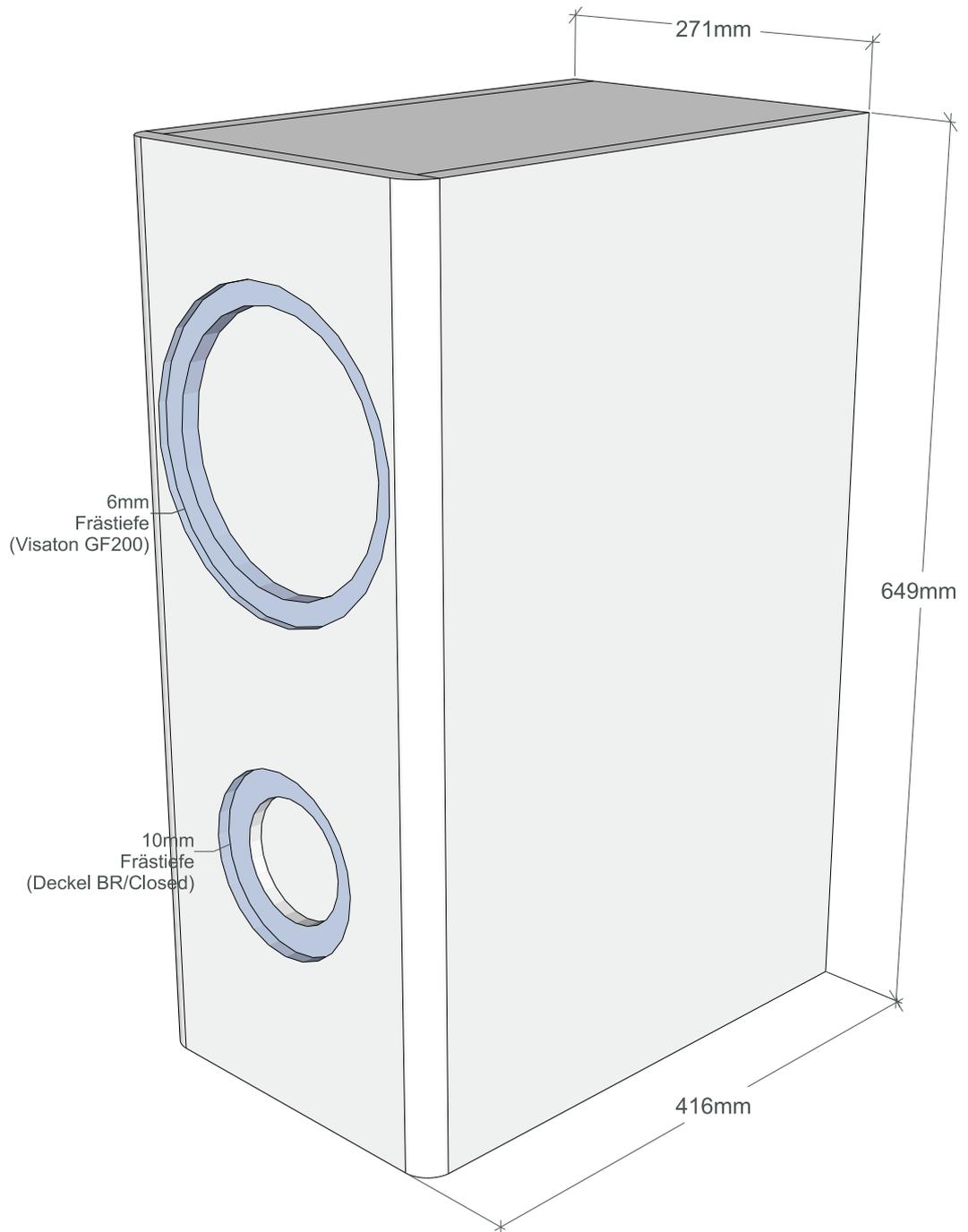


Abbildung 46: ISO Frontansicht variables 53, 8l Gehäuse

ISO Rückansicht:

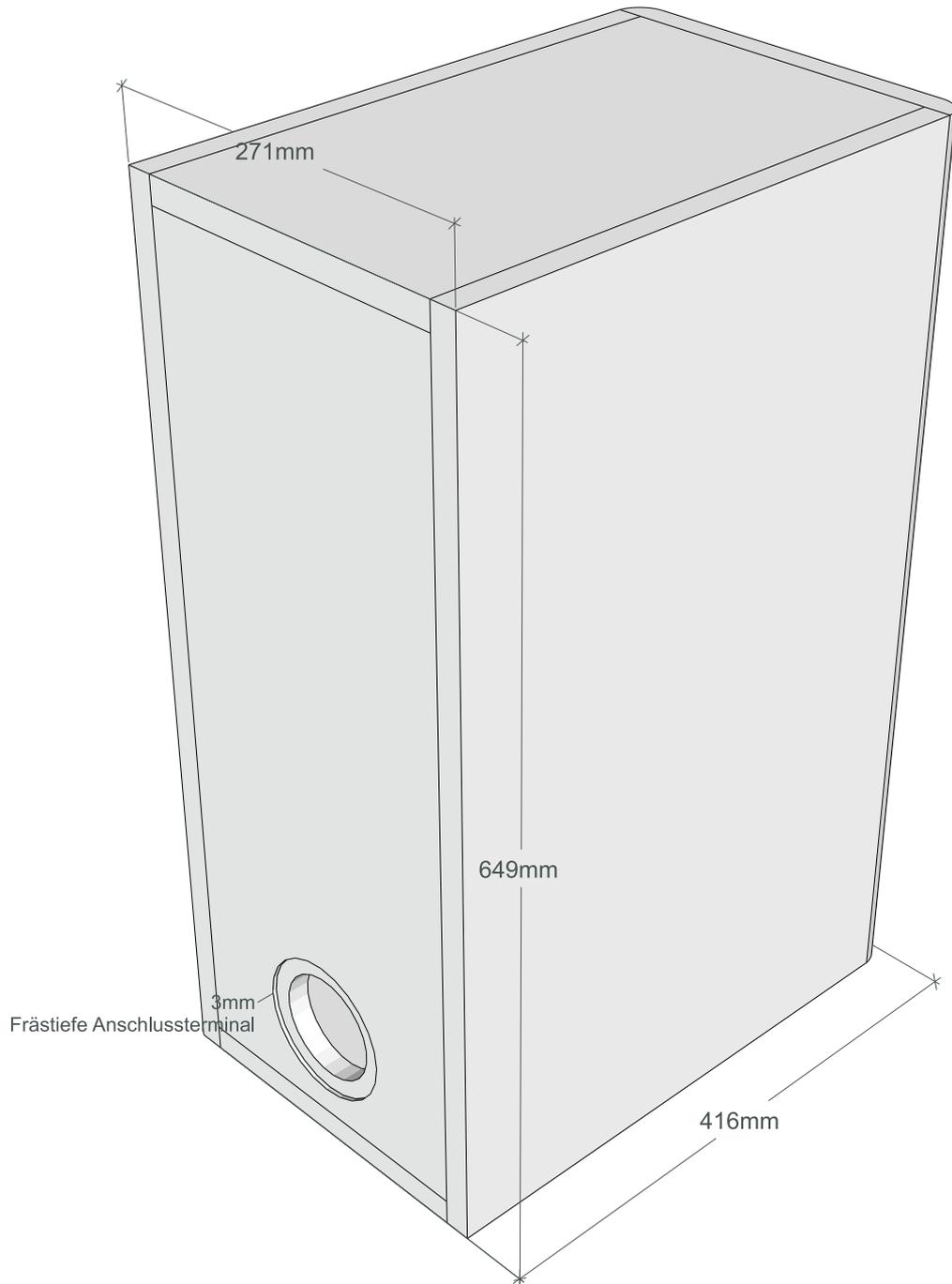


Abbildung 47: ISO Rückansicht variables 53,8l Gehäuse

Frontansicht:

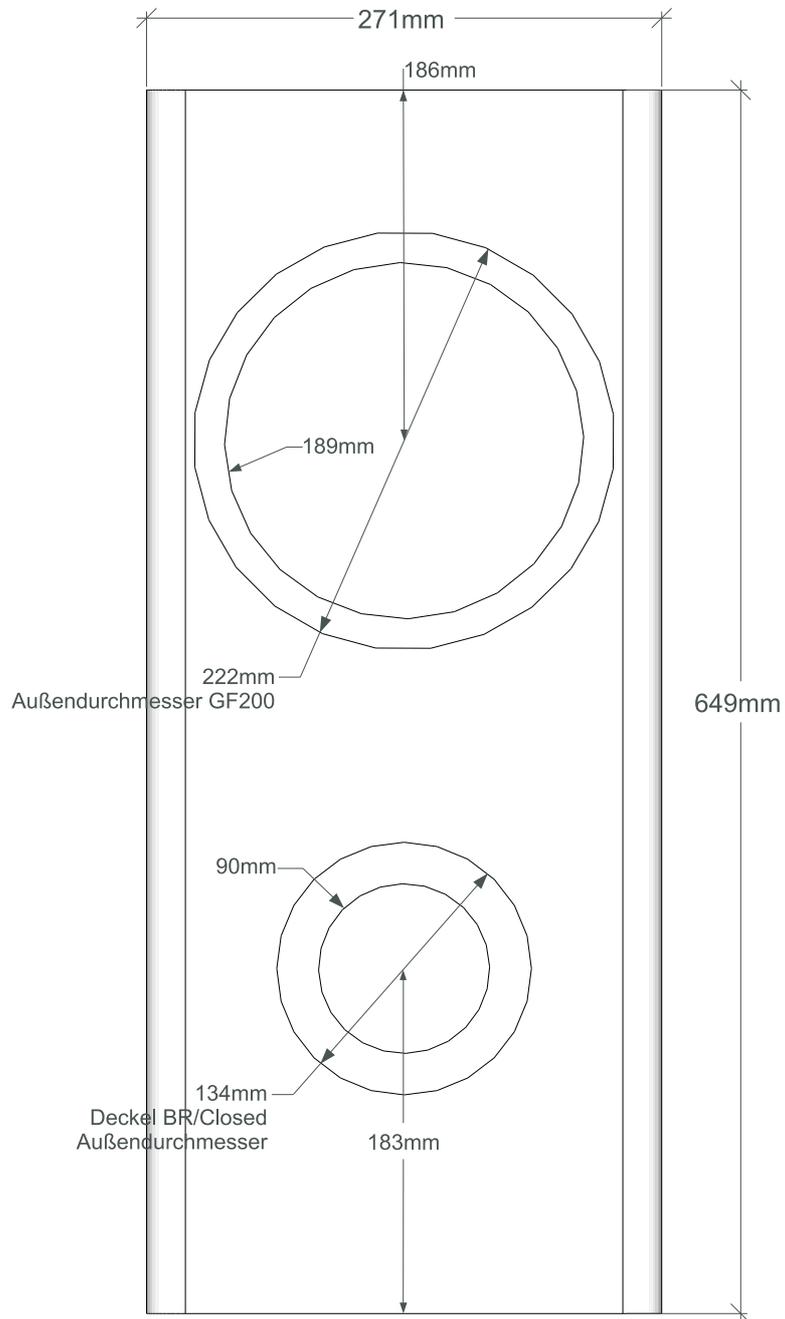


Abbildung 48: Frontansicht variables 53,8l Gehäuse

Seitenansicht:

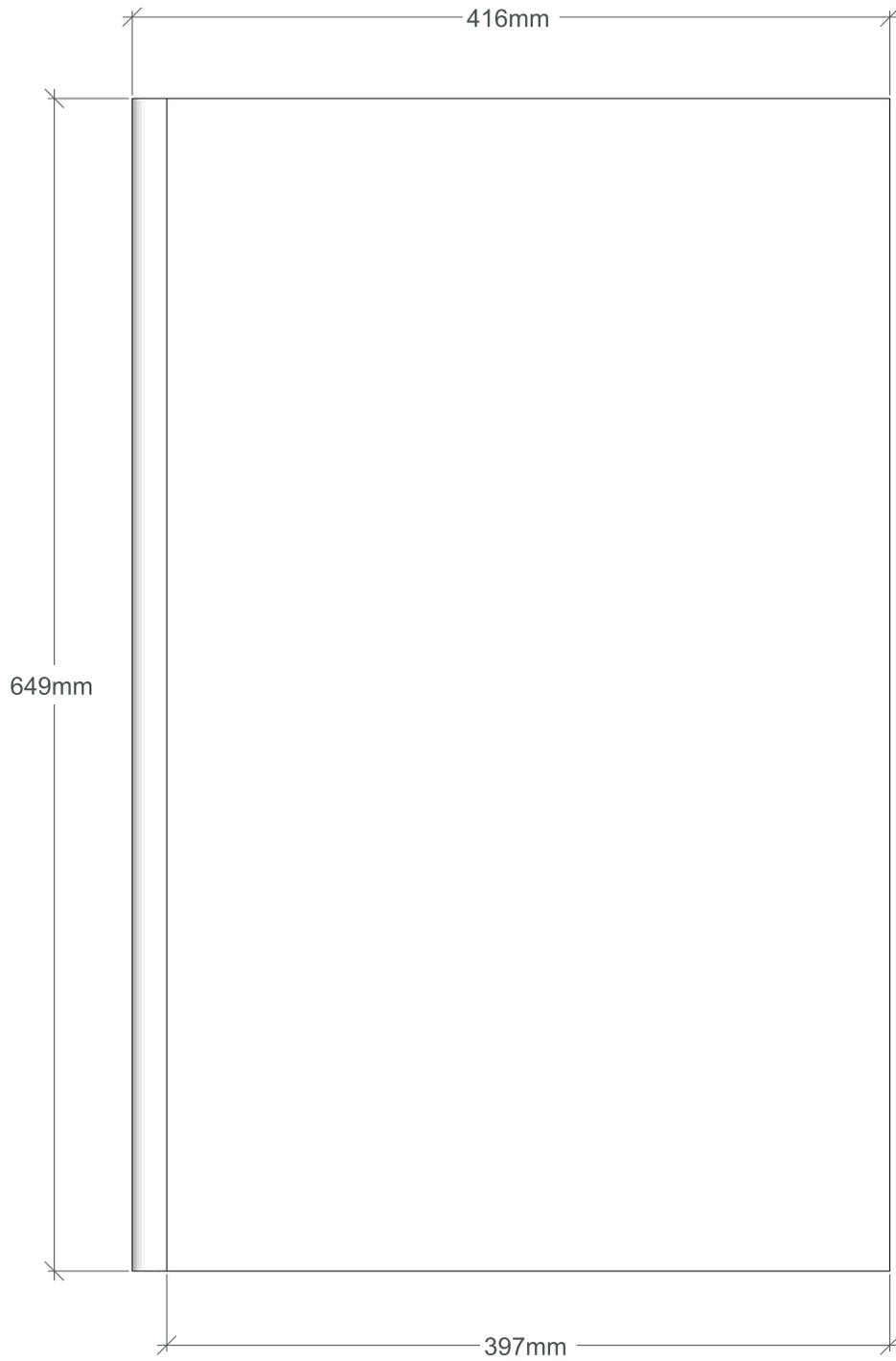


Abbildung 49: Seitenansicht variables 53,8l Gehäuse

Aufsicht:

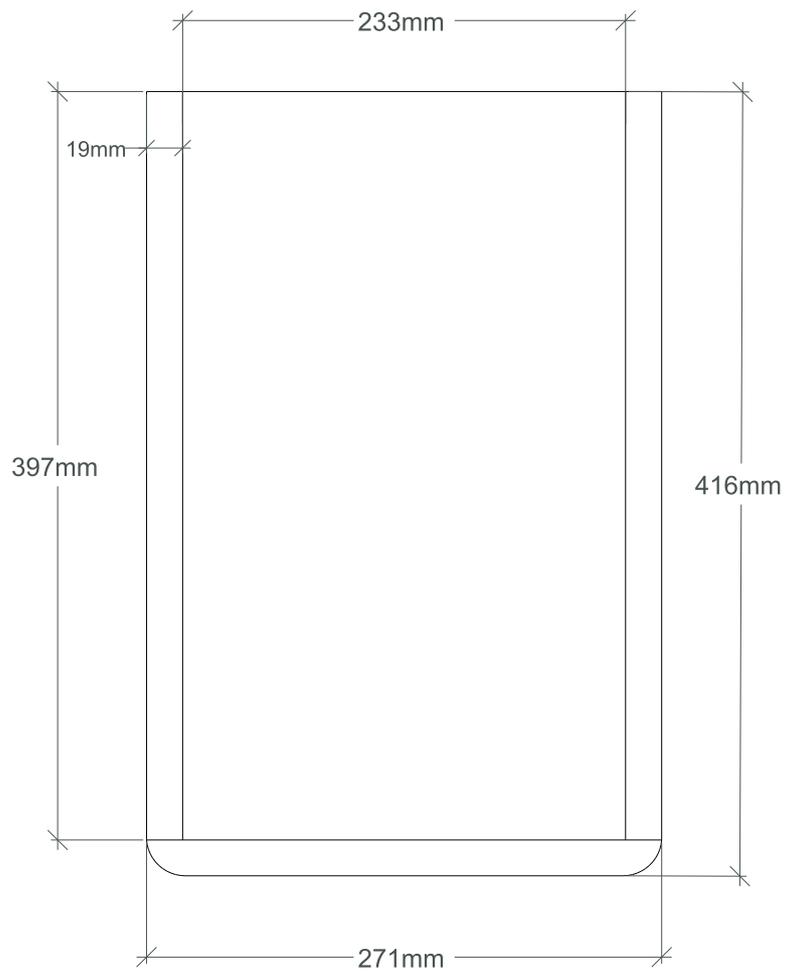


Abbildung 50: Sicht auf das variables 53,8l Gehäuse

Rückansicht:

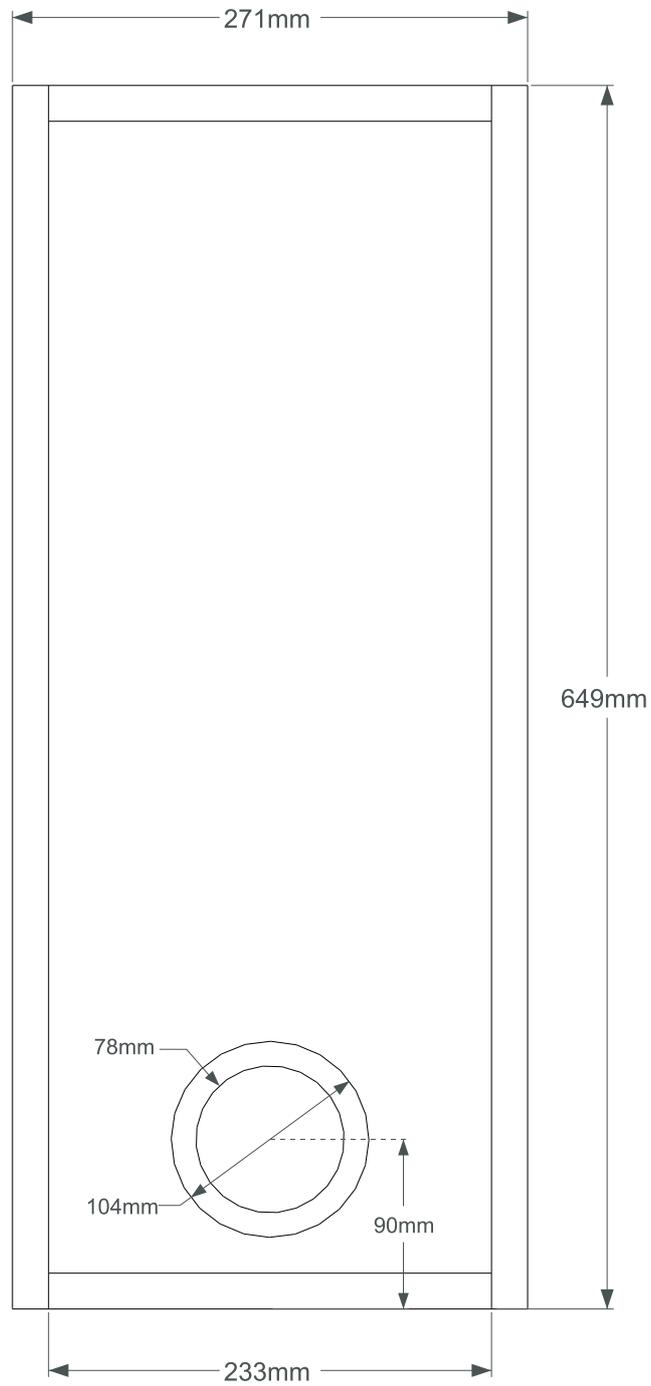


Abbildung 51: Rückansicht variables 53, 8l Gehäuse

14.3 Berücksichtigung des Chassiseigen Volumens

Wie bereits in Kapitel 14.1 erwähnt wurde, handelt es sich bei den bisher betrachteten Volumina der konstruierten geschlossenen Laborgehäuse um reine Nettovolumen. Das heißt es wurde noch keine Volumenskorrektur nach Chassis einbau berücksichtigt. Die Gesamtgehäusegüten $Q_{g,gG}$ und daraus resultierende Resonanzfrequenzen der Chassis/Gehäuse - Kombinationen f_{gG} nach Chassis einbau sollten daher durch resultierende geringere Gehäusevolumina laut Formel 3 und 4 geringfügig höher ausfallen.

Die Berechnung des vom Lautsprecherchassis benötigten Eigen volumens gestaltet sich jedoch konstruktionsbedingt als schwierig, da eine genaue Berechnung des Volumens - vor allem zwischen Chassiskorb und Membran - sehr kompliziert und zeitaufwändig ist. Wir haben aus diesem Grund auf ein „Freeware Softwarepaket“ zurückgegriffen, welches unter dem Namen „BassCADE“ bekannt ist. Die Software beinhaltet unter Anderem die Möglichkeit der Berechnung des Eigen volumens eines Lautsprecherchassis nach Eingabe einiger definierter Chassisabmessungen. Das Softwarepaket steht zum kostenlosen Download auf <http://www.selfmadehifi.de/basscad.htm> zur Verfügung.

In Abbildung 52 ist das „BassCADE“ Programmfenster zur Berechnung des Eigen volumens unseres Laborchassis GF200 ersichtlich.

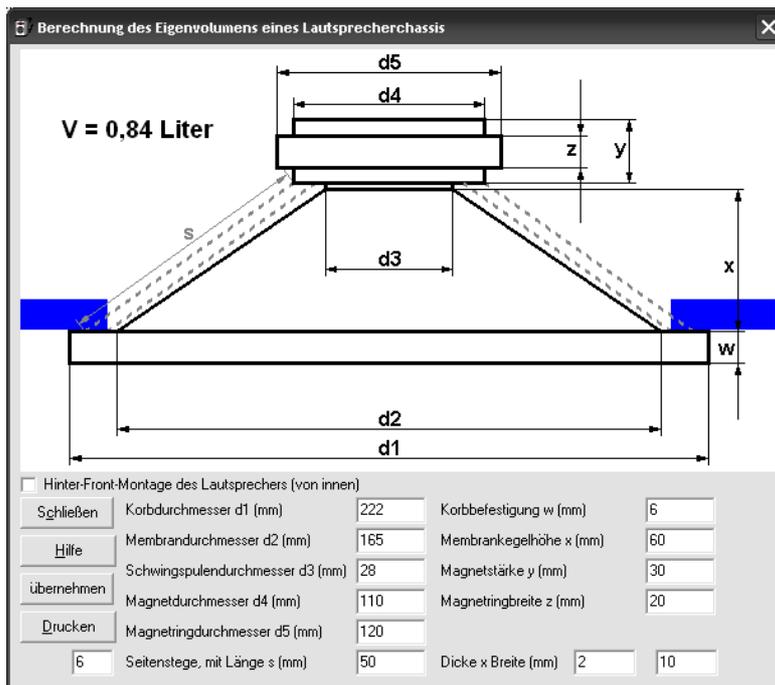


Abbildung 52: BassCADE - Berechnung des Chassiseigen volumens

Nach Eingabe aller relevanten Parameter erhält man ein Chassiseigen volumens von $V_{eig} \approx 0,84l$. Dieser Korrekturwert wird für alle nachfolgenden Berechnungen als Wahr angenommen um eine Evaluierung der Notwendigkeit dieser Korrektur zu ermöglichen.

14.3.1 Kleines geschlossenes Gehäuse (hoher Güte)

Mit dem kleinsten geschlossenen Laborgehäuse wurde eine Gesamtgüte von $Q_{g,gG} \approx 1$ angestrebt. Durch den Einbau des Lautsprecherchassis verringert sich das Nettogehäusevolumen von $V_{\dot{a},gG,netto} \approx 9,7l$ auf $V_{\dot{a},gG,brutto} \approx 8,86l$.

Nach Tabelle 1 und Umstellung der Formel 3 ergibt sich als neue Gesamtgüte:

$$Q_{g,gG} \approx \sqrt{\frac{\frac{60,07l}{8,86l} + 1}{1,15}} \cdot 0,4 \approx 1,04$$

Die Volumenverringerng führt somit zu einer leichten Güteerhöhung, die allerdings vernachlässigbar klein ist. Unsere Vorgehensweise, bei der Gehäuseberechnung und Konstruktion das Chassiseigenvolumen nicht zu berücksichtigen, betrachten wir somit als legitim.

Weiters ist nach Formel 4 eine Resonanzfrequenz der Chassis/Gehäuse - Kombination von:

$$f_{gG} \approx \frac{1,04}{0,40} \cdot 29,57 \text{ Hz} \approx 77 \text{ Hz}$$

zu erwarten (proportional zur Erhöhung der Gesamtgüte des geschlossenen Gehäuses). Beide Werte liegen damit etwa 4% über den Berechnungen bei Betrachtung des reinen Nettovolumens.

14.3.2 Geschlossenes Gehäuse mittlerer Größe

Mit dem geschlossenen Laborgehäuse mittlerer Größe wurde eine Gesamtgüte von $Q_{g,gG} \approx 0,71$ angestrebt. Durch den Einbau des Lautsprecherchassis verringert sich das Nettogehäusevolumen von $V_{\dot{a},gG,netto} \approx 22,9l$ auf $V_{\dot{a},gG,brutto} \approx 22,06l$.

Nach Tabelle 1 und Umstellung der Formel 3 ergibt sich als neue Gesamtgüte:

$$Q_{g,gG} \approx \sqrt{\frac{\frac{60,07l}{22,06l} + 1}{1,15}} \cdot 0,4 \approx 0,72 \quad (7)$$

Die Volumenverringerng führt somit zu einer leichten Güteerhöhung, die allerdings wieder vernachlässigbar klein ist.

Weiters ist nach Formel 4 eine Resonanzfrequenz der Chassis/Gehäuse - Kombination von:

$$f_{gG} \approx \frac{0,72}{0,40} \cdot 29,57 \text{ Hz} \approx 53,2 \text{ Hz}$$

zu erwarten (proportional zur Erhöhung der Gesamtgüte des geschlossenen Gehäuses). Beide Werte liegen damit etwa 1,4% über den Berechnungen bei Betrachtung des reinen Nettovolumens.

14.3.3 Großes geschlossenes Gehäuse (geringer Güte)

Mit dem größten Laborgehäuse wurde eine Gesamtgüte von $Q_{g,gG} \approx 0,50$ angestrebt. Nach Tabelle 1 und Formel 3 ergab sich für das Gehäusevolumen zunächst ein theoretisches Gehäusevolumen von $V_{\ddot{a},gG,netto} \approx 75,4l$. Durch vollständige Befüllung des Lautsprechergehäuses konnte allerdings dieses Äquivalenzvolumen durch ein Gehäuse mit einem Volumen von $V_{gG,netto} \approx 53,8l$ erreicht werden (vgl. Kapitel 14.1.3).

Durch Chassiseinbau verringert sich das effektive Gehäusevolumen nun zu $V_{gG,brutto} \approx 53l$. Laut Formel 6 entspricht dies wiederum einem Brutto - Äquivalenzvolumen von:

$$V_{\ddot{a},gG,brutto} = \frac{\kappa}{\psi} \cdot V_{gG,brutto} = \frac{1,4}{\approx 1} \cdot 53l \approx 74,2l$$

Nach Tabelle 1 und Umstellung der Formel 3 ergibt sich als resultierende Gesamtgüte:

$$Q_{g,gG} \approx \sqrt{\frac{\frac{60,07l}{74,2l} + 1}{1,15}} \cdot 0,4 \approx 0,502$$

Die Volumenverringerng führt somit nur zu einer äußerst geringen Güteerhöhung, die auf jeden Fall vernachlässigbar ist.

Weiters ist nach Formel 4 eine Resonanzfrequenz der Chassis/Gehäuse - Kombination von:

$$f_{gG} \approx \frac{0,502}{0,40} \cdot 29,57 \text{ Hz} \approx 37,1 \text{ Hz}$$

zu erwarten (proportional zur Erhöhung der Gesamtgüte des geschlossenen Gehäuses). Beide Werte liegen damit etwa 0,4% über den Berechnungen bei Betrachtung des reinen Nettovolumens.

15 Bassreflexgehäuse

Nachfolgend wird zunächst die grundlegende Theorie über Bassreflexgehäuse eingeführt, sowie Berechnungen zur Dimensionierung des Laborgehäuses angefertigt. Abschließend folgen einige Angaben zur Konstruktion.

15.1 Wiedergabeeigenschaften

Ein ventilerter Lautsprecher besitzt - analog zu einem Hochpassfilter vierter Ordnung - eine Sperrwirkung von $24dB/Oktave$.

Bei tiefen Frequenzen trägt die Reflexöffnung substantiell zur Schallwiedergabe des Systems bei. Das erfolgt jedoch, indem die akustische Belastung der Membranrückseite im Bereich der Helmholtzresonanzfrequenz vergrößert wird, was wiederum die Bewegung der Membran stark bedämpft und die akustische Wiedergabe der Vorderseite des Chassis verringert. Dies führt letztlich zu einer geringeren Auslenkung der Membran im Bereich der Resonanzfrequenz (größere akustische Belastung der Membran). Die Folge ist unter Anderem eine vergrößerte Belastbarkeit im Bereich der Helmholtzresonanzfrequenz, sowie geringere Wahrscheinlichkeit von Modulationsverzerrungen (vgl. Dickason (3. Auflage 2005, Kapitel 3)).

Wie auch bei der Konstruktion geschlossener Gehäuse können die Wiedergabeeigenschaften von Bassreflexgehäusen über die Gesamtgüte Q der Chassis/Gehäuse - Kombination kontrolliert und justiert werden. Der Hauptunterschied beider Konstruktion liegt jedoch in der Konstruktionsreihenfolge.

Bei geschlossenen Gehäusen kann mit nahezu jeder beliebigen Chassigüte $Q_{g,Mk}$ jede erwünschte Abstimmung für geschlossene Gehäuse, mit definierten Wiedergabeeigenschaften (siehe Kapitel 14.1), erzeugt werden.

Die Konstruktion von Bassreflexgehäusen erfolgt dahingegen normalerweise in Form spezieller Alignments, mit denen sämtliche Parameter für eine möglichst lineare Wiedergabekurve mit bestimmter unterer Grenzfrequenz f_{-3dB} festgelegt sind (Dickason (3. Auflage 2005, Kapitel 3)). Die verschiedenen Alignments repräsentieren verschiedene Wiedergabeeigenschaften der Chassis/Gehäuse - Kombinationen, die nur mit definierten Chassigüten $Q_{g,Mk}$ erreicht werden können. Die Konstruktion von Bassreflexgehäusen beinhaltet somit weniger Freiheitsgrade, als die Konstruktion geschlossener Gehäuse.

Von definierten Alignments stark abweichende Abstimmungsvariationen, die Anhebung oder Abschwächung der Wiedergabe von tiefen Frequenzen verursachen, werden als Fehlabbastimmungen oder „Misalignments“ bezeichnet.

15.2 Abstimmung/Fehlabstimmung

Durch eine ideale Abstimmung des ventilierten Gehäuses - auch mittige Abstimmung genannt - stellt sich ein möglichst symmetrischer Impedanzgang sowie eine flacher SPL-Frequenzgang (ohne Resonanzüberhöhung) ein. Bei „mittiger“ Abstimmung wird die Resonanzfrequenz des ventilierten Gehäuses f_H auf die Resonanzfrequenz des Chassis in unendlicher Schallwand f_{uS} eingestellt.

Nach Graber (WS 2006/07, Kapitel 7.3) ist das Abstimmungsverhältnis eines Bassreflexgehäuses wie folgt definiert:

$$h = \frac{f_H}{f_{uS}} \quad (8)$$

Der angesprochene Fall der „mittigen“ Abstimmung steht somit für ein Abstimmungsverhältnis von $h \approx 1$.

Bei leichter Abweichung von der mittigen Abstimmung spricht man von hoch- ($f_H > f_{uS}$) bzw. tiefabgestimmten ($f_H < f_{uS}$) Bassreflexgehäusen, was in der Praxis durchaus legitim ist um definierte Wiedergabeeigenschaften zu erhalten.

Ein möglicher Impedanz- und SPL - Frequenzgang eines leicht hochabgestimmten Bassreflexsystems ist in Abbildung 53 ersichtlich.

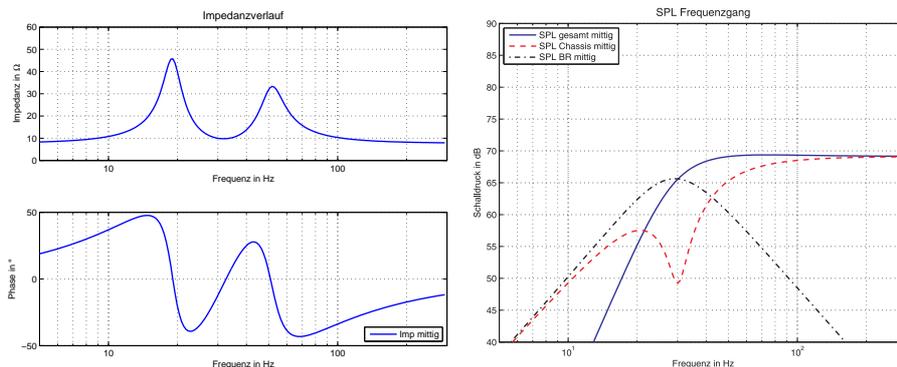


Abbildung 53: Impedanz- und SPL - Frequenzgang; „hohe“ Abstimmung

Es ist zu erkennen, dass die Chassis/Gehäuse - Kombination einen wünschenswert flachen SPL - Frequenzgang - ohne Überschwingen - aufweist. Wie nachfolgend auch in Kapitel 15.3 erläutert, ist nicht mit jedem Lautsprecherchassis ohne Weiteres eine mittige Abstimmung ($h \approx 1$) zu erreichen. Obige Abstimmung wurde mittels des SBB_4 - Alignments dimensioniert (vgl. Kapitel 15.3). Dadurch ist für jene Chassissgüte, die diesem Beispiel zu Grunde liegt, ein dementsprechend flacher SPL - Frequenzgang der Chassis/Gehäuse - Kombination gewährleistet.

Die übertriebener Hoch- bzw. Tiefabstimmung, wird als Fehlabstimmung bezeichnet und sollte in der Praxis tunlichst vermieden werden. So neigen deutlich zu hoch abgestimmte Bassreflexsysteme zu hörbarem Nachschwingen, dem sogenannten „Transient Ringing“. Tatsächlich war der schlechte Ruf, den ventilierte

Systeme als „Dröhnboxen“ mit überzogener und unsauberer Basswiedergabe in der Vergangenheit hatten (ca. 1970 - 1980), unzweifelhaft durch ernsthaft fehlabgestimmte Bassreflexgehäuse entstanden (Dickason, 3. Auflage 2005, Kapitel 3).

Wird beispielsweise die Resonanzfrequenz des ventilerten Gehäuses f_H weit unterhalb der Resonanzfrequenz des Chassis in unendlicher Schallwand f_{uS} gewählt ($f_H \ll f_{uS}$), so spricht man von einem zu tief abgestimmten Bassreflexsystem. Hier verhält sich die elektrische Impedanz zu $Z(f_{vG1}) \ll Z(f_{vG2})$, wobei $Z(f_{vG1})$ gegen Null tendiert. Zu tiefen Frequenzen hin ergibt sich eine flachere SPL - Abnahme, die sich dem charakteristischen SPL - Frequenzgang eines geschlossenen Gehäuses annähert (siehe Abbildung 54). Man erkennt, dass bei zu tiefer Abstimmung das Bassreflexrohr quasi keinen Anteil mehr zum Gesamtschalldruck liefert.

Tiefe FehlAbstimmung kann durch Verlängerung des Reflextunnels oder durch Verkleinerung der Öffnungsfläche erreicht werden.

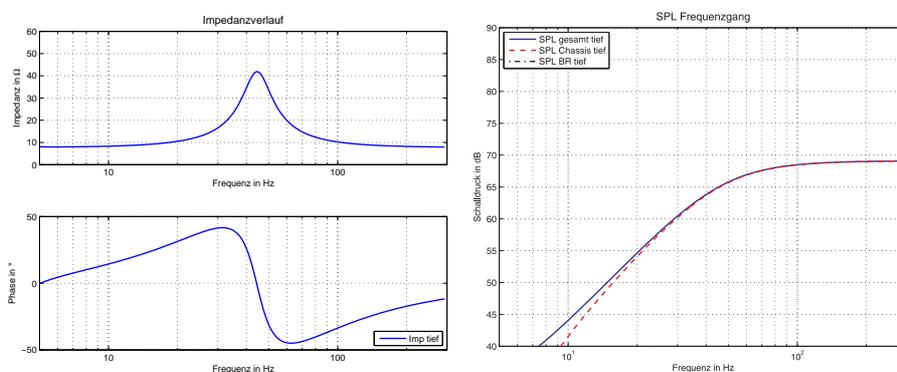


Abbildung 54: Impedanz- und SPL - Frequenzgang; „tiefe“ FehlAbstimmung

Wird die Resonanzfrequenz des ventilerten Gehäuses f_H weit oberhalb der Resonanzfrequenz des Chassis in unendlicher Schallwand f_{uS} gewählt ($f_H \gg f_{uS}$), so spricht man von einem zu hoch abgestimmten Bassreflexsystem. Hier verhält sich die elektrische Impedanz zu $Z(f_{vG1}) \gg Z(f_{vG2})$, wobei $Z(f_{vG2})$ gegen Null tendiert. Der SPL - Frequenzgang weist zu tiefen Frequenzen hin zunächst eine Resonanzüberhöhung auf und nimmt dann deutlich steiler ab als bei geschlossenem Gehäuse (siehe Abbildung 55). Man erkennt, dass hier das Bassreflexrohr einen zu hohen Anteil zum Gesamtschalldruck liefert.

Hohe FehlAbstimmung kann durch Verkürzung des Reflextunnels oder durch Vergrößerung der Öffnungsfläche erreicht werden.

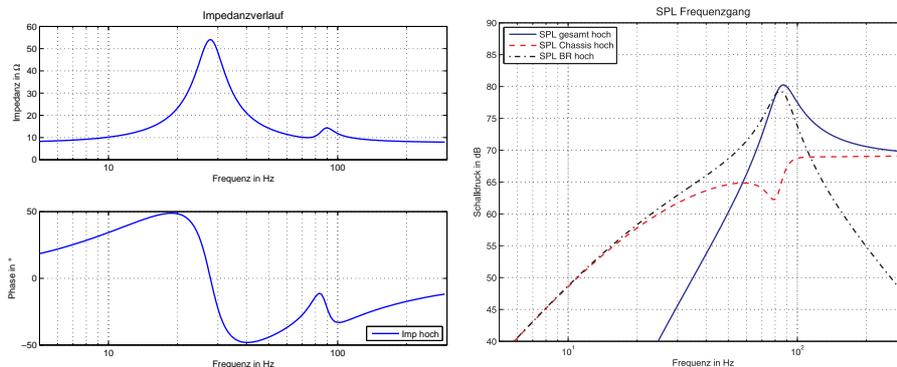


Abbildung 55: Impedanz- und SPL - Frequenzgang; „hohe“ Fehlabbstimmung

15.3 Alignments

Da nicht mit jedem Chassis die Anforderungen für mittige Abstimmung erfüllt werden können, ist es nicht immer möglich eine bestimmte Filtercharakteristik genau zu erreichen (Graber, WS 2006/07, Kapitel 7.3). Daher wurden sogenannte Alignments definiert, die für eine gegebene Filtercharakteristik und Verlustgüte die Konstruktion von ventilierten Lautsprechersysteme mit ähnlichem Wiedergabeverhalten wie bei mittiger Abstimmung ermöglichen. D.h. ein Alignment gewährleistet, dass ein sehr ähnliches klangliches Verhalten mit unterschiedlichen Chassisgüten erreicht werden kann. Durch die Abweichung der tatsächlichen Chassisgüte von der optimalen Chassisgüte für mittige Abstimmung ergeben sich daher hoch- bzw. tiefabgestimmte ventilierte Lautsprechersysteme.

In der Praxis ist eine oft gewählte Herangehensweise die Wahl des Alignments, mit dem das Wiedergabeverhalten festgelegt wird. Damit ist der Bereich für die Chassisgüte und die zugehörigen Gehäusevolumina vorgegeben. Chassis mit ähnlicher Güte können sich in der Resonanzfrequenz f_{uS} deutlich unterscheiden, was sich auf die erreichbare untere Grenzfrequenz f_{-3dB} auswirkt.

Typische Bassreflex - Alignments sind unter Anderem:

- Super Boom Box Alignment vierter Ordnung (SBB_4)
- Sub - Chebychev Alignment vierter Ordnung (SC_4)
- „Quasi dritter Ordnung“ Butterworth Alignment (QB_3)

Als Beispiel wird in der Lehrveranstaltung Elektroakustik an der TU Graz letztgenanntes QB_3 - Alignment genauer besprochen. Zur Berechnung und Konstruktion des Bassreflexgehäuses, das auch als Teil unserer Projektarbeit entstanden ist, haben wir uns daher auf dieses Alignment beschränkt. Die Wiedergabekurve des QB_3 - Alignments ist der eines elektrischen Filters dritter Ordnung mit einer Sperrwirkung von $18dB/Oktave$ ähnlich, was die Namensgebung erklärt. Dieses Alignment ist auch das in der Praxis meistverwendete, da dieses zu verhältnismäßig kleinen Gehäusen mit geringer unterer Grenzfrequenzen für gegebene Gütefaktoren $Q_{g,Mk}$ führt.

15.4 Abstimmung des Laborgehäuses

Unser gegebenes Lautsprecherchassis „Visaton GF200“ soll in der Bassreflexbox verwendet werden. Daher sind die Gesamtgüte $Q_{g,Mk}$, das Äquivalenzvolumen $V_{\ddot{a},Ma}$ und die Resonanzfrequenz f_{uS} des Chassis, nach der aus Teil III bekannten Tabelle 1 auf $Q_{g,Mk} = 0,40$, $V_{\ddot{a},Ma} = 60,07l$ und $f_{uS} = 29,57Hz$ festgelegt.

Um eine Alignment - Tabelle gemäß Dickason (3. Auflage 2005, Kapitel 3) - zur Bestimmung der gewünschten Gehäusefrequenz und Abstimmung des Helmholtzresonators - nutzen zu können, bedarf es der Abschätzung der Verlustgüte Q_L des Lautsprechergehäuses. Dabei gilt nach Graber (WS 2006/07, Kapitel 7.3) der in Tabelle 6 ersichtliche Zusammenhang.

Gehäuse über 100l Volumen:	$Q_L \approx 5$
Gehäuse zwischen 40 und 100l Volumen:	$Q_L \approx 7$
Gehäuse bis 40l Volumen:	$Q_L \approx 10$

Tabelle 6: Abschätzung der Verlustgüte Q_L

In unserem Fall sollte eine Wahl für $Q_L \approx 7$ genügen. Daraus ergeben sich nach der QB_3 - Alignment - Tabelle gemäß Dickason (3. Auflage 2005, Kapitel 3) alle gesuchten Werte. Aus der Gesamtgüte $Q_{g,Mk} = 0,40$ folgt bei QB_3 - Abstimmung ein Abstimmungsverhältnis von $h \approx 1,0106$ und ein Volumensverhältnis $\alpha \approx 1,1141$. Daraus folgt gemäß Formel 8 eine Helmholtzresonanzfrequenz von $f_H = f_{uS} \cdot h \approx 29,88Hz$.

Mit dem Volumenverhältnis α ergibt sich nach Graber (WS 2006/07, Kapitel 7.3) ein Gehäusevolumen von:

$$V_{vG} = \frac{V_{\ddot{a},Ma}}{\alpha} = \frac{60,07l}{1,1141} \approx 53,9l$$

Die Tabelle des QB_3 - Alignments für eine Verlustgüte von $Q_L \approx 7$ gemäß Dickason (3. Auflage 2005, Kapitel 3) gibt weiters Auskunft über das Verhältnis der $3dB$ - Grenzfrequenz zur Chassisresonanzfrequenz. Hier gilt:

$$\frac{f_{3dB}}{f_{uS}} \approx 1,0214$$

und damit folgt ein voraussichtliche $3dB$ - Grenzfrequenz von $f_{3dB} \approx 30,2 Hz$.

Nachfolgend ist in Tabelle 7 zur Verdeutlichung einen Ausschnitt der erwähnten QB_3 - Tabelle dargestellt. Die für uns wichtige Zeile ist grau hinterlegt. Es ist zu erkennen, dass bei diesem Alignment bis zu einer Chassisgüte von $Q_{g,Mk} \approx 0,41$ kein Überschwingen im SPL - Frequenzgang der Chassis/Gehäuse - Kombination zu erwarten ist. Ein leichtes Überschwingen setzt erst ab einer Chassisgüte von $Q_{g,Mk} \approx 0,42$ ein und steigert sich entsprechend deutlich hin zu höheren Chassisgüten.

$Q_{g,Mk}$	h	α	f_{-3dB}/f_s	Peak in dB
0,3000	1,3145	2,8421	1,5732	0
0,3100	1,2748	2,5944	1,5070	0
0,3200	1,2376	2,3667	1,4439	0
0,3300	1,2028	2,1594	1,3836	0
0,3400	1,1702	1,9699	1,3258	0
0,3500	1,1395	1,7964	1,2702	0
0,3600	1,1106	1,6371	1,2167	0
0,3700	1,0834	1,4905	1,1651	0
0,3800	1,0578	1,3552	1,1153	0
0,3900	1,0335	1,2300	1,0674	0
0,4000	1,0106	1,1141	1,0214	0
0,4100	0,9889	1,0065	0,9776	0
0,4200	0,9683	0,9064	0,9362	0,01
0,4300	0,9488	0,8131	0,8975	0,05
0,4400	0,9303	0,7260	0,8618	0,14
0,4300	0,9128	0,6445	0,8294	0,31

Tabelle 7: Ausschnitt einer QB_3 - Tabelle für $Q_L \approx 7$

15.5 Tunnelabmessung

Nach der Festlegung des Gehäusevolumens von $V_{vG} \approx 53,9l$ und der Helmholtzresonanzfrequenz von $f_H \approx 29,88Hz$ gilt es nun die geeigneten Tunnelabmessungen für den Bassreflexunnel zu finden.

15.5.1 Ideale Betrachtung

Zunächst ein Blick auf die Tunnelberechnung, die möglichst ideale Voraussetzungen zur Vermeidung eventuell entstehende Nebeneffekt bei der Schallwiedergabe mit Bassreflexgehäusen schafft.

Nach Graber (WS 2006/07, Kapitel 7.3) gilt für eine geeignete Tunnelquerschnittsfläche:

$$A_{B\ddot{o}} \geq 0,8 \frac{s}{m} \cdot f_H \cdot V_{M,max} \quad (9)$$

$V_{M,max}$ stellt das größte durch die Membran verschobene Luftvolumen in m^3 dar und ergibt sich aus:

$$V_{M,max} = A_M \cdot x_{M,max}$$

$x_{M,max}$ stellt den maximale linearen Membranauslenkung laut Herstellerdatenblatt dar und wird in unserem Fall mit $x_{M,max} = 20mm$ angenommen.

Aus $x_{M,max} = 20mm$ und gegebener Membranfläche von $S_d \approx 213,82 cm^2$ (siehe Tabelle 1) folgt unmittelbar:

$$V_{M,max} = 0,02138 m^2 \cdot 2 \cdot 10^{-2} m \approx 0,0004273 m^3$$

Die Fläche der Bassreflexöffnung sollte daher nach Formel 9 mindestens:

$$A_{B\ddot{o}} \geq 0,8 \frac{s}{m} \cdot 29,88 Hz \cdot 0,0004273 m^3 \approx 0,0102 m^2 = 102 cm^2$$

betragen. Der Mindestradius der Bassreflexöffnung liegt somit bei:

$$r_{B\ddot{o}} = \sqrt{\frac{A_{B\ddot{o}}}{\pi}} \approx 5,7 \text{ cm}$$

Die Tunnellänge für unsere „idealen“ Bassreflexstunnel ergibt sich nun aus der Theorie des Helmholtzresonators nach Graber (WS 2006/07, Kapitel 7.3) allgemein zu:

$$l_{Br} = l_{Br,eff} - 2 \cdot \Delta l_{Br} = \frac{c^2 \cdot A_{B\ddot{o}}}{V_{vG} \cdot 4\pi^2 \cdot f_h^2} - 1,7 \cdot r_{B\ddot{o}} \quad (10)$$

und in Zahlen zu:

$$l_{Br} = \frac{(\approx 343 \frac{m}{s})^2 \cdot 0,0102 \text{ m}^2}{0,0539 \text{ m}^3 \cdot 4\pi^2 \cdot (29,88 \frac{1}{s})^2} - 1,7 \cdot 0,057 \text{ m} \approx 0,5348 \text{ m}$$

Unter Anderem, weil diese Näherungen nicht als strenge Vorschrift gelten und diese Rohrdimensionen in der Praxis nicht zu realisieren sind (das Rohr ist für unser Gehäusevolumen einfach viel zu groß), weichen wir bei unserer Konstruktion von dieser - dem Ideal nahen - Berechnung ab.

15.5.2 Realisierung in der Laborbox

Auch weil oben genannte Berechnungen konstruktiv nicht realisierbar sind, aber vor Allem weil im Laborbestand bereits ein praktisches - in der Länge variables - Bassreflexrohr vorhanden war, haben wir uns für ein kleineres Bassreflexrohr entschieden. Allein der Durchmesser der „idealen“ Lösung ist in der Praxis für eine Bassreflexbox dieser Größe nicht gängig.

Eventuelle Verluste im Tunnel, werden sicherlich auch erst ab sehr großen Membranhüben zu erwarten sein, da die Bassreflexstunnelfläche $A_{B\ddot{o}}$ eine Funktion der maximalen linearen Membranauslenkung $x_{M,max}$ ist. Wir gehen allerdings nicht davon aus, dass im Labor dieser Maximalwert erreicht wird und rechtfertigen daher unsere Wahl des Bassreflexrohrs „BR 13.25“ der Firma Visaton, dessen Konstruktionszeichnung in Abbildung 56 zu sehen ist.

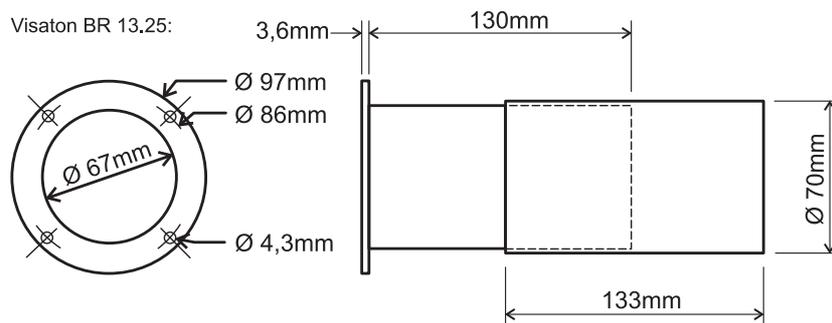


Abbildung 56: Konstruktionszeichnung Visaton BR 13.25

Durch dieses Bassreflexrohr ergibt sich der große Vorteil einer beliebigen Einstellung der Helmholtzfrequenz f_H durch einfache Längenvariation. Die deutlich

verringerte Öffnungsfläche $A_{B\delta}$ von „nur“ $A_{B\delta} \approx 35,26 \text{ cm}^2$, bereitete uns dabei in der Messpraxis keine Probleme.

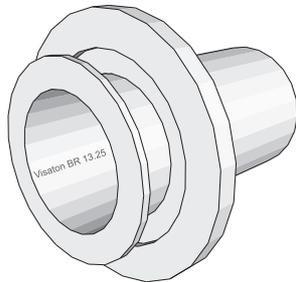
Weiterhin ist zu erwähnen, dass das Laborgehäuse - das ja auch als geschlossenes Gehäuse verwendet werden kann - ein Volumen von $V_{vG} \approx 53,8 \text{ l}$ und nicht das bereits berechnete theoretisch optimale Volumen von $V_{vG} \approx 53,9 \text{ l}$ aufweist. Dieser Sachverhalt ergibt sich aus den Berechnung für das große geschlossenen Laborgehäuse (vgl. Kapitel 14.1.3), bei dem wir durch sehr dichte Befüllung die theoretischen Anforderungen einer Gehäusegüte von $Q_{g,gG} \approx 0,5$ erreichen konnten. Die Abweichung der beiden Volumina beträgt nur etwa 0,2% und ist daher als vertretbar einzustufen.

Die entsprechende Tunnellänge l_{Br} für die geforderte Abstimmfrequenz $f_H \approx 29,88 \text{ Hz}$ ergibt sich mit diesem Bassreflexrohr nach Formel 10 nun zu:

$$l_{Br} = \frac{\left(\approx 343 \frac{\text{m}}{\text{s}}\right)^2 \cdot 0,003848 \text{ m}^2}{0,0538 \text{ m}^3 \cdot 4\pi^2 \cdot \left(29,88 \frac{1}{\text{s}}\right)^2} - 1,7 \cdot 0,035 \text{ m} \approx 0,1793 \text{ m}$$

Die theoretische Rohrlänge liegt damit in einem konstruktiv leicht zu realisierenden Bereich von $l_{Br} \approx 18 \text{ cm}$.

15.6 Konstruktion des Laborgehäuses



Aus der Überlegung so wenige Lautsprechergehäuse wie möglich bauen zu müssen entstand die Idee, das größte Lautsprechergehäuse sowohl als geschlossenes Gehäuse, als auch mit annähernd gleicher Konfiguration als Bassreflexgehäuse nutzen zu können. Die Konstruktion des Bassreflexgehäuses wurde daher schon in Kapitel 14.2.3 beschrieben und ist auch dort anhand Konstruktionszeichnung detailliert dokumentiert.

Die einzige Änderung gegenüber der Konfiguration des beschriebenen Gehäuses, stellt der einfach auszutauschende, verschraubte Deckel des Gehäuses dar. Bei der Realisierung der Bassreflexbox ist dieser lediglich durch den ebenfalls konstruierten Deckel mit eingesetztem Bassreflexrohr „BR 13.25“ der Firma Visaton auszutauschen. Für die geschlossenen Gehäusevariante steht entsprechend ein Deckel geschlossener Form zur Verfügung.

Die Deckel wurden - wie alle Gehäuse - aus mitteldichter Faserplatte (kurz: MDF) mit einer Materialstärke von 19mm erstellt. Sie haben in Ihrer Grundstruktur die Form des negativen Profilausschnitts der Schallwandöffnung, welcher aus den Konstruktionszeichnung auszulesen ist (siehe Kapitel 14.2.3). Einer dieser Deckel wurde entsprechend für das verwendete Bassreflexrohr angepasst. Die Konstruktionszeichnung des Deckels für die Bassreflexvariante sind nachfolgend in Abbildung 57 ersichtlich.

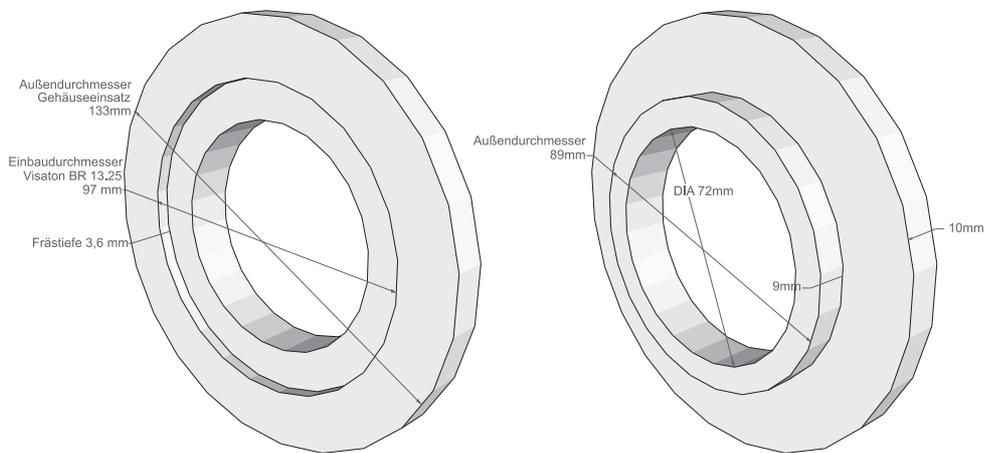


Abbildung 57: Profildeckel Bassreflexgehäuse; Front- und Rückansicht

Teil V

Messung der Laborgehäuse

Die folgenden Messergebnisse zeigen auf, wie gut theoretische Berechnungen mit der Praxis übereinstimmen. Dazu wird sowohl auf verschiedenen Impedanzfrequenzgängen, als auch auf entsprechenden SPL - Frequenzgängen der jeweiligen Chassis/Gehäuse - Kombination eingegangen und die zu beobachtenden Effekte genauer erläutert.

Weiters werden die Einflüsse bei Stopfung der Gehäuse mit Dämmmaterial behandelt.

16 Geschlossene Gehäuse

Nachfolgende Messungen beziehen sich auf die in Kapitel 14 vorgestellten geschlossenen Gehäuse.

16.1 Impedanzmessungen

16.1.1 Kleines geschlossenes Gehäuse (hoher Güte)

Der Impedanzfrequenzgang des Lautsprecherchassis im kleinen ungedämmten geschlossenen Gehäuse mit $V_{\dot{a},gG,brutto} \approx 8,86l$ Volumen ist in Abbildung 58 zu sehen. Unseren Erwartungen entsprechend sollte diese Gehäuse - Chassiskombination in einer Gehäuseresonanzfrequenz von $f_{gG} \approx 77 Hz$ resultieren (vgl. Kapitel 14.3.1).

Die Analyse der abgebildeten Messung ergibt einen Wert von $f_{gG} \approx 79 Hz$ und liegt damit nur knapp 2,6% über dem theoretisch berechneten Sollwert.

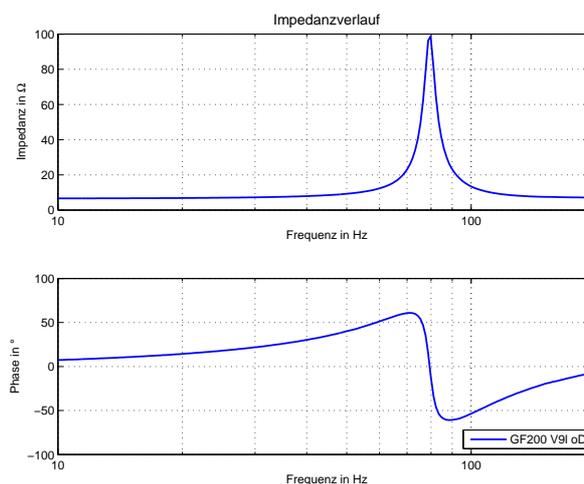


Abbildung 58: Impedanzverlauf 9,7l Gehäuse - ohne Dämmung

16.1.2 Geschlossenes Gehäuse mittlerer Größe

Der Impedanzfrequenzgang des Lautsprecherchassis im ungedämmten geschlossenen Gehäuse mittlerer Größe mit $V_{\ddot{a},gG,brutto} \approx 22,06l$ Volumen ist in Abbildung 59 zu sehen. Unseren Erwartungen entsprechend sollte diese Gehäuse - Chassikombination in einer Gehäuseresonanzfrequenz von $f_{gG} \approx 53,2 Hz$ resultieren (vgl. Kapitel 14.3.2).

Die Analyse der abgebildeten Messung ergibt einen Wert von $f_{gG} \approx 56 Hz$ und liegt damit knapp 5% über dem theoretisch berechneten Sollwert.

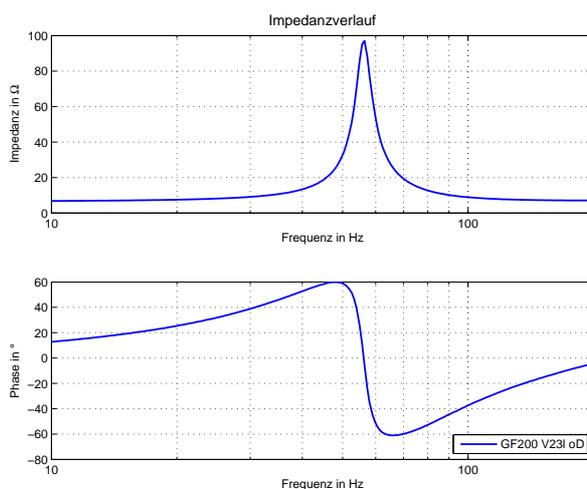


Abbildung 59: Impedanzverlauf 22,9l Gehäuse - ohne Dämmung

16.1.3 Großes geschlossenes Gehäuse (geringer Güte)

Der Impedanzfrequenzgang des Lautsprecherchassis im stark gedämmten großen geschlossenen Gehäuse mit $V_{gG,brutto} \approx 53l$ Volumen ist in Abbildung 60 zu sehen. Unseren Erwartungen entsprechend sollte diese Gehäuse - Chassikombination in einer Gehäuseresonanzfrequenz von $f_{gG} \approx 37,1 Hz$ resultieren (vgl. Kapitel 14.3.3).

Die Analyse der abgebildeten Messung ergibt einen Wert von $f_{gG} \approx 39 Hz$ und liegt damit knapp 5% über dem theoretisch berechneten Sollwert.

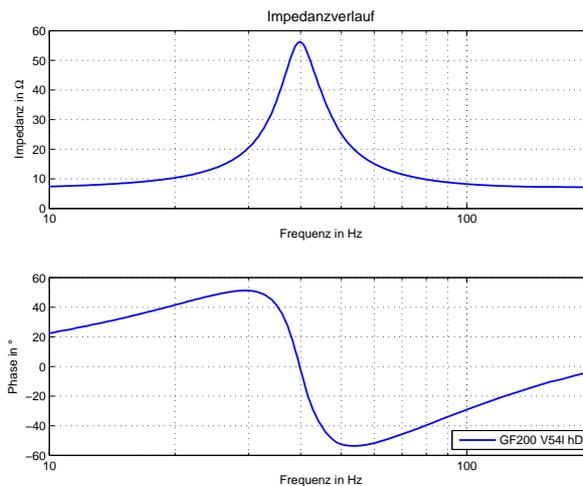


Abbildung 60: Impedanzverlauf 53,8l Gehäuse - hohe Dämmung

16.2 SPL - Messungen

16.2.1 Kleines geschlossenes Gehäuse (hoher Güte)

Abbildung 61 zeigt den SPL - Frequenzgang des Lautsprecherchassis im kleinen ungedämmten geschlossenen Gehäuse mit $V_{ü,gG,brutto} \approx 8,86l$ Volumen.

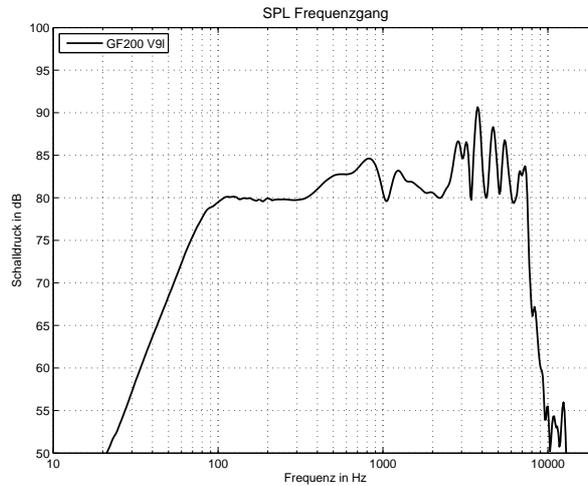


Abbildung 61: SPL - Frequenzgang 9,7l Gehäuse - ohne Dämmung

Die Abbildung zeigt einen Schalldruckpegel von $80\text{dB}/\text{SPL}$ bei einer Frequenz von etwa 120 Hz . Ausgehend davon, dass ein Chassis dieser Dimension als Basstreiber genutzt wird, können wir annehmen, dass sich die sogenannte -3dB Grenzfrequenz der Chassis/Gehäuse - Kombination bei etwa 75 Hz befindet. Die Abbildung zeigt die für Chebychev (C_2) - Abstimmungen charakteristischen Messergebnisse (vgl. Kapitel 14.1.1).

16.2.2 Geschlossenes Gehäuse mittlerer Größe

Abbildung 62 zeigt den SPL - Frequenzgang des Lautsprecherchassis im geschlossenes Gehäuse mittlerer Größe mit $V_{\text{ä},gC,\text{brutto}} \approx 22,06\text{ l}$ Volumen.

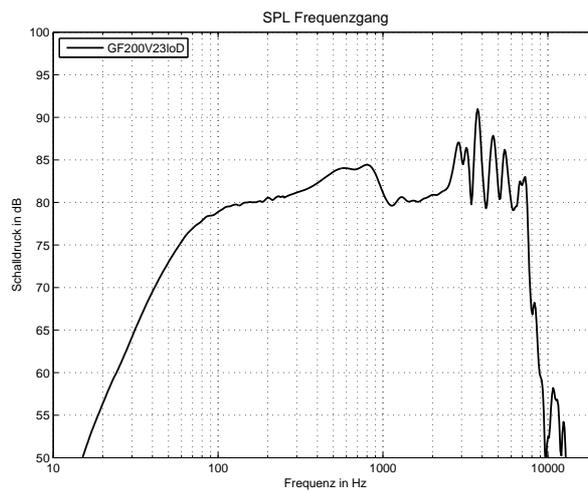


Abbildung 62: SPL - Frequenzgang 22,9l Gehäuse - ohne Dämmung

Die Abbildung zeigt einen Schalldruckpegel von $80\text{dB}/\text{SPL}$ bei einer Fre-

geunz von etwa 150 Hz . Ausgehend davon, dass ein Chassis dieser Dimension als Basstreiber genutzt wird, können wir annehmen, dass sich die sogenannte -3dB Grenzfrequenz der Chassis/Gehäuse - Kombination bei etwa 65 Hz befindet. Die Abbildung zeigt die für Butterworth (B_2) - Abstimmungen charakteristischen Messergebnisse (vgl. Kapitel 14.1.2).

16.2.3 Großes geschlossenes Gehäuse (geringer Güte)

Abbildung 63 zeigt den SPL - Frequenzgang des Lautsprecherchassis im großen stark gedämmten geschlossenen Gehäuse mit $V_{\ddot{u},g,brutto} \approx 53\text{ l}$ Volumen.

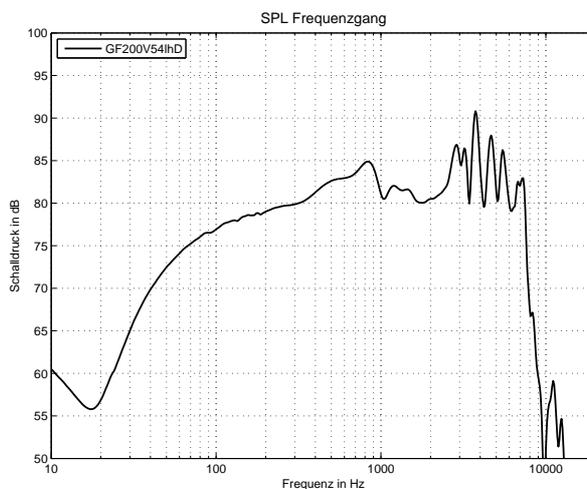


Abbildung 63: SPL - Frequenzgang 53,8l Gehäuse - hohe Dämmung

Die -3dB Grenzfrequenz der Chassis/Gehäuse - Kombination lässt sich hier nicht so leicht definieren. Die Kurve fällt allerdings zu tiefen Frequenzen hin deutlich flacher ab, was den theoretischen Erwartungen entspricht.

16.3 Einfluss von Dämmmaterial

Abbildung 64 und 66 zeigen die Einflüsse auf den Impedanzfrequenzgang bei Stopfung eines geschlossenen Gehäuses mit Dämmmaterial, im Vergleich zum gleichen leeren geschlossenen Gehäuse. Hierzu wurde das geschlossene Gehäuse mittlerer Größe mit $V_{\ddot{a},gG,brutto} \approx 22,06l$ Volumen (vgl. Kapitel 14.3.2) zunächst „mitteldicht“ und anschließend „dicht“ mit Mineralwolle gestopft.

16.3.1 Impedanzfrequenzgang bei „mitteldichter“ Dämmung

Die Analyse der Vergleichsmessung aus Abbildung 64 zeigt zunächst eine Absenkung der Resonanzfrequenz um etwa 2 Hz bei mitteldichter Dämmung des geschlossenen Gehäuses. Bei weiterer Betrachtung lässt sich durch den resultierenden flacheren Kurvenverlauf eine Güteverringering¹ feststellen. Dieses Verhalten entspricht dem aus Formel 6 in Kapitel 14.1.3 bekannten Zusammenhang der Vergrößerung des Äquivalenzvolumens $V_{\ddot{a},gG}$ eines geschlossenen Gehäuses bei Einbringung von Dämmmaterial. Die Erhöhung des Äquivalenzvolumens $V_{\ddot{a},gG}$ entspricht nun laut Formel 3 aus Kapitel 14.1 einer entsprechenden Verringerung der Gesamtgüte $Q_{g,gG}$ der geschlossenen Chassis/Gehäuse - Kombination.

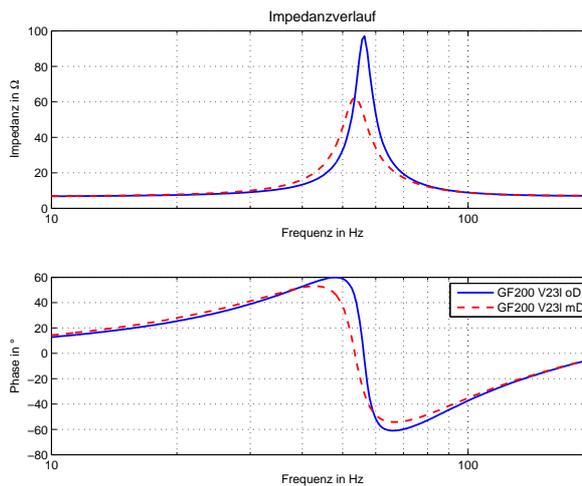


Abbildung 64: Impedanzverlauf 22,9l Gehäuse; ohne vs. mitteldichte Dämmung

Für unser mitteldicht gedämmtes geschlossenes Gehäuse mit $V_{gG,brutto} \approx 22,06l$ gilt so nach der Theorie:

$$V_{\ddot{a},gG,netto} = \frac{\kappa}{\psi} \cdot V_{gG,netto} = \frac{1,4}{\approx 1,2} \cdot 22,06l \approx 25,7l$$

was einer Erhöhung des Äquivalenzvolumens um etwa 17% entspricht.

Entsprechend verringert sich die Gesamtgüte von $Q_{g,gG} = 0,72$ auf:

$$Q_{g,gG} \approx \sqrt{\frac{\frac{60,07l}{25,7l} + 1}{1,15}} \cdot 0,4 \approx 0,68$$

¹Die Güte eines schwingungsfähigen Systems ergibt sich zu: $Q = \frac{f_0}{B}$

was einer Verringerung der Güte um etwa 5% entspricht.

Die Resonanzfrequenz würde in diesem Fall nach Formel 4:

$$f_{gG} \approx \frac{0,68}{0,4} \cdot 29,57 \text{ Hz} \approx 50 \text{ Hz}$$

betragen, was gegenüber der Berechnung des ungedämmten Gehäuses mit $f_{gG} \approx 53,2 \text{ Hz}$ einer Differenz von etwa 3 Hz entspricht.

Die Tatsache, dass die aus Abbildung 64 ersichtliche Differenz der Resonanzfrequenz der gedämmten Chassis/Gehäuse - Kombination von etwa 2 Hz nicht den 3 Hz der Berechnung entspricht, liegt wohl daran, dass die Wahl der Variablen ψ zur Berücksichtigung der Dämmung im Gehäuse, beziehungsweise die Menge der Dämmung selbst nur sehr schwierig mit vorliegender Theorie in Verbindung gebracht werden können. So hängt ψ selbst auch stark vom gewählten Dämmmaterial ab.

Die Berechnung stellt für uns trotzdem eine gute Näherung zur Praxis dar, da die sich ergebenden Gesamtabweichungen zusammen mit den entsprechenden Resonanzfrequenzen (berechnet und gemessen) in diesem Fall bei nur etwa 2% liegen.

16.3.2 SPL - Frequenzgang bei „mitteldichter“ Dämmung

Abbildung 65 zeigt den SPL - Frequenzgang des mitteldicht gedämmten Gehäuses im Vergleich zum gleichen Gehäuse im ungedämmten Fall. Eine leichte Erhöhung der -3dB Grenzfrequenz steht einem deutlich flacher abfallenden Kurvenverlauf hin zu tiefen Frequenzen gegenüber.

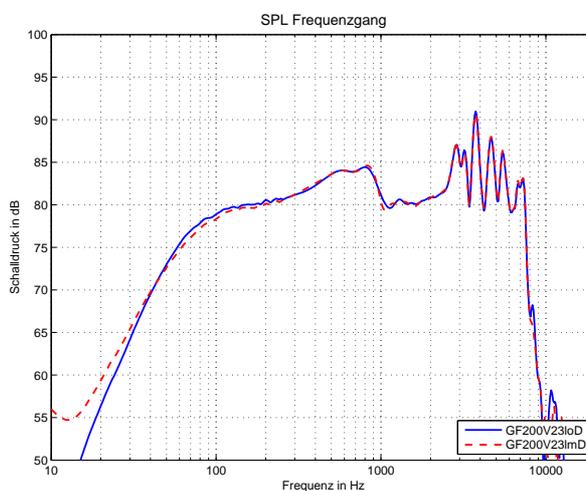


Abbildung 65: SPL - Frequenzgang 22,9l Gehäuse; ohne vs. mitteld. Dämmung

16.3.3 Impedanzfrequenzgang bei „hoher“ Dämmung

Bei sehr hoher Dämmung ergibt sich zum Vergleich folgender Sachverhalt. Die Analyse der Vergleichsmessung aus Abbildung 66 zeigt eine Absenkung der Resonanzfrequenz um etwa 6 Hz bei sehr hoher Dämmung des geschlossenen Ge-

häuses. Erneut lässt sich durch den resultierenden flacheren Kurvenverlauf eine - diese mal noch stärkere - Güteverringering feststellen. Dieses Verhalten entspricht dem aus Formel 6 in Kapitel 14.1.3 bekannten Zusammenhang der Vergrößerung des Äquivalenzvolumens $V_{\ddot{a},gG}$ eines geschlossenen Gehäuses, bei Einbringung von Dämmmaterial. Die Erhöhung des Äquivalenzvolumens $V_{\ddot{a},gG}$ entspricht nun laut Formel 3 aus Kapitel 14.1 einer entsprechenden Verringerung der Gesamtgüte $Q_{g,gG}$ der geschlossenen Chassis/Gehäuse - Kombination.

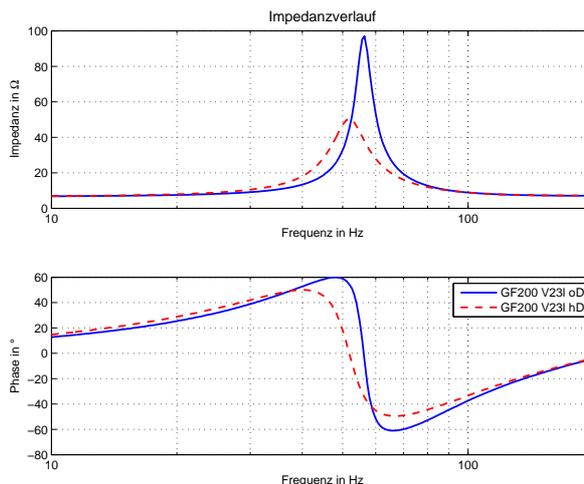


Abbildung 66: Impedanzverlauf 22,9l Gehäuse; ohne vs. hohe Dämmung

Für unser sehr stark gedämmtes geschlossenes Gehäuse mit $V_{gG,brutto} \approx 22,06l$ gilt so nach der Theorie:

$$V_{\ddot{a},gG,netto} = \frac{\kappa}{\psi} \cdot V_{gG,netto} = \frac{1,4}{\approx 1} \cdot 22,06l \approx 30,8l$$

was einer Erhöhung des Äquivalenzvolumens um 40% entspricht.

Entsprechend verringert sich die Gesamtgüte von $Q_{g,gG} = 0,72$ auf:

$$Q_{g,gG} \approx \sqrt{\frac{\frac{60,07l}{30,8l} + 1}{1,15}} \cdot 0,4 \approx 0,64$$

was einer Verringerung der Güte um etwa 11% entspricht.

Die Resonanzfrequenz würde in diesem Fall nach Formel 4:

$$f_{gG} \approx \frac{0,64}{0,4} \cdot 29,57 \text{ Hz} \approx 47,3 \text{ Hz}$$

betragen, was gegenüber der Berechnung des ungedämmten Gehäuses mit $f_{gG} \approx 53,2 \text{ Hz}$ einer Differenz von etwa 6 Hz entspricht. Die Berechnung stellt für uns daher eine sehr gute Näherung zur Praxis dar.

16.3.4 SPL - Frequenzgang bei „hoher“ Dämmung

Abbildung 67 zeigt den SPL - Frequenzgang des stark gedämmten Gehäuses im Vergleich zum gleichen Gehäuse im ungedämmten Fall. Im Vergleich zum

ungedämmten Gehäuse lässt sich hier kein flacherer Abfall des Kurvenverlaufs hin zu tiefen Frequenzen beobachten, sondern die Steigung bleibt fast gleich. Es lässt sich feststellen, dass die **Überbedämpfung** einer geschlossenen Chassis/Gehäuse - Kombination, trotz der theoretischen Vorteile durch scheinbar größeres Volumen, keine Verbesserung des Frequenzverhaltens hin zu sehr tiefen Frequenzen bedeuten muss. Hingegen zeigt sich an diesem Beispiel, dass im Bassbereich eher Schalldruck verloren geht (etwa -1dB/SPL zwischen 40 Hz und 200 Hz). Bei unerwünschten Überhöhungen in diesem Bereich kann allerdings eine starke Bedämpfung und der damit verbundene SPL - Verlust auch erwünscht sein, um einen ebenen SPL - Frequenzverlauf zu erhalten.

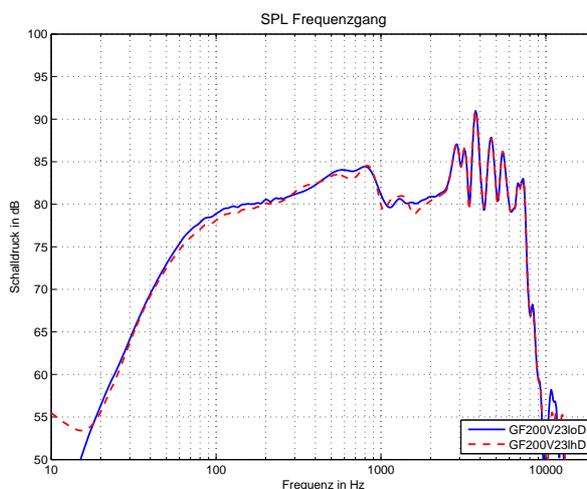


Abbildung 67: SPL - Frequenzgang 22,9l Gehäuse; ohne vs. hohe Dämmung

Abbildung 68 stellt im direkten Vergleich, die drei „Gehäusevarianten“ in einer Abbildung gegenüber.

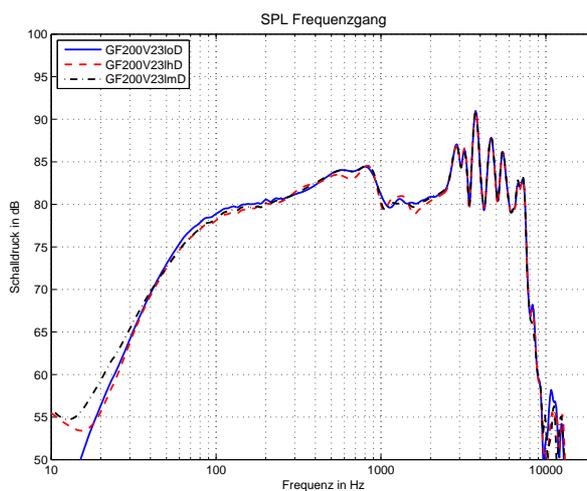


Abbildung 68: SPL - Frequenzgang 22,9l Gehäuse; ohne/mitteld./hohe D.

17 Bassreflexgehäuse

Nachfolgende Messungen beziehen sich auf die in Kapitel 15 vorgestellte Bassreflexgehäuse.

17.1 Impedanzmessungen des Bassreflexgehäuses

Nachfolgende Impedanzfrequenzgänge des Lautsprecherchassis wurden im Bassreflexgehäuse mit $V_{vG,brutto} \approx 53l$ Volumen (aus Chassisvolumenkorrektur, vgl. Kapitel 14.3) angefertigt. Auf zusätzliche Korrektur des Bruttovolumens um das Bassreflex-tunneleigenen Volumen wurde bei den Berechnungen verzichtet. Der dadurch zu erwartende Fehler ist als gering einzustufen (siehe Messergebnisse).

Die Bassreflexrohr-längen der gemessenen Konfigurationen entsprechen nicht der in Kapitel 15.5.2 berechneten Bassreflexrohr-länge von $l_{Br} \approx 18cm$ für das eingebaute Bassreflexrohr BR 13.25 der Firma Visaton. Dies war auch nicht unbedingt nötig, weil wir bei der Messauswertung mehr auf die Wirkung der Variation der Bassreflexrohr-länge eingehen möchten.

17.1.1 Tunnellänge 15cm

Entsprechend den aus Kapitel 15.5.2 bekannten Abmessungen des Bassreflexrohrs, dem um das Chassisvolumen korrigierte Gehäusevolumen von $V_{vG,brutto} \approx 53l$ und Formel 10 aus Kapitel 15.5 für die Bestimmung der Bassreflexrohr-länge, ergibt sich die zu erwartende Abstimmfrequenz f_H zunächst als neue Formel zu:

$$f_H = \sqrt{\frac{c^2 \cdot A_{B\ddot{o}}}{(l_{Br} + 1,7 \cdot r_{B\ddot{o}}) \cdot V_{vG} \cdot 4\pi^2}} \quad (11)$$

und als Wert zu:

$$f_H = \sqrt{\frac{(\approx 343 \frac{m}{s})^2 \cdot 0,003848 m^2}{(0,15 m + 1,7 \cdot 0,0335 m) \cdot 0,0538 m^3 \cdot 4\pi^2}} \approx 32,1 Hz$$

In Abbildung 69 ist der dieser Konfiguration entsprechende Impedanzfrequenzgang des eingebauten Lautsprecherchassis ersichtlich.

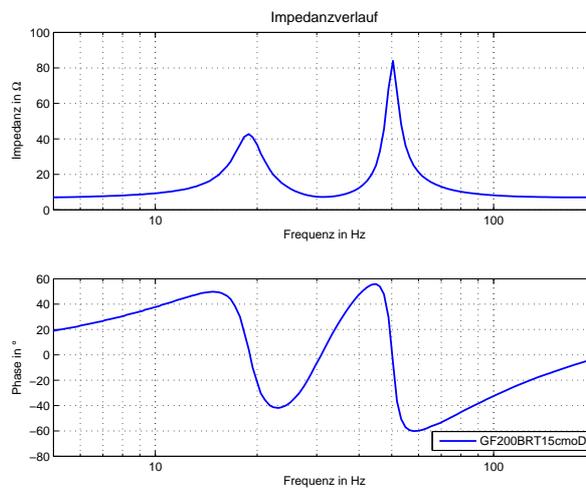


Abbildung 69: Impedanzfrequenzgang $l_{Br} = 15 \text{ cm}$ ohne Dämmung

Die Abstimmfrequenz f_H liegt im erwarteten Bereich von $f_H \approx 32,1 \text{ Hz}$.

17.1.2 Tunnellänge 25cm

Nun wurde die Tunnellänge auf 25cm erhöht.

Nach Formel 11 ergibt sich die Abstimmfrequenz f_H jetzt zu:

$$f_H = \sqrt{\frac{(\approx 343 \frac{m}{s})^2 \cdot 0,003848 \text{ m}^2}{(0,25 \text{ m} + 1,7 \cdot 0,0335 \text{ m}) \cdot 0,0538 \text{ m}^3 \cdot 4\pi^2}} \approx 26,4 \text{ Hz}$$

In Abbildung 70 ist der dieser Konfiguration entsprechende Impedanzfrequenzgang des eingebauten Lautsprecherchassis ersichtlich.

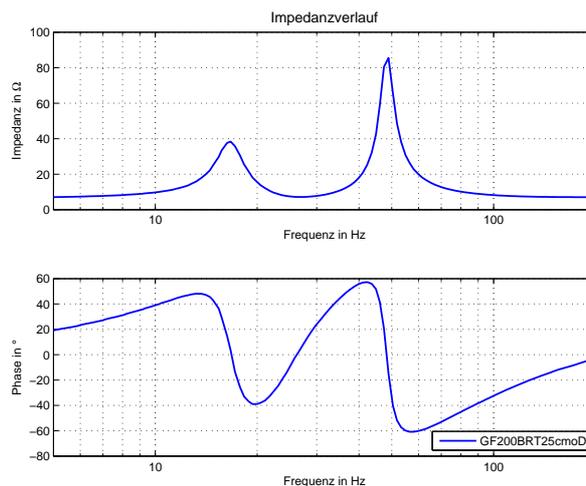


Abbildung 70: Impedanzfrequenzgang $l_{Br} = 25 \text{ cm}$ ohne Dämmung

Die Abstimmfrequenz f_H liegt ebenfalls sehr gut im erwarteten Bereich von $f_H \approx 26,4 \text{ Hz}$.

17.1.3 Einfluss von Dämmmaterial

Zur Verdeutlichung des Einflusses von Dämmmaterial im Bassreflexgehäuse, wurde eine Messung mit starker Dämmung bei einer Tunnellänge von 15 cm erstellt. Nach Formel 6 aus Kapitel 14.1.3 bewirkt das Stopfen des Gehäuses eine Vergrößerung des Äquivalenzvolumens. Dadurch erwartet man ein Absinken der Abstimmfrequenz f_H und damit eine Verschiebung des Impedanzfrequenzgangs zu tieferen Frequenzen. Weiterhin sollten die Resonanzspitzen im Impedanzfrequenzgang stark gedämpft sein, was dem gleichen Verhalten entspricht, das wir bereits in Kapitel 16.3 bei Dämmung geschlossener Gehäuse beobachten konnten.

Im Fall des Bassreflexgehäuses gilt folgend bei starker Dämmung:

$$V_{\ddot{a},vG,brutto} = \frac{\kappa}{\psi} \cdot V_{gG} = \frac{1,4}{\approx 1} \cdot 53 \text{ l} \approx 74,2 \text{ l}$$

Die Abstimmfrequenz f_H sollte sich für diese Konfiguration nun nach Formel 11 auf:

$$f_H = \sqrt{\frac{(\approx 343 \frac{\text{m}}{\text{s}})^2 \cdot 0,003848 \text{ m}^2}{(0,15 \text{ m} + 1,7 \cdot 0,0335 \text{ m}) \cdot 0,0742 \text{ m}^3 \cdot 4\pi^2}} \approx 27,3 \text{ Hz}$$

einstellen.

In Abbildung 71 ist der dieser Konfiguration entsprechende Impedanzfrequenzgang des eingebauten Lautsprecherchassis ersichtlich.

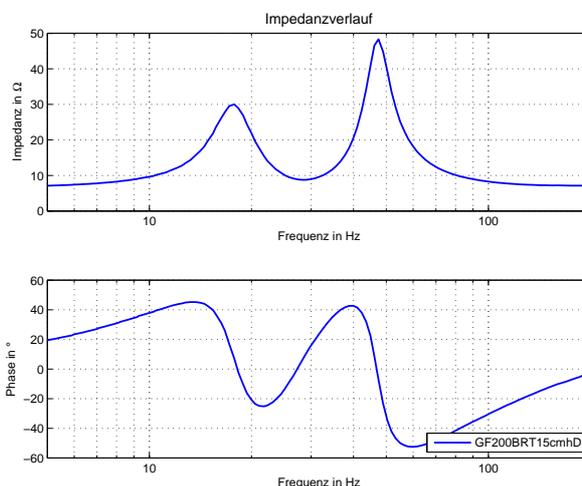


Abbildung 71: Impedanzfrequenzgang $l_{Br} = 15 \text{ cm}$ hohe Dämmung

Die Abstimmfrequenz f_H liegt in der Abbildung bei etwa $f_H \approx 28 \text{ Hz}$. Dieses Ergebnis entspricht mit ausreichender Genauigkeit unseren Erwartungen.

Nachfolgend zeigt Abbildung 72 die Impedanzfrequenzgänge drei Konfigurationsvarianten unseres Bassreflexgehäuses im direkten Vergleich.

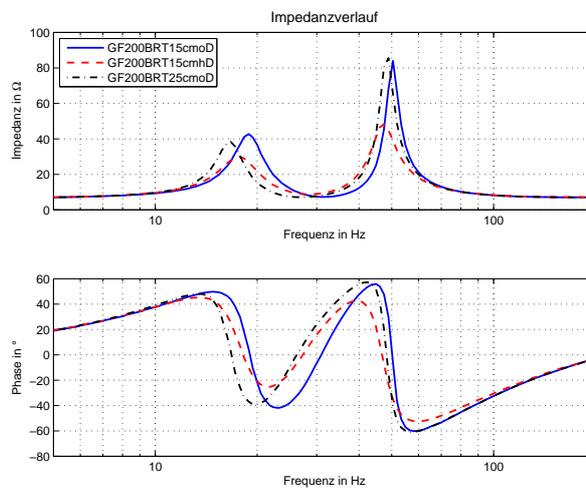


Abbildung 72: Vergleich der Impedanzfrequenzgänge des Bassreflexgehäuses

17.2 SPL - Messungen des Bassreflexgehäuses

Nachfolgende SPL - Frequenzangmessungen des Lautsprecherchassis entsprechen den bereits in Kapitel 17.1 beschriebenen Konfigurationen.

Die Messungen werden teilweise im Vergleich dargestellt. Theoretisch sollten sich die Kurven dabei im Mittel- und Hochtonbereich decken, was jedoch nicht immer der Fall ist. Die teilweise auftretenden undefinierten Welligkeiten der SPL - Frequenzgänge werden durch bisher ungeklärte Messartefakte bei der Messung mit „ARTA“ (vgl. Teil VII) verursacht. Bezüglich dieses Problems wurde von uns bereits mit dem Programmierer des Softwarepakets Kontakt aufgenommen. Eine Lösung gibt es zum Zeitpunkt der Fertigstellung dieser Projektdokumentation leider noch nicht. Die abgebildeten Messdaten sind trotzdem als verlässlich einzustufen, weil sich die Messartefakte erstens bei der Nahfeldmessung für den tieffrequenten Bereich gar nicht bemerkbar machen und im Mittel- und Hochtonbereich sich die Variation durch die Messartefakte im Mittel ausgleichen. Zudem ist der Mittel- und Hochtonbereich für die Betrachtung der Bassreflexbox nicht relevant.

17.2.1 Tunnellänge 15cm

Abbildung 73 zeigt den SPL - Frequenzgang des ungedämmten Bassreflexgehäuses mit einer Tunnellänge von $l_{Br} = 15 \text{ cm}$.

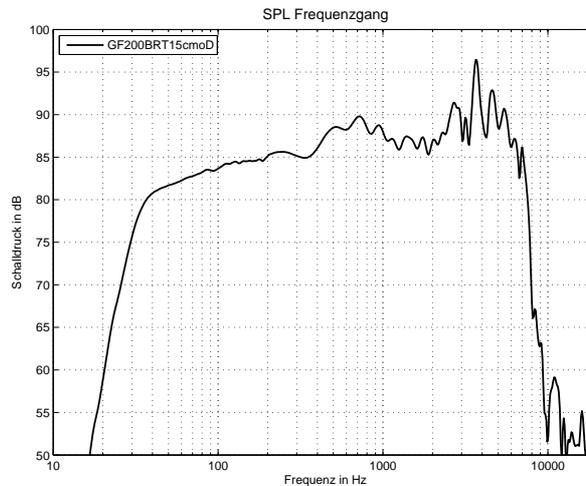


Abbildung 73: SPL - Frequenzgang $l_{Br} = 15 \text{ cm}$ ohne Dämmung

Die Abbildung zeigt eine Sperrwirkung von etwa 24 dB/Oktave . Es sei erwähnt, dass der Mittel- und Hochtonbereich der Messung nicht überbewertet werden sollte. Der Lautsprecher wurde als Bassreflexbox konstruiert und dient normalerweise einer Schallwiedergabe bis etwa 200 Hz . Durch geeignete schaltungstechnische Maßnahmen, lässt sich dieser Frequenzgang durchaus in der Praxis verwenden.

17.2.2 Tunnellänge 25cm

Abbildung 74 zeigt den SPL - Frequenzgang des ungedämmten Bassreflexgehäuses mit einer Tunnellänge von $l_{Br} = 25 \text{ cm}$.

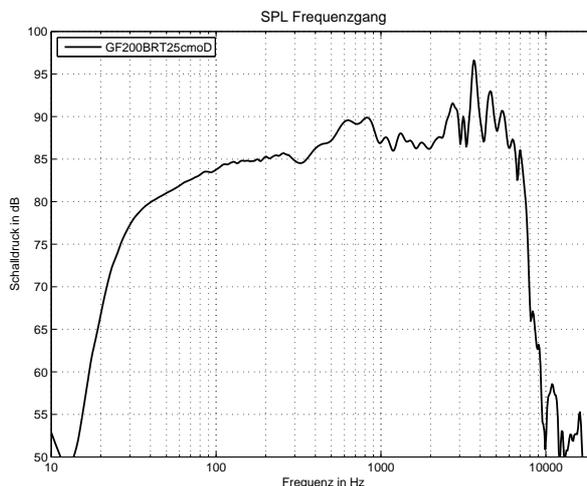


Abbildung 74: SPL - Frequenzgang $l_{Br} = 25 \text{ cm}$ ohne Dämmung

Die Abbildung zeigt eine etwas flachere Sperrwirkung von etwa 22 db/Oktave . Dieses Verhalten geht bereits mehr in Richtung der Vorgaben des QB_3 - Alignments, nach dessen Kriterien diese Bassreflexbox dimensioniert wurde (vgl. Kapitel 15.3).

Nachfolgend sind in Abbildung 75 die SPL - Frequenzgänge der beiden Konfigurationsvarianten, verschiedener Tunnellängen und ohne Gehäusedämmung, im direkten Vergleich dargestellt.

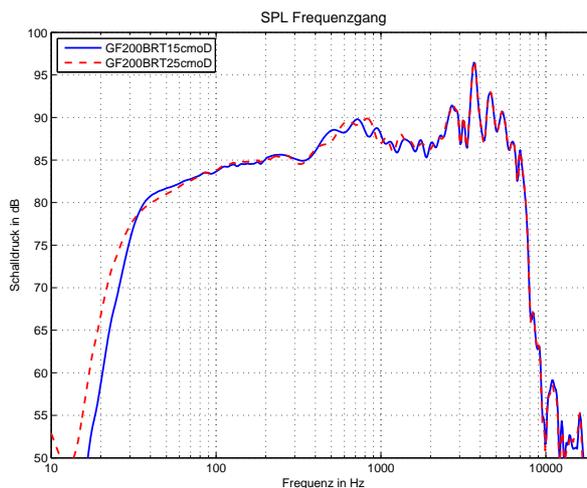


Abbildung 75: SPL - Frequenzgang $l_{Br} = 15 \text{ cm}$ u. $l_{Br} = 25 \text{ cm}$ ohne Dämmung

17.2.3 Einfluss von Dämmmaterial

Es wurde eine Messung mit starker Dämmung bei einer Tunnellänge von 15cm erstellt. Gemäß Kapitel 16.3.4, welches das Verhalten des geschlossenen Gehäuses bei hoher Dämmung beschreibt, erwarten wir uns auch bei der Bassreflexbox ein ähnliches Verhalten. Die extreme Dämmung stellt auch bei der Bassreflexbox eine Überbedämpfung dar und somit sollte dementsprechend kein flacherer Abfall des Kurvenverlauf hin zu tiefen Frequenzen beobachtet werden, obwohl die Abstimmfrequenz f_H nach Kapitel 17.1.3 gesunken ist. Im Abknickbereich - also um den Bereich der Grenzfrequenz - sollte hingegen ein starker Einfluss der Dämmung zu sehen sein.

Abbildung 76 zeigt den SPL - Frequenzgang des stark gedämmten Bassreflexgehäuses mit einer Tunnellänge von $l_{Br} = 15\text{ cm}$.

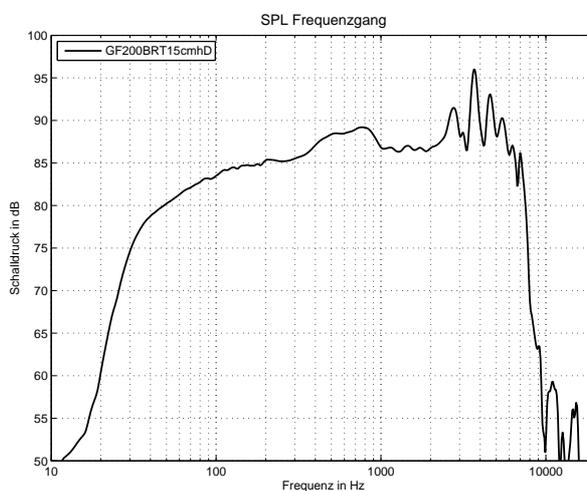


Abbildung 76: SPL - Frequenzgang $l_{Br} = 15\text{ cm}$ mit hoher Dämmung

Nachfolgend sind in Abbildung 77 die SPL - Frequenzgänge, der ungedämmten und stark gedämmten Bassreflexkonfiguration gleicher Tunnellängen, im direkten Vergleich dargestellt.

Wie diese Abbildung bestätigt bringt auch die **Überbedämpfung** eines Bassreflexgehäuses, trotz der theoretischen Vorteile durch scheinbar größeres Volumen, keine Verbesserung des Frequenzverhaltens hin zu sehr tiefen Frequenzen. Zur Tiefbasserweiterung der Schwallwiedergabe eines Bassreflexgehäuses taugt diese Dämpfungsvariante also nicht.

Nach Dickason (3. Auflage 2005, Kapitel 3) empfiehlt sich, entgegen unserer Variante, eine lockere Stopfung des Bassreflexgehäuses (Füllung von etwa 50%). Dabei wird empfohlen, vor allem die dem Chassis gegenüberliegende Gehäusewand mit Dämmwatte zu bedecken. Noch besser sei allerdings die Bedämpfung aller Flächen direkt, neben und hinter dem Chassis. Die Wiedergabekurven für den SPL - Frequenzgang zeigen auch bei Dickason's Messungen nur sehr geringe Änderungen vor und nach der Gehäusedämmung (ebenso beim Impedanzfre-

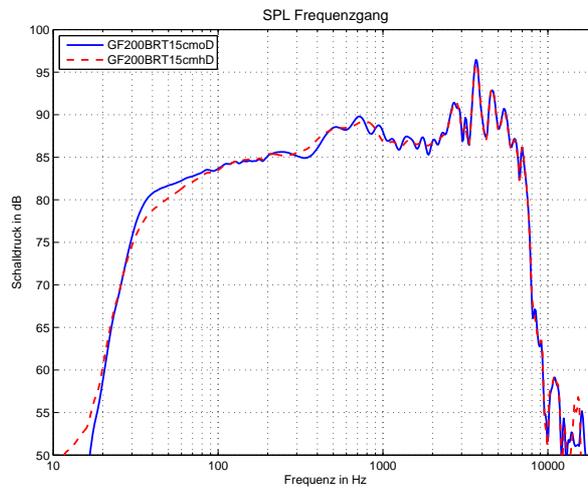


Abbildung 77: SPL - Frequenzgang $l_{Br} = 15 \text{ cm}$ ohne vs. hohe Dämmung

quenzgang). Der Hauptvorteil liegt in der Verringerung von Stehwellenmoden im Bassreflexgehäuse, was die leichte Bedämpfung eines Bassreflexgehäuses nahelegt. Bei der Bedämpfung sollte jedoch stets darauf geachtet werden, dass der Bassreflexrohr nicht mit Dämmwatte verstopft wird.

Teil VI

Entwurf eines Mehrwegesystems

Das folgenden Kapitel beschäftigt sich mit der Entwicklung eines ventilierten Zwei-Wege Systems inklusive passiver Frequenzweiche. Die Konstruktion wurde im Rahmen der Projektarbeit als Stereopaar durchgeführt und steht somit für Messungen und Hörvergleiche bereit.

Im Vordergrund stand dabei, dass sich die einzelnen Entwurfsschritte leicht nachvollziehen lassen, um Unzulänglichkeiten und Optimierung hörbar zu machen. Weiters soll untersucht werden, wie gut eine Simulation des Systems mit dem realen System übereinstimmt.

18 Planungsprozess

Die bisherigen Laborgehäuse und Aufbauten hatten als Konstruktionsvorgabe immer die theoretischen Vorgaben zur Erreichung bestimmter Ergebnisse zur Grundlage. Es mag also etwas überraschend klingen, dass wir als Vorgabe für das Zwei-Wege System Vorgaben verwendet haben, die eher aus der Praxistauglichkeit für den Einsatzzweck stammen. Unser Ziel, einen als typische Stereo-Nahfeldabhöre eingesetzten Studiomonitor zu entwickeln, der aus ergonomischen Gesichtspunkten optimal sein soll, ließ, wie man später sehen wird, eine starke Diskrepanz dieser beiden Ansätze aufkommen. Dennoch hielten wir es für sinnvoll die ergonomischen Vorgaben einzuhalten. Eine überdimensionierte Nahfeld-Abhöre, die nicht an den Arbeitsplatz passt, dürfte nicht das Ziel eines Boxen Entwicklers sein.

18.1 Entwurfskriterien

Umgesetzt werden soll ein ventiliertes, passives Zwei-Wegesystem bestehend aus einem Tiefmitteltöner und einer Gewebekalotte als Hochtöner. Das Gehäusevolumen wurde auf 20 Liter beschränkt, was eine kompakte Bauform zulassen soll. Die Frequenzweiche soll für Laborzwecke extern untergebracht sein, um sie variabel zu gestalten und das System für weitere Ergänzungen offen zu halten, so ist z.B. die Umsetzung als aktive Variante nachträglich möglich. Auch kann so mit einer Echtzeitsimulation der Frequenzweichenschaltung, wie es mit LspCAD Pro möglich ist gearbeitet werden, um weitere Optimierungen vorzunehmen.

18.2 Chassiswahl

Da wir gute Erfahrungen mit den High - End Chassis der Firma Visaton gemacht haben, fiel die Entscheidung für den Tiefmitteltöner relativ schnell auf ein Chassis aus der „AL Serie“, deren Vertreter eine Aluminiummembran aufweisen. Das AL170 erschien für den Einsatzzweck ideal, da es mit 17 cm erwartungsgemäß eine ausreichend niedrige Resonanzfrequenz haben sollte. Das Prinzip der Aluminium Membran hat einen mechanischen Nachteil: Es entsteht eine starke Resonanz im Bereich von ca. $5,5kHz$, die auf Biegeschwingungen der Membran selbst zurückzuführen ist. Diese Resonanz liegt oberhalb des Frequenzbereichs, in dem das Chassis eingesetzt werden soll. Somit ist eine steile und möglichst

tiefe Trennung innerhalb der Frequenzweiche wichtig. Des Weiteren wird auf Grund des Durchmessers der Membran eine starke Bündelung zu hohen Frequenzen zu erwarten sein, die ab ca. $1 - 2kHz$ bemerkbar sein wird. Um diesen Kriterien mit dem Hochtöner entgegenzukommen wurde eine Hochtön-Kalotte mit 2,5 cm Durchmesser gewählt. Die Trennfrequenz sollte somit in den Bereich $1,5 - 2kHz$ gelegt werden können.

18.3 Gehäuseabstimmung

Wie anfangs erwähnt, soll das fertige System eine kompakte Bauform erhalten. Als Vorgabe für das Volumen wurden 20 Liter gewählt. Das Gehäuse soll zudem einen abgestimmten Bassreflex tunnel erhalten. Um das Äquivalenzvolumen etwas zu vergrößern und gleichzeitig Gehäuse resonanzen zu minimieren, soll das Gehäuse ausreichend mit Dämmmaterial gefüllt werden. Um die Wirkung der Bassreflex tunnel zu wahren, sollten diese hierbei frei bleiben.

18.3.1 Abmessungen

Die Außenabmessungen der Lautsprechergehäuse wurden aus ästhetischen Gesichtspunkten folgendermaßen festgelegt:

(Höhe x Breite x Tiefe): $420mm \times 220mm \times 320mm$ (1,91 : 1 : 1,45).

Durch die Materialwahl von 19mm MDF Platten (mitteldichte Faserplatten), ergeben sich folgende Innenabmessungen:

(Höhe x Breite x Tiefe): $382mm \times 182mm \times 282mm$.

Das Gesamtvolumen beträgt somit $V_{MwS} = 3,82dm \cdot 1,82dm \cdot 2,82dm = 19,6l$.

18.3.2 Stopfen mit Dämmwolle

Das Gehäuse soll ausreichend mit Dämmwolle gestopft werden, um innere Reflexionen zu vermeiden. Es ist außerdem zu erwarten, dass die Abstimmfrequenz des Gehäuses aufgrund des kleinen Volumens etwas zu hoch liegen wird, mit der Dämmwolle kann die Abstimmfrequenz ein wenig nach unten korrigiert werden.

18.3.3 Bassreflex tunnel

Der Bassreflex tunnel des Systems soll sowohl in der Frontplatte integriert werden als auch aus leicht erhältlichen Standard Reflex tunneln aufgebaut werden können.

18.4 Passive Frequenzweiche

Die Frequenzweiche hat die Aufgabe mit Hilfe von Tief- und Hochpassfilter die beiden Wege zu Tief- und Hochtöner zu trennen und die einzelnen Chassis nur mit dem Frequenzbereich zu versorgen, in dem sie auch genutzt werden sollen. Für den Hochtöner ist dies wichtig, da eine Bespielung mit zu tiefen Frequenzen ab einem relativ geringen Pegel zur mechanischen Zerstörung führen kann. Beim Tiefweg hat die Filterung hauptsächlich klangästhetische Gründe.

Wir wollen für unser Mehrwegesystem eine flexible Frequenzweiche aufbauen, die mit Butterworth-Filtern 1. und 2. Ordnung ausgestattet ist. Per Schalter soll die Filterordnung umschaltbar gemacht werden, um die beiden Filtertypen vergleichen zu können. Des Weiteren sollen alle gegebenenfalls notwendigen Korrekturschaltungen zu und abschaltbar sein, um auch hier einen leichten AB Vergleich zu ermöglichen.

Zur Berechnungsgrundlage für die Filterschaltungen wird die Nennimpedanz $R_{nenn} = 8 \Omega$ der Chassis benutzt.

18.4.1 Berechnung von Butterworth Filtern 1. Ordnung

Für die Bauteilwerte eines Butterworth-Filters 1. Ordnung mit der Übergangsfrequenz $f_{\ddot{u}}$ ergibt sich nach Graber (WS 2006/07):

$$C = \frac{1}{2\pi \cdot R_{nenn} \cdot f_{\ddot{u}}}$$

$$L = \frac{R_{nenn}}{2\pi \cdot f_{\ddot{u}}}$$

18.4.2 Berechnung von Butterworth Filtern 2. Ordnung

Für die Bauteilwerte eines Butterworth-Filters 2. Ordnung mit der Übergangsfrequenz $f_{\ddot{u}}$ ergibt sich nach Graber (WS 2006/07):

$$L = \frac{\sqrt{2} \cdot R_{nenn}}{2\pi f_{\ddot{u}}}$$

$$C = \frac{\sqrt{2}}{2\pi \cdot f_{\ddot{u}} \cdot R_{nenn}}$$

18.4.3 Berechnung der Übergangsfrequenzen

Beim Entwurf der Frequenzweiche wurden nur Standardbauteilwerte benutzt. Die Trennfrequenzen 1 der Filter 1. Ordnung wurden weit auseinander gelegt. Die Übergangsfrequenzen ergeben mit den realen Bauteilwerten:

$$f_{\ddot{u},TF1,HT,1O} = \frac{1}{2\pi \cdot R_{nenn} \cdot C} = \frac{1}{2\pi \cdot 8\Omega \cdot 8,2\mu F} \approx 2425 \text{ Hz}$$

$$f_{\ddot{u},TF1,TT,1O} = \frac{R_{nenn}}{2\pi \cdot L} = \frac{8\Omega}{2\pi \cdot 0,68mH} \approx 1870 \text{ Hz}$$

Die Trennfrequenzen 2 der Filter 1. Ordnung wurden dichter gelegt. Die Übergangsfrequenzen ergeben mit den realen Bauteilwerten:

$$f_{\ddot{u},TF2,HT,1O} = \frac{1}{2\pi \cdot R_{nenn} \cdot C} = \frac{1}{2\pi \cdot 8\Omega \cdot 6,8\mu F} \approx 2925 \text{ Hz}$$

$$f_{\ddot{u},TF2,TT,1O} = \frac{R_{nenn}}{2\pi \cdot L} = \frac{8\Omega}{2\pi \cdot 0,47mH} \approx 2710 \text{ Hz}$$

Die Filter 2. Ordnung wurden empirisch mit Hilfe der Boxsim Simulation (siehe Kap. 19) optimiert. Die Filtercharakteristik entspricht nicht mehr der

eines Butterworth Filters, eine Rückrechnung auf die Übergangsfrequenz ist deshalb schwierig. Aus den Messungen in Kap. 21 ist jedoch ersichtlich, dass die Übergangsfrequenz jeweils bei ca. 2kHz liegt.

18.4.4 Berechnung von Schwingspulen-Impedanzkorrekturen

Um die ansteigende Impedanz zu hohen Frequenzen aufgrund der Schwingspulenimpedanz des Tieftonchassis zu korrigieren und so die Wirksamkeit des Filters zu verstärken, kann eine Impedanzkorrektur in Form eines parallelen RC Gliedes vorgenommen werden. Gleichstromwiderstand und Schwingspuleninduktivität aus 2 ergeben nach Graber (WS 2006/07) folgende Bauteilwerte:

$$R_K = R_S \approx 5,5 \Omega$$

$$C_K = \frac{10^3 \cdot L_S}{R_S^2} \approx 0,0397 \mu F$$

Diese Werte wurden mit Standardbauteilwerten angenähert: $R_K = 5 \Omega$, $C_K = 33 \mu F$

18.4.5 Berechnung von Saugkreisen

Um störende Resonanzen im Frequenzgang des A1170 auszugleichen soll ein elektrischer Saugkreis verwendet werden. Mit einem seriell geschaltetem Parallelschwingkreis mit Resonanzfrequenz $f_{SK} \approx 6kHz$ lassen sich Überhöhungen am Chassis-Frequenzgang effektiv vermindern. Die Bauteilwerte werden nach Dickason (3. Auflage 2005) folgendermaßen bestimmt:

$$C_{SK} = \frac{0,03003}{f_{SK}} \approx 5 \mu F$$

$$L_{SK} = \frac{0,2252}{(f_{SK}^2 \cdot C)} \approx 0,125 mH$$

$$R_{SK} = \text{Nennimpedanz des Chassis} = 8 \Omega$$

Diese Werte wurden mit Standardbauteilwerten angenähert: $C_{SK} = 4,7 \mu F$ und $L_{SK} = 0,15 mH$. Der Widerstand wurde aufgrund der Simulationsergebnisse auf $R_{SK} = 33 \Omega$ erhöht.

19 Aufbau des Systems in Boxsim

Boxsim ist ein kostenloses Programm der Firma Visaton, welches bereits sämtliche Daten sowie Messungen der hauseigenen Chassis enthält. Mit Boxsim ist es möglich, einen ersten Entwurf der Gehäusekonstruktion mit den Chassisdaten zu verknüpfen und eine passende Frequenzweiche zu konstruieren. Boxsim bietet zahlreiche Tools zur schnellen Berechnung von Abstimmfrequenz, Reflaxtunnel und diverser Filter. Wir wollen diese Tools verwenden, um unsere gewünschten Konstruktionsvorgaben umzusetzen und eine geeignete Frequenzweichenschaltung zu finden. Hierzu müssen wir einige Vorbereitungen in Boxsim treffen.

19.1 Projekt erstellen



Unter **Neu - Projekt** wird ein neues Projekt mit 2 Chassis und einem Verstärker angelegt. Die Simulation soll über den kompletten Audiofrequenzbereich in feinsten Auflösung geschehen.

19.2 Chassisdaten laden

Als ersten Schritt müssen wir die Chassisdaten laden (**Chassis & Einbau - Chassis 1 (Strg+1), Chassis 2 (Strg+2)**). Zuerst über 'Chassis laden aus Datei' die Datei AL170_8 auswählen, anschließend werden die gemessenen T/S Parameter (siehe Tab. 2) eingegeben. 'F-gang Impedanz ben.': Kann man entweder abwählen (Impedanzkurve wird anhand der T/S Parameter simuliert) oder die gemessene Kurve über 'Import' laden.

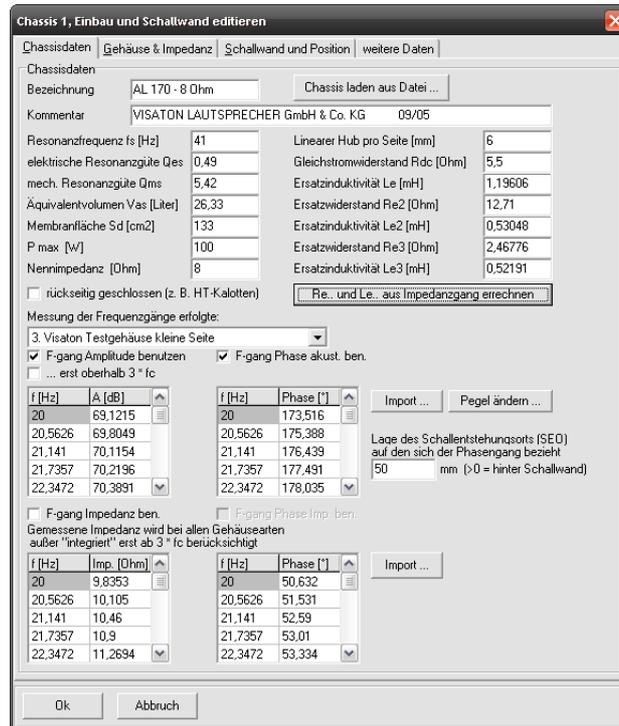


Abbildung 78: Laden der AL170 Daten für Chassis 1

Für das Chassis 2 wird die Datei G25FFL-8 geladen, alle weiteren Parameter werden belassen.

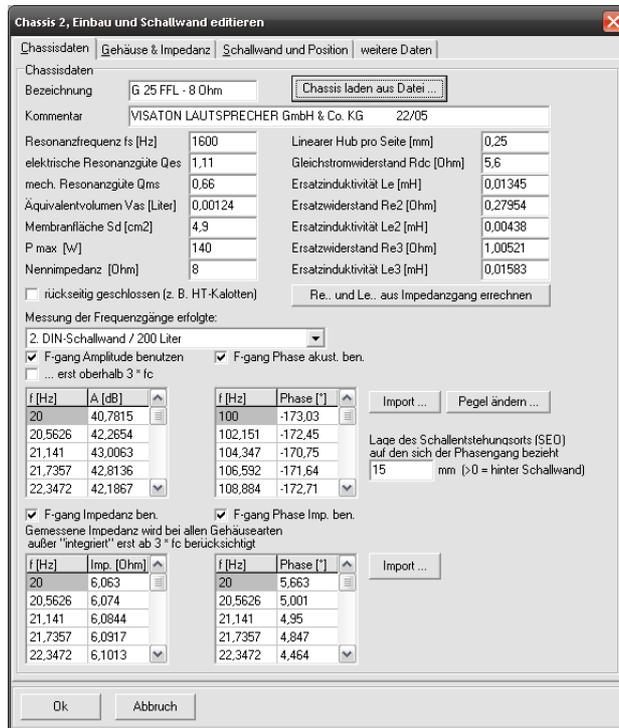


Abbildung 79: Laden der G25FFL Daten für Chassis 2

19.3 Eintragen der Gehäusedimensionen

Jetzt werden unter **Chassis & Einbau -Gemeinsames Außengehäuse** die Gehäusedimensionen eingegeben:

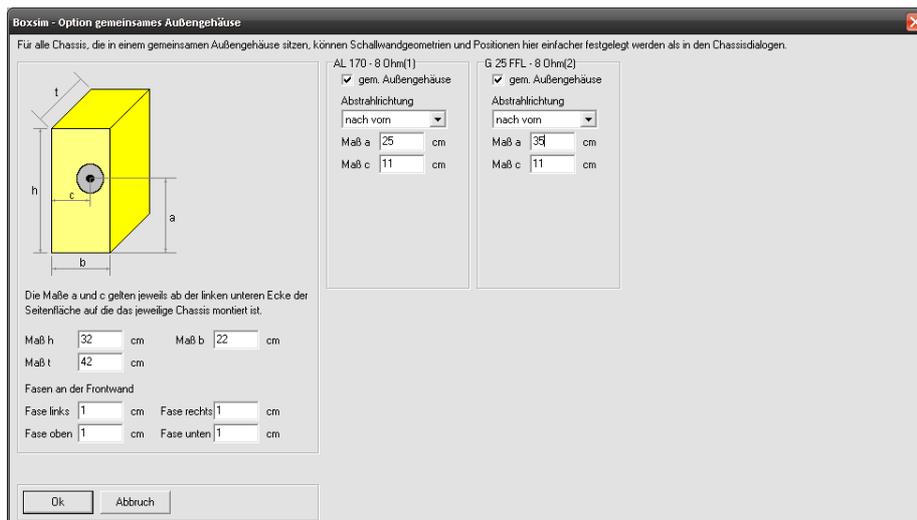


Abbildung 80: Eingeben der Gehäusedaten

Es werden die Außenmaße des Gehäuses wie in 18.3.1 gewählt eingegeben, das Innenvolumen werden wir später für das AL170 direkt eingeben. Die Lage der Chassis auf der Frontplatte werden ebenfalls hier angegeben, es ist darauf zu achten, dass 'gem. Außengehäuse' ausgewählt ist.

Zum Innenvolumen:

Zunächst wollen wir betrachten, wie sich die Abstimmfrequenz unseres gewählten Bassreflex-Gehäusevolumens ergibt, hierfür rufen wir den Menüpunkt **Extras - Geschlossenes Gehäuse & Bassreflex Gehäuse** auf und geben unsere Messwerte ein:

Abbildung 81: Bestimmung der Abstimmfrequenz des Gehäuses

Da wir nicht die optimale Volumengröße gewählt haben, sondern ein kleineres Gehäuse, geben wir unter 'Alternatives Volumen' unser gewähltes Volumen abzüglich des Chassiseigenenvolumens ein (siehe dazu auch 14.3).

Es ergibt sich eine Abstimmfrequenz von ca. 45 Hz und ein Ripple von ca. +3dB (das ist die erwartete Bassüberhöhung vor dem Hochpassabfall des Gehäuses).

Die Werte werden nun für das Innenvolumen des AL170 übernommen. Dazu rufen wir noch einmal das Dialogfeld für Chassis 1 auf (Strg +1) und gehen auf die Registerkarte **Gehäuse & Impedanz**. Für die Füllung geben wir geschätzte Werte ein.

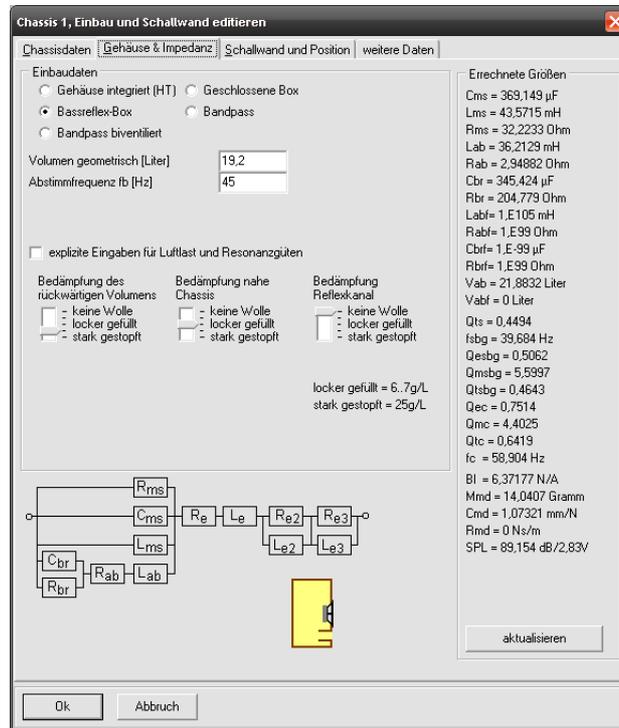


Abbildung 82: Eingabe des Innenvolumens für das AL170

19.4 Bassreflexkanal

Wir können nun den Bassreflexkanal so dimensionieren, dass die Helmholtzresonanzfrequenz mit der vorhin bestimmten Abstimmfrequenz übereinstimmt. Die Dimensionierung eines Bassreflexkanals haben wir in Kap. 15.5 schon besprochen. Will man die Dimensionierung mit Boxsim vornehmen, so ist etwas Experimentierfreude nötig. Unter **Extras - Bassreflexkanal** können die Dimensionen, sowie Lage und Anzahl der Kanäle eingegeben werden. Man erhält als Ergebnis die Abstimmfrequenz, die sich mit diesen Kanälen ergeben würde. Wir finden nach einigen Versuchen eine mögliche Lösung mit zwei Röhren, die einen Durchmesser von 3,6 cm und eine Länge von ca. 6,7 cm haben.

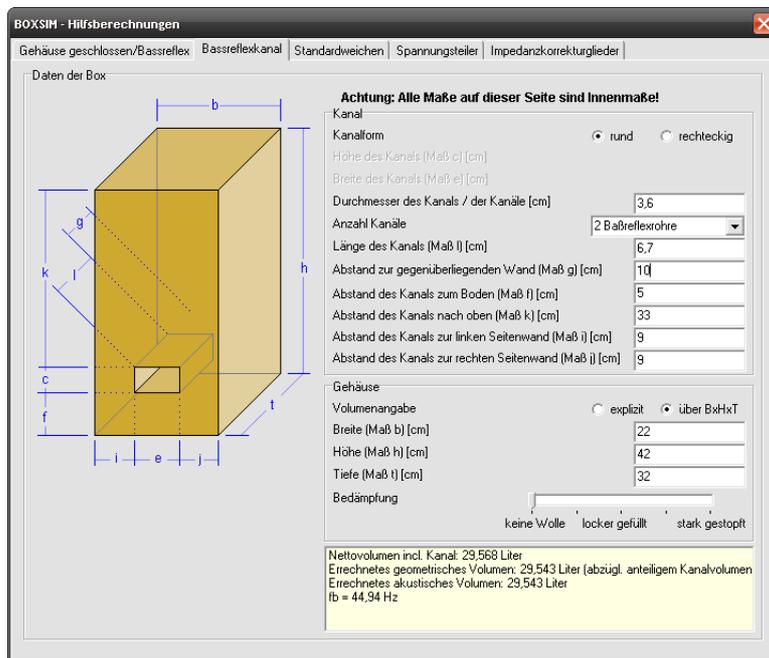


Abbildung 83: Bestimmung der Tunnelabmessung

19.5 Passive Frequenzweiche

Nachdem die Gehäusedaten nun vollständig in unser Boxsim Projekt eingetragen wurden, können wir mit der elektrischen Seite des Systems beginnen. Mit 'F6' gelangen wir ins Menü **Verstärker 1 - Weiche editieren**. Hier können mit Rechtsklick an die gewünschte Stelle des virtuellen Klemmbretts Chassis, LCR Bauteile, Drahtverbindungen, sowie Verstärkerausgang und Masse angelegt werden.

19.5.1 Hoch- und Tiefpass 1. Ordnung

Wir beginnen mit dem einfachen Hoch- und Tiefpass 1. Ordnung durch das Einfügen eines Kondensators im Hochtonzweig und einer Spule im Tieftonzweig. Durch die schlechte Trennung der Frequenzweiche mit Filtern 1. Ordnung ist ein deutliches Einspielen der Resonanzspitze des AL170 in den Gesamt-Schalldruckfrequenzgang zu erkennen.

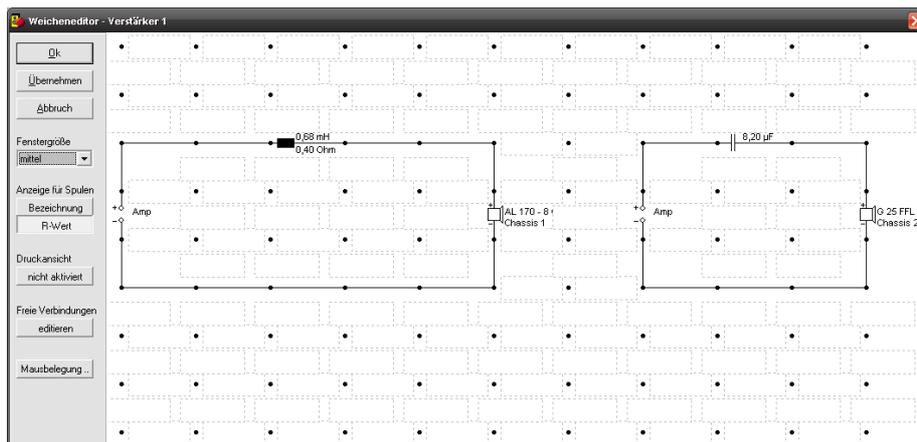


Abbildung 84: Einfacher Hoch- und Tiefpassfilter

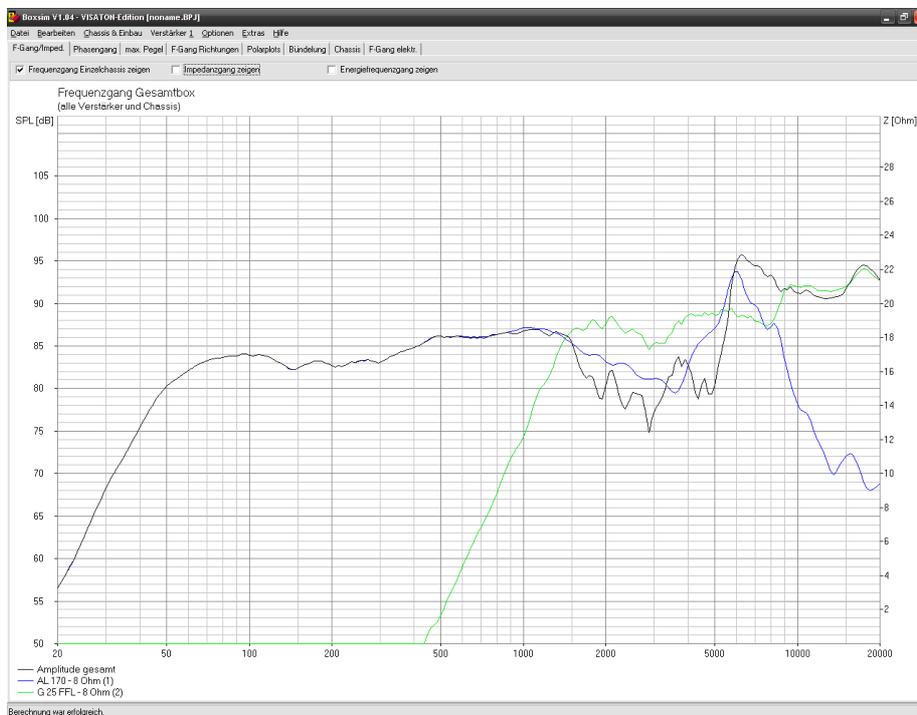


Abbildung 85: SPL Verlauf für Weiche 1. Ordnung

19.5.2 Vorwiderstand zur Dämpfung des Hochtöners

Es ist zu erwarten, dass der Hochtöner einen zu hohen Pegel liefert. Wir wollen dies zunächst durch einen Spannungsteiler vor dem HT Chassis korrigieren.

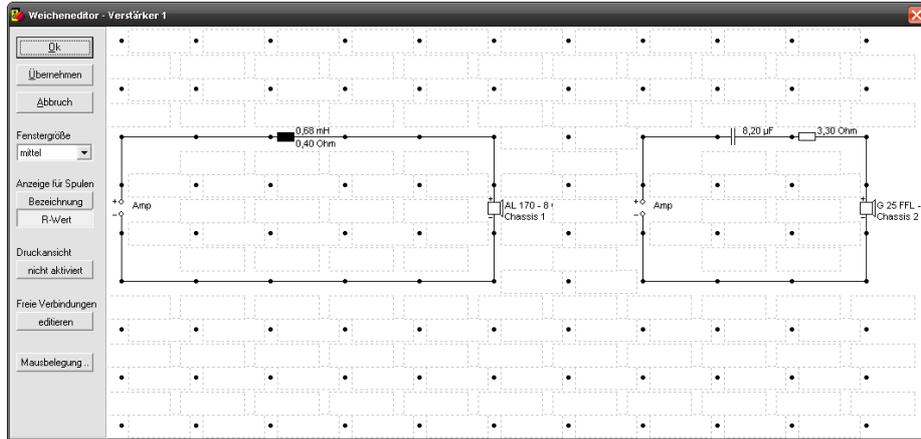


Abbildung 86: Weiche 1. O mit Spannungsteiler in Hochtonweg

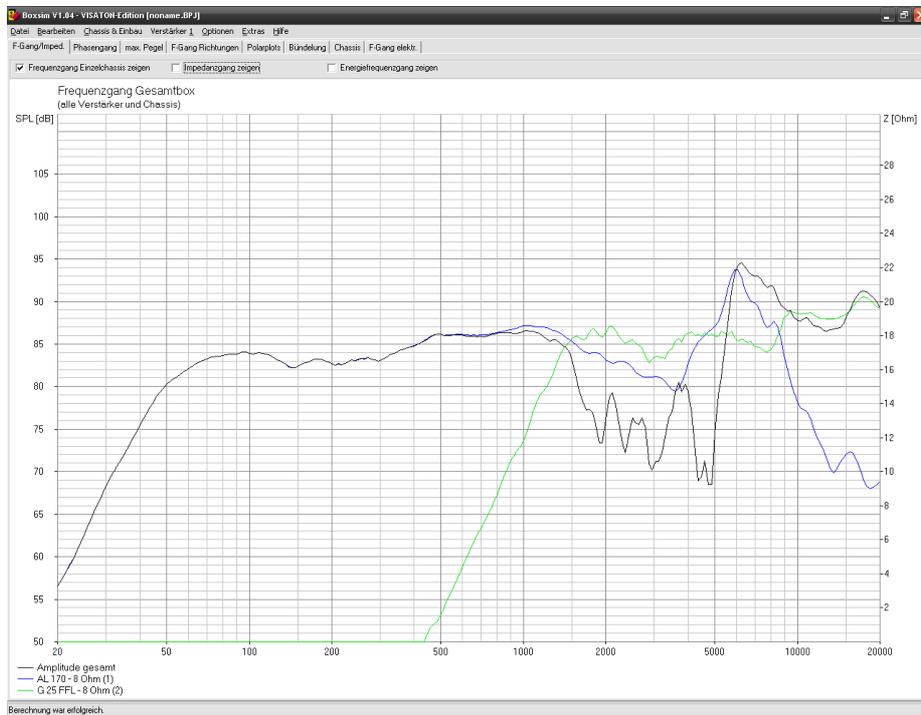


Abbildung 87: SPL Verlauf: Weiche 1. O mit Spannungsteiler an Hochtonweg

19.5.3 Impedanzkorrektur für den AL170

Um nun die Wirkung des Tiefpassfilters zu verbessern, wollen wir als nächstes eine Impedanzkorrektur für die Schwingspuleninduktivität des AL170 einbauen.

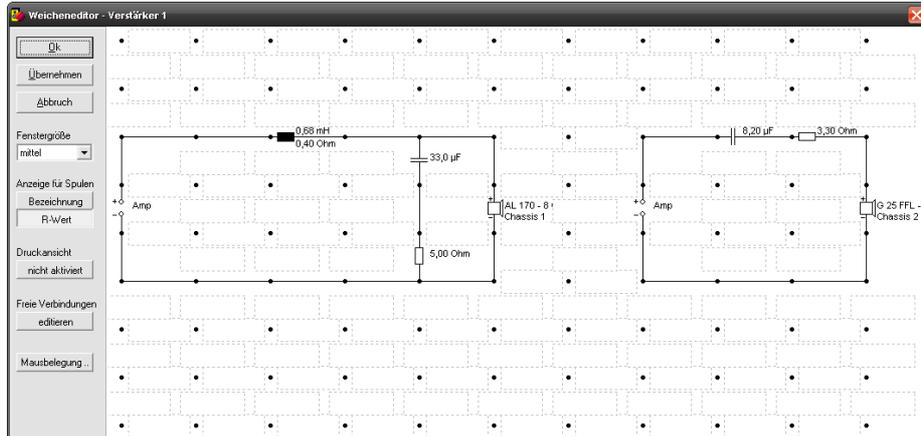


Abbildung 88: Weiche 1. O mit Impedanzkorrektur

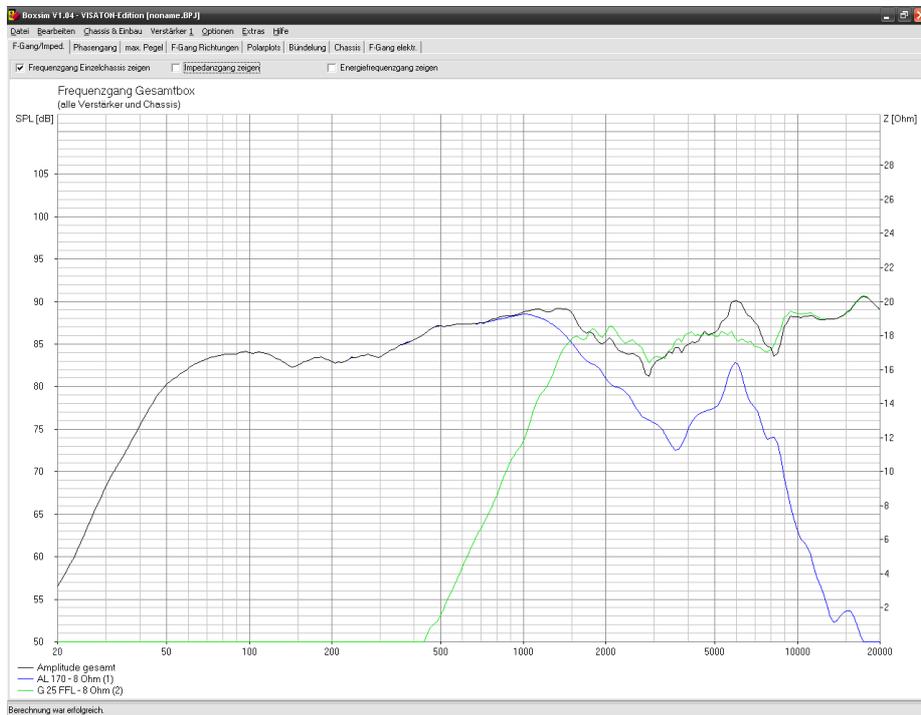


Abbildung 89: SPL Verlauf: Weiche 1. O mit Impedanzkorrektur

19.5.4 Saugkreis für die Resonanz der Membran des AL170

Um die Resonanz des AL170 bei ca. 6kHz noch etwas zu reduzieren, wollen wir abschließend noch einen Saugkreis konzipieren. Er wird als Parallelschwingkreis, der in Serie zum Chassis in die Weiche eingebaut wird, realisiert und ist auf ca. 6kHz abgestimmt:

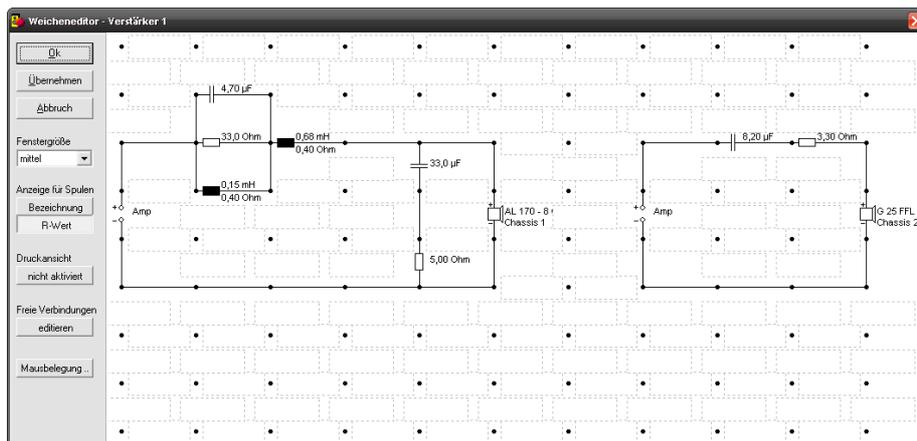


Abbildung 90: Weiche 1. O mit Saugkreis

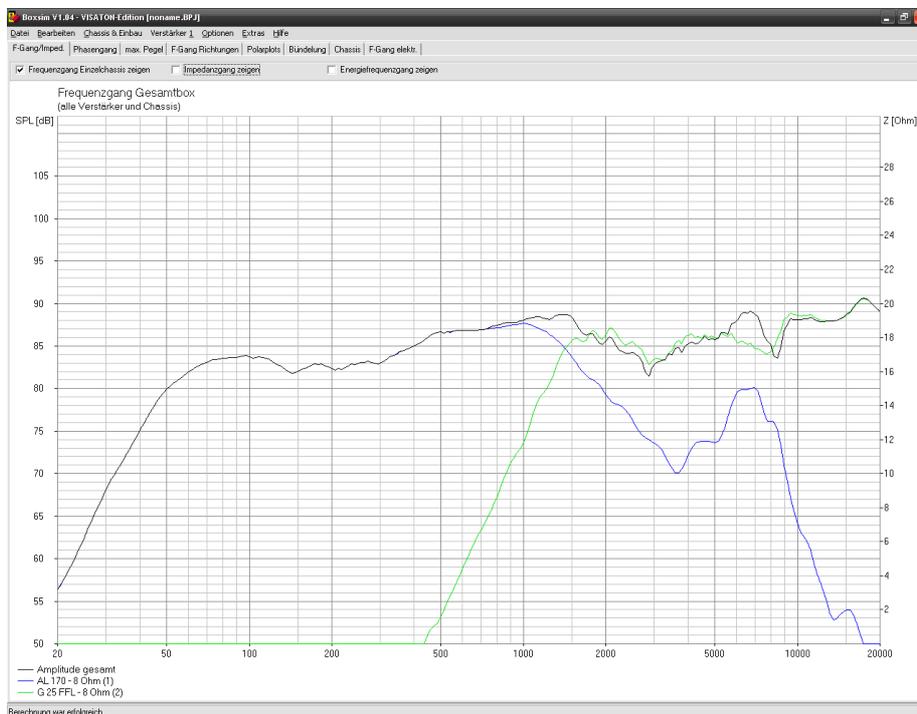


Abbildung 91: SPL Verlauf: Weiche 1. O mit Saugkreis

19.5.5 Hoch- und Tiefpass 2. Ordnung

Nun fügen wir die Filter 2. Ordnung ein. Den Spannungsteiler belassen wir direkt in der Schaltung, da die Angleichung der zwei Chassis nicht durch den Filtertyp beeinflusst wird. Zu beachten ist die aus dem Phasengang der Filter hervorgerufene Notwendigkeit der Verpolung. (Graber, WS 2006/07)

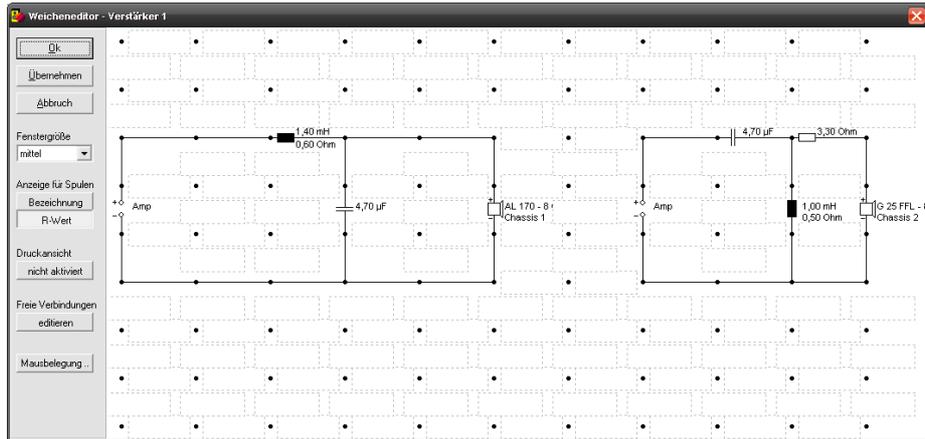


Abbildung 92: Weiche 2. O

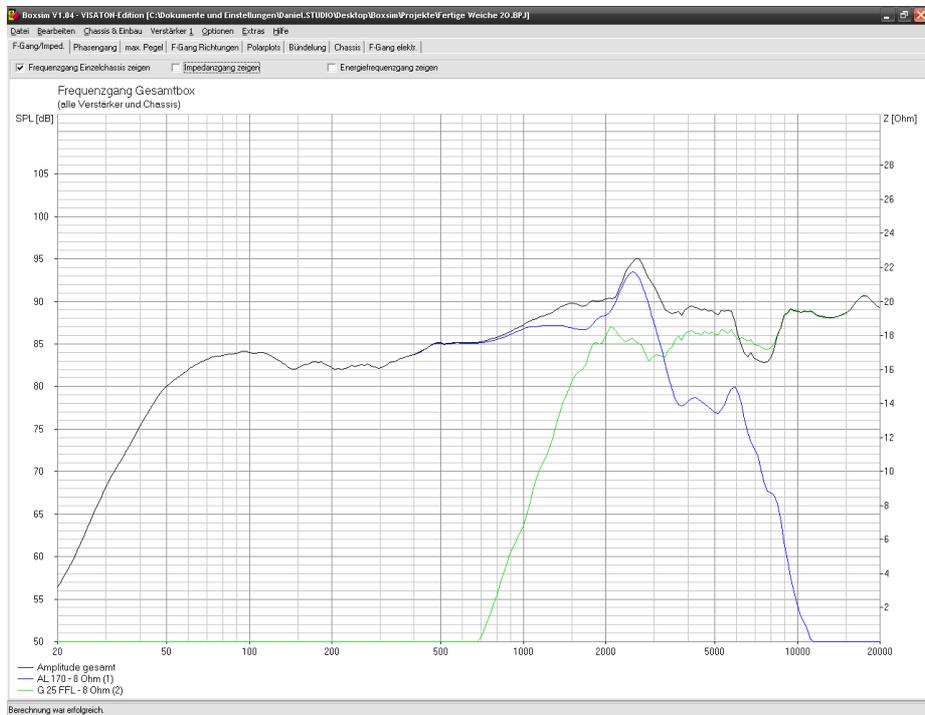


Abbildung 93: SPL Verlauf: Weiche 2. O

Durch den steileren Flankenabfall der Filter ergibt sich von Grund auf schon ein besseres Gesamtbild. Wie man sieht, sind die störenden Faktoren ähnlich der Weiche 1. Ordnung, deshalb haben wir die gleichen Korrekturschaltungen vorgenommen und erhalten folgendes Ergebnis.

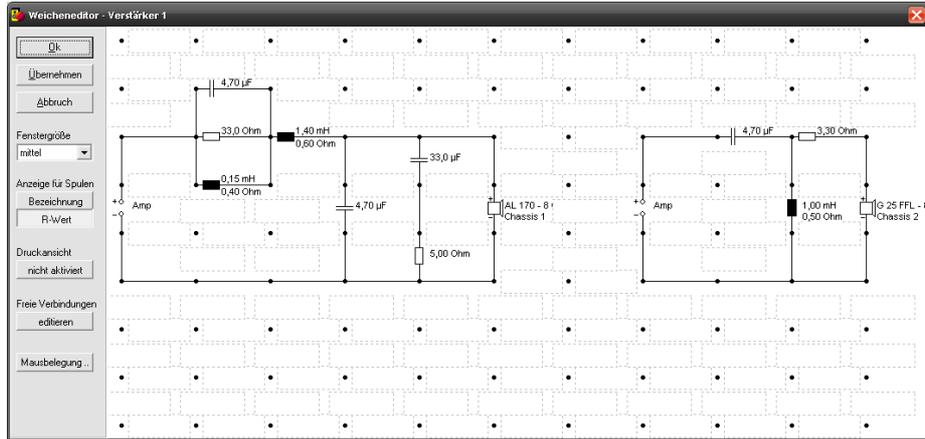


Abbildung 94: Weiche 2. O mit Korrekturen

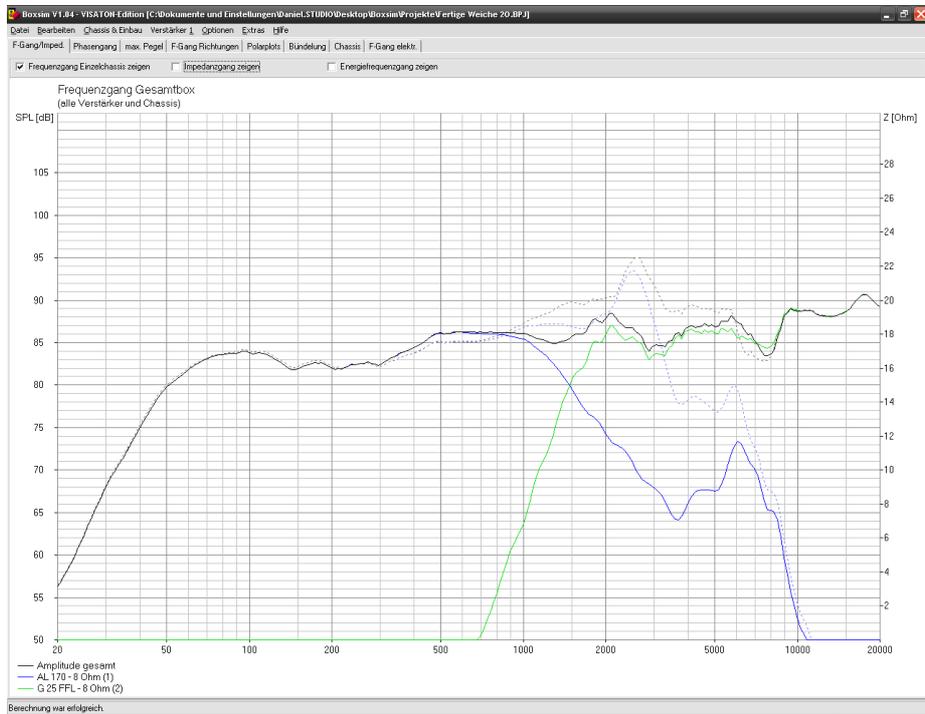


Abbildung 95: SPL Verlauf: Weiche 2. O mit Korrekturen

19.5.6 Vergleich Weiche 1. und 2. Ordnung

Abschließend vergleichen wir noch die Ergebnisse beider Filterordnungen mit allen Korrekturmaßnahmen.

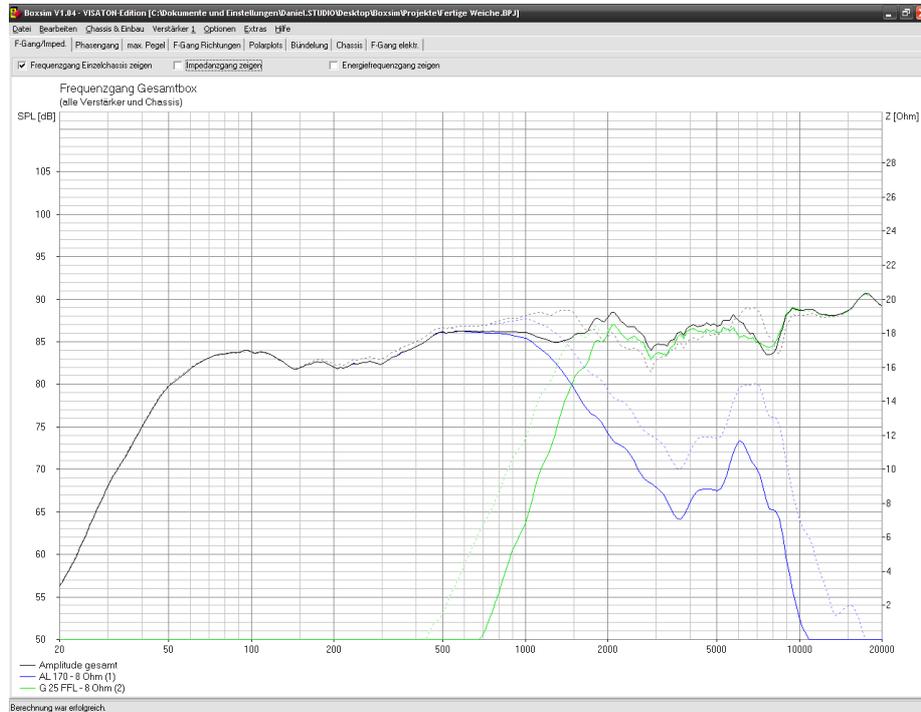


Abbildung 96: SPL Verlauf: Vergleich der Weiche mit 1. O und 2. O

20 Konstruktion

20.1 Gehäuse

Nach Dickason (3. Auflage 2005, Kapitel 6) sollten Chassis versenkt montiert werden, um Beugungseffekte an der Schallwand zu minimieren. Diese Vorgabe wurde beim Mehrwegesystem konsequent umgesetzt.

Sämtliche Chassisverschraubungen wurden für die Gewährleistung einer langen Haltbarkeit der Laborgehäuse durch Gewindeverschraubungen realisiert. Die Laborgehäusen wurden dazu innen mit Einschlagmuttern versehen und diese entsprechend mit Epoxidharz fixiert.

Weiters wurden die Gehäuse mit einer praktischen internen Steckverkabelung versehen. Die Kabelenden wurden mit „Bananensteckern“ entsprechender Farbe (+ rot, - schwarz) versehen, die eine schnelle und sichere Verbindung zu den Laborchassis ermöglicht. Die Laborchassis wurden dazu mit entsprechenden „Bananenbuchsen“ versehen. Die Verkabelung ist intern fix an die installierten Anschluss terminals verlötet.

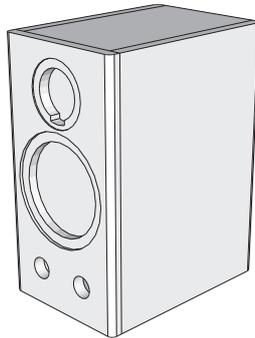


Abbildung 97: Gehäuse des 19,6l Mehrwegegehäuses

Das Mehrwegegehäuse ist in Abbildung 97 zu sehen. Die Gehäusekonstruktion wurde aus mehreren Gründen entsprechend gewählt:

- Die schmale Schallwandform begünstigt eine geringere Beeinflussung des Frequenzgangs des Chassis durch Reflexionen (Dickason, 3. Auflage 2005, Kapitel 6).
- Die Gehäusekonstruktion wurde so gewählt, dass ein möglichst harmonischer Kantenverlauf bzw. ein symmetrischer Aufbau entsteht - eine Schallwand ohne sichtbare Stoßkanten der einzelnen Bauteile war dabei oberste Priorität.
- Aus klanglichen, optischen und haptischen Gründen wurden sämtliche Gehäusekanten abgerundet. Nach Dickason (3. Auflage 2005, Kapitel 6) vermindert diese Vorgehensweise die Beeinflussung der Wiedergabeeigenschaften des Lautsprechers bei Frequenzen, deren Wellenlänge die Abmessung der Schallwand erreichen.
- Die Chassispositionen auf der Schallwand wurde frei gewählt, jedoch sollte die Schallwandmitte auf Grund eventueller Interferenzerscheinungen bei Schallreflexionen auf der Schallwand und Kantenbeugungen vermieden werden. Nach Dickason (3. Auflage 2005, Kapitel 6) sollte daher ein Chassis auf der Schallwand so angeordnet werden, dass es möglichs nicht gleich weit von allen Gehäusekanten entfernt ist. Weiters wurden Hoch- und Tieftonchassis so nah wie möglich zueinander plaziert.

Der Konstruktion liegt die in Tabelle 8 dargestellte Schnittliste für die Einzelbauteile des Gehäuses zu Grunde.

Bauteil	Maße L x B [in mm]	Stückzahl
Schallwand	420 x 220	1
Rückwand	182 x 382	1
Seitenwand	420 x 301	2
Deckel/Boden	182 x 301	2

Tabelle 8: Schnittliste für ein Gehäuse des Mehrwegesystems

ISO Frontansicht:

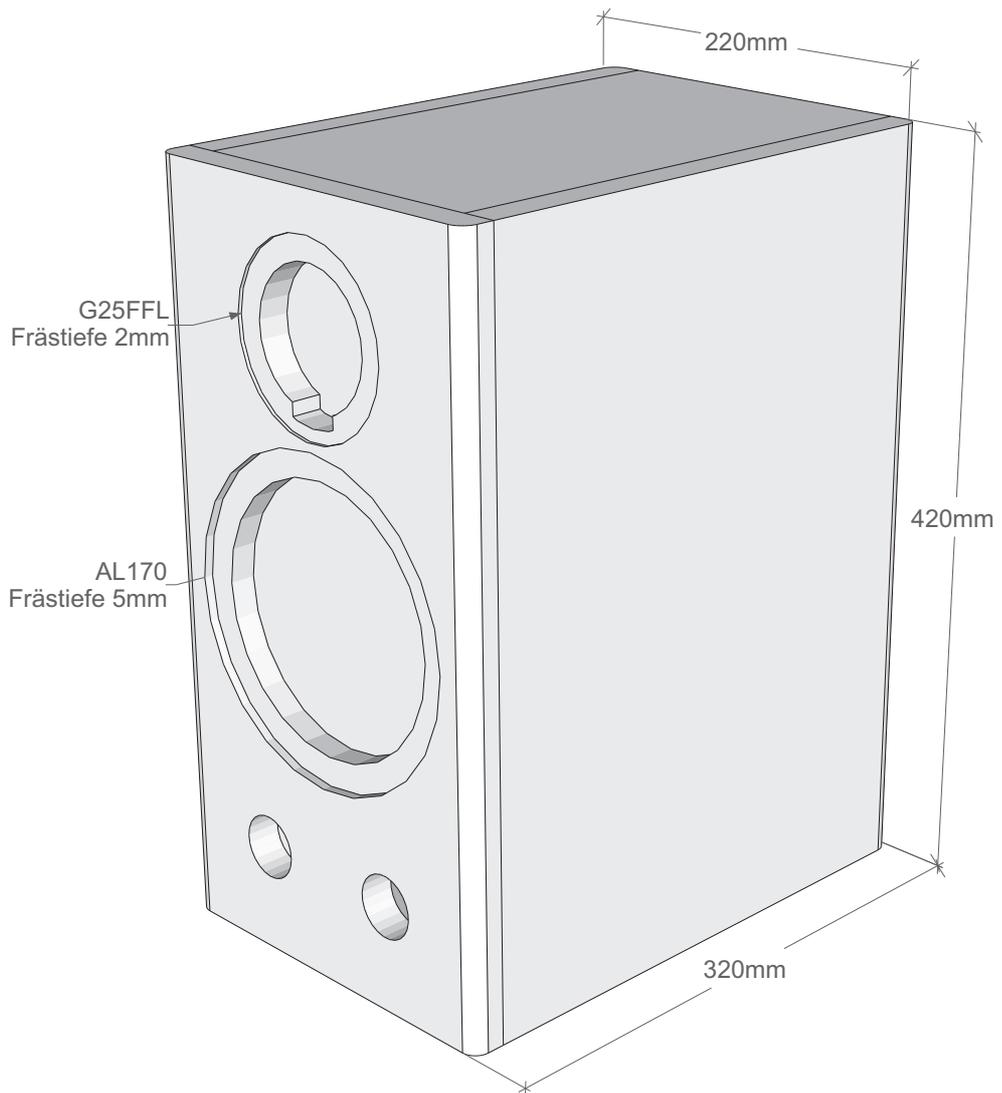


Abbildung 98: ISO Frontansicht des Mehrwegegehäuses

ISO Rückansicht:

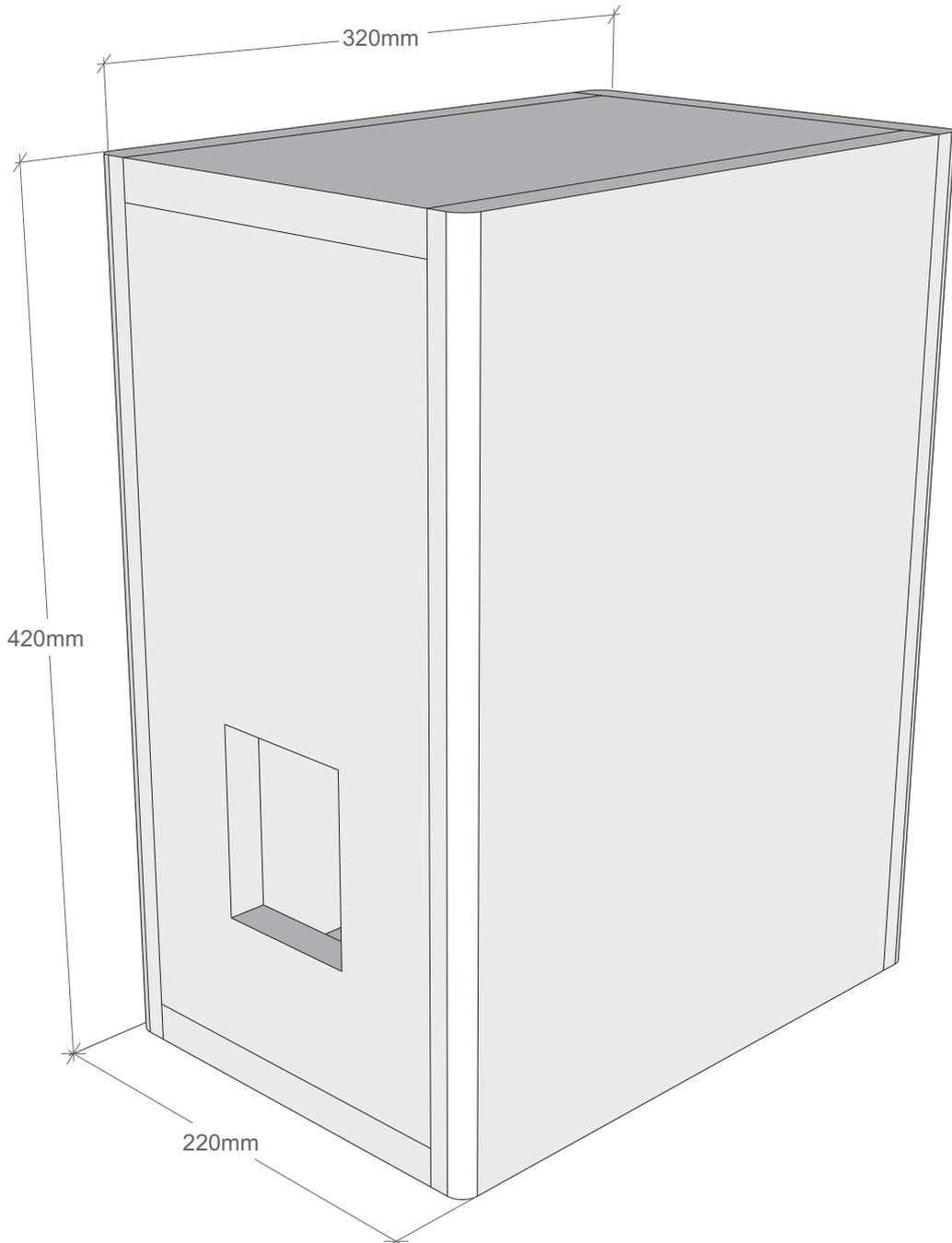


Abbildung 99: ISO Rückansicht des Mehrwegegehäuses

Frontansicht:

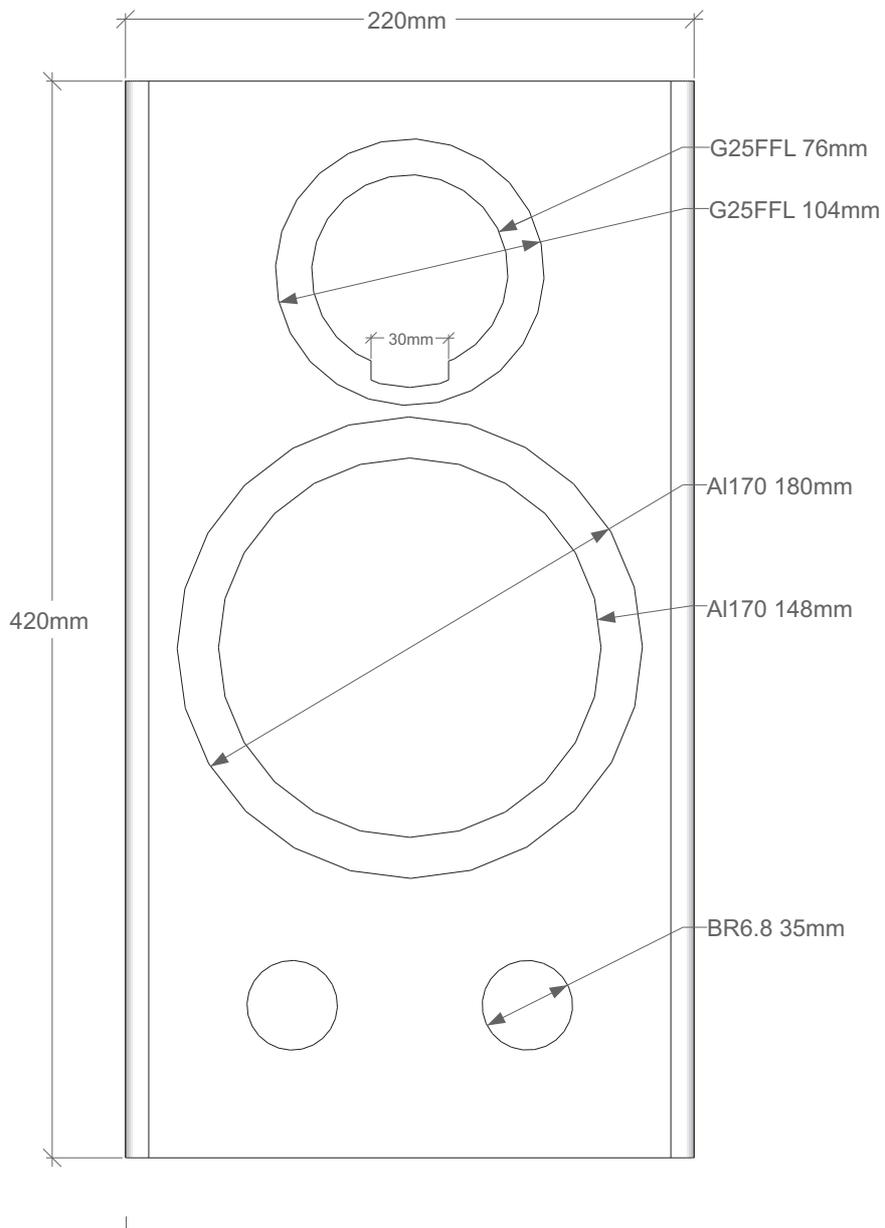


Abbildung 100: Frontansicht des Mehrwegegehäuses

Seitenansicht:

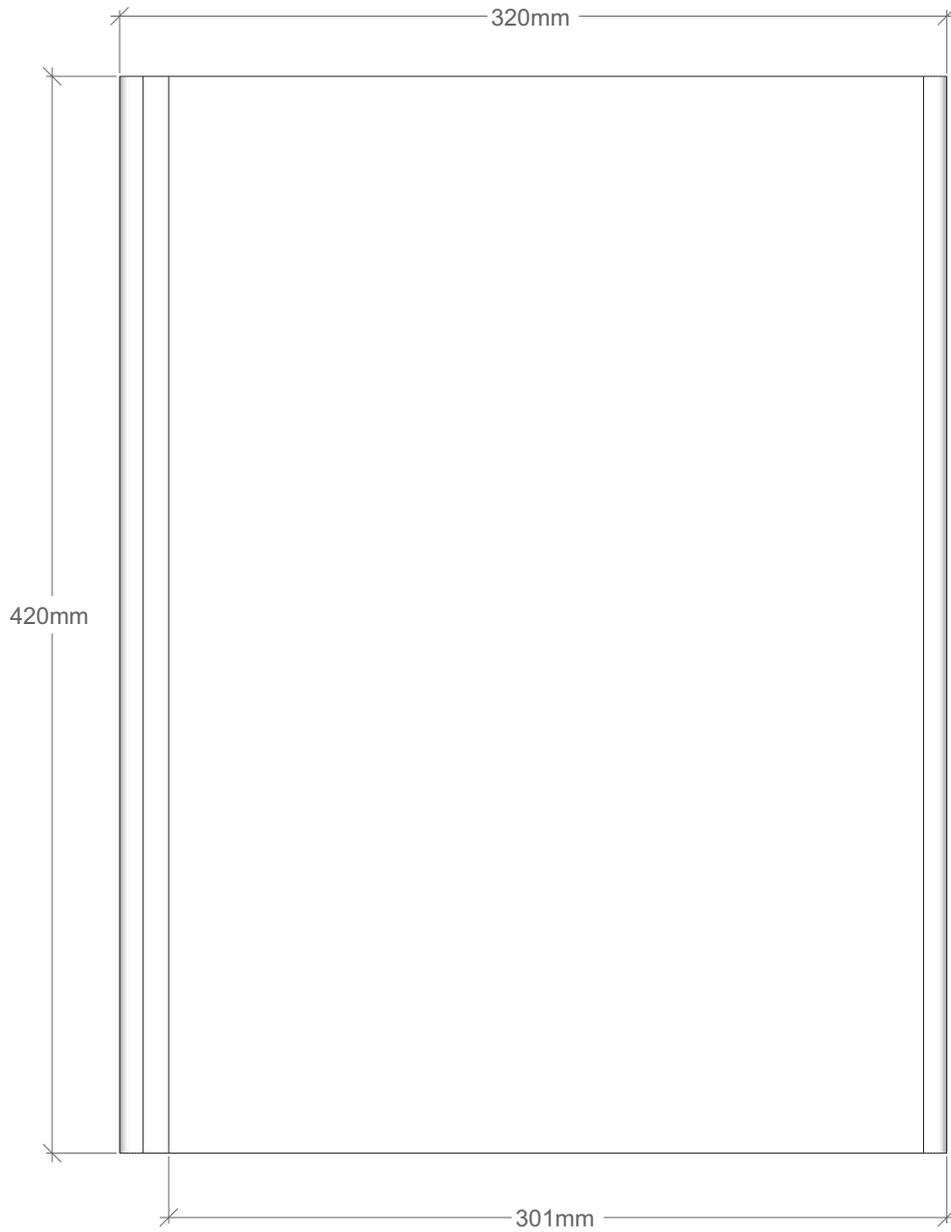


Abbildung 101: Seitenansicht des Mehrwegegehäuses

Aufsicht:

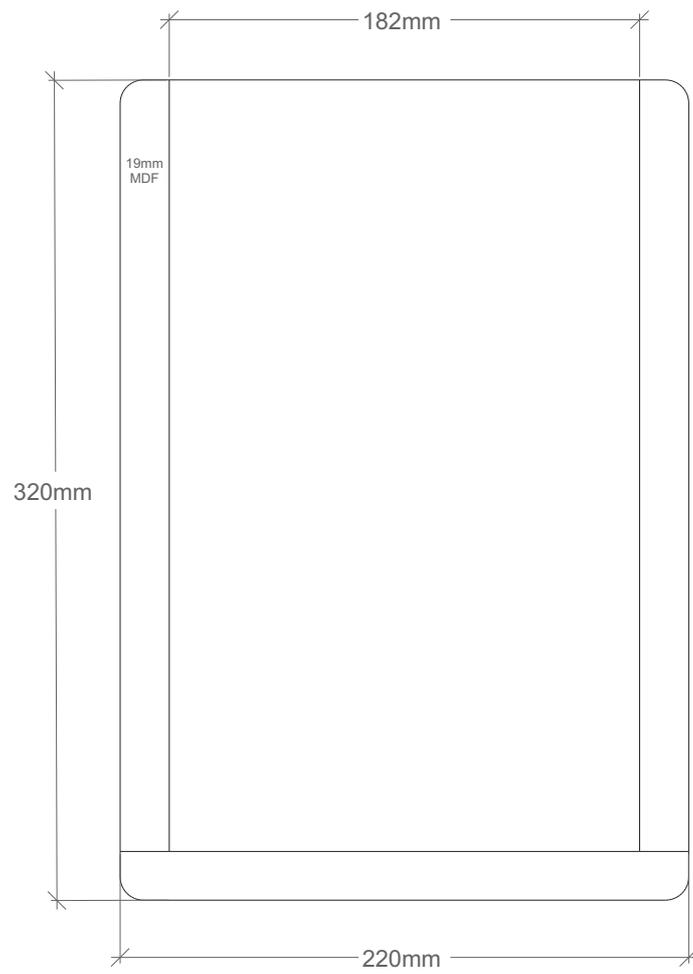


Abbildung 102: Sicht auf das Mehrwegegehäuse

Rückansicht:

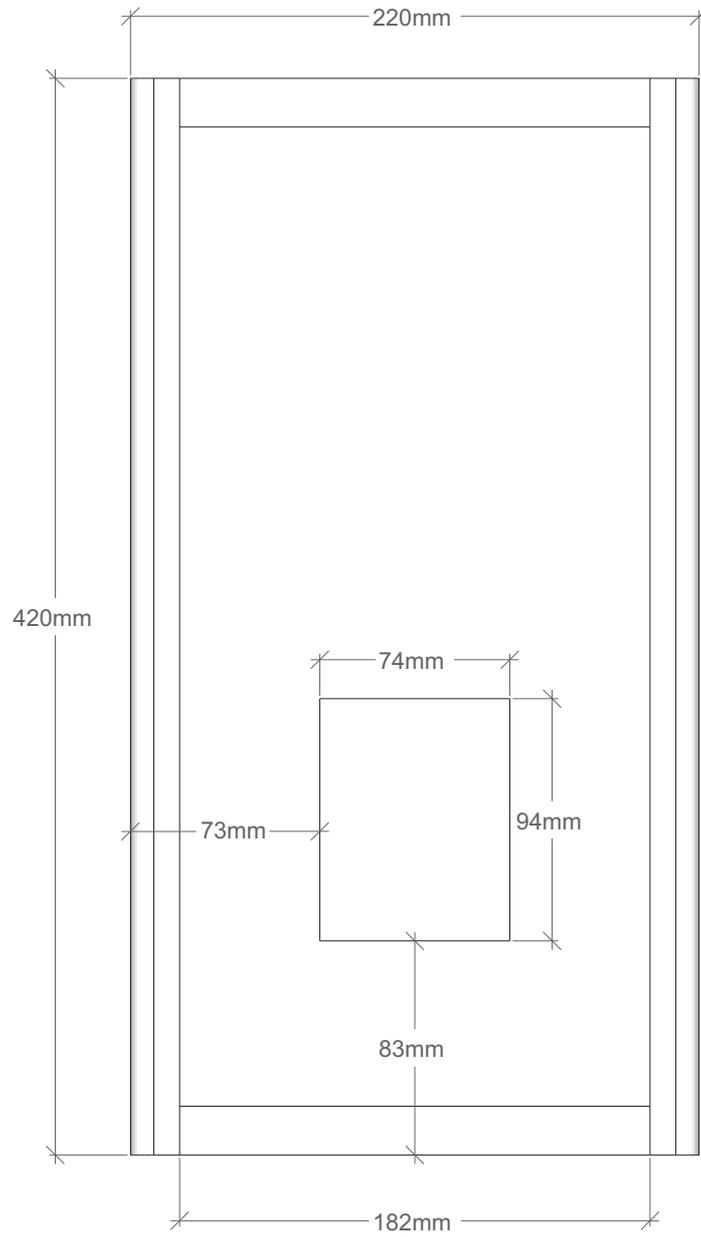


Abbildung 103: Rückansicht des Mehrwegegehäuses

20.2 Frequenzweiche

20.2.1 Schaltplan der fertigen Frequenzweiche

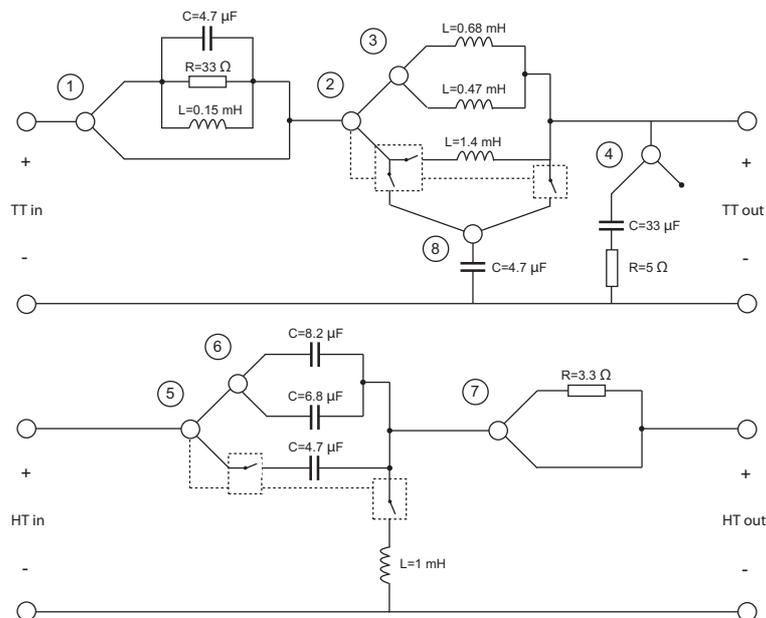


Abbildung 104: Schaltplan der fertigen Frequenzweiche

20.2.2 Aufbau der Weiche

Die Bauteile wurden auf eine Lochplatte aufgelötet und in einem passenden Holzgehäuse untergebracht. Als Deckel wurde eine Aluminiumplatte verwendet. Hier befinden sich Anschluss terminals und Schalter, sowie ein Ausdruck des Schaltplans auf robuster Klebefolie. So konnte gewährleistet werden, dass die Bauteile bei flexibler Verwendung nicht beschädigt werden und ein schnelles Umschalten zwischen den verschiedenen Filtereinstellungen möglich ist.

Schalterbelegung:

- 1 TT Saugkreis an (oben)/aus (unten)
- 2 TT Filterordnung: 1. Ordnung (oben), 2. Ordnung (unten)
- 3 TT Trennfrequenz für Filter 1. Ordnung: TF1 (oben), TF2 (unten)
- 4 TT Impedanzkorrektur an (links)/aus (rechts)
- 5 HT Filterordnung: 1. Ordnung (oben), 2. Ordnung (unten)
- 6 HT Trennfrequenz für Filter 1. Ordnung: TF1 (oben), TF2 (unten)
- 7 HT Vorwiderstand $3,3\Omega$
- 8 TT Parallelkondensator Filter 2. Ordnung eingangsseitig (links) oder ausgangsseitig (rechts) - Sollte für korrekte Funktion der FW stets ausgangsseitig geschaltet sein

21 Messungen

21.1 Frequenzgang der Frequenzweiche

Der korrekte Frequenzgang der Weichenwege wurde mit einer Messung an einem 8Ω Lastwiderstand überprüft. Hierbei ist zunächst ein Fehler im Tieftonzweig der Weiche aufgefallen. Der Kondensator im Parallelzweig des Filters 2. Ordnung wurde auf der Eingangsseite verdrahtet, was einen Kurzschluss zu hohen Frequenzen zur Folge hat. Das Layout wurde daraufhin korrigiert. Mit Schalter 8 kann der Kondensator nun auf Eingangs- oder Ausgangsseite der Weiche geschaltet werden, um den Fehler nachvollziehen zu können.

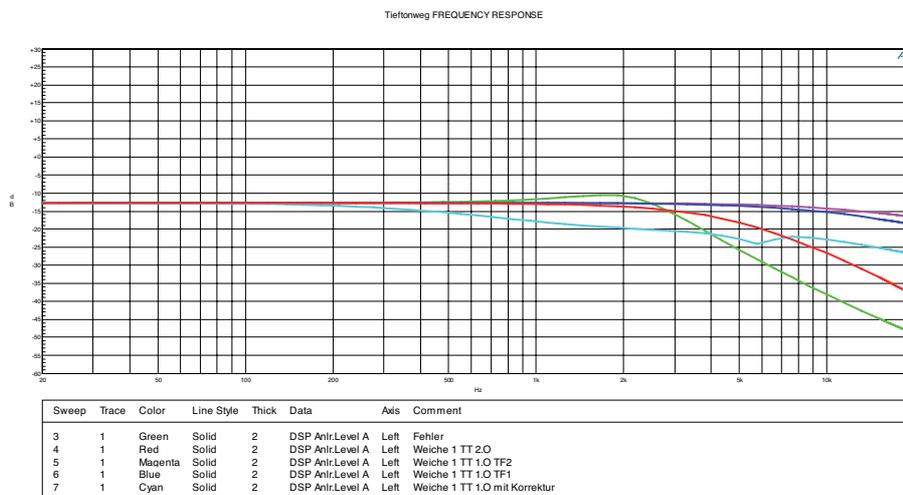


Abbildung 105: Frequenzgang des Tieftonwegs der FW

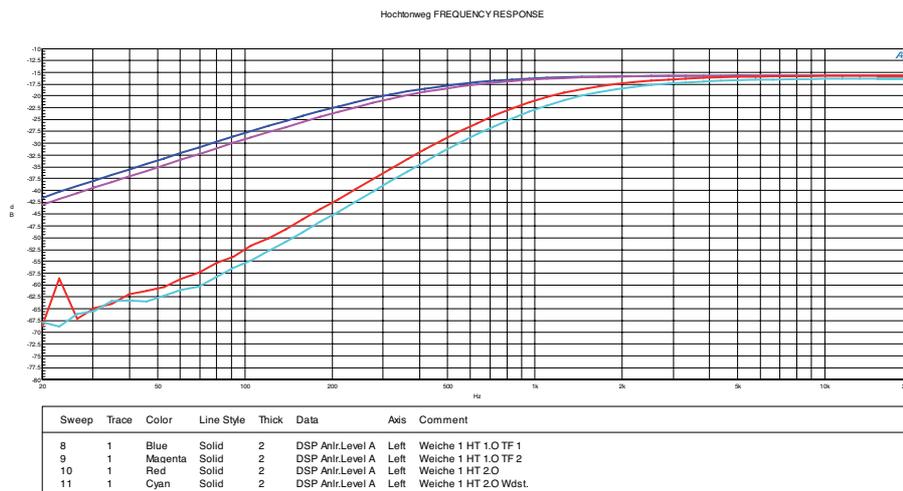


Abbildung 106: Frequenzgang des Hochtonwegs der FW

21.2 SPL Verlauf der einzelnen Chassis im Gehäuse

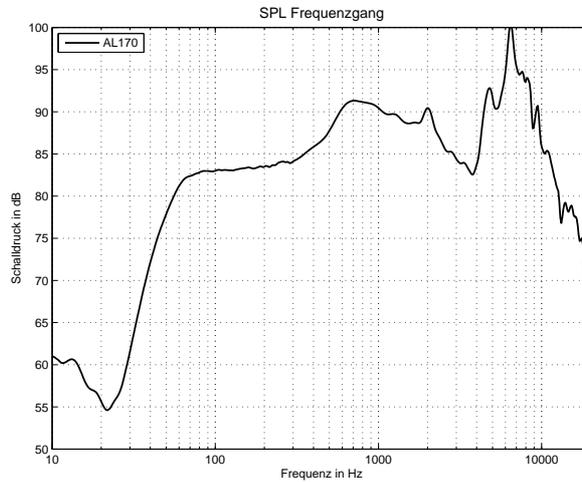


Abbildung 107: SPL Frequenzgang AL170 in Gehäuse

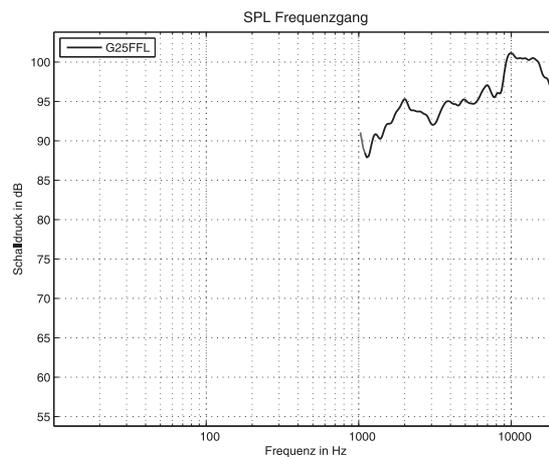


Abbildung 108: SPL Frequenzgang G25FFL in Gehäuse

21.3 SPL Verlauf des Systems mit Frequenzweiche

Da der Frequenzbereich unter 200Hz für die meisten folgenden Messungen irrelevant war, haben wir auf die Nahfeldmessung verzichtet. Wir wollen mit einigen Messkurven die Effekte der einzelnen Frequenzweichenteile aufzeigen. Die Messungen dienen auch als Referenz für die Simulation in LspCAD, wie sie in Kap. 22 weiter ausgeführt wird.

21.3.1 Hoch- und Tiefpass 1. Ordnung

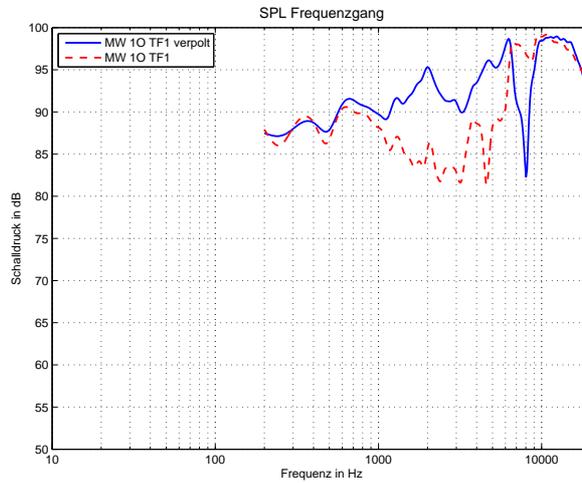


Abbildung 109: Filter 1. Ordnung verpolt (—) vs. unverpolt (- -)

Durch die etwas weiter auseinander gelegten Übergangsfrequenzen bei TF1 ergibt sich ein minimal besserer Frequenzgang, der sich klanglich kaum bemerkbar machen dürfte.

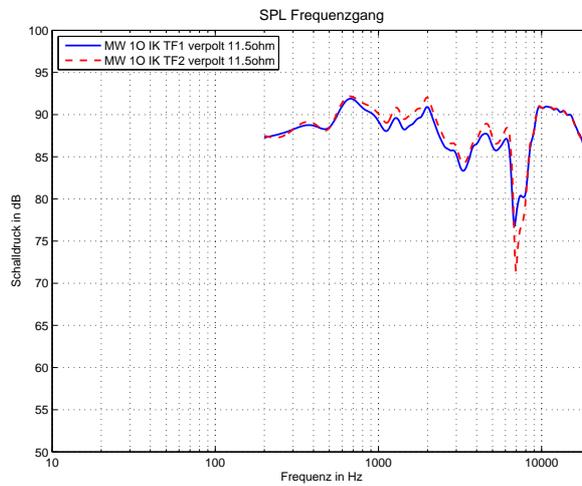


Abbildung 110: Filter 1. Ordnung Trennfrequenz 1 (—) vs 2 (- -)

21.3.2 Hoch- und Tiefpass 2. Ordnung

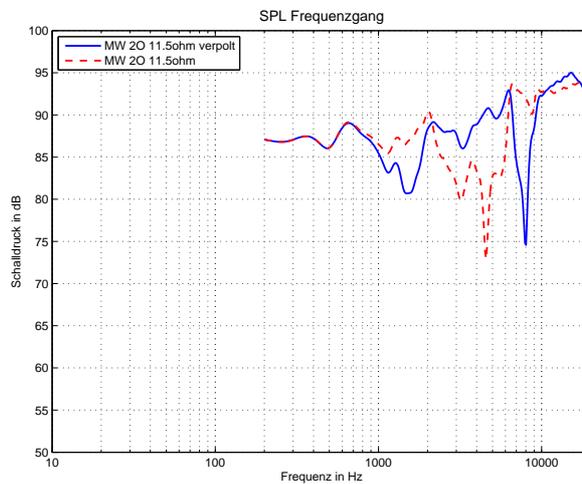


Abbildung 111: Filter 2. Ordnung verpolt (—) vs. unverpolt(- -)

21.3.3 Filter 1. Ordnung vs. 2. Ordnung

Interessanterweise ergibt die Verpolung der beiden Chassis zueinander bei beiden Filterordnungen zunächst eine Verbesserung des Frequenzgangs, was sich nach Integration der beiden Korrekturschaltungen im Bereich der Übergangsfrequenz jedoch wieder etwas legt.

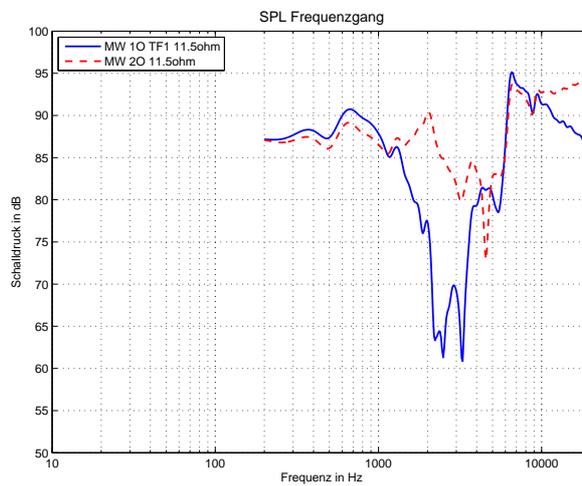


Abbildung 112: Filter 1. Ordnung (—) vs. 2. Ordnung (- -) (unverpolt)

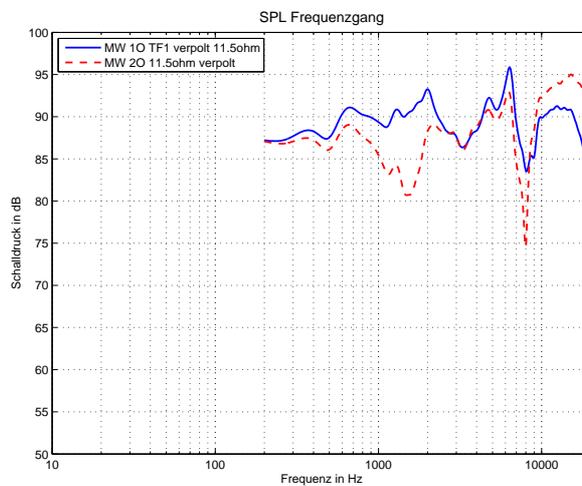


Abbildung 113: Filter 1. Ordnung (—) vs. 2. Ordnung (- -) (verpolt)

21.3.4 Impedanzkorrektur für den AL170

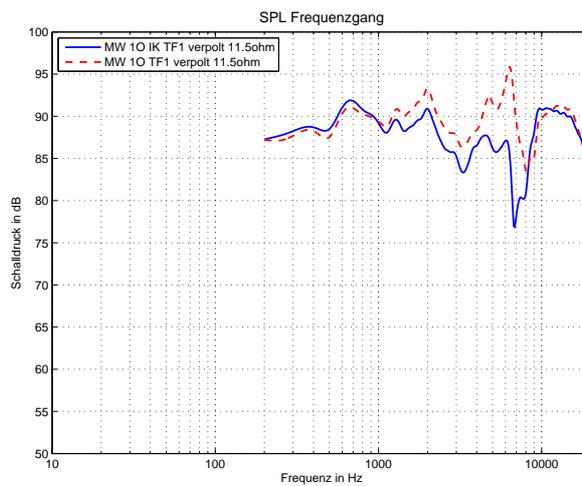


Abbildung 114: Filter 1. Ordnung mit (—) vs. ohne Impedanzkorrektur (- -)

Durch die Impedanzkorrektur ist eine deutliche Verbesserung der Filterwirkung im Tieftonzweig bemerkbar, die sich im Frequenzgang widerspiegelt.

21.3.5 Saugkreis für die Resonanz der Membran des A1170

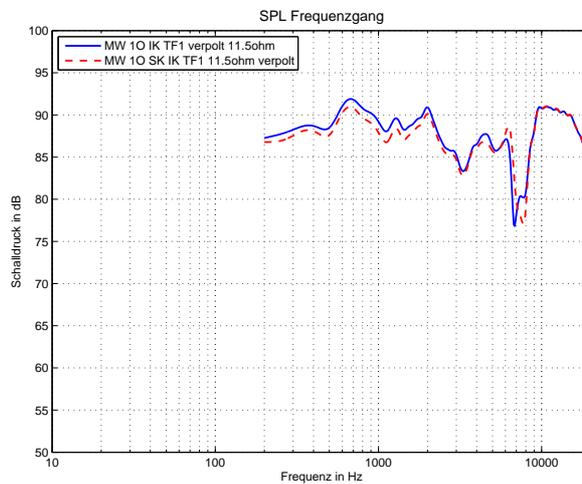


Abbildung 115: Filter 1. Ordnung ohne vs. mit Saugkreis
Filter 1. Ordnung ohne (—) vs. mit Saugkreis (- -)

Der Effekt der Saugkreisschaltung ist in der Messung leider nicht so gut zu erkennen, wie in der Simulation. Eventuell wird der Effekt hier von den Auswirkungen der Impedanzkorrektur überdeckt.

21.3.6 Vorwiderstand zur Dämpfung des Hochtöners

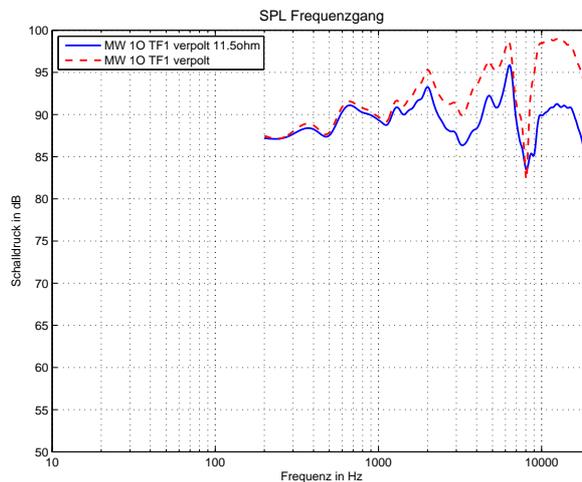


Abbildung 116: Filter 1. Ordnung mit (—) vs. ohne Vorwiderstand 11,5Ω (- -)

Zur drastischeren Darstellung wurde zum 3,3Ω Widerstand ein weiterer 8,2Ω Widerstand in serie geschaltet. Diese Einstellung wurde im Übrigen für die meis-

ten Messungen beibehalten, da sie den linearsten Frequenzgang und ein ausgewogenes Klangbild lieferte.

21.4 Gestopft vs. Ungestopft

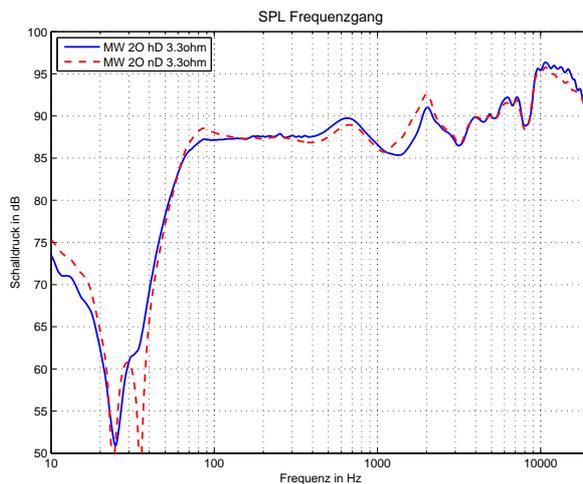


Abbildung 117: Vergleich Mehrwegesystem hohe (—) vs.niedrige Dämmung (-
-)

Durch das sehr klein gewählte Gehäuse wurde ein Überschwingen im Bassbereich von ca. 3 dB erwartet. In 117 ist sehr schön zu erkennen, dass das Befüllen mit Dämmwolle dieses Überschwingen eliminiert und somit die Gesamtabstimmung des Systems dem QB3 Alignment wieder ein Stück näherbringt.

21.5 Richtcharakteristik

Erstaunliche Ergebnisse lieferten die Messungen der Richtcharakteristik. Es wurde in 10° Schritten von $0 - 180^\circ$ je eine Fernfeldmessung für beide Filterordnungen inklusive aller Korrekturschaltungen angefertigt. Aus diesen Messungen ergaben sich die folgenden Polardiagramme, bzw. Sonogramme. Man erkennt deutlich den kritischen Bereich der Übergangsfrequenz bei ca. $2kHz$, wo der Hochtöner den Tiefmitteltöner ablöst. Ein Unterschied zwischen den beiden Filterordnungen ist allerdings kaum zu erkennen.

21.6 Polardiagramm

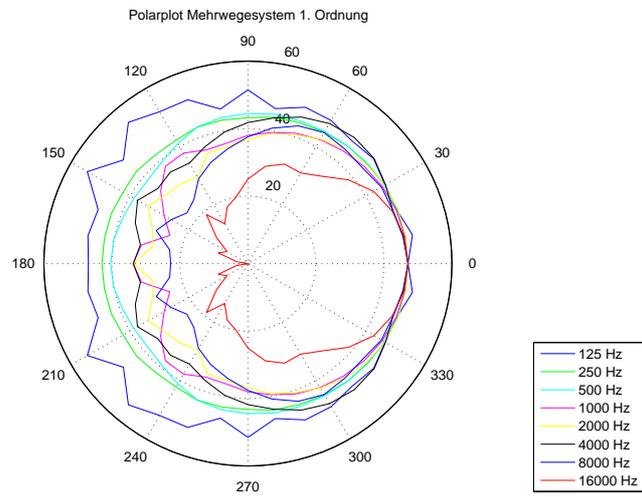


Abbildung 118: Polardiagramm Mehrwegesystem mit Filter 1. Ordnung

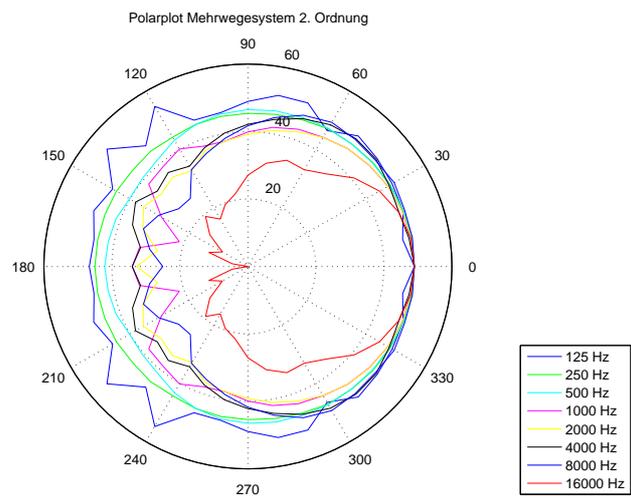


Abbildung 119: Polardiagramm Mehrwegesystem mit Filter 2. Ordnung

21.7 Sonogramm

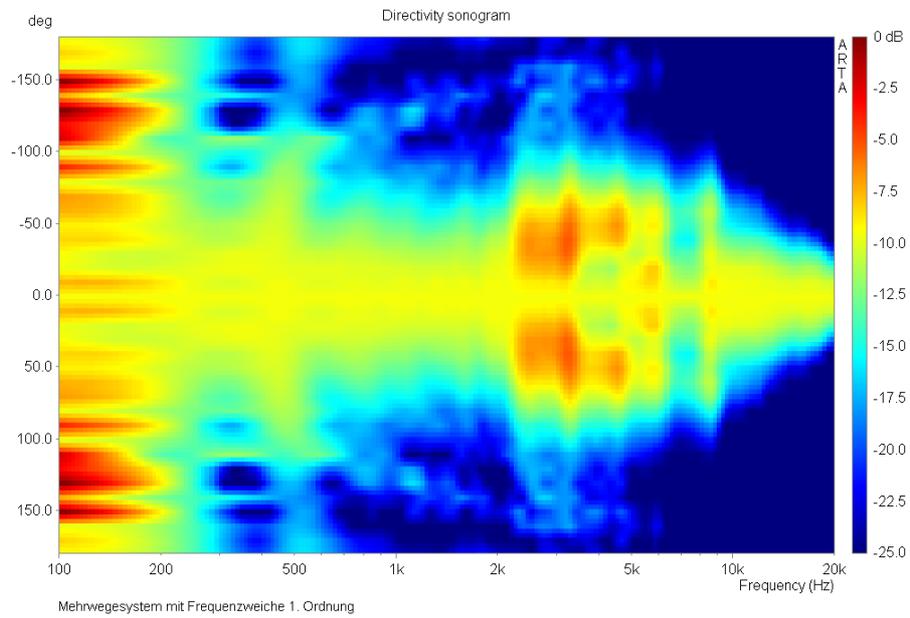


Abbildung 120: Sonogramm Mehrwegesystem mit Filter 1. Ordnung

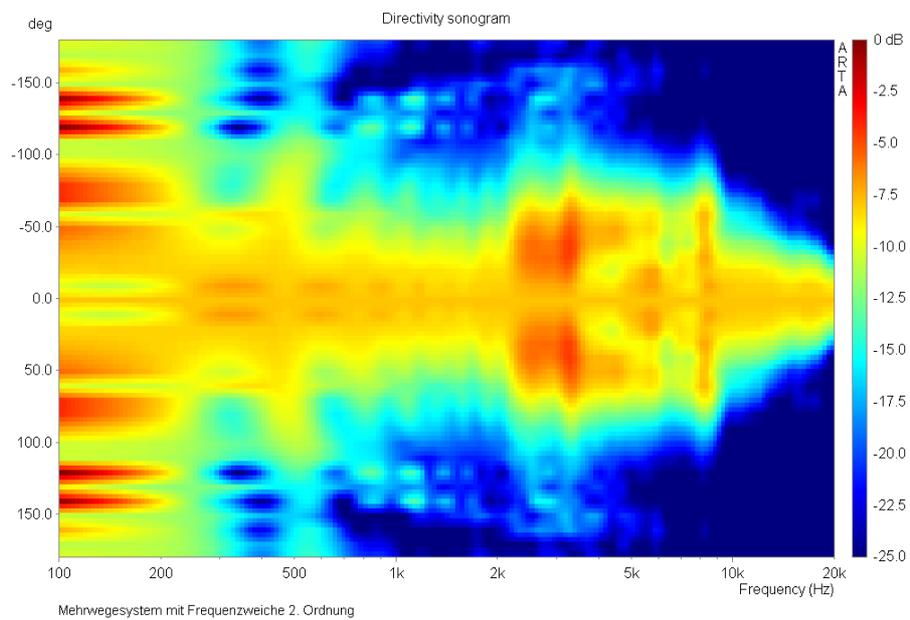


Abbildung 121: Sonogramm Mehrwegesystem mit Filter 2. Ordnung

22 Simulation des Systems in LspCAD Pro

Die Bedienung von LspCAD Professional wird in Teil VIII detailliert beschrieben. Wir wollen daher in diesem Abschnitt nur grob den Simulationsaufbau des Mehrwegesystems in LspCAD beschreiben und auf einige wenige Besonderheiten hinweisen, die bei der Simulationskonfiguration nötig sind.

Hauptsächlich beschäftigt sich dieser Abschnitt jedoch mit der Auswertung und Evaluierung der Simulationsergebnisse. Dazu werden die Simulationen mit Messkurven verglichen. Zur nachfolgend beschriebenen Simulation sind sämtliche Projektdateien inklusive Messungen auf der EAK-Labor CD zu finden („X:/Mehrwegesystem/Mehrwegesystem.lsp“).

Die für die komplette Simulation des Mehrwegesystems in LspCAD Pro verwendeten Messdaten, stützen sich auf unsere Messergebnisse und Angaben aus Teil III und Kapitel 21.

22.1 Simulationsaufbau

22.1.1 Hochtonzweig

Nachfolgend ist in Abbildung 122 der Simulationsaufbau für den Hochtöner inklusive Realisierung der „Laborweiche“ für den kompletten Hochtonzweig abgebildet.

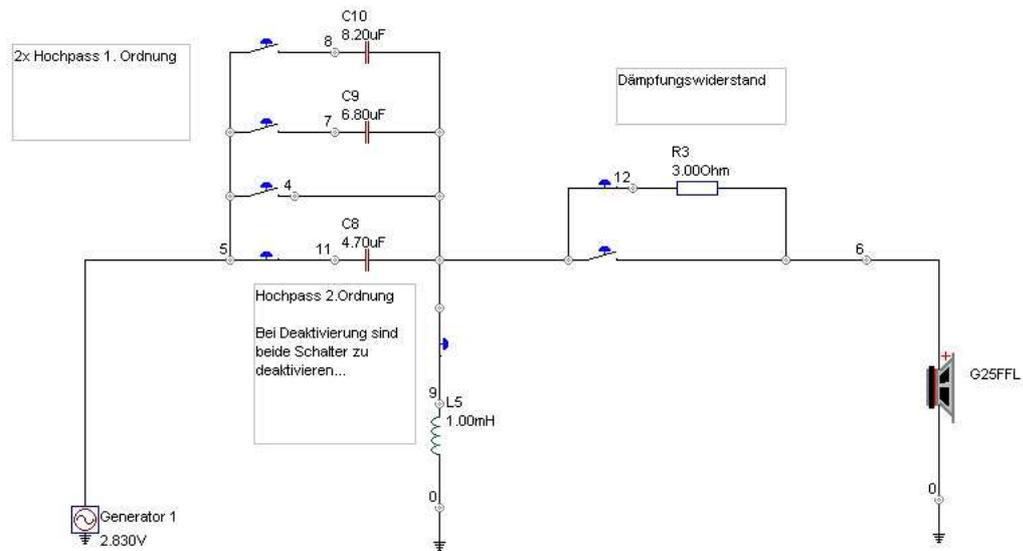


Abbildung 122: Mehrwegesimulation Visaton G25FFL

Der dargestellte Aufbau entspricht der „Simulation mit Messdaten in LspCAD“ (vgl. Kapitel 27), mit aktivierter Frequenzweiche zweiter Ordnung.

Eine wichtige Besonderheit bei der Konfiguration im Hochtonzweig betrifft die Wahl des in Kapitel 27.1 angesprochenen Phasendelays. So wurde bei den für die Simulation ermittelten Fernfeldmessungen, die Transformation in den

Frequenzbereich durch Fensterung, ausgehend vom direkten Impulsbeginn angefertigt. Das heißt, zwischen Tiefmittelton- und Hochtonzweig wird sich in der Fernfeldmessung kein Phasenversatz, und damit keine Verschiebung des akustischen Zentrums ergeben, was aber nicht der Realität entspricht. Daher muss eines der beiden Lautsprecherchassis händisch verzögert werden, um sinnvolle Simulationsergebnisse zu erhalten. Abbildung 123 zeigt die Konfiguration des empirisch ermittelten optimalen Phasendelays von $130\mu\text{s}$ für eine möglichst realitätskonformer Simulation.

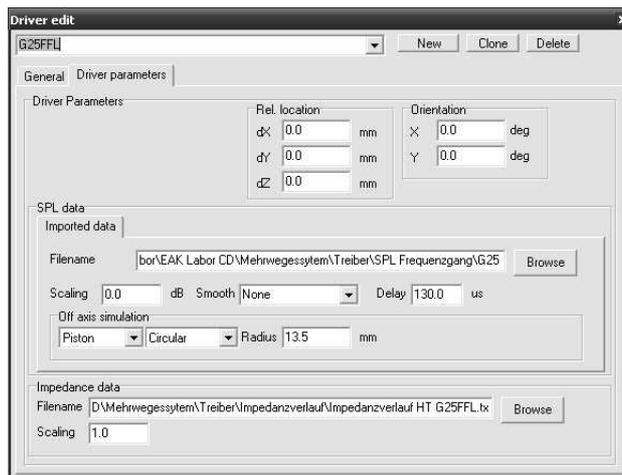


Abbildung 123: Mehrwegesimulation Phasendelay

22.1.2 Tiefmitteltonzweig

Nachfolgend ist in Abbildung 124 der Simulationsaufbau für den Tiefmitteltöner inklusive Realisierung der „Laborweiche“ für den kompletten Tiefmitteltonzweig abgebildet.

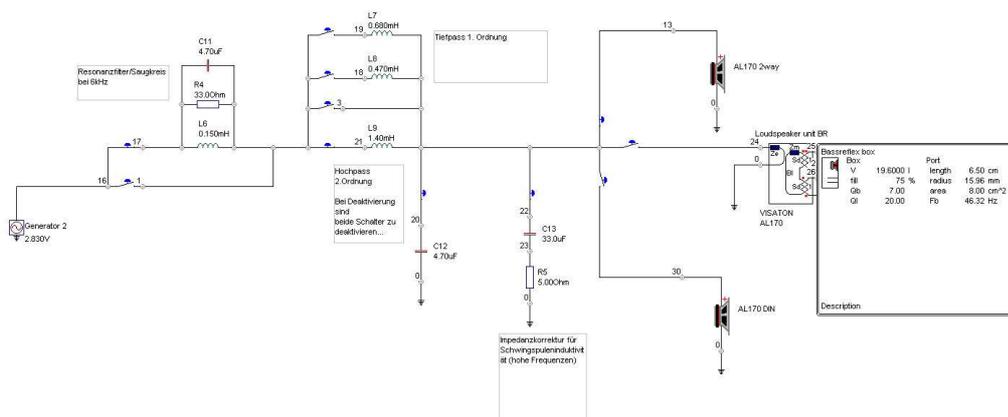


Abbildung 124: Mehrwegesimulation Visaton AL170

Der dargestellte Aufbau/Schalterkonfiguration entspricht der „Simulation

mit Messdaten in LspCAD“ (vgl. Kapitel 27), mit aktivierter Frequenzweiche zweiter Ordnung inklusive Resonanzfilter und Impedanzkorrektur im Tiefmitteltontzweig.

22.2 Simulationsergebnisse

Die Simulationsergebnisse stützen sich auf die in Kapitel 20.2.1 vorgestellten und für das Labor praktisch realisierten Frequenzweichen.

22.2.1 Simulation ohne Weiche

Nachfolgend stellt Abbildung 125 die Simulationsergebnisse für Impedanz- und SPL – Frequenzgang ohne Filterschaltungen dar. Es ist zunächst keine Summe der SPL – Frequenzgänge von Hochtון- und Tiefmitteltontzweig zu erkennen. Leider lässt sich in LspCAD Pro (vorliegender Version) kein getrennte Darstellung der Phase der beiden Chassis erreichen, wodurch sich aus der Abbildung lediglich die Phasensumme herleiten lässt.

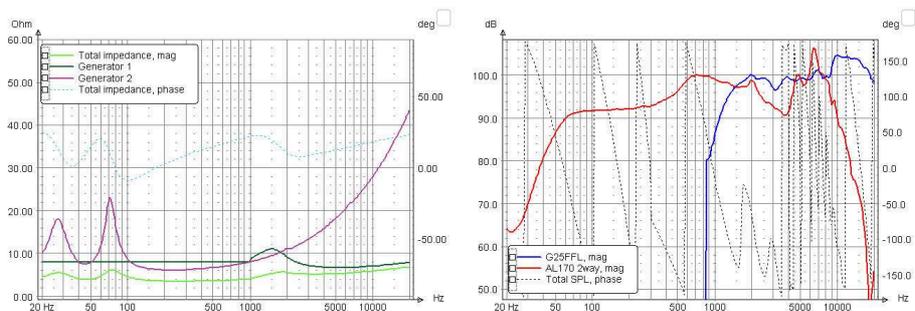


Abbildung 125: Impedanz- und SPL - Frequenzgang ohne Weiche

Verursacht durch Interferenzen erwarten wir uns aus der Summenbildung der Chassiswiedergabekurven starke Einbrüche im Überlappungsbereich der beiden Chassis, welcher ohne Simulation der Frequenzweiche entsprechend breit ist. Abbildung 126 zeigt das Simulationsergebnis der Summenkurve beider Lautsprecherchassis und bestätigt unsere Erwartungen.

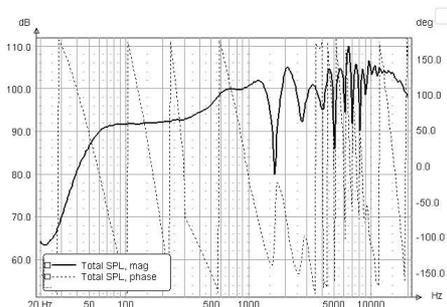


Abbildung 126: SPL - Frequenzgang (Summe) ohne Weiche

22.2.2 Simulation der Impedanzkorrektur

In Abbildung 127 ist der Vergleich des Impedanzfrequenzgang mit und ohne Impedanzkorrektur im Tiefmitteltonzweig abgebildet.

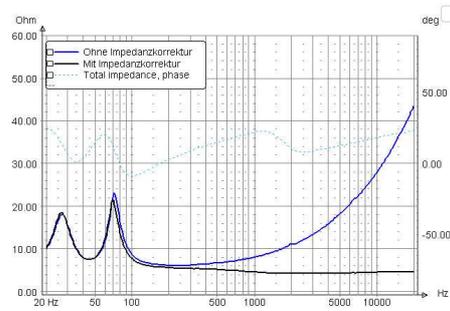


Abbildung 127: Impedanzfrequenzgang mit/ohne Impedanzkorrektur

Die Simulation zeigt ein sehr gutes Ergebnis für die berechnete Korrektur, deren Verwendung für optimale Wirkung der realisierten Tiefpassfilter unbedingt notwendig ist. Die Impedanzkorrektur bleibt daher für alle nachfolgenden Simulationsschritte aktiviert.

22.2.3 Simulation des Saugkreises

In Abbildung 128 ist die simulierte Wirkung des Resonanzfilters im Tiefmitteltonzweig zu erkennen.

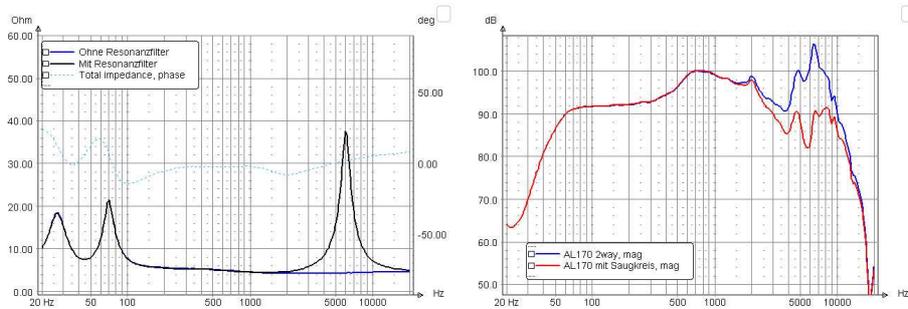


Abbildung 128: Impedanz- und SPL - Frequenzgang mit/ohne Saugkreis

Es ergibt sich - wie erwünscht - die größte Wirkung des Filters bei den stärksten Eigenresonanzen des Chassis im Bereich um 6 kHz .

22.2.4 Simulation mit Hoch- und Tiefpass 1. Ordnung

In Abbildung 129 sind die Simulationsergebnisse für Impedanz- und SPL – Frequenzgang mit Realisierung einer Frequenzweiche 1. Ordnung dargestellt. Impedanzkorrektur und Saugkreis im Tiefmitteltonzweig, als auch die Pegelabsenkung durch den seriellen Widerstand im Hochtonzweig sind aktiviert.

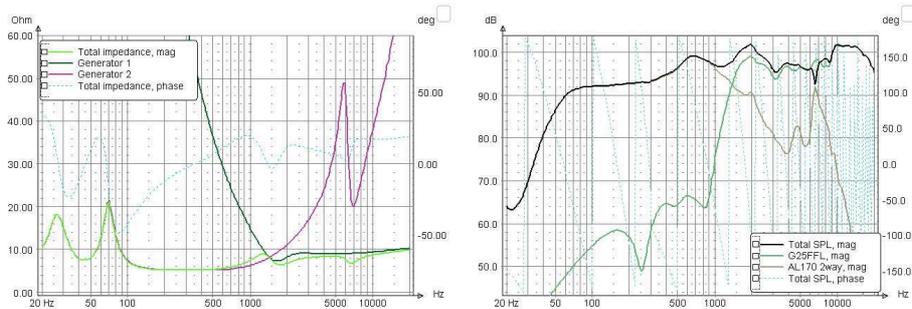


Abbildung 129: Impedanz- und SPL - Frequenzgang; Weiche 1. Ordnung

Es ergibt sich ein für diese Filterordnung recht befriedigendes Ergebnis der Wiedergabekurve. Durch die Impedanzkorrektur verrichtet der Tiefpassfilter im Tiefmitteltonzweig gute Dienste. Der Saugkreis vermeidet zu starke Interferenzen der beiden Chassis. Jedoch wird für ein gutes Gesamtergebnis ein Filter dieser Ordnung, vor allem wegen des starken Einfluss der Resonanz des Tiefmitteltöners bei etwa 7 kHz , nicht ausreichen.

22.2.5 Simulation mit Hoch- und Tiefpass 2. Ordnung

In Abbildung 130 sind die Simulationsergebnisse für Impedanz- und SPL – Frequenzgang mit Realisierung der Frequenzweiche 2. Ordnung dargestellt. Impedanzkorrektur und Saugkreis im Tiefmitteltonzweig, als auch die Pegelabsenkung durch den seriellen Widerstand im Hochtonzweig sind aktiviert. Desweiteren ist eine Referenzmesskurve dargestellt, die an der Lautsprecherbox gleicher Konfiguration angefertigt wurde und zum direkten Vergleich mit den Simulationsergebnissen aus LspCAD Pro dienen soll.

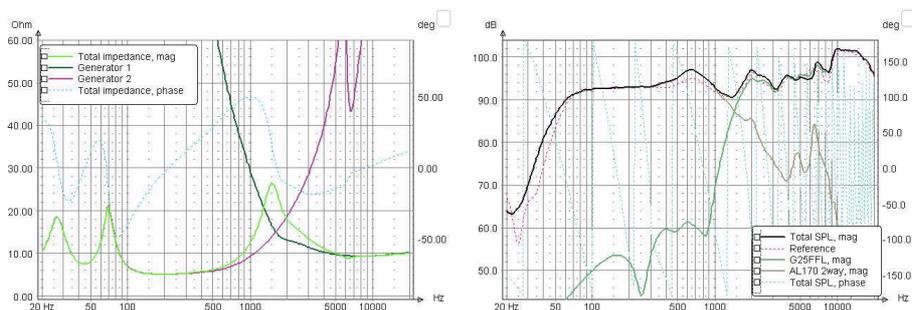


Abbildung 130: Impedanz- und SPL - Frequenzgang; Weiche 2. Ordnung

Die Abbildung zeigt eine sehr gute Korrelation der Simulation zur Referenz mit einer Maximalabweichung von 1dB . Dieses Ergebnis „beweist“, dass Simulationsergebnissen aus LspCAD Pro - korrekte Bedienung vorausgesetzt - durchaus Glauben zu schenken ist, da sie eine realitätsnahe Abbildung der Wirklichkeit darstellen. Durch diese Simulationssoftware lassen sich ernst zu nehmende Lautsprecherboxen vorentwickeln, was auch die Verwendung dieser von vielen namhaften Lautsprecherherstellern zeigt.

Unser Mehrwegesystem hat einen durchaus gleichmäßigen, aber auch noch verbesserungswürdigen Gesamtfrequenzgang. Hier könnte bei einer weiteren Optimierung beispielsweise an der Modifizierung des Hochtonzweigs begonnen werden, welcher trotz Pegelabsenkung eine zu hohe Dominanz aufweist. Die Optimierung des Systems war allerdings nicht Inhalt unserer Projektarbeit.

Teil VII

Messen mit ARTA

Sämtliche Messungen wurden mit dem Softwarepaket „ARTA“ von Ivo Mateljan durchgeführt (<http://www.fesb.hr/~mateljan/arta/>). Zum Zeitpunkt der Referenzmessungen für das Labor stand die Software Version 1.3 zur Verfügung.

23 LIMP - Impedanz

Das Programm LIMP des ARTA Pakets dient zum einfachen Messen von Impedanzgängen. Wir wollen einen kurzen Überblick über die wichtigsten Funktionen und Einstellungen geben, für die weiterführende Bedienung des Programms sei auf die Bedienungsanleitung verwiesen (Mateljan, 2008b).

23.1 Messmethode

LIMP bietet zwei Mess-Methoden:

1. Messung mit gestuften Sinustönen (**Stepped Sine**)

Für jeden Messpunkt auf der Frequenzskala wird hierbei ein Sinuston der entsprechenden Frequenz als Anregungssignal genutzt. Die Signalenergie pro Frequenzband ist deutlich höher als bei der FFT Messung und kann zudem genau definiert werden. Das aufgezeichnete Signal wird schmalbandig um die aktuelle Frequenz gefiltert. Bei dieser Messmethode kann daher ein sehr guter SNR erreicht werden kann.

2. FFT - Messung mit breitbandigem rosa Rauschen (**Pink PN**)

Bei der FFT Messung wird ein breitbandiges Signal als Anregungssignal genutzt. Das ermöglicht die gleichzeitige Messung im gesamten Frequenzbereich, allerdings ist hier die Signalenergie pro FFT Frequenzband niedrig, was zu einem schlechteren SNR führt. Durch Mittelung mehrerer Signalperioden kann der SNR verbessert werden.

23.2 Einstellungen

Im Menü **Setup - Measurement Setup** findet man die Messeinstellungen:

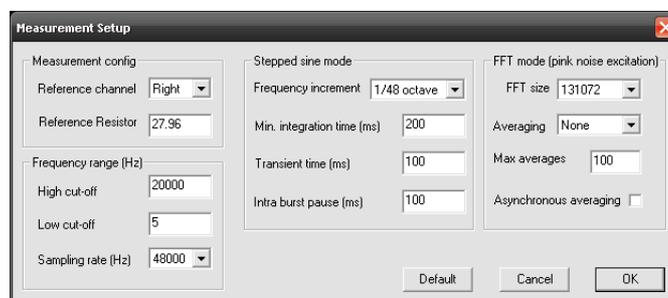


Abbildung 131: Dialogfeld „Measurement Setup“

1. Referenzwiderstand

Der in die Messbox eingebaute Widerstand wird mit einem Multimeter genau vermessen. Der Wert wird aufgeschrieben und im Dialogfeld als **Reference Resistor** eingetragen.

ACHTUNG: Die Verbindungen an der Messbox müssen für diese Messung getrennt werden!

2. Frequency Range

Hier kann der Frequenzbereich, in dem die Messung stattfinden soll, eingegeben werden. Diese Einstellung kann auch mit **Fstart** und **Fstop** direkt von der Symbolleiste im Hauptfenster aus geschehen. Die Samplingrate kann ebenfalls geändert werden.

3. Parameter für den Modus **Stepped Sine**

- Frequency increment:

Der Abstand zwischen zwei Frequenzmesspunkten kann von 1/24 Oktave auf 1/48 Oktave verringert werden, um eine bessere Auflösung zu erhalten.

- Min. Integration time:

Die Integrationszeit T im eingeschwungenen Zustand wird hier eingestellt. Sie hat direkten Einfluss auf die Filterbandbreite B der nachträglichen Filterung des aufgezeichneten Signals.

$$B = 1/T$$

- Transient time:

Gibt die Zeitdauer an, die das System braucht, um einen stabilen, eingeschwungenen Zustand zu erreichen.

- Intra Burst Pause:

Gibt die Zeitdauer an, die zwischen den einzelnen Sinustönen pausiert wird. Sie sollte so eingestellt werden, dass die Energie aus sämtlichen reaktiven Bauteilen abgeflossen ist, bis der nächste Sinuston einsetzt.

4. Parameter für den Modus **Pink Noise Excitation**

- FFT size:

Gibt die Blocklänge der FFT Berechnung an.

- Averaging:

Hier kann die Mittelung über mehrere Signalperioden eingestellt werden. **Linear** ist eine einfache Mittelung über alle Wiederholungen, **Exp** gewichtet die letzten 5 Wiederholungen stärker. Die Einstellung kann auch über die Symbolleiste unter **Avg** erreicht werden.

- Max averages:

Gibt die Anzahl der Wiederholungen für die Mittelung an.

23.3 Kalibrierung

Bevor die eigentliche Messung durchgeführt wird, müssen Kanaldifferenzen zwischen linkem und rechtem Kanal durch eine Kalibrierung ausgeglichen werden. Zunächst werden unter **Setup- Audio Devices** die genutzten Ein- und Ausgänge der Audioschnittstelle ausgewählt.

Im Menü **Record** kann die Funktion **Calibrate** ausgewählt werden, ebenso zu erreichen ist sie über das Icon **CAL** in der Toolbar. Nun sollte die **Calibrate Input Channels** Dialogbox, erscheinen:

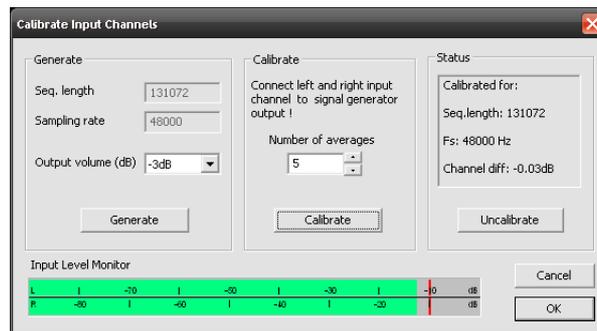


Abbildung 132: Dialogfeld „Calibrate Input Channels“ nach der Kalibrierung

Der Leistungsverstärker muss für die Kalibrierung eingeschaltet sein, die Verstärkung sollte zunächst auf Null gestellt werden. Die Messbox muss auf **Impedanzmessung - Kalibrierung** gestellt werden. Über den Button **Generate** wird ein Testsignal mit dem angegebenen Pegel erzeugt (empfohlener Wert: $-3dB(FS)$). Nun kann der Lautstärkeregel des Verstärkers langsam aufgedreht werden, bis eine ausreichende Aussteuerung der Audioschnittstellen-Eingänge erreicht wird. Zur Kontrolle dient hierfür der **Input Level Monitor**.

ACHTUNG: Die Kalibrierung gilt nur für eine spezielle Stellung der Eingangs-Pegelregler der Audioschnittstelle und einer bestimmten Sampling-Frequenz und FFT-Länge. Wird ein Parameter geändert muss neu kalibriert werden!

23.4 Messung

In der Symbolleiste unter **Gen** wird die Messmethode ausgewählt. Die Messung wird mit **Record -Start** oder dem roten Dreieck in der Symbolleiste gestartet. Für eine schnelle Kontrolle wird eine Messung nach der FFT Methode empfohlen, die präzisere Messung erfolgt anschließend durch die Sinustonmethode.

23.5 Berechnung der Thiele-Small Parameter

Zur schnellen Bestimmung der wichtigsten Thiele-Small Parameter gibt es in LIMP die Funktionen **Analyse - Loudspeaker Parameters** jeweils mit der Methode der Zusatzmasse (**added mass method**) oder eines Zusatzvolumens (**closed box method**).

23.5.1 Methode der Zusatzmasse

Es wird eine Messung ohne Schallführung des Lautsprecherchassis wie aus Kap. I bekannt durchgeführt. Anschließend wird eine Zusatzmasse angebracht und eine zweite Messung durchgeführt. Beide Messungen sollten unter einem eindeutigen Namen gespeichert werden. Nun wird die erste Messung geöffnet und als Overlay gesetzt (**Overlay - Set As Overlay**), anschließend wird die zweite Messung geöffnet.

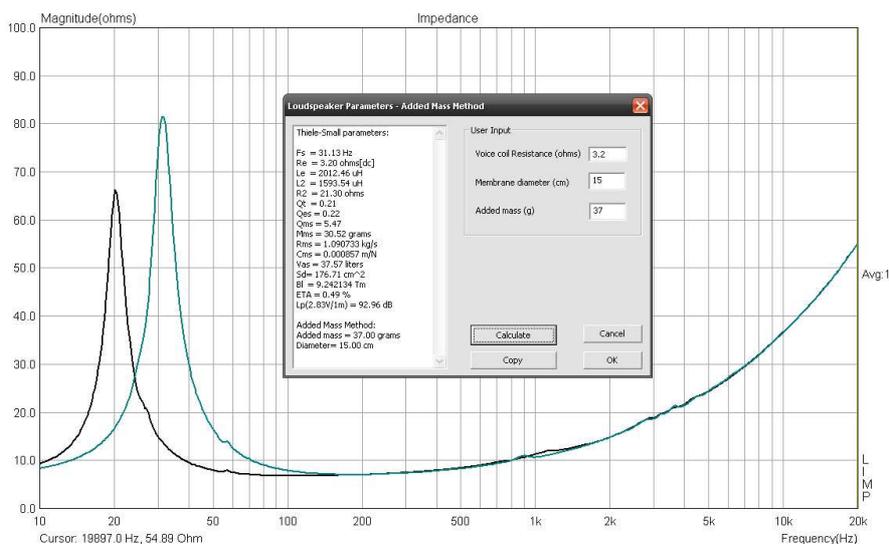


Abbildung 133: Analyse der Thiele-Small Parameter mit Zusatzmasse

Mit dem Befehl **Analyse - Loudspeaker Parameters - added mass method** wird das Analysefenster geöffnet (siehe Abb. 133). Hier muss der Gleichstromwiderstand R_s , der effektive Membrandurchmesser D_M , sowie die Zusatzmasse für die zweite Messung m_Z eingetragen werden. Mit 'Calculate' werden die in Tab. 9 beschriebenen Parameter nach den in Kap. I beschriebenen Verfahren berechnet.

23.5.2 Methode des Zusatzvolumens

Hierbei wird die zweite Messung in einem definierten geschlossenen Gehäuse durchgeführt, wie es in Kap. I beschrieben wurde. Der Vorgang ist ansonsten mit der Methode der Zusatzmasse identisch. Im Menü **Analys** wird jetzt **Loudspeaker Parameters - closed box method** ausgewählt, um zum Analysefenster zu gelangen.

Anstelle der Zusatzmasse muss hier das Volumen des geschlossenen Gehäuses angegeben werden (siehe Abb. 134).

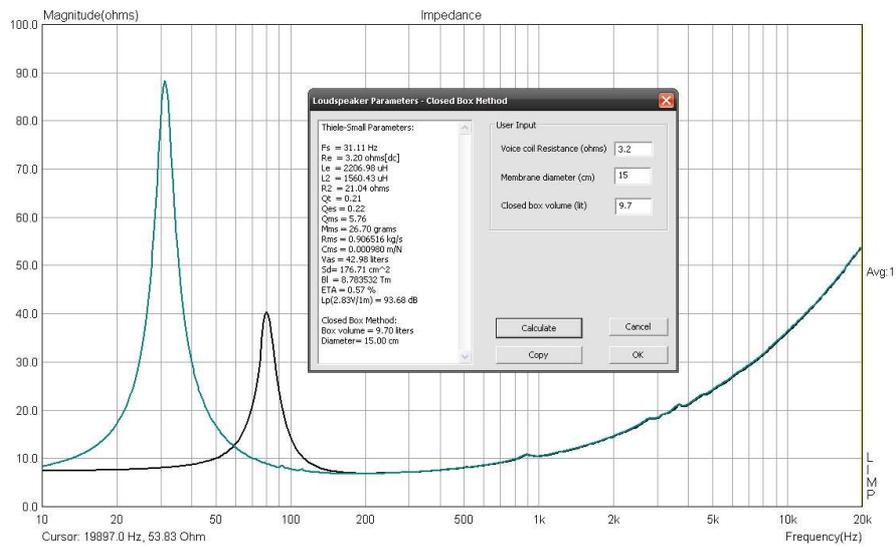


Abbildung 134: Analyse der Thiele-Small Parameter mit Zusatzvolumen

23.5.3 Tabelle der berechneten Parameter

Bez. LIMP	Bez. Projekt	Bemerkungen
f_s	f_{oS}	Freiluftresonanzfrequenz
R_e	R_s	Gleichstromwiderstand
L_e	L_s	Induktivität der Schwingspule
L_2	keine	Parameter für höhere Modellordnung
R_2	keine	Parameter für höhere Modellordnung
Q_t	$Q_{g,Mk}$	Gesamtgüte „ $Q_{g,Mk}$ “ der Membrankonstr.
Q_{es}	$Q_{e,Mk}$	Elektrische Güte der Membrankonstr.
Q_{ms}	$Q_{m,Mk}$	Mechanische Güte der Membrankonstr.
M_{ms}	$m_{g,oS}$	Bewegte Masse
R_{ms}	R_{Mk}	mechanischer Verlustwiderstand
C_{ms}	$C_{m,Ma}$	Nachgiebigkeit der Membranaufhängung
V_{as}	$V_{\ddot{a},Ma}$	Äquivalentvolumen
S_d	A_M	Membranfläche
Bl	Bl	Wandlerkonstante $B * l$
ETA	η	Wirkungsgrad
L_p	keine	Schalldruckpegel in 1m Abstand (bei 2,83V)

Tabelle 9: Thiele Small Parameter mit Limp berechnen

23.6 Exportieren der Messdaten

Um einen einfachen Datenaustausch mit anderen Programmen zu gewährleisten, bietet LIMP die Möglichkeit Messungen im ASCII Format zu exportieren. Hierzu wählt man **File - Export ASCII as...** und das gewünschte Format. Zur Wahl stehen **Commented .txt** mit Header, der die wichtigsten Messinformationen enthält, oder **Plain .zma** mit puren Messdaten. Die Werte von Frequenz, Betrag und Phase werden in dieser Reihenfolge mit Tabstops getrennt und zeilenweise exportiert.

24 ARTA - Impulsantwort und SPL Verlauf

Mit dem Programmteil ARTA kann die Impulsantwort eines Systems gemessen werden. Hieraus lassen sich über Analysetools Schalldruck-Frequenzgang (SPL-Verlauf) und Polardiagramme erstellen. Auch hier werden wir wieder einen kurzen Überblick über die wichtigsten Funktionen geben, eine genaue Beschreibung des Programms ist in der Bedienungsanleitung zu finden (Mateljan, 2008a).

24.1 Kalibrierung

Um korrekte Aussagen über den tatsächlichen SPL Verlauf machen zu können, ist es wichtig, dass der Messaufbau kalibriert ist und Verstärkungsfaktoren korrekt in den Messeinstellungen eingegeben werden. Unter **Setup - Audio Devices** werden zunächst die genutzten Ein- und Ausgänge der Audioschnittstelle eingestellt.

24.1.1 Mikrofonkalibrierungsdatei

Ist für das verwendete Messmikrofon eine Kalibrierungsdatei vorhanden, so kann diese unter **Setup - FR Compensation** geladen und angewendet werden.

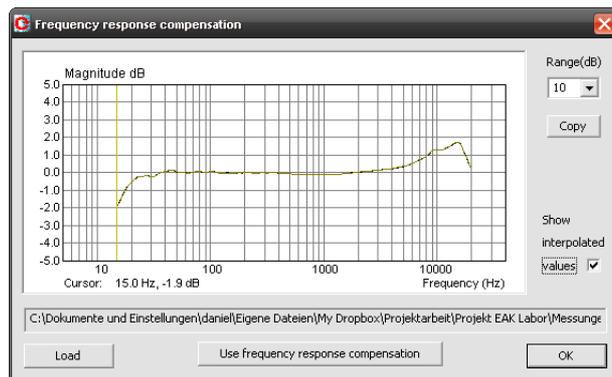


Abbildung 135: Einsetzen einer Mikrofonkalibrierungsdatei in ARTA

24.1.2 Kalibrierung des Messaufbaus

Über das Menü **Setup - Calibrate Devices** wird der Dialog **Soundcard and Microphone Calibration** geöffnet:

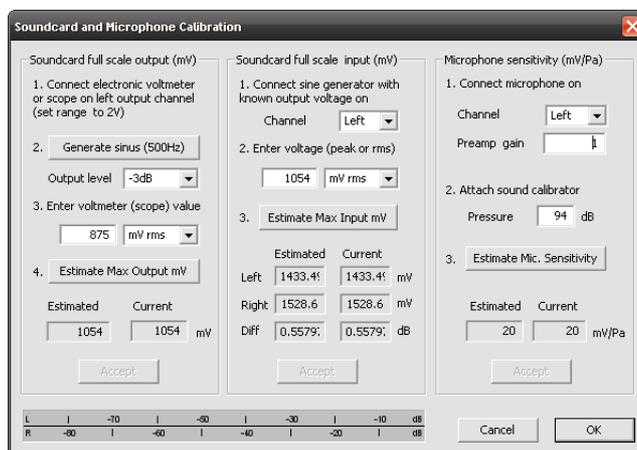
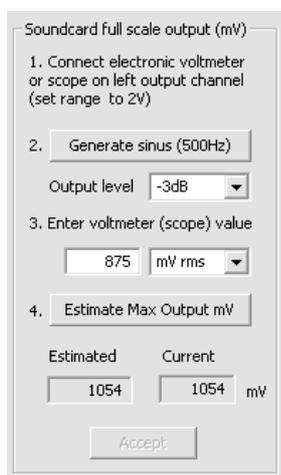


Abbildung 136: Dialogfeld „Soundcard and Microphone Calibration“

Das Kalibrierungsmenü ist in drei Abschnitte unterteilt:

1. Ausgang der Audioschnittstelle - Erzeugte Generatorspannung



- (a) Der Ausgang der Audioschnittstelle wird mit einem Voltmeter (RMS) verbunden.
- (b) 'Generate sinus (500Hz)' drücken. ARTA erzeugt ein Sinussignal mit wählbarer Amplitude, wobei empfohlen wird, die Grundeinstellung ($-3dB$) beizubehalten.
- (c) Wert vom Voltmeter in das Textfeld eingeben (in V_{rms})
- (d) 'Estimate Max Output mV' drücken
- (e) Der veranschlagte Wert für Max Output wird im Feld 'Estimated' angezeigt.
- (f) Wenn das Ergebnis plausibel erscheint, wird mit 'Accept' der veranschlagte Wert als aktueller Wert für **LineOut Sensitivity** übernommen.

2. Pegeldifferenzen der Eingänge abgleichen

Soundcard full scale input (mV)

1. Connect sine generator with known output voltage on

Channel

2. Enter voltage (peak or rms)

3.

	Estimated	Current	
Left	1433.4	1433.4	mV
Right	1528.6	1528.6	mV
Diff	0.5579	0.5579	dB

- Verbinden des Line-Out-Kanals mit dem linken Line-In-Kanal
- Drücken von 'Generate sine (500Hz)'
- Der Wert der Generatorspannung wird aus 1.) übernommen
- Mit 'Estimate Max Input mV' wird der Abgleich gestartet. Wenn der Eingangskanal übersteuert ist muss der Eingangspegel reduziert werden und der Schritt wiederholt werden
- Wenn der Wert plausibel erscheint, wird mir 'Accept' der geschätzte Wert als aktueller Wert für **Line In Sensitivity** übernommen
- Wiederholen der Schritte 1)-6) für den rechten Line-In-Kanal

3. Mikrofon Pegelkalibrierung - Referenzschallquelle

Zur Kalibrierung des Mikrofons wird eine Referenzschallquelle benutzt:

Microphone sensitivity (mV/Pa)

1. Connect microphone on

Channel

Preamp gain

2. Attach sound calibrator

Pressure dB

3.

	Estimated	Current	
	20	20	mV/Pa

- Verbinden des Mikrofons mit dem linken Eingang der Audioschnittstelle
- Als **Preamp Gain** wird der Verstärkungsfaktor des Vorverstärkers eingetragen (nicht in dB), um eine korrekte Mikrofonempfindlichkeit zu berechnen
- Der Kalibrator wird auf das Mikrofon gesetzt und eingeschaltet
- Drücken von 'Estimate Mic Sensitivity'
- Wenn die Messung plausibel erscheint, wird sie mit 'Accept' übernommen

24.1.3 Verstärkungsfaktoren

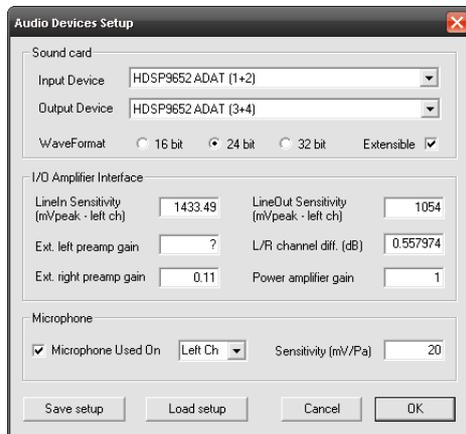


Abbildung 137: Dialogfeld „Audio Devices Setup“

Unter **Setup - Audio Devices** werden abschließend die korrekten Verstärkungsfaktoren eingetragen: Am rechten Eingang wird der Spannungsteilerfaktor k eingetragen und am linken Eingang der Verstärkungsfaktor des Mikrofonvorverstärkers. Da eine zweikanalige Messung durchgeführt wird, ist der Verstärkungsfaktor des Leistungsverstärkers uninteressant, er wird bei der Messung automatisch korrigiert.

ACHTUNG: Die Faktoren werden nicht in dB eingetragen!

24.2 Messung der Impulsantwort

Die Erstellung einer Messung mit einem exponentiell ansteigenden Sinussweep erfolgt nun folgendermaßen:

Über **Record - Impulse Response** wird das Fenster für die Messung geöffnet. In der Registerkarte für die Sweep Messung können weitere Parameter für den Signalgenerator und für die Aufzeichnung eingestellt werden. Der linke Kanal wird als **Preferred input channel** ausgewählt (Mikrofonsignal) und **dual channel measurement mode** wird aktiviert (Referenzkanal), somit können Einflüsse durch die Messkette bis zum Leistungsverstärker unterdrückt werden. Für ein besseres Signal-Rausch-Verhältnis kann unter **Number of averages** die Anzahl der Mittelungen eingegeben werden.

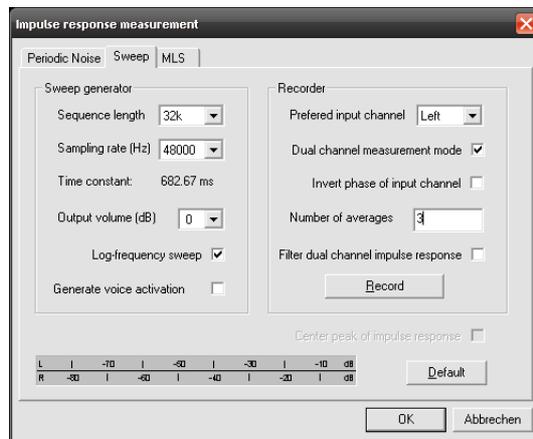


Abbildung 138: Dialogfeld „Impulse Response Measurement“ für Sweep Messung

24.3 Analyse und Bearbeitung

Für die weitere Aufbereitung der Messung sind verschiedene Werkzeuge in ARTA vorhanden, um Zeitfenster zu setzen, Pegel anzupassen, eine Beugungskorrektur vorzunehmen und um verschiedene Messungen zu einem Messergebnis zusammen zu führen.

24.3.1 Einstellen des Zeitfensters für die Impulsantwort

Nach erfolgter Messung kann ein Zeitfenster T mit linkem und rechtem Cursor im Graph gesetzt werden. Zum setzen des Cursors kann die linke bzw. rechte Maustaste verwendet werden. In der Symbolleiste wird unter **Window** noch die gewünschte Fensterform eingestellt (Reckteck, Hann-Fenster,...).

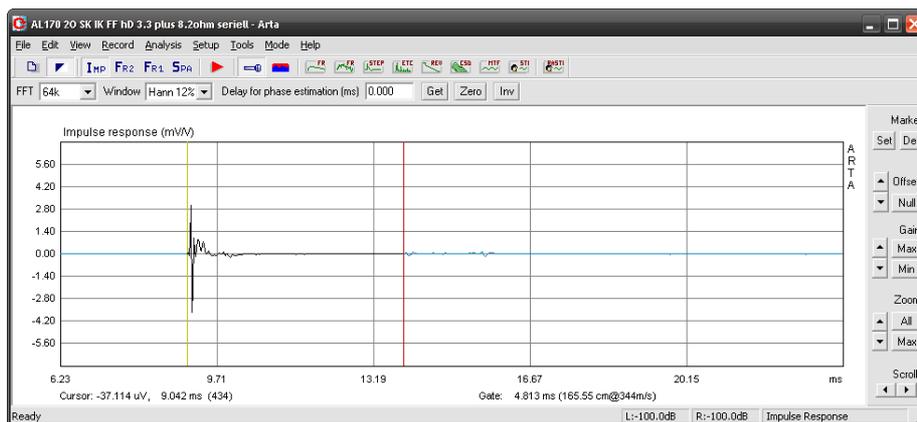


Abbildung 139: Setzen der linken und rechten Gategrenzen im Zeitbereich

Die Fenster Länge wird im unteren Bereich des Fenster als **Gate** angezeigt. Sie kann über **View - Gate Time** auch in $[m]$ bei $c = 344m/s$ angezeigt werden.

24.3.2 DFT Analyse der Impulsantwort

Um einen Frequenzgang zu erhalten, wird unter **Analysis** der Menüpunkt **Smoothed Frequency Response** ausgewählt. Hier können durch anlegen von **Overlays** mehrere Analysekurven übereinander dargestellt werden, um einen einfachen Vergleich zu ermöglichen.

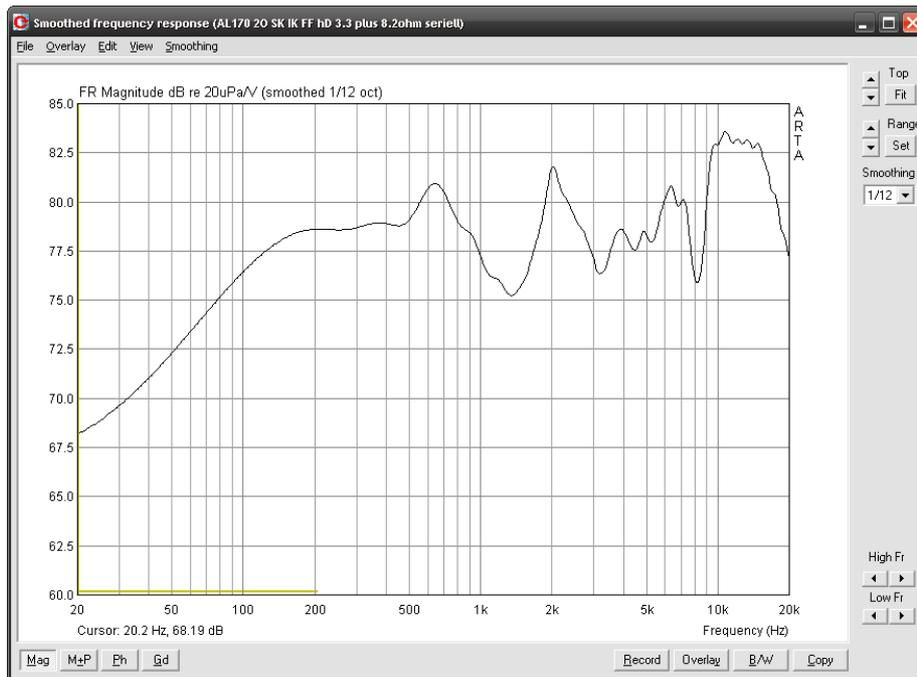


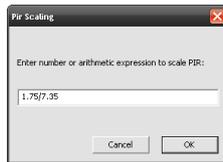
Abbildung 140: Beispiel eines fertiggestellten SPL Verlaufs

24.3.3 Summieren mehrerer Messungen

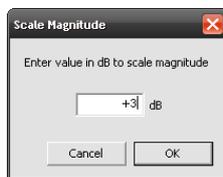
Über **Load and Sum** kann zu der aktuell geöffneten Messung eine weitere Impulsantwort addiert werden. Das Ergebnis kann dann als neues PIR File abgespeichert werden, um es für die spätere Analyse aufzubewahren. Die Summierung kann ebenfalls im Frequenzbereich durchgeführt werden. Mit dem Befehl **Edit - Power Average with Overlay** wird zum aktuellen SPL Verlauf die Overlay Kurve hinzuaddiert. Es ist zu beachten, dass hier der Phasengang berücksichtigt wird.

24.3.4 Pegel skalieren

Skalierungsfaktoren können sowohl im Zeitbereich unter **Edit - Scale** (ACHTUNG: nicht in *dB*!) als auch im Frequenzbereich unter **Edit - Scale Level** (in *dB*) eingegeben werden.

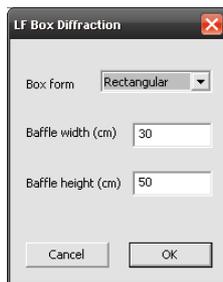


Im Zeitbereich kann mit **Edit - Scale** ein ganzer arithmetischer Ausdruck als Skalierungsfaktor dienen. Der Ausdruck wird mit den einzelnen Messwerten multipliziert.



Im Analysefenster kann mit **Edit - Scale Level** der SPL Verlauf komplett nach oben oder unten verschoben werden. Der Wert wird mit jeweiligem Vorzeichen in *dB* eingetragen.

24.3.5 Beugungskorrektur (Baffle Step Korrektur)



Im DFT Fenster können unter **Edit -LF Box diffraction** die Schallwanddimensionen zur Simulation der Beugungskorrektur eingetragen werden.

ACHTUNG: Die Korrektur ist nach jeder Skalierung erneut einzugeben!

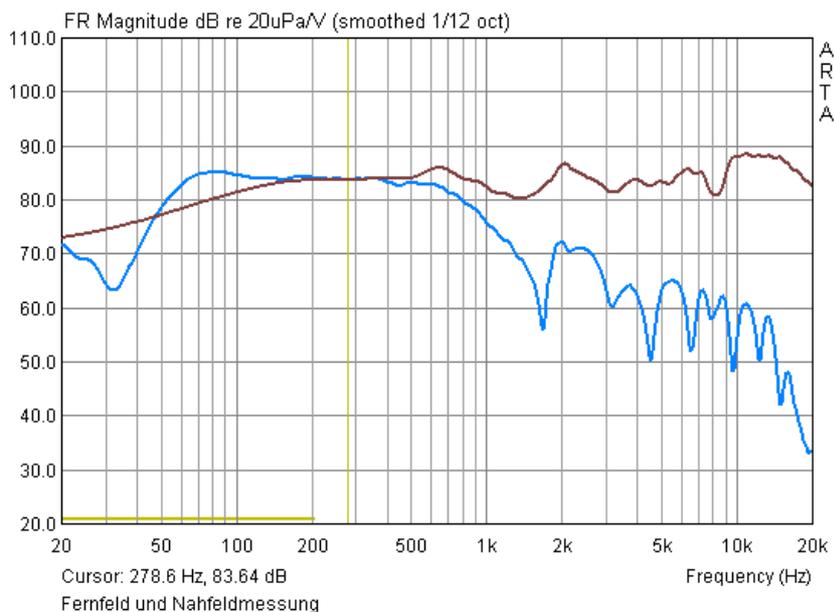
24.3.6 Zwei Messungen im Frequenzbereich zusammenschneiden

Ist ein Overlay gesetzt, kann der aktuelle SPL Verlauf an einer bestimmten Frequenz abgeschnitten werden. Der nun abgeschnittene Teil wird mit den Daten aus dem Overlay ergänzt. Im Übergangsbereich muss ein geeigneter Schnittpunkt gewählt werden.

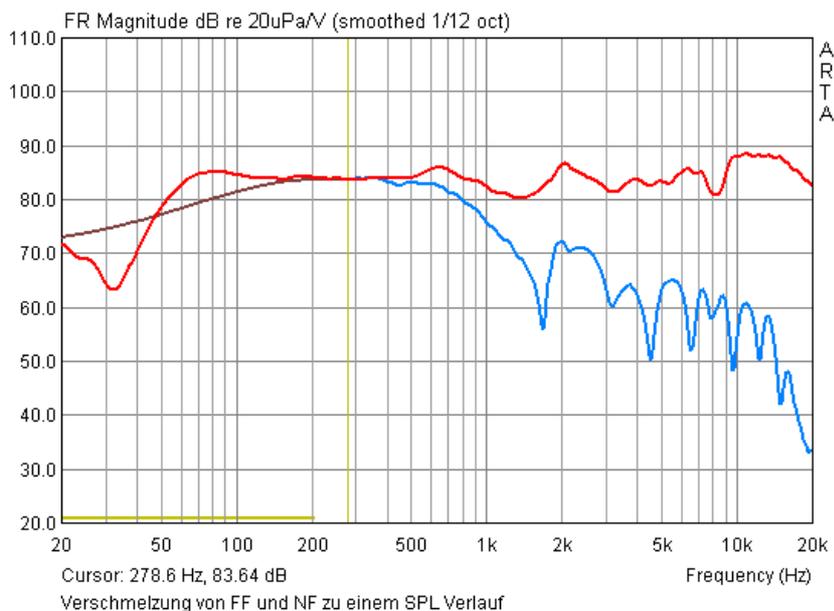
Edit - Merge overlay below cursor: Ersetzt unterhalb des Cursors die aktuelle Kurve mit den Overlaywerten.

Edit - Merge overlay above cursor: Ersetzt überhalb des Cursors die aktuelle Kurve mit den Overlaywerten.

Dieser Vorgang soll an einem Beispiel noch verdeutlicht werden:
 Es wurde eine Nahfeldmessung mit allen Summierungen, Pegel- und Beugungs-
 korrektur als Overlay gespeichert (blau). Anschließend wurde die Fernfeldmes-
 sung geladen und der Pegel korrigiert.



Der Cursor wird nun mit der linken Maustaste an die gewünschte Position
 gesetzt und mit dem Befehl **Edit - Merge overlay below cursor** verschmelzen
 Nah- und Fernfeldmessung zu einem SPL Verlauf.



24.3.7 Erstellen von Polardiagrammen und Sonogrammen

Zur Betrachtung der Abstrahlcharakteristik eines Lautsprechersystems ist die Erstellung eines Polardiagramms bzw. von Sonogrammen eine nützliche Hilfe. Um ein Polardiagramm in ARTA zu erstellen muss eine Serie von Messungen aus mehreren Winkeln zur Verfügung stehen. Die Messungen werden im Format „Name_deg φ .pir“ gespeichert. Wobei φ den aktuellen Winkel mit Vorzeichen angibt. Es wird empfohlen Messungen im Abstand von $d\varphi = 10 - 15^\circ$ durchzuführen. Handelt es sich um eine symmetrische Lautsprecheranordnung, so ist die Messung zu einer Seite ausreichend.

Ist die Messreihe komplett, so kann unter **Tools - Directivity Pattern** mit **File - Create Directivity Pattern** das Menü zum eingeben der Messungen aufgerufen werden:

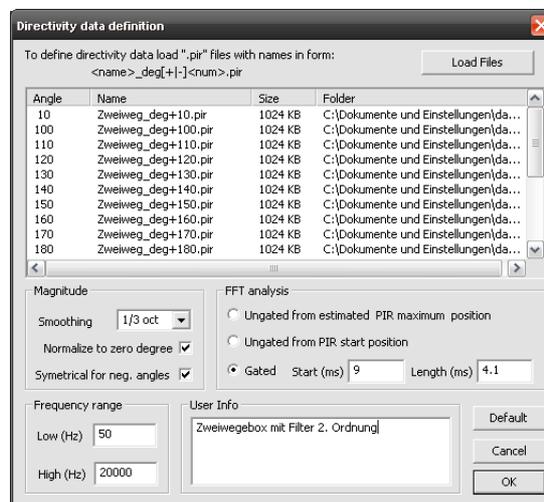


Abbildung 141: Anlegen einer Messreihe für Polardiagramme und Sonogramme

Es genügt, die erste Datei der Messreihe auszuwählen, somit werden alle gleichnamigen Messungen geladen und dem entsprechenden Winkel zugeordnet. Im Dialog können noch der Frequenzbereich, Normierung auf die 0° Achse sowie gegebenenfalls ein Fenster eingestellt werden. Mit **OK** gelangt man zurück zum Diagrammfenster, hier sollte nun das gewünschte Anzeigeformat ausgewählt werden. Für die Richtcharakteristik sind 'Polardiagramm' und 'Sonogram' zu empfehlen.

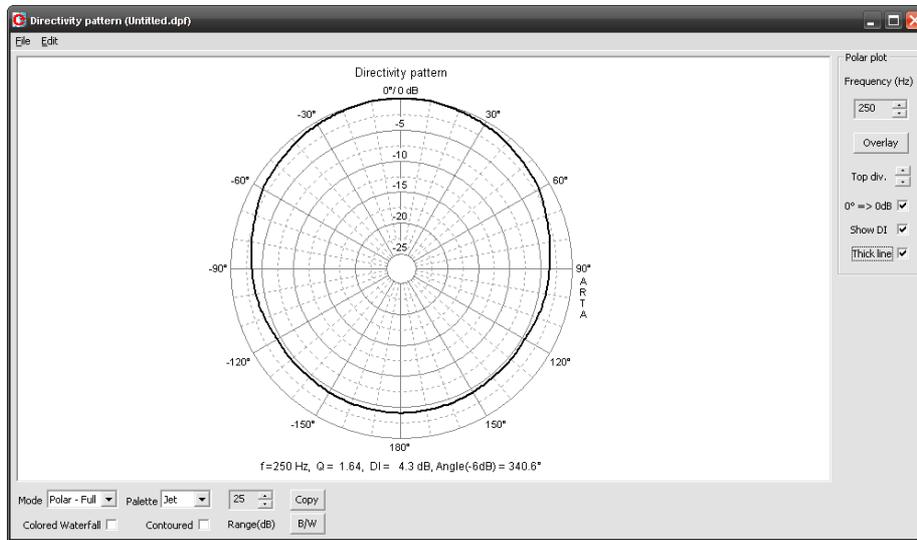


Abbildung 142: Beispiel eines fertigen Polardiagramms

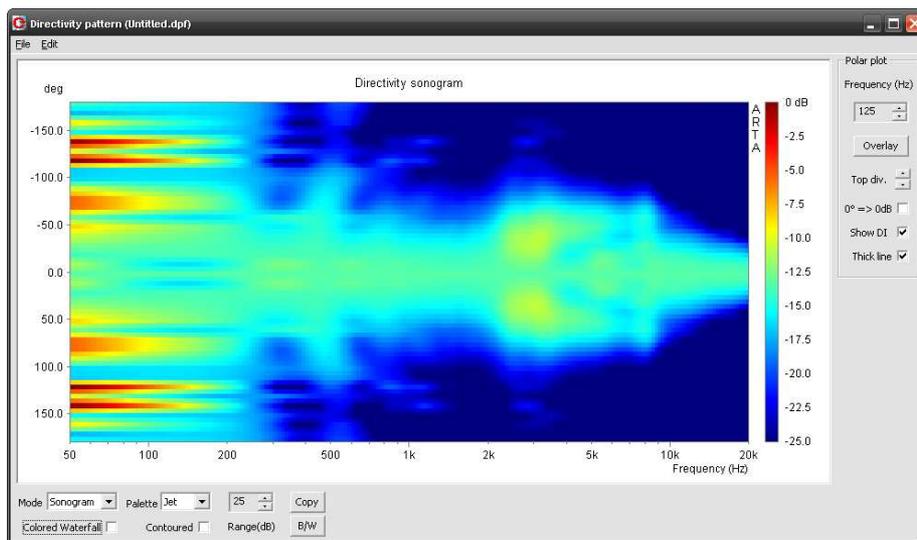


Abbildung 143: Beispiel eines fertigen Sonogramms

24.4 Exportieren von Messdaten

Um die Messdaten für andere Programme zu Verfügung zu stellen, können die bearbeiteten SPL Verläufe in ARTA im ASCII Format exportiert werden. Hierfür dient der Befehl **Export - Export ASCII**.

WICHTIG: Es wird das exportiert, was aktuell im Analysefenster angezeigt wird. Overlays werden nicht beachtet. Im Menü **View** kann eingestellt werden, was ARTA anzeigen soll. So kann z.B. entweder die Betrags- oder die Phaseninformation, oder auch beides gemeinsam exportiert werden.

Wählt man den Export als .txt Datei, wird ein Header erzeugt, in dem die relevanten Informationen des Exports stehen. Die Werte für Frequenz, Betrag und Phase werden in dieser Reihenfolge mit Tabstops getrennt und zeilenweise exportiert. Wählt man das Format .frd (nur bei Betrag und Phase) wird der Header beim Export weggelassen. Dies ermöglicht einen einfachen Datenaustausch mit anderen Programmen.

Etwas seltener gebraucht, aber durchaus nützlich ist die Export Funktion für die Impulsantwort. Im Hauptfenster von ARTA wählt man **File - Export** und das gewünschte Exportformat, z.B. ASCII oder .wav Datei. Im ASCII Export werden die Messdaten ebenfalls durch Tabstops getrennt in zwei Spalten exportiert, dem Zeitpunkt und dem Amplitudenwert. Es wird ebenfalls ein Header geschrieben, der die wichtigsten Informationen über die Messung enthält.

Teil VIII

Simulation mit LspCAD Pro

Sämtliche Simulationen werden im Labor mit der in der professionellen Lautsprecherentwicklung sehr gängigen und beliebten Simulationssoftware „**LspCAD Professional**“ von Ingemar Johansson durchgeführt. Eine Demoversion des Pakets sowie ein Handbuch und hilfreiche Tutorials stehen kostenlos zum Download zur Verfügung (http://www.ijdata.com/LspCAD_download.html).

Zum Zeitpunkt der Referenzmessungen für das Labor stand die Software Version 6.33 pro zur Verfügung.

Zu den nachfolgend durchgeführten Simulationsbeispielen in LspCAD Professional wurden entsprechende Beispieldateien angefertigt, die auf der EAK-Labor CD zu finden sind. Auf die einzelnen Dateien wird in den entsprechenden Simulationsschritten explizit hingewiesen.

25 Einführung

Zur Simulation der im Labor behandelten Lautsprecherboxen stehen in LspCAD Professional zwei Möglichkeiten zur Verfügung:

1. Simulation über die Angabe von Thiele & Small Parametern der verwendeten Chassis sowie genaue Definition der Gehäusegeometrie
2. Simulation über die Angabe gemessener Schalldruckfrequenzgänge und Impedanzfrequenzgänge einzelner Chassis in eingebautem Zustand

Auf Grund der Komplexität dieser umfangreichen Simulationssoftware ist jedoch vor Simulationsbeginn eine Einführung in die Grundfunktionen sowie deren Bedienung notwendig.

25.1 Das Hauptfenster „Main“

Nach dem Start von LspCAD Professional erscheinen zwei Programmfenster. Das mit „Main“ bezeichnete und in Abbildung 144 ersichtliche Programmfenster ist das Hauptfenster, von welchem aus sich unter Anderem Projekte öffnen, speichern oder schließen, jedoch auch für die Simulation relevante Grundeinstellungen (z.B. Frequenzbereich oder Wertebereich der Simulationsfenster) treffen lassen.

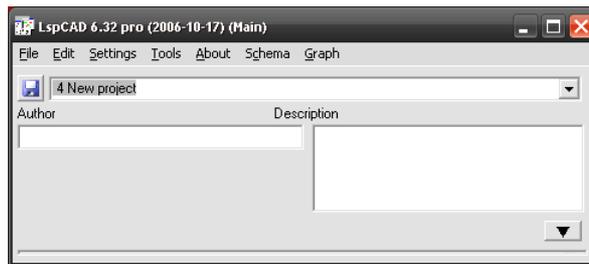


Abbildung 144: Das Hauptfenster „Main“ in LspCAD Pro

In LspCAD lassen sich mehrere Simulationsprojekte gleichzeitig verwalten. Nach dem Start sind vier Projekte verfügbar (vgl. Abbildung 145). Drei davon sind spezielle Projekte die nicht gelöscht werden können. Wichtig ist davon vor allem das Vorlagenprojekt „**Templates**“.

Das Vorlagenprojekt „**Templates**“ enthält vorbereitete (gruppierte) Schaltungselemente wie aktive Filter und Parallelschwingkreise, sowie Boxenkonstruktionen (zum Beispiel geschlossene Box oder Bassreflexbox), die einfach in ein neues Projekt übernommen werden können.

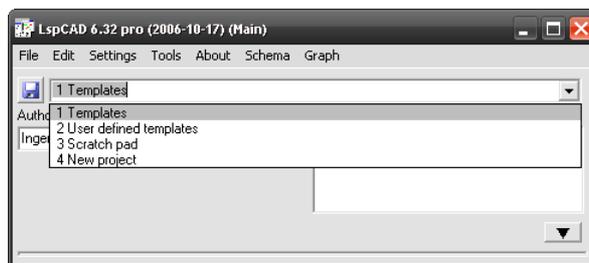


Abbildung 145: Projektauswahl im Hauptfenster „Main“

Wählt man nun im Hauptfenster das Vorlagenprojekt „**Templates**“ aus, erscheinen entsprechend im zweiten Programmfenster, dem Projektfenster „**Schema**“, die verfügbaren Projektvorlagen.

25.2 Das Projektfenster „Schema“

Das in Abbildung 146 zu sehende Projektfenster „**Schema**“ dient zum Aufbau von Simulationsschaltbildern. Im **Editiermodus** kann der Benutzer Komponenten erstellen, bewegen löschen, duplizieren, gruppieren oder Gruppen wieder auflösen.

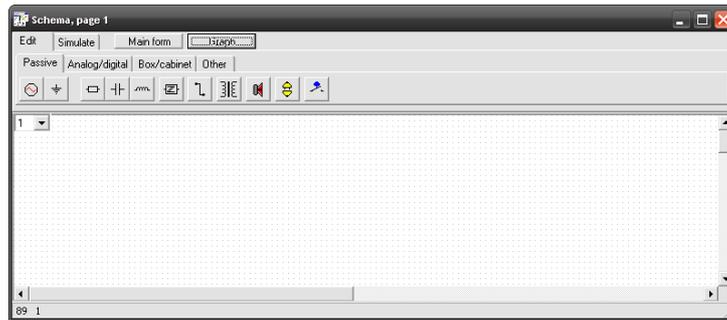


Abbildung 146: Das Projektfenster „Schema“

Das Programmfenster besitzt zweierlei Modi. Einen Modus zum editieren von Schaltplänen „**Edit**“ und einen Modus zum simulieren der erstellten Schaltpläne „**Simulate**“.

Abbildung 146 zeigt allerdings noch nicht alle verfügbaren Arbeitsflächen des Projektfensters („Schema“). So gibt es im **Editiermodus** die Möglichkeit unter Zehn verschiedenen „Projektunterseiten“ auszuwählen auf denen mehrere Schaltungen parallel aufgebaut werden können (vgl. Abbildung 147).

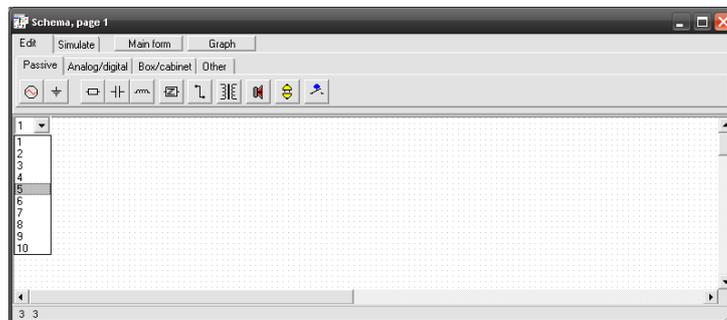


Abbildung 147: Subpages im Projektfenster „Schema“

Im **Simulationsmodus** kann der Benutzer die verschiedenen Werte der Komponenten anpassen während in einem weiteren Fenster gleichzeitig das Ergebnis der Veränderungen erscheint.

25.3 Das grafische Ausgabefenster „Graphs“

Dieses dritte, mit „**Graphs**“ bezeichnete und in Abbildung 148 zu sehende Programmfenster steht ausschließlich im Simulationsmodus zur Verfügung. Der Simulationsmodus ist vom Programmfenster „**Schema**“ aus, durch Betätigung des Reiters „**Simulate**“, zu erreichen.

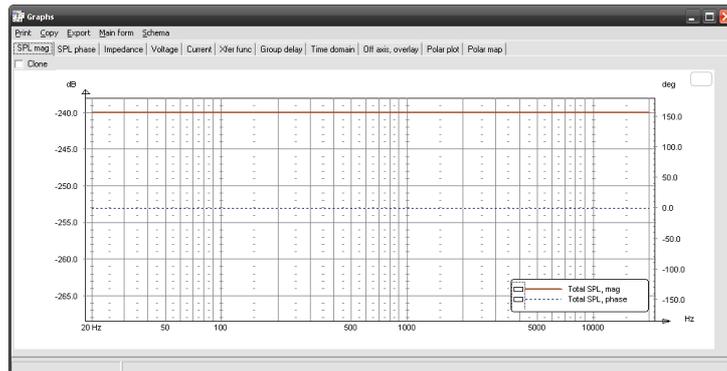


Abbildung 148: Das grafische Ausgabefenster „Graphs“

26 Simulation mittels Thiele & Small Parametern

Es folgt ein Simulationsbeispiel mit dem bereits aus Kapitel III bekannten Laborchassis Visaton GF200, welches in ein geschlossenes Gehäuse eingebaut werden soll.

Zunächst wird in LspCAD Professional ein neues Projekt erstellt. Das Editierfenster sollte somit keine Schaltpläne enthalten (auch auf keiner der Zehn Unterseiten).

Besteht der Wunsch, kann der Benutzer zur besseren Übersicht dem neuen Projekt auch einen frei definierbaren Namen zuteilen (vgl. Abbildung 149).

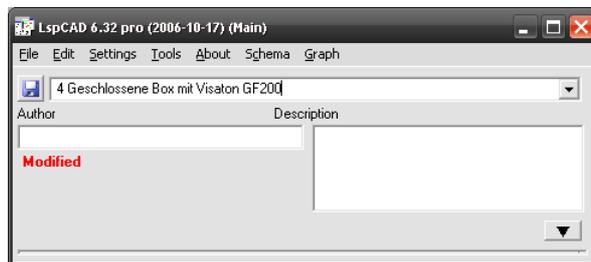


Abbildung 149: Freie Projektbezeichnungen in LspCAD Professional

Anschließend wird aus dem Vorlagenprojekt die Vorlage für ein geschlossenes Gehäuse ausgewählt. Hierzu wird zunächst im Hauptfenster „Main“ aus der Projektauswahl der Reiter „Templates“ aufgerufen.

Die von uns gewünschte Vorlage für das zu simulierende geschlossene Gehäuse, ist mit „Loudspeaker unit CL“ bezeichnet und befindet sich im Programmfenster „Schema“ auf der dritten Projektunterseite. Das Programmfenster „Schema“ muss sich im Editiermodus befinden.

Die gesamte Vorlage muss mit der Maus markiert werden (vgl. Abbildung 150). Die Untermenüs zum Kopieren und Einfügen sind durch einen Rechtsklick mit der Maus zu erreichen.

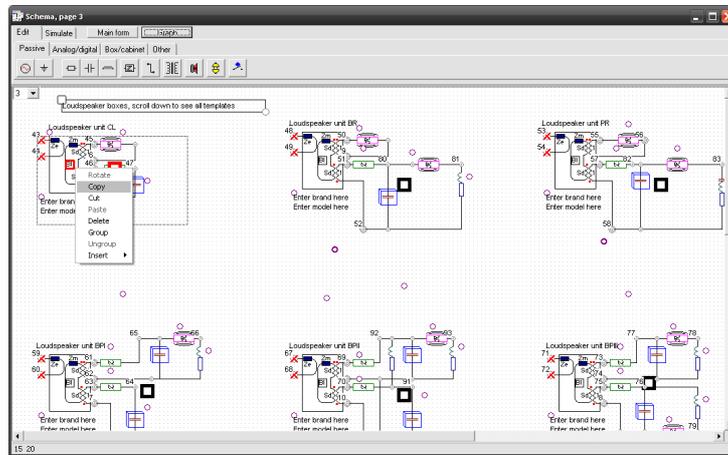


Abbildung 150: Vorlage für geschlossenes Gehäuse in Projekt „Templates“

Die kopierte Vorlage wird daraufhin in das neue Simulationsprojekt eingefügt (vgl. Abbildung 151) und durch den obligatorischen Anschluss eines Signalgenerators und eines Masseanschlusses an den mit einem roten X gekennzeichneten Anschlusspunkten ergänzt (Beispieldatei: „*T_S geschlossene Box Beispiel 1.lsp*“). Die Vorgehensweise soll durch die Abbildungen 151 und 152 verdeutlicht werden.

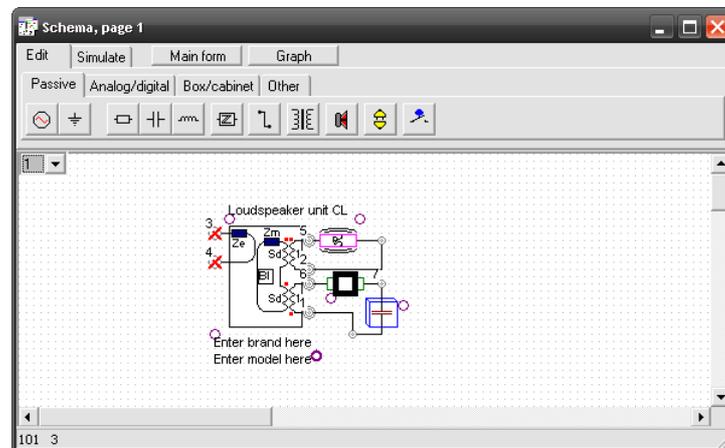


Abbildung 151: Einfügung einer Vorlage in LspCAD Pro

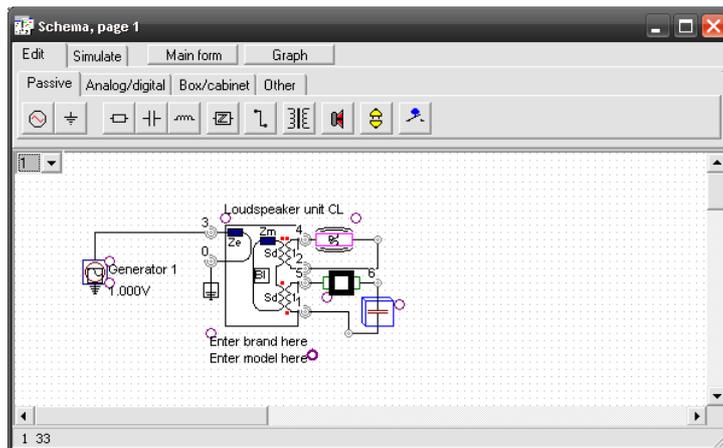


Abbildung 152: Obligatorische Schaltungselemente (Generator und Masse)

Alle Schaltungsbauteile (die auch in den Vorlagen verbaut sind) sind im Programmfenster „Schema“ zu finden. Sie können in jeder Schaltung frei miteinander verbunden werden. Dem Benutzer ergeben sich damit alle erdenklichen Möglichkeiten der freien Konstruktion und damit zum freien Experimentieren (Beispieldatei: „T_S geschlossene Box Beispiel 2.lsp“).

Anschließend wird der Simulationsmodus gestartet (vgl. Abbildung 153). Dieser ist als Reiter „Simulate“ im Projektfenster „Schema“ zu finden (Beispieldatei: „T_S geschlossene Box Beispiel 2.lsp“).

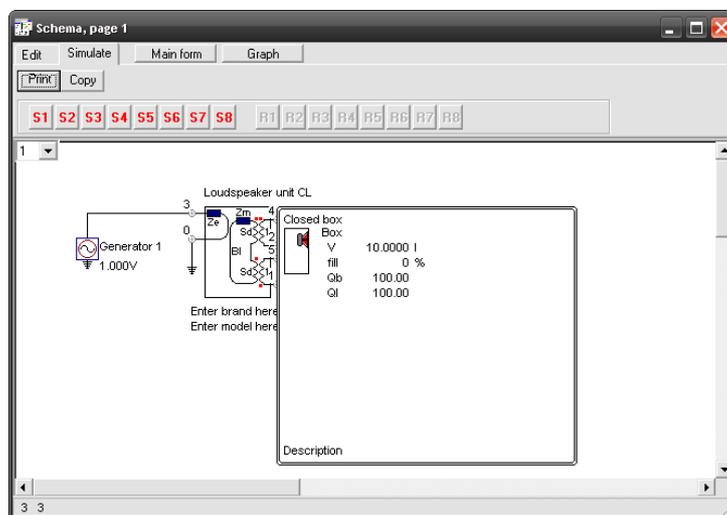


Abbildung 153: Starten des Simulationsmodus

Es öffnet sich das in Abbildung 154 ersichtliche grafische Ausgabefenster „Graphs“, mit ersten Simulationsergebnissen aus vordefinierten Werten unseres Projekts, die wir folgend anpassen wollen.

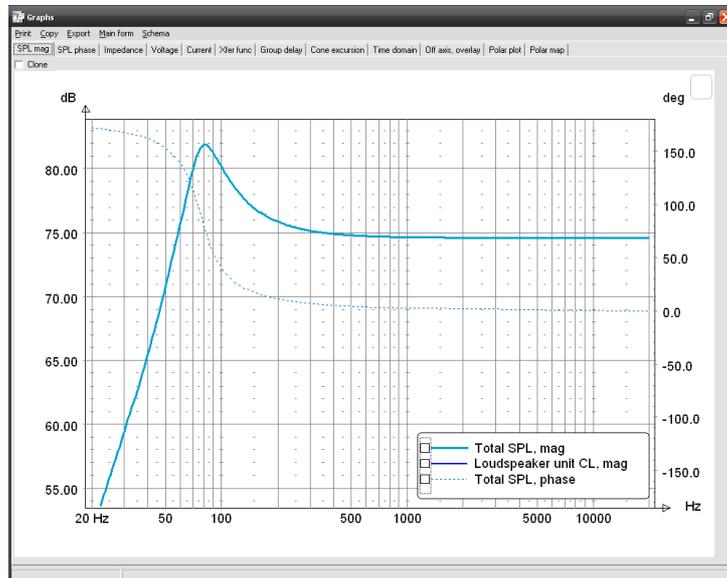


Abbildung 154: Erste grafische Simulationsergebnisse

Die Anpassung sämtlicher Simulationsparameter erfolgt im Programmfenster „**Schema**“, das sich weiterhin im Simulationsmodus befinden muss.

Als erster Schritt erfolgt die Eingabe der Thiele & Small Parameter, die unseren verwendeten Treiber näher beschreiben soll.

26.1 Eingabe der T/S Parameter

Ein Mausklick auf das mit „**Bl**“ bezeichnete Schaltungssymbol im Projektfenster „**Schema**“ öffnet den **T/S Parameter** Reiter. Das Schaltungssymbol „**Bl**“ repräsentiert das Lautsprecherchassis und ist als eigenständiges Schaltungssymbol im Editiermodus zu finden.

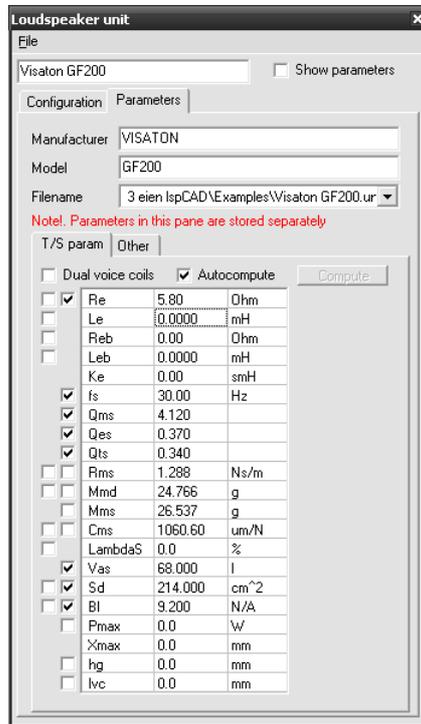


Abbildung 155: Eingabe der Thiele & Small Parameter

Die Thiele & Small Parameter werden in einer Liste eingetragen (siehe Abbildung 155). Links von der Parameterliste sind zwei Spalten mit Kästchen zum ankreuzen.

In der linken Spalte lässt sich auswählen, welche Parameter optimiert werden können. In der zweiten Spalte hat man die Option Parameter auf „unveränderbar“ (verriegelt) festzusetzen, das heißt sie behalten ihren Wert, auch wenn eine andere Komponente, die sonst eine Wirkung auf den Parameter haben würde, verändert wird.

Zur Eingabe neuer Parameter ist ein neuer Parametersatz zu erstellen (*File* → *new*). Danach werden die zur Verfügung stehenden Parameter eingegeben. Wichtig ist es dabei nach Eingabe eines Parameters, diesen durch Aktivierung der „Verriegelungsbox“ vor Änderungen zu schützen.

Nachdem einige Parameter eingegeben worden sind, werden andere Parameter automatisch neu berechnet. Wenn dies nicht erwünscht wird, kann die sogenannte „**Autocompute**“ Funktion abgeschaltet werden. Eine Berechnung von „unverriegelten“ Parametern kann dann mit einem Klick auf den „**Compute**“ – Knopf manuell gestartet werden.

In Tabelle 10 sind die definierbaren T/S Parameter dargestellt. Wir tragen nun, die uns vorliegenden, selbst gemessenen/berechneten Parameter des Laborchassis GF200 (vgl. Tabelle 1 aus Kapitel III) ein und speichern die Konfiguration unter dem Dateinamen „**Visaton GF200.unt**“ (*File* → *Save as*).

R_e	Gleichstromwiderstand $[W]$
L_e	Schwingspuleinduktivität $[mH]$
R_{eb}	Erweiterter Induktanzmodellparameter $[W]$
L_{eb}	Erweiterter Induktanzmodellparameter $[mH]$
f_s	Resonanzfrequenz in freier Luft $[Hz]$
Q_{ms}	Mechanische Güte Q
Q_{eb}	Elektrische Güte Q
Q_{ts}	Q_{gesamt}
RMS	Der Verlustwiderstand der Aufhängung $[Ns/m]$
M_{md}	bewegte Masse ohne Luft $[g]$
M_{ms}	bewegte Masse inklusive Luft $[g]$
C_{ms}	Die mechanische Nachgiebigkeit der Aufhängung $[m/N]$
Λ_{s}	Cms Kriechfaktor $[\%]$
V_{as}	Äquivalentvolumen $[l]$
S_d	Membranfläche $[cm^2]$
Bl	Wandlerkonstante $[N/A]$
P_{max}	Die maximale Eingangsleistung $[W]$
X_{max}	maximale lineare Auslenkung $[mm]$
h_g	Luftspalthöhe $[mm]$
l_{vc}	Höhe der Schwingspule $[mm]$
R_{eb} und L_{eb}	

Tabelle 10: Übersicht über Parameter für T/S – Simulation

Anschließend kann das Konfigurationsfenster geschlossen werden (Beispieldatei: „*T_S geschlossene Box Beispiel 3.lsp*“).

26.2 Defintion des Gehäusevolumens

Jetzt soll die fehlende Definition des Gehäusevolumens ergänzt werden. Dazu wird ein Mausklick im Programmfenster „**Schema**“ auf das mit einem großen Rechteck eingerahmte Gehäusedefinitionsfenster ausgeführt, um die in Abbildung 156 dargestellte Ansicht zu erhalten.

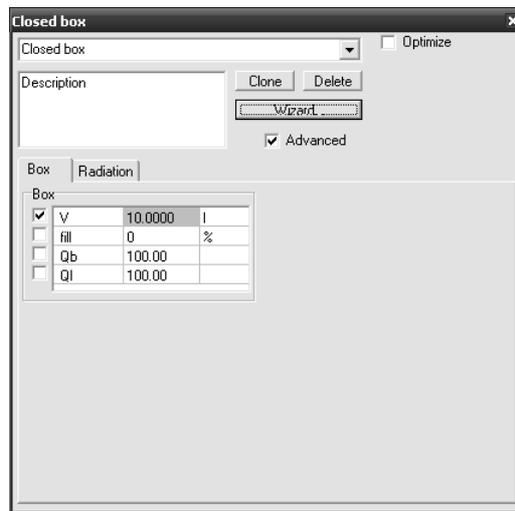


Abbildung 156: Der „Closed Box“ Reiter

Dieses Fenster ist im Übrigen ausschließlich bei Verwendung von Projektvorlagen zugänglich (vgl. Abbildung 150) und beinhaltet einen äußerst praktischen „Wizard“ zur Bestimmung der optimalen Gehäusegröße (vgl. Abbildung 157), welcher nachfolgend verwendet wird.

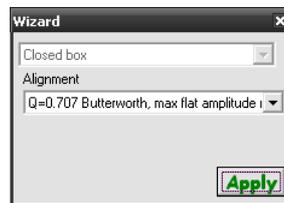


Abbildung 157: Der Closed Box Wizard

Mit der standardmäßig definierten Butterworth Abstimmung (auch B_2 genannt; vgl. Kapitel 14.1.2) geben wir uns zufrieden und bestätigen die Auswahl mit „Apply“. Die Definition aller Parameter ist damit beendet.

Es ergibt sich die in Abbildung 158 dargestellte Ansicht im grafischen Ausgabefenster von LspCAD Pro für SPL – Verlauf und Impedanzverlauf (Beispieldatei: „*T_S geschlossene Box Beispiel 4.lsp*“).

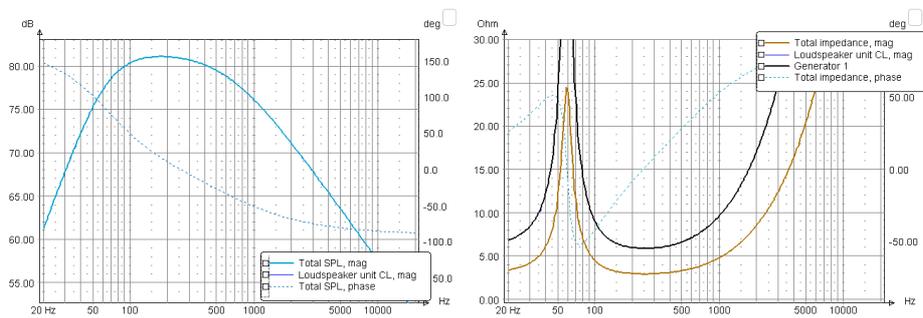


Abbildung 158: SPL- und Impedanzverlauf – Simulation mit T/S Parametern

Messungen in der Praxis und anschließende Simulation in LspCAD haben ergeben, dass eine korrekte Anzeige der Impedanzwerte nur für die Impedanzkurve des Generators gültig ist (vgl. Abbildung 158). Die Anpassung der grafischen Ausgabe lässt sich durch Änderung der Simulationseigenschaften erreichen (siehe Kapitel 26.3).

26.3 Änderung der Simulationseigenschaften

Alle Änderungen können im Hauptfenster „Main“ (siehe Kapitel 25.1) unter dem Reiter „Settings“ vorgenommen werden (vgl. Abbildung 159).

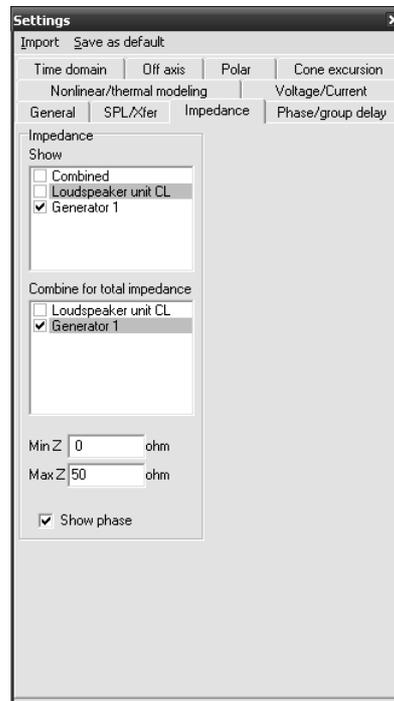


Abbildung 159: LspCAD Pro „Settings“

Zur Änderung der grafischen Anzeige des Impedanzverlaufs ist ein weiterer Wechsel zum Reiter „**Impedance**“ nötig und alle Kurven – außer diejenige für Generator 1 – werden deaktiviert. Weiters wird der Anzeigebereich auf 50 Ohm erweitert.

Es ergibt sich nun die in Abbildung 160 dargestellte Ansicht des Impedanzverlaufs (Beispieldatei: „*T_S geschlossene Box Beispiel 5.lsp*“).

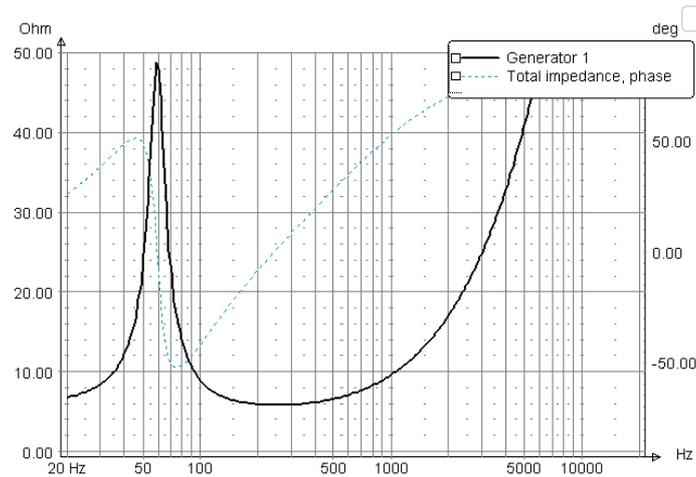


Abbildung 160: „Korrigierte Darstellung“ des Impedanzverlaufs

26.4 Gehäusemodellierung

Bei der kompletten Lautsprechersimulation soll natürlich auch der Einfluss des Lautsprechergehäuses auf den Gesamtfrequenzgang eine Rolle spielen.

Zum allgemeinen Verständnis sollte das zugrunde liegende Koordinatensystem in LspCAD Pro bekannt sein, um Gehäusedefinitionen vornehmen zu können.

Da Lautsprecherkomponenten – wie Chassis, Bassreflexrohrer und Passivmembrane – frei platziert werden können und nicht unbedingt senkrecht zur Schallwand abstrahlen müssen, bedarf es eines definierten Koordinatensystems (vgl. Abbildung 161).

Die Gehäusedefinition setzt sich zunächst aus Angabe der Breite, Höhe und Tiefe des Gehäuses – **aus Sicht auf die Schallwand** – zusammen. Ausgehend davon wird ein Koordinatenursprung definiert, der sich an der linken, unteren Gehäuseecke – **aus Sicht auf die Schallwand** – orientiert. Der Koordinatenursprung liegt dabei immer auf der Schallwand, es ist somit keine Definition in z-Richtung möglich.

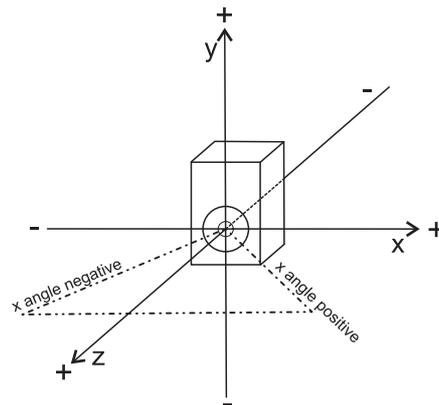


Abbildung 161: Koordinatensystem

Lautsprecherkomponenten werden dann folgend nur noch in x-, y- und z-Richtung, abweichend vom Koordinatenursprung und eventuell unterschiedlichem Abstrahlwinkel von der z-Richtung definiert.

Das folgende Beispiel beruht auf den technischen Daten des geschlossenen Labortestgehäuses mittlerer Größe (vgl. Kapitel 14.2.2). Die Gehäusesimulation wurde daraufhin auf 22,9 Liter Volumen angepasst. Das Gehäuse selbst besitzt folgende Außenabmessung (Höhe x Breite x Tiefe): $498\text{mm} \times 322\text{mm} \times 213\text{mm}$. Der Chassismittelpunkt befindet sich 184mm ab Oberkante des Lautsprechergehäuses exakt in der Mitte der Schallwand.

Um unser Laborgehäuse zu modellieren ist es nötig im Projektfenster „**Schema**“ erneut in den Editiermodus zurückzuschalten. Betrachtet man im Reiter „**Box/cabinet**“ die verfügbaren Schaltsymbole stößt man auf das Symbol der Schallwandkomponente  (Mauszeiger länger unbewegt auf ein Schaltsymbol gehalten, bewirkt das Erscheinen der „Symbolkurzinfo“). Dieses Symbol wird nun an einem beliebigen Platz im Projektfenster eingefügt (vgl. Abbildung 162, Beispieldatei: „*T_S geschlossene Box Beispiel 8.lsp*“).

Durch Rückkehr in den Simulationsmodus im Projektfenster „**Schema**“ lässt sich per Mausklick das zugehörige Konfigurationsfenster öffnen („**Baffle configuration**“, vgl. Abbildung 163 links).

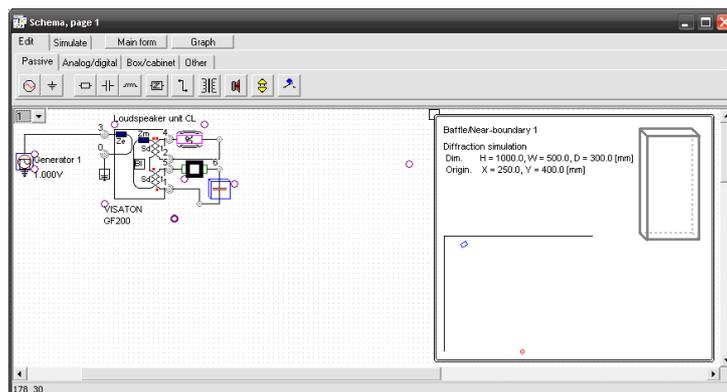


Abbildung 162: Einfügen des „Gehäusemodellsymbols“

Die sogenannte Schallwandkomponente (vgl. Abbildung 163) beschreibt die Geometrie der benutzten Schallwand (für Beugungssimulation). Falls mehr als ein Treiber im Projekt beteiligt sein sollte wird die Schallwandkomponente von allen Treibereinheiten geteilt, für die die Gehäusekantenbeugung simuliert werden soll. Es können mehrere Schallwandkomponenten in einer Simulation existieren, z.B. eine, die die Größe der Subwooferbox beschreibt, und eine, die die Mittel-/Hochtonbox beschreibt. Wir benötigen in unserem Fall allerdings nur eine Schallwandkomponente.

Das Feld „**Baffle dimension**“ beinhaltet die Außenabmessungen des Lautsprechergehäuses nach der Angabe Breite W (width), Höhe H (height) und Tiefe D (depth) und wird in Millimetern angegeben.

Das Feld „**Location of origin**“ definiert den Koordinatenursprung auf der Schallwand des Lautsprechergehäuses, der zur genauen Positionierung der Laut-

sprecher auf der Schallwand benötigt wird. Die Angaben beziehen sich auf die linke, untere Ecke der Schallwand.

Die Lautsprecherchassis werden anschließend relativ zu diesem Punkt positioniert.

Für die vorgegebene Laborbox könnte die fertige Konfiguration somit wie in Abbildung 163 rechts dargestellt aussehen (Beispieldatei: „*T_S geschlossene Box Beispiel 9.lsp*“).

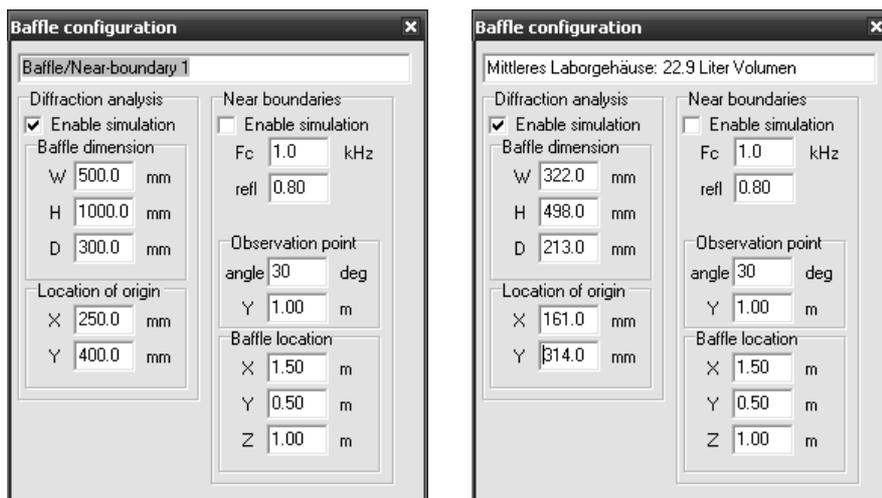


Abbildung 163: Modellierung der Schwallwand und Definition des Laborgehäuses

Als Koordinatenursprung wurde hier der Mittelpunkt des Chassis auf der Gehäuseschallwand angenommen. Das Lautsprecherchassis befindet sich folglich im Koordinatenursprung.

Anschließend muss die Position des Treibers auf der Schallwand definiert und die Beugungssimulation aktiviert werden. Dazu wird im Projektfenster „**Schema**“ durch Mausklick das Konfigurationsmenü des Lautsprechergehäuses aufgerufen.

Durch Auswahl des Reiters „**Radiation**“ und des Buttons „**Driver radiation**“ lassen sich die Einstellungen vornehmen (vgl. Abbildung 164).

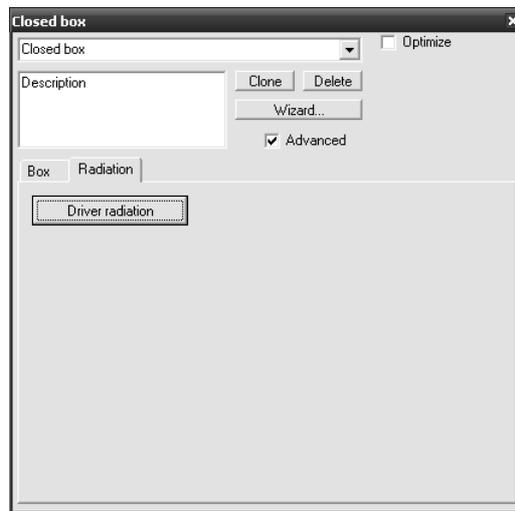


Abbildung 164: Aufrufen weiterer Treibereigenschaften

Da der Koordinatenursprung als Chassismittelpunkt auf der Schallwand definiert wurde, bedarf es keiner Änderung an diesen Konfigurationen. Lediglich die Beugungssimulation zur Berücksichtigung der „**Diffraction**“ zur Simulation der Schallwandeinflüsse müssen, wie in Abbildung 165 dargestellt, aktiviert werden („*T_S geschlossene Box Beispiel 10.lsp*“).

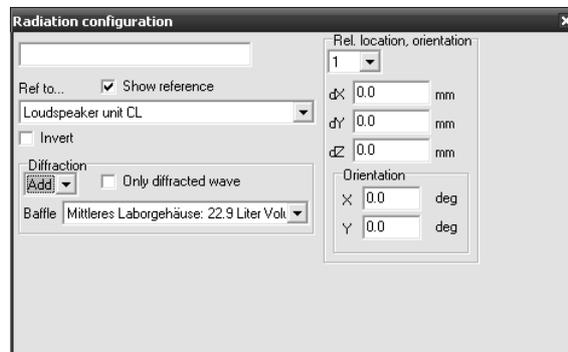


Abbildung 165: Aktivieren der Beugungssimulation

Als Ergebnis der Gehäusesimulation sollte eine gute Korrelation zu den Messungen der Lautsprecherbox in der Laborübung zu erkennen sein, was bei diesem Beispiel der Fall ist (vgl. Abbildung 166).

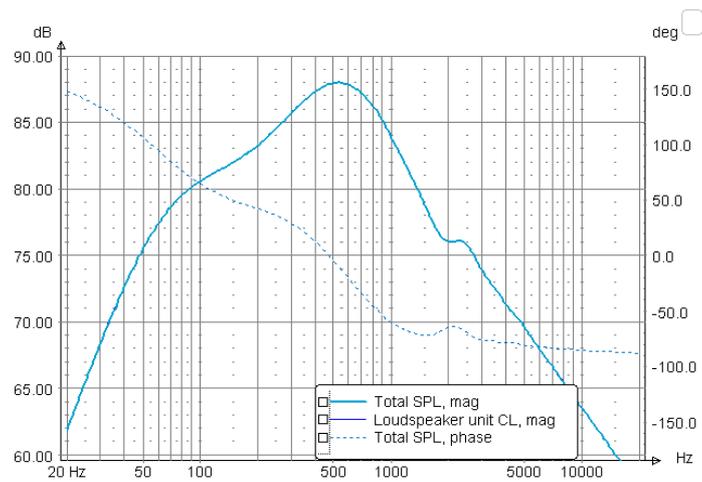


Abbildung 166: SPL-Verlauf inklusive Beugungssimulation

Die Überhöhung um 500 Hz lässt sich in der Realität auch messen. Lediglich die Simulation hin zu hohen Frequenzen sollte mit Vorsicht betrachtet werden, weil die reine Thiele und Small Simulation zu hohen Frequenzen zu keiner realitätsnahen Simulation führen kann (hier spielen Eigenresonanzen der Membran eine große Rolle).

27 Simulation mit Messdaten

Es erfolgt ein Beispiel zur Simulation des im Labor verwendeten Chassis „Visaton GF200“ (vgl. Kapitel III), das zur Messung der vorliegenden Messdaten zu SPL- und Impedanzverlauf in dem geschlossenen Laborgehäuse mittlerer Größe (vgl. Kapitel 14.2.2) eingebaut war.

Zu beachten ist, dass Messdaten als spezielle „Textdateien“ aus ARTA zu exportieren sind. Dabei ist es wichtig zum Frequenzgang auch zusätzlich die Phaseninformationen aus ARTA zu exportieren. Die Dateien werden folgend von ARTA im Format „*.frd“ ausgegeben. Diese Dateien lassen sich jedoch wie normale Textdateien behandeln und von LspCAD Pro direkt einlesen. Die Phaseninformationen sind vor allem für Simulation von Mehrwegesystemen extrem wichtig, da die Phasenbeziehungen sich in Auslöschungen und Überhöhungen im summierten Frequenzgang widerspiegeln. Die richtige Vorgehensweise beim Exportieren von Daten ist im Kapitel 24.4 genau beschrieben.

Alle Messdaten im folgend beschriebenen Beispiel wurden im geschlossenen Labortestgehäuse mittlerer Größe mit 22,9 Liter Volumen angefertigt. Das Gehäuse selbst besitzt folgende Außenabmessung (Höhe x Breite x Tiefe): $498\text{mm} \times 322\text{mm} \times 213\text{mm}$.



Abbildung 167: Freie Projektbezeichnungen

Zunächst wird in LspCAD Pro ein neues Projekt ausgewählt. Das Editierfenster sollte also keine Schaltpläne enthalten (auf keiner der zehn Unterseiten). Besteht der Wunsch, kann der Benutzer zur bessern Übersichtlichkeit dem neuen Projekt auch einen frei definierbaren Namen zuteilen (vgl. Abbildung 167).

Es folgt der Aufbau der Simulationsschaltung im Projektfenster „**Schema**“, welches sich im Editiermodus befinden muss.

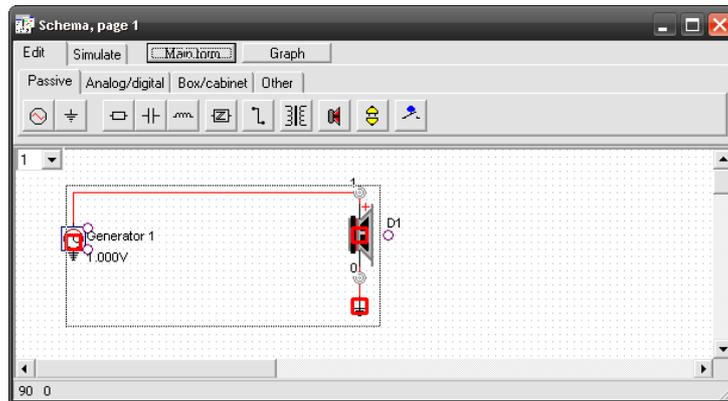


Abbildung 168: Allgemeiner Schaltungsaufbau zur Messdatensimulation

Es wird eine einfache Verschaltung eines Lautsprecherchassiselements (als roter Lautsprecher dargestellt) mit einem Generatorelement und Masseelement realisiert (Beispieldatei: „Messdatensimulation geschlossene Box Beispiel 1.lsp“, vgl. Abbildung 168).

Beim folgenden Wechsel in den Simulationsmodus, erfolgt gemäß Abbildung 169 die Darstellung eines linearen SPL- und Impedanzverlaufs (es sind keine Messdaten geladen).

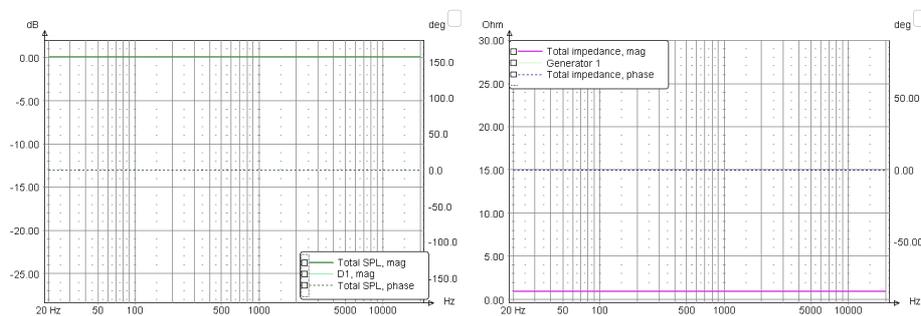


Abbildung 169: SPL- und Impedanzverlauf ohne geladene Messdaten

Es bedarf somit nachfolgend einer Anpassung der Simulationsschaltung, also dem Laden der vorliegenden Messdaten. Hierzu wechselt man zurück ins Projektfenster „Schema“, welches sich weiterhin im Simulationsmodus befinden muss.

27.1 Treibereinstellungen

Ein Mausklick auf das Lautsprecherchassiselement (als roter Lautsprecher dargestellt) öffnet das Fenster „**Driver edit**“ in dem sämtliche Konfigurationen² vorgenommen werden und die vorliegenden Messdaten geladen werden können (vgl. Abbildung 170).

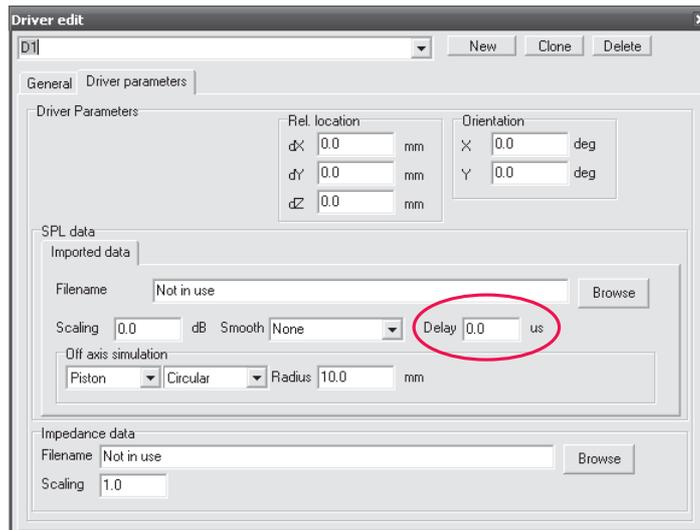


Abbildung 170: Fenster zur Eingabe der Lautsprechermessdaten

Durch anklicken von „**Browse**“ im Feld „**SPL data**“ lässt sich nun einfach der in ARTA gemessene und exportierte SPL Verlauf einbinden (vgl. Abbildung 171).

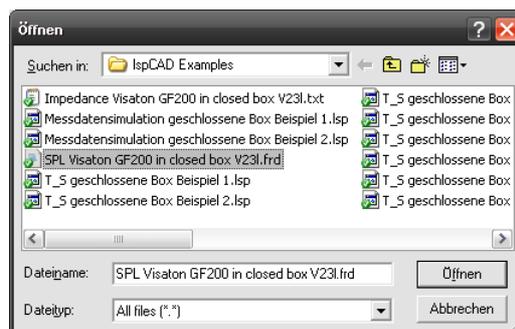


Abbildung 171: Einbinden des gemessenen SPL - Verlaufs

²Es sei erwähnt, dass das eingekreiste Konfigurationsfenster für ein definiertes Phasendelay in Abbildung 170 bei der Simulation von Mehrwegsystemen äußerst wichtig ist (vgl. Kapitel 22). Es lässt sich durch korrekte Wahl des Phasendelays das akustische Zentrum des Lautsprecherchassis genau definieren. Hierdurch wird eine korrekte Addition von Frequenz- und Phasengängen der Einzelchassis von Mehrwegsystemen ermöglicht. Da es sich bei der Beispielkonfiguration jedoch um kein Mehrwegsystem handelt, ist diese Funktion jetzt nicht von Bedeutung.

Weiters wird nun anhand derselben Prozedur im Feld „**Impedance data**“ der in LIMP gemessene und exportierte Impedanzverlauf eingebunden.

Das grafische Ausgabefenster „**Graphs**“ gibt für den SPL- und Impedanzverlauf folgende in Abbildung 172 ersichtliche Ergebnisse aus (Beispieldatei: „*Messdatensimulation geschlossene Box Beispiel 2.lsp*“).

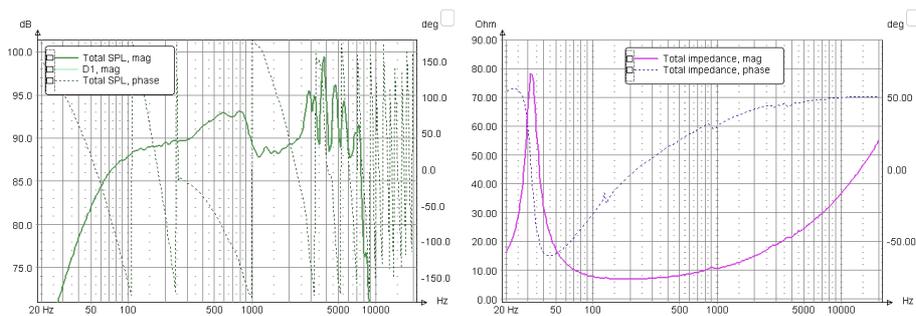


Abbildung 172: SPL- und Impedanzverlauf der eingebunden Messungen

28 Realisierung elektrischer Filter

Die für die Laborübung zur Simulation vorgesehenen Filter 1. Ordnung, lassen sich in LspCAD Pro direkt in der Simulationsschaltung realisieren. Dazu muss allerdings im Programmfenster „**Schema**“ zurück in den Editiermodus gewechselt werden.

Im Folgenden ist die Simulation elektrischer Filter bei Angabe von Thiele & Small Parametern ersichtlich (vgl. Kapitel 26). Es sei jedoch erwähnt, dass die äquivalente Beschaltung auch bei Simulation über Angabe gemessener Schalldruckfrequenzgänge und Impedanzfrequenzgänge möglich ist (vgl. Kapitel 27).

Wie in Abbildung 173 zu sehen ist, wurde das Schaltbild etwas auseinandergezogen, um einen entsprechenden Filter zwischen Generator und Lautsprecherbox realisieren zu können (Beispieldatei: „*T_S geschlossene Box Beispiel 6.lsp*“).

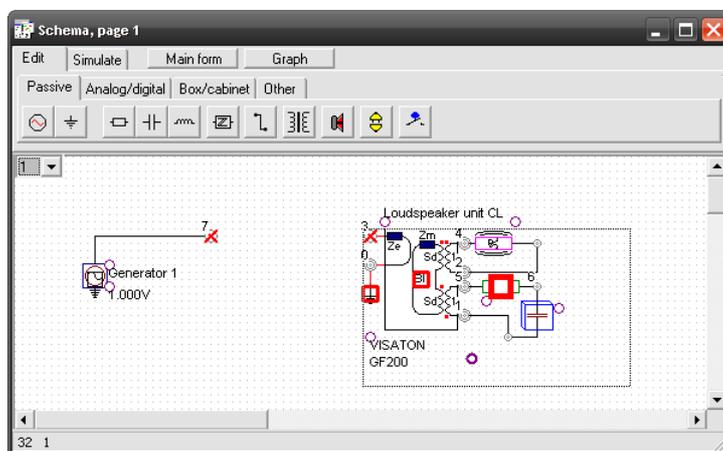


Abbildung 173: Wechsel in den Editiermodus zur Realisierung el. Filter

Standardmäßig lassen sich mittels der verfügbaren passiven Bauelemente jede Art passiver elektrischer Schaltungen realisieren.



Abbildung 174: Passivfilter Wizard in LspCAD Pro

Für die Filterrealisierung gibt es nun wieder einen praktischen „**Wizard**“, der in LspCAD Pro bereits implementiert ist. Dieser kann durch einen Mausklick mit der rechten Maustaste im Editierfenster und anschließender Auswahl der Reiter „**Insert**“ und „**Passive HP/LP filter**“ aufgerufen werden (vgl. Abbildung 175).

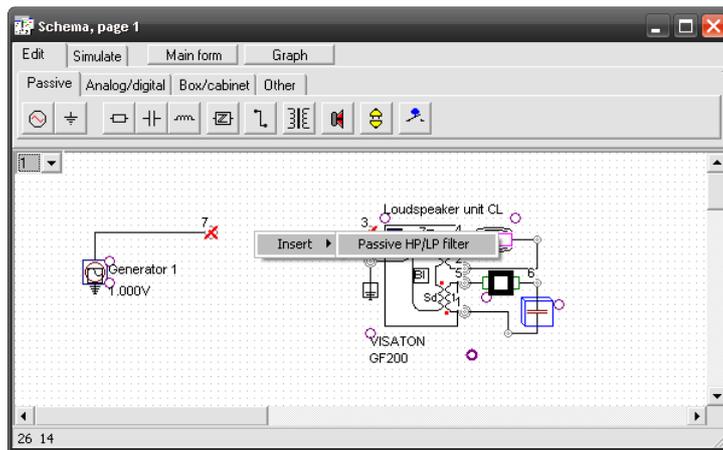


Abbildung 175: Aufrufen des „Passivfilter Wizards“

Wir entscheiden uns – wie Abbildung 174 zeigt – für ein Hochpassfilter 1. Ordnung, belassen die Grenzfrequenz bei 500Hz und bestätigen mit „**Create**“.

Der Filter wurde somit für eine konstante Lastimpedanz von $8\ \Omega$ realisiert (Beispieldatei: „*T_S geschlossene Box Beispiel 7.lsp*“, vgl. Abbildung 176). Entsprechende Simulationsergebnisse sind daher zu erwarten.

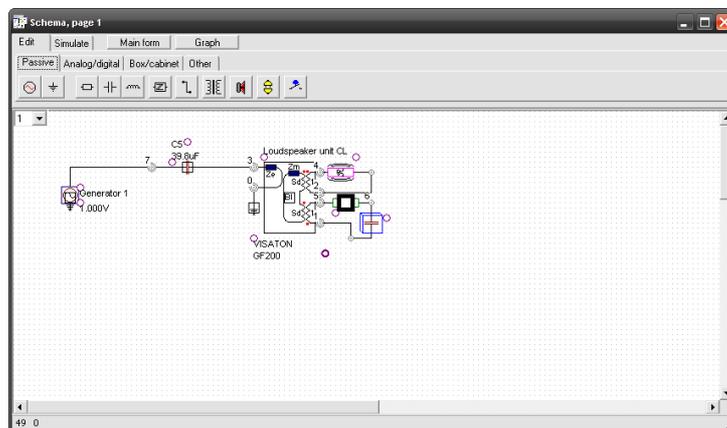


Abbildung 176: Schaltbild mit HP Filter 1. Ordnung in LspCAD Pro

Die grafische Simulation führt zu den in Abbildung 177 dargestellten Ergebnissen für SPL- und Impedanzverlauf.

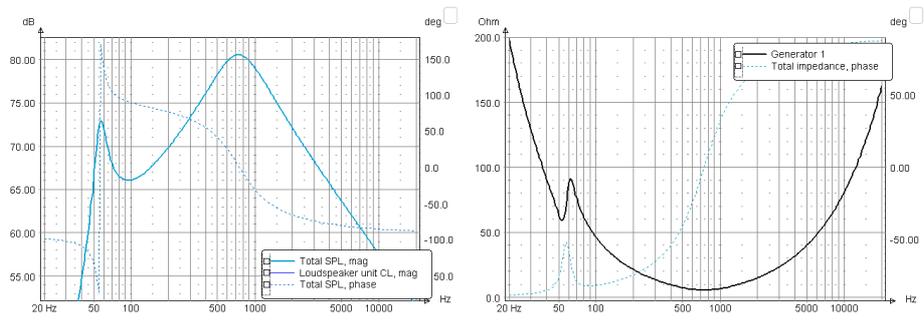


Abbildung 177: SPL- und Impedanzverlauf mit HP Filter 1. Ordnung

Abbildungsverzeichnis

1	Skizze eines dynamischen Wandlers	2
2	Elektrische Ersatzkomponenten der Schwingspule	3
3	Elektrische Ersatzkomponenten der Membrankonstruktion	3
4	Elektrische Ersatzkomponenten der Luftankopplung	4
5	Ersatzschaltbild unter Freiluftbedingungen	4
6	Typischer Impedanzverlauf eines Tieftonchassis	6
7	Bestimmung der Freiluftresonanzfrequenz	9
8	Bestimmung der Gütefaktoren	9
9	Impedanzverlauf mit Zusatzmasse	11
10	Impedanzverlauf mit Zusatzvolumen	12
11	Kalibrierungskurve des TL4006 (SN 2110503)	14
12	Kalibrierungskurve des TL4006 (SN 2110504)	15
13	Front und Rückansicht der ARTA Messbox	15
14	Schaltplan der ARTA Messbox	16
15	Messaufbau zur Loopback Messung	17
16	Roundtripzeit bei Zeikanalmessung	17
17	Roundtripzeit bei Einkanalmessung	17
18	Vergleich vor und nach 12 stündigem Einspielen	19
19	Vergleich vor und nach Einwobbelvorgang	19
20	Messaufbau für Impedanzmessungen mit LIMP	20
21	Messaufbau für die SPL Messung mit ARTA	21
22	Laborchassis „Visaton GF200“	25
23	Impedanz-Frequenzgang Messung GF200, Zusatzmasse 41, 52g	25
24	SPL-Frequenzgang GF200 ohne Schallführung	26
25	Laborchassis „Visaton AL170“	27
26	Impedanz-Frequenzgang Messung AL170, Zusatzmasse 18, 53g	27
27	SPL-Frequenzgang AL170 ohne Schallführung	28
28	Laborchassis „Visaton G25FFL“	29
29	SPL-Frequenzgang GF200 in DIN Schallwand	30
30	SPL-Frequenzgang AL170 in DIN Schallwand	30
31	Geschlossenes 9,7l Gehäuse	35
32	ISO Frontansicht geschlossenes 9,7l Gehäuse	37
33	ISO Rückansicht geschlossenes 9,7l Gehäuse	38
34	Frontansicht geschlossenes 9,7l Gehäuse	39
35	Seitenansicht geschlossenes 9,7l Gehäuse	40
36	Sicht auf das geschlossene 9,7l Gehäuse	41
37	Rückansicht geschlossenes 9,7l Gehäuse	42
38	Geschlossenen 22,9l Gehäuse	43
39	ISO Frontansicht geschlossenes 22,9l Gehäuse	44
40	ISO Rückansicht geschlossenes 22,9l Gehäuse	45
41	Frontansicht geschlossenes 22,9l Gehäuse	46
42	Seitenansicht geschlossenes 22,9l Gehäuse	47
43	Sicht auf das geschlossene 22,9l Gehäuse	48
44	Rückansicht geschlossenes 22,9l Gehäuse	49
45	Geschlossenen 53,8l Gehäuse	50
46	ISO Frontansicht variables 53,8l Gehäuse	52
47	ISO Rückansicht variables 53,8l Gehäuse	53
48	Frontansicht variables 53,8l Gehäuse	54

49	Seitenansicht variables 53, 8l Gehäuse	55
50	Sicht auf das variables 53, 8l Gehäuse	56
51	Rückansicht variables 53, 8l Gehäuse	57
52	BassCADe - Berechnung des Chassiseigenvolumens	58
53	Impedanz- und SPL - Frequenzgang; „hohe“ Abstimmung	62
54	Impedanz- und SPL - Frequenzgang; „tiefe“ Fehl Abstimmung	63
55	Impedanz- und SPL - Frequenzgang; „hohe“ Fehl Abstimmung	64
56	Konstruktionszeichnung Visaton BR 13.25	67
57	Profildeckel Bassreflexgehäuse; Front- und Rückansicht	69
58	Impedanzverlauf 9,7l Gehäuse - ohne Dämmung	70
59	Impedanzverlauf 22,9l Gehäuse - ohne Dämmung	71
60	Impedanzverlauf 53,8l Gehäuse - hohe Dämmung	72
61	SPL - Frequenzgang 9,7l Gehäuse - ohne Dämmung	73
62	SPL - Frequenzgang 22,9l Gehäuse - ohne Dämmung	73
63	SPL - Frequenzgang 53,8l Gehäuse - hohe Dämmung	74
64	Impedanzverlauf 22, 9l Gehäuse; ohne vs. mitteldichte Dämmung	75
65	SPL - Frequenzgang 22, 9l Gehäuse; ohne vs. mitteld. Dämmung	76
66	Impedanzverlauf 22, 9l Gehäuse; ohne vs. hohe Dämmung	77
67	SPL - Frequenzgang 22, 9l Gehäuse; ohne vs. hohe Dämmung	78
68	SPL - Frequenzgang 22, 9l Gehäuse; ohne/mitteld./hohe D.	78
69	Impedanzfrequenzgang $l_{Br} = 15\text{ cm}$ ohne Dämmung	80
70	Impedanzfrequenzgang $l_{Br} = 25\text{ cm}$ ohne Dämmung	80
71	Impedanzfrequenzgang $l_{Br} = 15\text{ cm}$ hohe Dämmung	81
72	Vergleich der Impedanzfrequenzgänge des Bassreflexgehäuses	82
73	SPL - Frequenzgang $l_{Br} = 15\text{ cm}$ ohne Dämmung	83
74	SPL - Frequenzgang $l_{Br} = 25\text{ cm}$ ohne Dämmung	84
75	SPL - Frequenzgang $l_{Br} = 15\text{ cm}$ u. $l_{Br} = 25\text{ cm}$ ohne Dämmung	84
76	SPL - Frequenzgang $l_{Br} = 15\text{ cm}$ mit hoher Dämmung	85
77	SPL - Frequenzgang $l_{Br} = 15\text{ cm}$ ohne vs. hohe Dämmung	86
78	Laden der AL170 Daten für Chassis 1	91
79	Laden der G25FFL Daten für Chassis 2	92
80	Eingeben der Gehäusedaten	92
81	Bestimmung der Abstimmfrequenz des Gehäuses	93
82	Eingabe des Innenvolumens für das AL170	94
83	Bestimmung der Tunnelabmessung	95
84	Einfacher Hoch- und Tiefpassfilter	96
85	SPL Verlauf für Weiche 1. Ordnung	96
86	Weiche 1. O mit Spannungsteiler in Hochtonweg	97
87	SPL Verlauf: Weiche 1. O mit Spannungsteiler an Hochtonweg	97
88	Weiche 1. O mit Impedanzkorrektur	98
89	SPL Verlauf: Weiche 1. O mit Impedanzkorrektur	98
90	Weiche 1. O mit Saugkreis	99
91	SPL Verlauf: Weiche 1. O mit Saugkreis	99
92	Weiche 2. O	100
93	SPL Verlauf: Weiche 2. O	100
94	Weiche 2. O mit Korrekturen	101
95	SPL Verlauf: Weiche 2. O mit Korrekturen	101
96	SPL Verlauf: Vergleich der Weiche mit 1. O und 2. O	102
97	Gehäuse des 19, 6l Mehrwegegehäuses	103
98	ISO Frontansicht des Mehrwegegehäuses	104

99	ISO Rückansicht des Mehrwegegehäuses	105
100	Frontansicht des Mehrwegegehäuses	106
101	Seitenansicht des Mehrwegegehäuses	107
102	Sicht auf das Mehrwegegehäuse	108
103	Rückansicht des Mehrwegegehäuses	109
104	Schaltplan der fertigen Frequenzweiche	110
105	Frequenzgang des Tieftonwegs der FW	111
106	Frequenzgang des Hochtonwegs der FW	111
107	SPL Frequenzgang A1170 in Gehäuse	112
108	SPL Frequenzgang G25FFL in Gehäuse	112
109	Filter 1. Ordnung verpolt vs. unverpolt	113
110	Filter 1. Ordnung Trennfrequenz 1 vs 2	113
111	Filter 2. Ordnung verpolt vs. unverpolt	114
112	Filter 1. Ordnung vs. 2. Ordnung (unverpolt)	114
113	Filter 1. Ordnung vs. 2. Ordnung (verpolt)	115
114	Filter 1. Ordnung mit vs. ohne Impedanzkorrektur	115
115	Filter 1. Ordnung ohne vs. mit Saugkreis	116
116	Filter 1. Ordnung mit vs. ohne Vorwiderstand $11,5\Omega$	116
117	Vergleich Mehrwegesystem hohe vs. niedrige Dämmung	117
118	Polardiagramm Mehrwegesystem mit Filter 1. Ordnung	118
119	Polardiagramm Mehrwegesystem mit Filter 2. Ordnung	118
120	Sonogramm Mehrwegesystem mit Filter 1. Ordnung	119
121	Sonogramm Mehrwegesystem mit Filter 2. Ordnung	119
122	Mehrwegesimulation Visaton G25FFL	120
123	Mehrwegesimulation Phasendelay	121
124	Mehrwegesimulation Visaton AL170	121
125	Impedanz- und SPL - Frequenzgang ohne Weiche	122
126	SPL - Frequenzgang (Summe) ohne Weiche	122
127	Impedanzfrequenzgang mit/ohne Impedanzkorrektur	123
128	Impedanz- und SPL - Frequenzgang mit/ohne Saugkreis	123
129	Impedanz- und SPL - Frequenzgang; Weiche 1. Ordnung	124
130	Impedanz- und SPL - Frequenzgang; Weiche 2. Ordnung	125
131	Dialogfeld „Measurement Setup“	126
132	Dialogfeld „Calibrate Input Channels“ nach der Kalibrierung	128
133	Analyse der Thiele-Small Parameter mit Zusatzmasse	129
134	Analyse der Thiele-Small Parameter mit Zusatzvolumen	130
135	Einsetzen einer Mikrofonkalibrierungsdatei in ARTA	132
136	Dialogfeld „Soundcard and Microphone Calibration“	133
137	Dialogfeld „Audio Devices Setup“	135
138	Dialogfeld „Impulse Response Measurement“ für Sweep Messung	136
139	Setzen der linken und rechten Gategrenzen im Zeitbereich	136
140	Beispiel eines fertiggestellten SPL Verlaufs	137
141	Anlegen einer Messreihe für Polardiagramme und Sonogramme	140
142	Beispiel eines fertigen Polardiagramms	141
143	Beispiel eines fertigen Sonogramms	141
144	Das Hauptfenster „Main“ in LspCAD Pro	144
145	Projektauswahl im Hauptfenster „Main“	144
146	Das Projektfenster „Schema“	145
147	Subpages im Projektfenster „Schema“	145
148	Das grafische Ausgabefenster „Graphs“	146

149	Freie Projektbezeichnungen in LspCAD Professional	147
150	Vorlage für geschlossenes Gehäuse in Projekt „Templates“	148
151	Einfügung einer Vorlage in LspCAD Pro	148
152	Obligatorische Schaltungselemente (Generator und Masse)	149
153	Starten des Simulationsmodus	149
154	Erste grafische Simulationsergebnisse	150
155	Eingabe der Thiele & Small Parameter	151
156	Der „Closed Box“ Reiter	153
157	Der Closed Box Wizard	153
158	SPL- und Impedanzverlauf – Simulation mit T/S Parametern	154
159	LspCAD Pro „Settings“	154
160	„Korrigierte Darstellung“ des Impedanzverlaufs	155
161	Koordinatensystem	155
162	Einfügen des „Gehäusemodellsymbols“	156
163	Modellierung der Schwallwand und Definition des Laborgehäuses	157
164	Aufrufen weiterer Treibereigenschaften	158
165	Aktivieren der Beugungssimulation	158
166	SPL-Verlauf inklusive Beugungssimulation	159
167	Freie Projektbezeichnungen	160
168	Allgemeiner Schaltungsaufbau zur Messdatensimulation	161
169	SPL- und Impedanzverlauf ohne geladene Messdaten	161
170	Fenster zur Eingabe der Lautsprechermessdaten	162
171	Einbinden des gemessenen SPL - Verlaufs	162
172	SPL- und Impedanzverlauf der eingebunden Messungen	163
173	Wechsel in den Editiermodus zur Realisierung el. Filter	164
174	Passivfilter Wizard in LspCAD Pro	164
175	Aufrufen des „Passivfilter Wizards“	165
176	Schaltbild mit HP Filter 1. Ordnung in LspCAD Pro	165
177	SPL- und Impedanzverlauf mit HP Filter 1. Ordnung	166

Literatur

- J. D'Appolito. *Lautsprecher Messtechnik*. Elektor-Verlag, Aachen, 2. Auflage 2005. ISBN 3-89576-090-0.
- V. Dickason. *Lautsprecherbau: Bewährte Rezepte für den perfekten Bau*. Elektor-Verlag, Aachen, 3. Auflage 2005. ISBN 3-89576-116-8.
- DIN. IEC 60268-5 Elektroakustische Geräte - Teil 5: Lautsprecher, 2006.
- G. Graber. *Elektroakustik Skriptum*. Institut für Breitbandkommunikation, Technische Universität Graz, WS 2006/07.
- I. Mateljan. *ARTA*. Faculty of electrical engineering, R. Boskovic bb., 21000 Split, Croatia, v. 1.4.0 edition, April 2008a.
- I. Mateljan. Die Arta Messbox. *Arta Application Note*, 2006.
- I. Mateljan. *LIMP*. Faculty of electrical engineering, R. Boskovic bb., 21000 Split, Croatia, v. 1.4.0 edition, April 2008b.
- C. J. Struck. Simulated free field measurements. *AES*, 42(6):467–482, June 1994.
- A. N. Thiele. Loudspeakers in vented boxes part i & ii. *IRE Australia*, Aug. 1961.