

---

BACHELORARBEIT

---

# ENTWURF VON VENTILIERTEN LAUTSPRECHERSYSTEMEN

---

Entwurf und Bau eines Lautsprechers im ventilerten Gehäuse

durchgeführt am  
Institut für Signalverarbeitung und Sprachkommunikation (SPSC)  
Technische Universität Graz, Österreich

von  
David Neussl, 01430419

Betreuer:  
Ao.Univ.-Prof. Dipl.-Ing. Dr.techn. Gerhard Graber

Begutachter:

Graz, 6. Oktober 2019









# Inhaltsverzeichnis

<b>1</b>	<b>Einleitung</b>	<b>9</b>
1.1	Geschlossenes Gehäuse . . . . .	9
1.2	Ventiliertes Gehäuse - Bassreflexlautsprecher . . . . .	9
1.3	Hornlautsprecher . . . . .	10
1.4	Gliederung . . . . .	10
<b>2</b>	<b>Theorie</b>	<b>11</b>
2.1	Thiele-Small Parameter . . . . .	11
2.2	Bassreflexsysteme . . . . .	12
<b>3</b>	<b>Bestimmen der Chassis-Parameter des B&amp;C 8CX21 Chassis</b>	<b>13</b>
3.1	Das Chassis 8CX21 . . . . .	13
3.2	Bestimmen der Thiele-Small Parameter . . . . .	13
3.2.1	Messaufbau . . . . .	15
3.2.2	Kalibrieren des Lasers . . . . .	15
3.2.3	Messvorgang . . . . .	16
3.3	Chassisparameter . . . . .	16
<b>4</b>	<b>Simulation B&amp;C 8CX21</b>	<b>19</b>
4.1	Voreinstellungen für die Simulation in LspCAD 6 . . . . .	19
4.1.1	Einstellen der Herstellerangaben . . . . .	19
4.1.2	Einstellen der gemessenen Thiele-Small Parameter . . . . .	21
4.2	Simulationsergebnisse . . . . .	22
<b>5</b>	<b>Alternativchassis &amp; Simulation</b>	<b>25</b>
5.1	Auswahl des neuen Chassis . . . . .	25
5.2	Simulation des Dayton Audio Systems . . . . .	27
<b>6</b>	<b>Entwurf &amp; Konstruktion der Lautsprecherboxen</b>	<b>29</b>
6.1	Entwurf mit Konstruktionscharts bei gegebenem Chassis . . . . .	29
6.1.1	Bestimmen des Gehäuses . . . . .	30
6.1.2	Bestimmen des Bassreflexrohrs . . . . .	30
6.1.3	Zusammenfassung des Entwurfs . . . . .	33
6.2	Entwurf mit Simulationsergebnissen . . . . .	33
6.2.1	Auswahl der Bassreflexrohre . . . . .	33
6.3	Festlegen der Maße . . . . .	34
<b>7</b>	<b>Frequenzweiche</b>	<b>41</b>
7.1	Funktion der Frequenzweiche . . . . .	41
7.2	Tieftonkanal . . . . .	42
7.3	Hochtönerausgang . . . . .	43
<b>8</b>	<b>Vermessen der Lautsprechersysteme</b>	<b>45</b>
8.1	Kalibrierung des Messaufbaus . . . . .	46
8.2	Messen des Schalldruckpegelverlaufs . . . . .	48
8.2.1	Messsignal . . . . .	49
8.2.2	Fernfeldmessung . . . . .	50
8.2.3	Nahfeldmessung am Chassis . . . . .	51
8.2.4	Nahfeldmessung am Bassrohr . . . . .	52

8.3	Auswertung der Messdaten . . . . .	52
8.3.1	Messung am Tieftonchassis . . . . .	52
8.3.2	Messung am Hochtonchassis . . . . .	54
8.4	Ergebnisse der Messungen . . . . .	56
<b>9</b>	<b>Zusammenfassung</b>	<b>57</b>
9.1	Vergleich der Chassis . . . . .	57
9.2	Vergleich der Gehäusearten . . . . .	57
9.3	Vergleich von Simulation und Schalldruckpegelmessung . . . . .	58
9.4	Vergleich der Lautsprecher . . . . .	59
<b>10</b>	<b>Appendix</b>	<b>63</b>

## Kurzfassung

Die klanglichen Eigenschaften eines Lautsprechers werden von allen Elementen in der Signalkette beeinflusst. Beginnend bei einer eventuell notwendigen Digital-Analog Wandlung und Entzerrung, durchläuft ein Signal einige Stationen, bis schließlich am Lautsprecherchassis das Signal aus der elektrischen in die akustische Domäne gewandelt wird. Aufgrund der physikalischen Eigenschaften des Chassis, wird letztlich auch hier das entstehende Klangbild noch maßgeblich beeinflusst. Durch eine geeignete Einfassung des Chassis in ein Lautsprechergehäuse kann richtungsweisend auf den schlussendlichen Klang eingewirkt werden. So lassen sich durch ein Gehäuse nicht nur unerwünschte Effekte wie der sogenannte *akustische Kurzschluss* vermeiden, bei dem aufgrund der Beugung des gegenphasigen Signals der Rückseite der Membran destruktive Interferenzen zu einer teilweisen Auslöschung tieffrequenter Signalanteile führen können. Es wird beispielsweise auch die Basswiedergabe des Lautsprechers deutlich verbessert.

Um einen Vergleich verschiedener Bauformen zu ermöglichen, wird ein Lautsprecher aus einer früheren Projektarbeit ((1)) herangezogen. In (1) wurde für ein bestimmtes Chassis ein *Horn-lautsprecher* gebaut und anschließend vermessen. In dieser Arbeit wird daher dasselbe Chassis betrachtet, jedoch in ein *ventiliertes Gehäuse*, auch Bassreflexgehäuse genannt, verbaut und anschließend vermessen. Abschließend werden unter Berücksichtigung der Ergebnisse aus (1) die Vor- und Nachteile der beiden Bauformen sowie des Chassis besprochen.

## Abstract

The sonic properties of a loudspeaker are influenced by every element in the signal chain. Beginning with an eventually necessary digital to analog conversion and equalisation, the signal will pass through several stations, before the signal will eventually be transformed from the electric to the acoustic domain. Due to the physical characteristics of the chassis, a relevant adaptation of the emerging sound will occur. Through an educated choice of a housing for the chassis, it is possible to directly influence the final sound of the loudspeaker. This way, not only can undesirable effects be avoided, such as the acoustic shortcircuit, which describes the partial obliteration in the low frequencies of a signal caused by destructive interference due to diffraction of the counter phase signal of the rear membrane. In this way, the bass reproduction of the loudspeaker can also be enhanced.

To achieve a comparison between different construction methods, a loudspeaker from an earlier project work (1) will be referenced. In (1) a *horn-type* loudspeaker was constructed for a certain chassis and subsequently measured afterwards. For this work the same chassis will be used but enclosed by a *ventilated case*, also referred to as bass reflex case, and measured accordingly. In the conclusion, based on the measurements from (1) and this work, the advantages and disadvantages of each of the two types as well as the chassis will be discussed.



## 1

# Einleitung

Als alleinstehendes Bauteil findet ein Operationsverstärker kaum Anwendung, erst durch die äußere Beschaltung wird dieser ordentlich verwendbar. Ähnlich verhält es sich bei Lautsprecherchassis, da diese ohne ein passendes Gehäuse nur selten ein erstrebenswertes Klangergebnis erzeugen können werden. Neben Hilfsmitteln aus der Signalverarbeitung, wie beispielsweise analogen oder digitalen Filtern, kann das Chassis auch in einer Halterung oder einem *Gehäuse* verbaut werden. Im wesentlichen gibt es dazu 4 Basismöglichkeiten, das Gehäuse zu entwerfen: die *unendlichen Schallwand*, das *geschlossenen Gehäuse*, den *Hornlautsprecher* und schließlich das *ventilierte Gehäuse*, auch Bassreflexlautsprecher genannt.

Die sogenannte unendliche Schallwand ist ein Sonderfall, da diese Bauform hauptsächlich bei fixen Installation als Decken- oder Wandinstallationen Anwendung findet. Weil es sich hierbei streng genommen nicht um eine (realisierbare) Gehäuseform handelt, wird diese auch nicht weiter betrachtet.

## 1.1 Geschlossenes Gehäuse

Die einfachste Form, ein Chassis zu verbauen, ist daher in Form eines geschlossenen Gehäuses. Mit Ausnahme einer kleinen *Ausgleichsöffnung*, die einen Druckausgleich zwischen dem Druck im Inneren des Gehäuses und dem Umgebungsdruck ermöglicht, ist dieses Gehäuse komplett geschlossen. Durch das Gehäuse lässt sich der *akustische Kurzschluss* verhindern, da die gegenphasigen Anteile auf der Rückseite des Chassis im inneren der Box bleiben. Somit kann es zu keiner destruktiven Interferenz im Bereich der Bassfrequenzen kommen und die Basswiedergabe wird im Gegensatz zu einem nicht eingebauten Chassis verbessert.

Obwohl diese Art des Chassiseinbaus sehr einfach zu realisieren ist und bereits hier die Bässe angehoben werden können, ist mit etwas komplexeren Bauformen eine noch größere Verbesserung möglich.

## 1.2 Ventiliertes Gehäuse - Bassreflexlautsprecher

Erweitert man das Gehäuse um eine Öffnung mit bestimmter Länge und bestimmtem Durchmesser, kann im Gegensatz zum geschlossenen Gehäuse auch der eigentlich gegenphasige Anteil des Signals verwendet werden, der von der Rückseite der Membran erzeugt wird. Durch das Hinzufügen eines Rohrs entsteht in Kombination mit dem Gehäusevolumen ein Resonator mit einer bestimmten Resonanzfrequenz  $f_B$ . Oberhalb dieser Frequenz wird durch eine Phasendrehung von etwa  $180^\circ$  das Bassrohr quasi gleichphasig mit dem Chassis betrieben, was die Basswiedergabe verbessert. Frequenzen unterhalb dieser Resonanzfrequenz werden gegenphasig zum vorderseitigen Signal wiedergegeben und löschen sich folglich mit dem Signal der Vorderseite der Membran aus. Diese Auslöschung resultiert in einer sehr starken Sperrdämpfung von etwa  $24 \frac{dB}{Okt}$  für Frequenzen  $f < f_B$ .

Bei dieser Bauform ergeben sich im Vergleich zum geschlossenen Gehäuse indes gewisse Schwierigkeiten. So ist nicht jedes Chassis zwangsläufig für den Einbau in eine ventilierte Lautspre-

chertbox geeignet und selbst dann sind für ein geeignetes Chassis die Variationsmöglichkeiten im Entwurf des Gehäuses sehr stark eingeschränkt. Maßgebender Parameter hierbei ist die *mechanische Güte*, die die Steifigkeit der Membrankonstruktion beschreibt und Teil der *Thiele-Small* Parameter (Abschnitt 2.1) ist. Das ventilierte Gehäuse wird also bereits sehr stark durch die Thiele-Small Parameter des jeweiligen Chassis vorgegeben, falls sich dieses überhaupt für diese spezielle Gehäuseart eignet.

### 1.3 Hornlautsprecher

Die im Bau aufwendigste Gehäuseart der hier besprochenen stellt der *Hornlautsprecher* dar. Bei Lautsprechern dieser Art ist es das Ziel, die Impedanz der Membran an die Impedanz der Umgebung anzupassen. Analog zur Anpassung der elektrischen Impedanzen in elektrischen Schaltkreisen, soll im Akustischen die *Schallimpedanz* der Membran an die *Impedanz von Luft* (umgebendes Medium) angepasst werden. Diese Anpassung wird mithilfe eines *Trichters* oder *Horns* durchgeführt, wobei die prominentesten Arten der *Konustrichter* und der etwas aufwendigere *Exponentialtrichter* sind. Durch den nach und nach anwachsenden Radius des Horns wird somit die Strahlungsimpedanz der Membran an die der Luft angepasst. Diese Bauform bringt allerdings, ebenso wie das ventilierte Gehäuse zuvor, eigene Probleme mit sich.

So ist der Zusammenbau des Horns deutlich aufwendiger und komplexer als beim geschlossenen und ventilierten Gehäuse. Zudem ist es für einen *glatten* Frequenzgang notwendig, das Horn möglichst reflexionsfrei zu entwerfen, wodurch das Horn an Länge und dadurch auch Volumen zunimmt. Letztlich ist diese Anpassung des Abschlusses des Rohrs nicht trivial und eine Fehl-anpassung kann dazu führen, dass die akustische Leistung zu einem großen Teil in das Horn reflektiert anstatt abgestrahlt wird.

### 1.4 Gliederung

Das Ziel in dieser Arbeit ist es nun, die Vor- und Nachteile von Horn- und Bassreflexlautsprechern gegenüberzustellen und die beiden Lautsprechertypen miteinander zu vergleichen. Zu diesem Zweck wird eine 2012 am Institut für Signalverarbeitung und Sprachkommunikation (SPSC) der Technischen Universität Graz durchgeführte Projektarbeit ((1)) als Referenz herangezogen. In dieser Arbeit wurde ein Hornlautsprecher mit dem Chassis B&C 8CX21 gebaut und vermessen. Aufbauend darauf werden hier zwei Hauptpunkte diskutiert:

1. Ist es möglich, mit dem Chassis B&C 8CX21 ((2)) einen vergleichbaren Bassreflexlautsprecher wie in ((1)) zu bauen?
2. Lässt sich (unter Vorgabe gewisser Kriterien) durch die gezielte Wahl eines Chassis der vorige Lautsprecher optimieren?

Um diese Fragen schlüssig beantworten zu können ist daher zunächst eine genauere Inspektion des vorhandenen Chassis notwendig. Hier soll auch ein kurzer Blick auf die Ermittlung der Thiele-Small Parameter (Kapitel 3) und deren Bedeutung geworfen werden. In Kapitel 4 wird anhand der in Kapitel 3 ermittelten Daten eine Simulation durchgeführt, um eine erste Einschätzung des schlussendlichen Ergebnisses zu erhalten. Da sich bereits an dieser Stelle zeigen wird, dass sich das erhoffte Ergebnis mit großer Wahrscheinlichkeit so nicht einstellen lässt, wird diese Arbeit um Kapitel 5 ergänzt. Hier wird die Erweiterung der Forschungsfrage eingeführt, ob die zu Beginn abgesteckten Ziele unter *vergleichbaren Bedingungen* erreichbar sind. In Kapitel 6 und Kapitel 7 wird näher auf die Konstruktion der zuvor simulierten Gehäuse eingegangen und abschließend werden die Ergebnisse der Vermessung anhand der fertigen Lautsprechersysteme präsentiert und diskutiert.



## 2

## Theorie

Bevor nun näher auf das verwendete Chassis eingegangen wird und die durchgeführten Messungen und Entscheidungen erklärt werden, soll hier der theoretische Hintergrund dieser Arbeit näher betrachtet werden. Zu diesem Zweck wird nebst der Theorie zu Bassreflexsystemen auch auf die im Lautsprecherbau weit verbreiteten *Thiele-Small* Parameter eingegangen.

## 2.1 Thiele-Small Parameter

Unter den sogenannten Thiele-Small Parametern versteht man einen Satz an Parametern, die das tieffrequente Verhalten eines Lautsprecherchassis für den Lautsprecherbau ausreichend beschreiben. Die Thiele-Small Parameter gehen zurück auf diverse Veröffentlichungen von Neville Thiele und Richard Small, woher auch der Name stammt. Dabei liefern diese Parameter eine Beschreibung über die physikalischen Eigenschaften des Chassis zu denen unter anderem die Resonanzfrequenz des Chassis  $f_s$ , die Membranfläche  $S_d$  oder das äquivalente Luftvolumen  $V_{as}$  (und weitere, Tabelle 10.1) zählt. Wie in weiterer Folge zu sehen ist, ermöglichen diese Parameter die Simulation eines Chassis auch in Kombination mit verschiedenen Gehäusearten und nehmen beim Entwurf der Lautsprecher eine tragende Rolle ein.

Ein weiterer großer Vorteil dieser Art der Chassisbeschreibung ist, dass es mit relativ geringem Aufwand und ohne teurem Equipment möglich ist, diese Parameter selbst zu ermitteln (Kapitel 3). Dies ist unter anderem auch ein Grund weshalb diese Parameter heute sehr stark verbreitet sind und viele Hersteller häufig für ihrer Produkte einige oder zumindest die wichtigsten dieser Werte in Produktblättern angeben. Beispielhaft können die für diese Arbeit verwendeten Produktblätter von B&C ((2)) und Dayton Audio ((3) und (4)) genannt werden. Die für diese Arbeit wichtigsten Thiele-Small Parameter sind:

- $f_s$ : Die *Resonanzfrequenz des Chassis* ergibt sich aus elektrischen wie mechanischen Eigenschaften des Chassis. Bei dieser Frequenz sind die Auslenkung sowie die Schnelle der Membran maximal
- $Q_{ts}$ : Die *Gesamtgüte* gibt Auskunft über die Dämpfung, die sich aus elektrischen und mechanischen Komponenten des Chassis ergibt.
- $Q_{ms}$ : Die *mechanische Güte* gibt Auskunft über die Dämpfung, die sich durch die Steifigkeit der Membranaufhängung ergibt.
- $M_{ms}$ : In der *gesamten bewegten Masse* wird das Gewicht aller bewegten Bauteile des Chassis so wie die Belastung durch die Luft zusammengefasst
- $V_{as}$ : Das *äquivalente Volumen* gibt die Größe eines Luftvolumens an, das die selbe Nachgiebigkeit wie die Membranaufhängung aufweist.

Eine ausführlichere Auflistung von diesen und weiteren Thiele-Small Parametern mit kurzer Erklärung ist im Anhang in Tabelle 10.1 zu finden.

## 2.2 Bassreflexsysteme

Um für ein besseres Verständnis der hier angewandten Bauweise zu sorgen, wird an dieser Stelle der theoretische Hintergrund eines Bassreflexlautsprechers beleuchtet. Zu diesem Zweck ist in Abbildung 2.1 das elektrische Ersatzschaltbild eines dynamischen Lautsprechers im ventilerten Gehäuse dargestellt, wobei bereits *Zusammenfassungen* von Bauteilen vorgenommen wurden. So beschreibt die Parallelschaltung aus  $\mathfrak{R}_{13A}$ ,  $L_1$  und  $C_{13}$  die Membran (Index 1), die äußere Strahlungsimpedanz (Index  $3A$ ) sowie die Massenhemmung im inneren des Lautsprechers (Index  $3I$ ). Der Einfluss des Gehäusevolumens wird durch  $R_{3I}$  und  $L_2$  berücksichtigt. Am rechten Ende der Schaltung fließt in Form von  $C_{45}$  und  $\mathfrak{R}_{45}$  das Bassreflexrohr (Index 4) und die Öffnung des Rohrs (Index 5) mit ein ((5)).

Da dieses Schaltbild *pI-Analog* umgesetzt wurde, entsprechen elektrische Widerstände im mechanischen Reibwiderständen, elektrische Induktivitäten den zugehörigen mechanischen Steifigkeiten und elektrische Kapazitäten der jeweiligen mechanischen Massenhemmung.

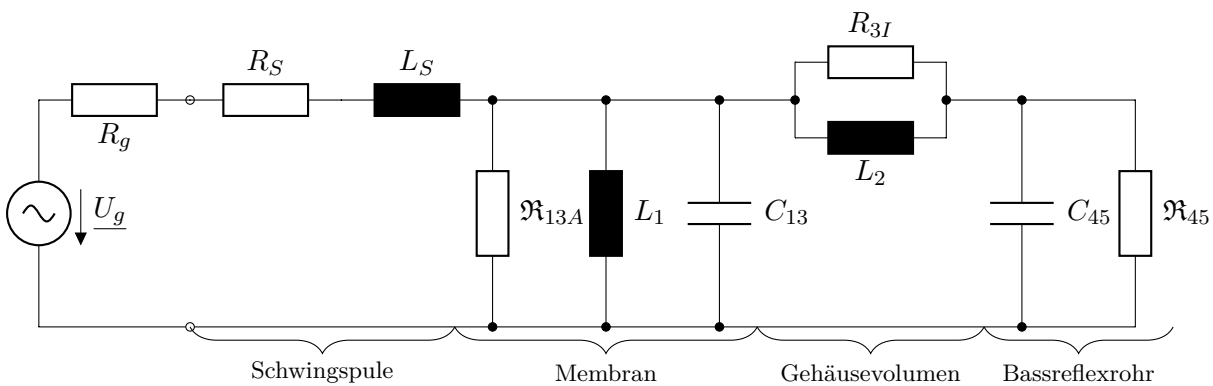


Abbildung 2.1: Elektrisches Ersatzschaltbild eines dynamischen Lautsprechers im Bassreflexgehäuse (zusammengefasste Form) (5)

Durch Einbringen eines Bassreflexkanals entsteht in Kombination mit dem Gehäusevolumen des Lautsprechers ein Resonator. Wird der Resonator an das System *angepasst* (Veränderung von Gehäusevolumen, Kanalvolumen und Kanallänge), kann der Resonator auf das System *abgestimmt* werden. So kann die Resonanzfrequenz dazu verwendet werden, den Frequenzgang des Gesamtsystems zu tiefen Frequenzen hin anzupassen und zu erweitern. Die Funktionsweise dieser Gehäuseart teilt sich dabei in 3 Bereiche:

$f \gg f_B$ : Oberhalb der Resonanzfrequenz ist das Chassis gleich belastet wie für andere Gehäuse, kein Einfluss durch das Gehäuse.

$f \approx f_B$ : Im Bereich um die Resonanzfrequenz des Gehäuses steigt die Belastung an der Rückseite des Chassis stark an. Dadurch wird die vorderseitige Schallabstrahlung durch das Chassis verringert, die Schallabstrahlung erfolgt zum größten Teil durch das Bassreflexrohr.

$f \ll f_B$ : Unterhalb der Resonanzfrequenz beginnen die vorder- und rückseitigen Signalanteile einander gegenseitig aufzuheben. So ist die Sperrdämpfung hier mit  $24 \frac{dB}{Okt}$  sogar stärker als für geschlossenes Gehäuse.

# 3

## Bestimmen der Chassis-Parameter des B&C 8CX21 Chassis

### 3.1 Das Chassis 8CX21

Bei dem in (1) verwendetem Chassis handelt es sich um ein *acht Zoll Koaxial Chassis*. Das bedeutet die Membran des Hochtöners ist im Zentrum der Tieftonmembran verbaut, geschützt durch eine dünne, durchlässige Staubschutzkappe (Abbildung 3.1).



Abbildung 3.1: Chassis B&C 8CX21

Der Hersteller des Chassis stellt einen Großteil der Thiele-Small Parameter, welche zum Entwurf des Lautsprechers notwendig sind, bereits auf der Produktseite (2) zur Verfügung. Zusätzlich wurde zu diesen Parametern ein eigener Satz von Thiele-Small Parametern durch Messungen erstellt. Diese Messungen wurden anhand der Unterlagen des Elektroakustik Labor Skripts und (6) durchgeführt.

### 3.2 Bestimmen der Thiele-Small Parameter

Wie bereits erwähnt, können die Thiele-Small Parameter sehr einfach und mit geringem Aufwand bestimmt werden. Dazu werden zwei elektrische Impedanzmessungen am Chassis durchgeführt, wobei für die zweite Messung eine von zwei Manipulationen am Chassis durchgeführt wird:

**Massendifferenzmethode:** Es wird eine geringe Zusatzmasse auf das Chassis aufgetragen. Die Schwierigkeit hier besteht darin, dass die Masse sehr gut fixiert werden muss, um auch während der Messung auf dem Chassis zu haften. Weiters muss diese sehr geringe Masse äußerst genau bestimmt werden, um mit dieser Methode korrekte Ergebnisse zu erhalten.

**Federdifferenzmethode:** Das Chassis wird an ein geschlossenes Gehäuse gekoppelt. Dabei ist es wichtig dass das Chassis möglichst luftdicht ist und das Innenvolumen sehr genau bekannt ist. Durch die Notwendigkeit eines zusätzlichen Gehäuses ist auch diese Methode etwas aufwendiger.

In Abbildung 3.2 ist eine quantitative Impedanzmessung zu sehen, bei der bereits die Resonanzfrequenz von  $f_s = 79,5\text{Hz}$ , Resonanzimpedanz  $R_e = 108\Omega$  und die 3dB Bandbreite  $B_{3dB} = 32\text{Hz}$  sowie der Gleichstromwiderstand  $R_e = 8\Omega$  eingetragen sind. Mit diesen Werten können bereits erste Parameter, wie die Schwingspuleninduktivität  $L_S$  oder die Gütemaße ( $Q_{ms}$ ,  $Q_{es}$ ,  $Q_{ts}$ ) bestimmt werden. Mithilfe einer zweiten Messung mit veränderter Steifigkeit (Massen- oder Federdifferenzmethode) können schließlich auch die restlichen notwendigen Parameter bestimmt werden ( $m_{ms}$ ,  $C_{ms}$ ,  $V_{as}$ ,  $B \times l$ ,  $\eta_0$ ).

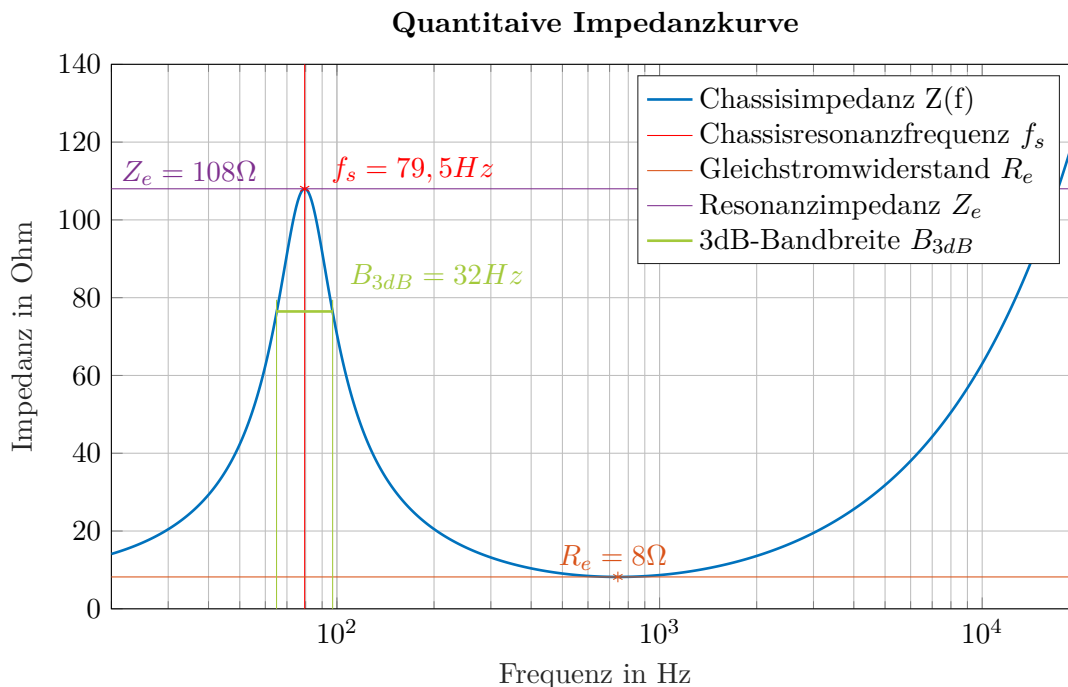


Abbildung 3.2: Quantitative Impedanzkurve

Im industriellen Bereich sind jedoch höher entwickelte Messmethoden weiter verbreitet, wie die Messung mit dem *Klippel R&D* ((7)) System. Hierbei handelt es sich um ein Messsystem, das alle notwendigen Daten zur Bestimmung der Thiele-Small Parameter erfasst und die Parameter direkt berechnet. Dazu wird die zweite Impedanzmessung mit veränderter Masse/Federsteifigkeit durch eine Messung der Chassisauslenkung mithilfe eines Lasers ausgetauscht. Da beide Messungen simultan erfolgen, ist eine Vermessung des Chassis sehr schnell durchgeführt und kann auch mehrmals durchgeführt und gemittelt werden, um die Genauigkeit zu erhöhen. Darüber hinaus ist diese Messmethode weniger aufwändig da kein extra Gehäuse benötigt wird, keine Zusatzmasse gemessen und angebracht werden muss und auch die Parameter sofort berechnet werden. Der Messprozess ist in (6) detailliert angeführt und wurde auch anhand dieser Arbeit durchgeführt.

### 3.2.1 Messaufbau

Bevor die eigentliche Messung durchgeführt werden kann, muss zuvor der Messaufbau hergestellt und das System kalibriert werden. Neben dem zu vermessenden Chassis sind dazu zusätzlich folgende Hard- und Software notwendig:

Hardware:

- Klippel Messgestell
- Klippel Distortion Analyzer 2 (Abbildung 8.1)
- Audioverstärker: Alesis RA-300
- Messmikrofon (inkl. Stativ): DPA TL4006
- Klippel Laserkontroller
- Messlaser: Keyence LK-H052
- Verbindungskabel

Software:

- Klippel *dB-Lab*
- Klippel *Linear Parameter Measurement* Modul

Zu Beginn wird das zu vermessende Chassis im Messgestell fixiert, wobei das Chassis fest eingespannt werden sollte, ohne dabei eine (dauerhafte) Beschädigung am Metallrahmen oder Magneten des Chassis zu verursachen. Anschließend werden die benötigten Ein- und Ausgänge am Distortion Analyzer nach Tabelle 3.1 belegt und der Laser wird mit dem Laserkontroller verbunden.

Distortion Analyzer	Richtung	Peripheriegerät
Laser Input	«	Laserkontroller
IN 1	«	Messmikrofon
OUT1	»	Audioverstärker
SPEAKER2	»	Lautsprecherchassis
AMP1&2	«	Verstärker
USB	»	PC mit <i>db-Lab</i>

Tabelle 3.1: Belegung der Ein-/Ausgänge des Distortion Analyzer

### 3.2.2 Kalibrieren des Lasers

Da die Membranauslenkung nur sehr gering ist, muss diese Messung mit dem Laser äußerst genau erfolgen. Dazu ist es notwendig, den Messlaser so zu positionieren, dass dieser optimal arbeitet. Ist der Laser an den Laserkontroller angeschlossen beginnt am Laser eine orange LED zu blinken. Nun muss zuerst der Laser so vor dem Chassis verschoben werden, bis die LED konstant orange leuchtet. Anschließend wird mit einer *Mikrometerschraube* die Position weiter verändert, bis die Farbe der LED von orange auf grün wechselt.

Sobald die exakte Position und damit auch der optimale Arbeitspunkt des Lasers eingestellt ist, muss der Laser kalibriert werden. Zu diesem Zweck wird eine *Abstandsmessung* relativ zum eingestellten Abstand durchgeführt. Nachdem die aktuelle Distanz zwischen Chassis und Laser eingestellt ist, wird nun der Abstand zwischen Membran und Messkopf um 1 mm verringert, was zwei kompletten Umdrehungen der Mikrometerschraube entspricht und für das Messsystem als Referenzabstand gilt.

### 3.2.3 Messvorgang

Bevor nun der Messvorgang gestartet wird, müssen in der Software *dB-Lab* noch ein Projekt und Lautsprecherobjekt erstellt und mehrere Einstellungen sowie Informationen eingegeben werden.

Für das *Objekt* wird die *Operation-Vorlage LPM Subwoofer T/S (Sp2)* verwendet, wodurch die Einstellungen für die Messung der linearen Parameter (**L**inear **P**arameter **M**eurment) geladen werden.

Des Weiteren müssen Informationen zum Chassis über *Properties* unter der Registerkarte *Driver* für die Messung eingetragen werden (Membranfläche  $S_d$ , Impedanz  $Z_e$ , max. Leistung  $P_{e,max}$ ).

Unter *Stimulus* wird das *Messsignal* spezifiziert. Da hier nur das Tieftonchassis gemessen wurde, wurde die maximale Frequenz mit 4kHz begrenzt. Zusätzlich wird auch die relative Auflösung und Signalspannung am Chassis definiert.

In *Input* wird einerseits der verwendete *Ausgangskanal* für das Messsignal angegeben (hier *Speaker 2*). Zum anderen werden aber auch die *verwendeten Sensoren* angegeben. Um zusätzlich den Schalldruckpegelverlauf zu messen, kann ein Messmikrofon (Abschnitt 3.2.1, Hardware) verwendet werden.

Über die Registerkarte *Method* kann die verwendete Messmethode ausgewählt werden. Hier stehen neben der Messung mit Lasersensor auch die zuvor angesprochenen Methoden der Massen- (*Using additional mass*) und Federdifferenzmethode (*Using sealed enclosure*) zur Verfügung. Zudem ist es bei der Lasermessung ebenso möglich, das Chassis in einem geschlossenen Gehäuse zu vermessen, wobei dazu das Innenvolumen bekannt sein muss. Für die Messung im Messstativ muss hier *In free air* ausgewählt werden.

Der *Datenexport* wird in *Im/Export* festgelegt. Eine interessante Einstellung ist hier das Induktanzmodell mit dem Kriechfaktor (*Creep model*), der das zeitliche Verhalten der Membransteiifigkeit beschreibt ((6), 3.1.2.3). Anschließend kann der Messvorgang gestartet werden.

## 3.3 Chassisparameter

Nachdem die Messung wie zuvor beschrieben durchgeführt wurde, zeigt sich, dass die Herstellerangabe bezüglich der Thiele-Small Parameter (2) teilweise stark unterschiedlich zu den selbst gemessenen Werten sind (siehe Tabelle 3.2). Diese Unterschiede in den Parametern werden in weiterer Folge auch starke Auswirkung auf den Entwurfsprozess des Lautsprechers haben, was in den folgenden Kapiteln (speziell Kapitel 4 und Kapitel 6) genauer besprochen wird. Wie mit stark divergierenden Parametersätzen verfahren werden kann um ein Design auszuwählen, wird hier ebenso besprochen.

Speziell die großen Unterschiede bezüglich der Resonanzfrequenz ( $f_s$ ) und dem äquivalenten Volumen ( $V_{as}$ ) sind eher problematisch, da diese immensen Einfluss auf das Gehäusevolumen und auch die Resonanzfrequenz  $f_B$  haben (Vergleiche (8), 11 System Synthesis, Design with a Given Driver). Anhand der Thiele-Small Parameter lassen sich beispielsweise mithilfe von *Konstruktionscharts* (engl.: alignment charts) die Werte  $\alpha$  (Gleichung 3.1) und  $h$  (Gleichung 3.2) bestimmen, die das Design und die *Filtercharakteristik* des Lautsprechers bestimmen. Dieser Entwurfsvorgang wird in Abschnitt 6.1 allgemein und genauer ausgeführt.

$$\alpha = \frac{V_{as}}{V_{vG}} \Rightarrow V_{vG} = \frac{V_{as}}{\alpha} \quad (3.1)$$

$$h = \frac{f_B}{f_s} \Rightarrow f_B = h \cdot f_s \quad (3.2)$$

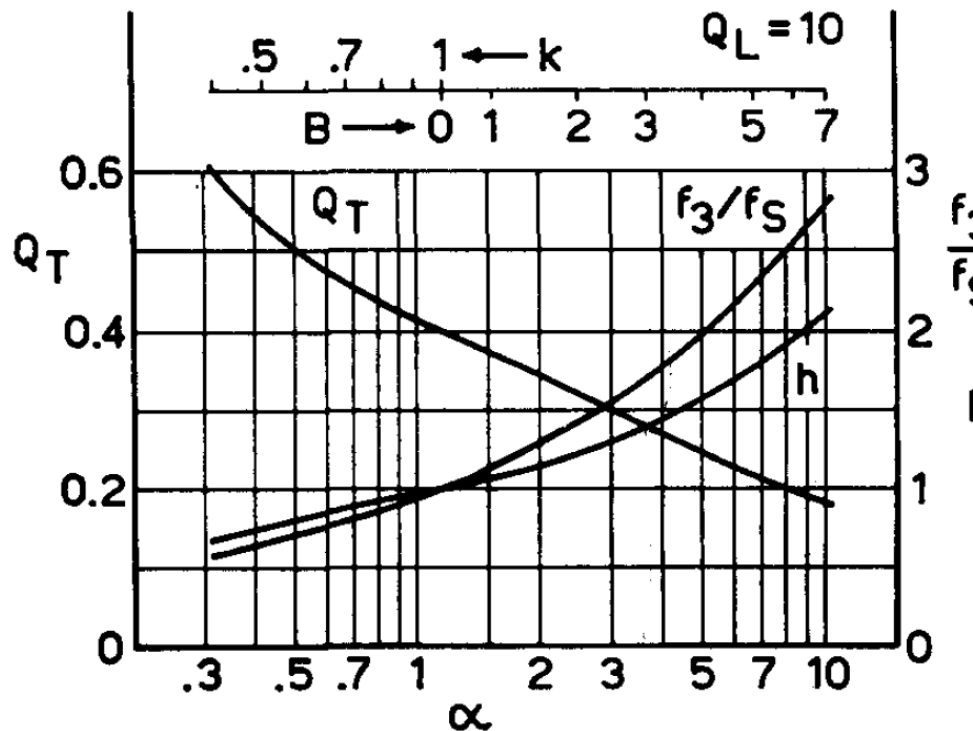


Abbildung 3.3: Schematisches Konstruktionschart aus (11), S. 322

In Abbildung 3.3 ist ein Konstruktionschart dargestellt. Charts wie dieses können zur schnellen händischen Ermittlung des Gehäusevolumens ( $V_{vG}$ ) und der Resonanzfrequenz des Bassrohrs ( $f_B$ ) verwendet werden. Obwohl das Gehäusevolumen und die Resonanzfrequenz des Bassrohrs in dieser Arbeit auf anderem Weg ermittelt wurden, ist es mithilfe dieser Charts sehr schnell möglich, allgemeine Trends zu ermitteln, wenn gewisse Parameter verändert werden, weshalb diese Methode besprochen wird. Auch lässt sich der gesamte Entwurf mit dieser Methode durchführen, falls Designtools wie etwa *LspCAD6* nicht zugänglich sind. Die folgende Betrachtung bezieht sich immer auf Abbildung 3.3 und die Werte aus Tabelle 3.2.

In Tabelle 3.2 sind sowohl die Angaben der Thiele-Small Parameter des Herstellers als auch die Ergebnisse der eigens angestellten Messung sowie einige zusätzliche Parameter angeführt und gegenübergestellt (große Unterschiede in den Werten sind **fett** markiert).

**Betrachtung des Konstruktionscharts:** Da die Gesamtgüte ( $Q_{ts}$ ) in beiden Parametersätzen in etwa gleich ist, verändert sich auch der Wert von  $\alpha$  nur geringfügig. Bei gleichem  $\alpha$  aber geringerem äquivalentem Volumen im Vergleich zur Herstellerangabe ((2)) muss auch das Gehäusevolumen proportional reduziert werden (Gleichung 3.1). In weiterer Folge kann am Konstruktionschart der Wert für das Wellenverhältnis ( $h$ ) abgelesen werden. Durch die höhere Resonanzfrequenz von  $f_s = 90,4\text{Hz}$  erhöht sich auch die Resonanzfrequenz der Bassreflexöffnung ( $f_B$ , Gleichung 3.2) was die Gesamtgrenzfrequenz des Lautsprechersystems nach oben verschiebt und von Nachteil für dieses Projekt ist. Daher muss eine Lösung gefunden werden, bei der diese Probleme und Variationen der Parameter berücksichtigt werden.

(Thiele-Small) Parameter		Herstellerangabe (2)	Messwert
Resonanzfrequenz [Hz]	$f_s$	74Hz	<b>90,4Hz</b>
Mechanische Güte	$Q_{ms}$	4,1	<b>9,09</b>
Elektrische Güte	$Q_{es}$	0,39	0,412
Gesamtgüte	$Q_{ts}$	0,36	0,394
Gleichstromwiderstand [ $\Omega$ ]	$R_e$	5,2 $\Omega$	5,11 $\Omega$
Schwingspuleninduktivität [mH]	$L_e$	1,2mH	<b>21,84mH</b>
Wandlerkonstante [Tm]	$Bl$	11,5Tm	13,08Tm
Wirkungsgrad [%]	$\eta_0$	1,5%	1,506%
Gesamte bewegte Masse [g]	$M_{ms}$	21,0g	24,297g
Äquivalentes Volumen [l]	$V_{as}$	15l	<b>8,7452l</b>
Membranfläche [ $cm^2$ ]	$S_d$	kA	210 $cm^2$

Tabelle 3.2: (Thiele-Small) Parameter des Chassis B&amp;C 8CX21



## 4

## Simulation B&amp;C 8CX21

Anhand der Herstellerangaben (2) und der Messergebnisse (siehe Kapitel 3) zu den Thiele-Small Parametern ist es nun möglich, mithilfe der Software *LspCAD6* (9) Ergebnisse für diverse Lautsprecherdesigns zu simulieren. Hierfür wird zuerst ein allgemeines Chassis-Element mit den jeweiligen Thiele-Small Parametern ausgewählt, anhand derer das gewünschte Chassis simuliert wird. Anschließend besteht die Möglichkeit, Simulationen für das zuvor definierte Lautsprecherchassis in verschiedenen Gehäusen durchzuführen. Dabei kann für das Gehäuse ein geschlossenes, ventiliertes oder Basshorngehäuse ausgewählt werden.

## 4.1 Voreinstellungen für die Simulation in LspCAD 6

Aufgrund der teilweise großen Unterschiede in den Thiele-Small Parametern zwischen Herstellerangabe und Messwerten wurde für beide Datensätze (siehe Tabelle 3.2) eine eigene Simulation durchgeführt, um den maximal zu erwartenden Fehler abschätzen zu können und basierend darauf ein passendes Design festzulegen.

### 4.1.1 Einstellen der Herstellerangaben

In Abbildungen 4.1 und 4.2 ist das Hauptfenster der Software *LspCAD6* zu sehen. Das Hauptfenster bietet den *Edit* Modus, in dem der Einbau des Chassis definiert wird, und den *Simulate* Modus, in dem Simulationsparameter wie das Gehäusevolumen definiert und Ergebnisse angezeigt werden.

In Abbildung 4.1 (*Edit* Modus) sieht man ein elektroakustisches Ersatzschaltbild für eine Gehäuse sowie den Basskanal. Diese Konfiguration wurde aus den vorhandenen Templates geladen und angepasst. Hier ist es auch möglich, eine elektrische Vorbeschaltung in Form einer Frequenzweiche in die Simulation miteinzubeziehen.

In Abbildung 4.2 (*Simulate* Modus) ist ganz links schematisch das elektrische Ersatzschaltbild des Gehäuses zu erkennen, mit der Eingangsimpedanz  $Z_e$  und zwei Membrandurchmessern  $S_d$ . Diese repräsentieren zum einen die eigentliche Membran des Chassis und zum anderen die Kolbenmembran des Bassrohrs. Wird der *Simulate* Modus gestartet, öffnet sich ein weiteres Fenster, in dem graphische Simulationsergebnisse unter anderem für Schalldruckpegelverlauf und Gruppenlaufzeit (siehe Abbildungen 4.9) angezeigt werden. Werden nun Änderungen an Chassis, Gehäuse oder Bassrohr vorgenommen, können die Auswirkungen in Echtzeit betrachtet werden, was eine Gehäuseanpassung mit *LspCAD6* sehr intuitiv gestaltet.

Da die tatsächlichen Parameter des Chassis mit großer Wahrscheinlichkeit im Bereich zwischen den beiden Datensätzen liegen werden, kann anhand dieser Simulationen ein Bereich abgesteckt werden, in dem letztlich die Ergebnisse der abschließenden Messung der Lautsprecher (Kapitel 8) erwartet werden können. Nun kann durch Verändern von Gehäusevolumen, Bassrohrlänge und -radius das Gehäuse so angepasst werden, dass für beide Parametersätze ein in jedem Fall verwertbares Ergebnis zu erwarten ist.

Durch Anklicken des Lautsprecher-Objekts im *Edit*-Mode öffnet sich das Fenster zur Eingabe der Thiele-Small Parameter des Chassis (*Loudspeaker unit*, Abbildung 4.3). Hier wird der jeweilige

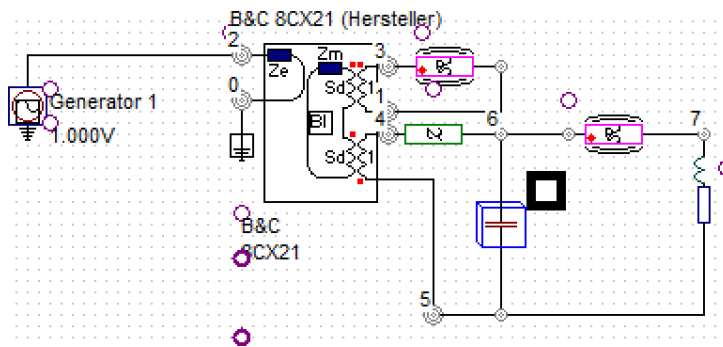


Abbildung 4.1: Hauptfenster Edit

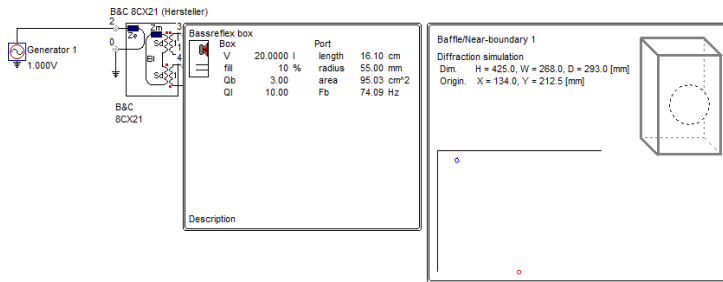


Abbildung 4.2: Hauptfenster Simulate

Satz an Thiele-Small Parametern eingegeben. Dieses Eingabefenster bietet die *Autocompute*-Funktion, die anhand bereits eingegebener Parameter die restlichen Parameter bestimmt, was nützlich ist, wenn *nicht alle* geforderten Parameter bekannt sind. Wird dieser Modus verwendet, sollten dazu die bekannten Werte unbedingt durch Setzen der Häkchen in der zweiten Spalte *fixiert* werden (zu sehen in Abbildung 4.3 bei  $Re$ ,  $fs$ ,  $Qms$ , ...).

Die Eingabe der Gehäuseparameter erfolgt über das Anklicken des Simulationsobjekts im *Simulate*-Modus (Abbildung 4.4). Im Reiter *Box* wird das Gehäusevolumen sowie das Bassreflexrohr definiert. Da das Programm hier bereits im *Simulate*-Modus ist, werden in einem separaten Fenster auch direkt die Simulationsergebnisse angezeigt, sodass die Auswirkungen einer Änderung an Gehäusevolumen oder Bassreflexrohr direkt erkennbar sind und die Anpassung von Gehäusegröße wie auch Länge und Radius des Bassreflexrohrs sehr einfach durchgeführt und auch überprüft werden kann.

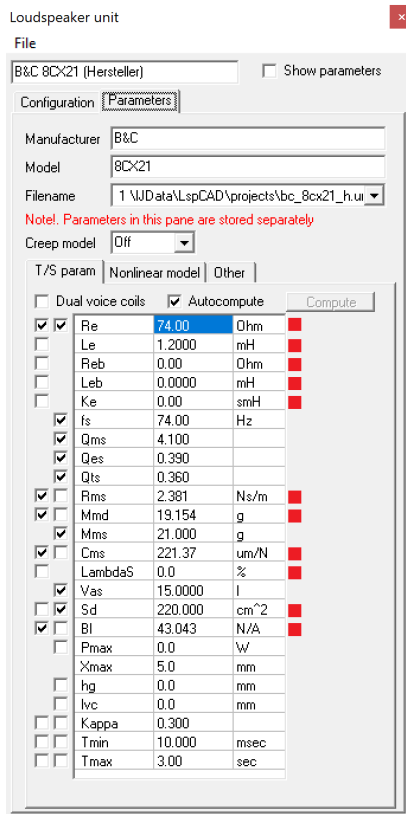


Abbildung 4.3: Eingabe der Thiele-Small Parameter des Chassis (Tabelle 3.2, Spalte Herstellerangabe (2))

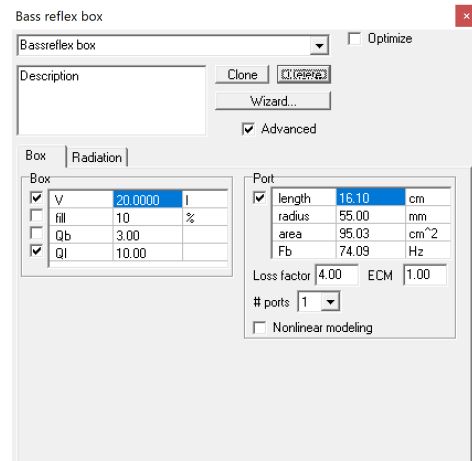


Abbildung 4.4: Eingabe der Gehäusedaten

#### 4.1.2 Einstellen der gemessenen Thiele-Small Parameter

Die Einstellungen für den Parametersatz der selbst gemessenen Thiele-Small Parameter wurden auf die selbe Weise wie in Abschnitt 4.1.1 durchgeführt. Dazu wurden die Werte aus Tabelle 3.2 (Spalte Messwert) verwendet (Abbildungen 4.5 bis 4.8).

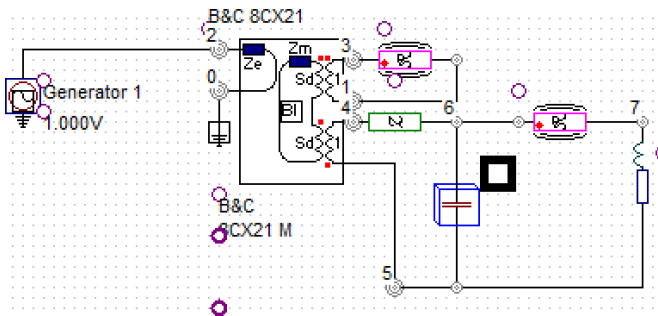


Abbildung 4.5: Hauptfenster: Edit

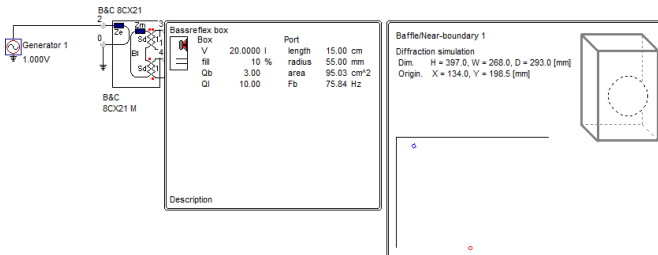


Abbildung 4.6: Hauptfenster: Simulate

Loudspeaker unit

File

B&C 8CX21  Show parameters

Configuration  Parameters

Manufacturer B&C

Model 8CX21 M

Filename 1 \J\data\LspCAD\projects\bc\_8cx21\_m.u

Note: Parameters in this pane are stored separately

Creep model Off

T/S param Nonlinear model Other

Dual voice coils  Autocompute

<input checked="" type="checkbox"/>	Re	5.02	Ohm	
<input type="checkbox"/>	Le	0.0000	mH	
<input type="checkbox"/>	Reb	0.00	Ohm	
<input type="checkbox"/>	Leb	0.0000	mH	
<input type="checkbox"/>	Ke	0.00	smH	
<input checked="" type="checkbox"/>	fs	88.70	Hz	
<input checked="" type="checkbox"/>	Qms	10.748		
<input checked="" type="checkbox"/>	Qes	0.388		
<input checked="" type="checkbox"/>	Qts	0.374		
<input checked="" type="checkbox"/>	Rms	2.564	Ns/m	
<input checked="" type="checkbox"/>	Mmd	45.771	g	
<input checked="" type="checkbox"/>	Mms	49.458	g	
<input checked="" type="checkbox"/>	Cms	65.10	um/N	
<input type="checkbox"/>	LambdaS	0.0	%	
<input checked="" type="checkbox"/>	Vas	4.4619	l	
<input checked="" type="checkbox"/>	Sd	220.000	cm^2	
<input checked="" type="checkbox"/>	B1	18.885	N/A	
<input type="checkbox"/>	Pmax	0.0	W	
<input type="checkbox"/>	Xmax	5.0	mm	
<input type="checkbox"/>	hg	0.0	mm	
<input type="checkbox"/>	lvc	0.0	mm	
<input type="checkbox"/>	Kappa	0.300		
<input type="checkbox"/>	Tmin	10.000	msec	
<input type="checkbox"/>	Tmax	3.00	sec	

Abbildung 4.7: Eingabe der Thiele-Small Parameter (Tabelle 3.2, Spalte „Messwert“) des Chassis

Bass reflex box

Bassreflex box  Optimize

Description

Advanced

Box Radiation

<input checked="" type="checkbox"/>	v	20.0000	l
<input type="checkbox"/>	fill	10	%
<input type="checkbox"/>	Qb	3.00	
<input checked="" type="checkbox"/>	Ql	10.00	

Port

<input checked="" type="checkbox"/>	length	15.00	cm
	radius	55.00	mm
	area	95.03	cm^2
	Fb	75.84	Hz

Loss factor 4.00 ECM 1.00

# ports 1

Nonlinear modeling

Abbildung 4.8: Eingabe der Gehäusedaten

## 4.2 Simulationsergebnisse

Nachstehend sind Schalldruckpegelverläufe für mehrere Konfigurationen entsprechend der beiden Parametersätze zu sehen. Anhand dieser Simulationen ist es möglich, eine Fehlerabschätzung

zu treffen und so ein Design zu wählen, für das in jedem Fall ein brauchbares Ergebnis zu erwarten ist. Für die Simulationsergebnisse wurde jeweils ein Nettovolumen von 20l sowie ein Bassreflexrohr mit  $r = 55$  mm und  $l_{max} = 150$  mm gewählt, um den Grad der Abweichung der Lautsprecher aufgrund der teilweise unterschiedlichen Thiele-Small Parameter aufzuzeigen.

Es ist hier bereits erkennbar, dass durch das Bassreflexrohr zwar eine Verbesserung im tieffrequenten Bereich möglich ist, diese Anpassung jedoch nur bis zu einem gewissen Grad möglich ist. Während die Resonanzfrequenz des Rohrs weiter nach unten verschoben werden *kann*, entsteht dadurch im schlimmsten Fall ein Einbruch im Schalldruckpegelverlauf im Bereich von 100Hz bis 150Hz. Erste Ansätze dieser Absenkung im Schalldruckpegelverlauf zeigen sich bereits in der zweiten Grafik in Abbildung 4.9. Aufgrund des großen Radius des Rohrs ist jedoch auch die Resonanzgüte des Rohrs (*Port*) recht gering, was diese Welligkeit etwas entschärft.

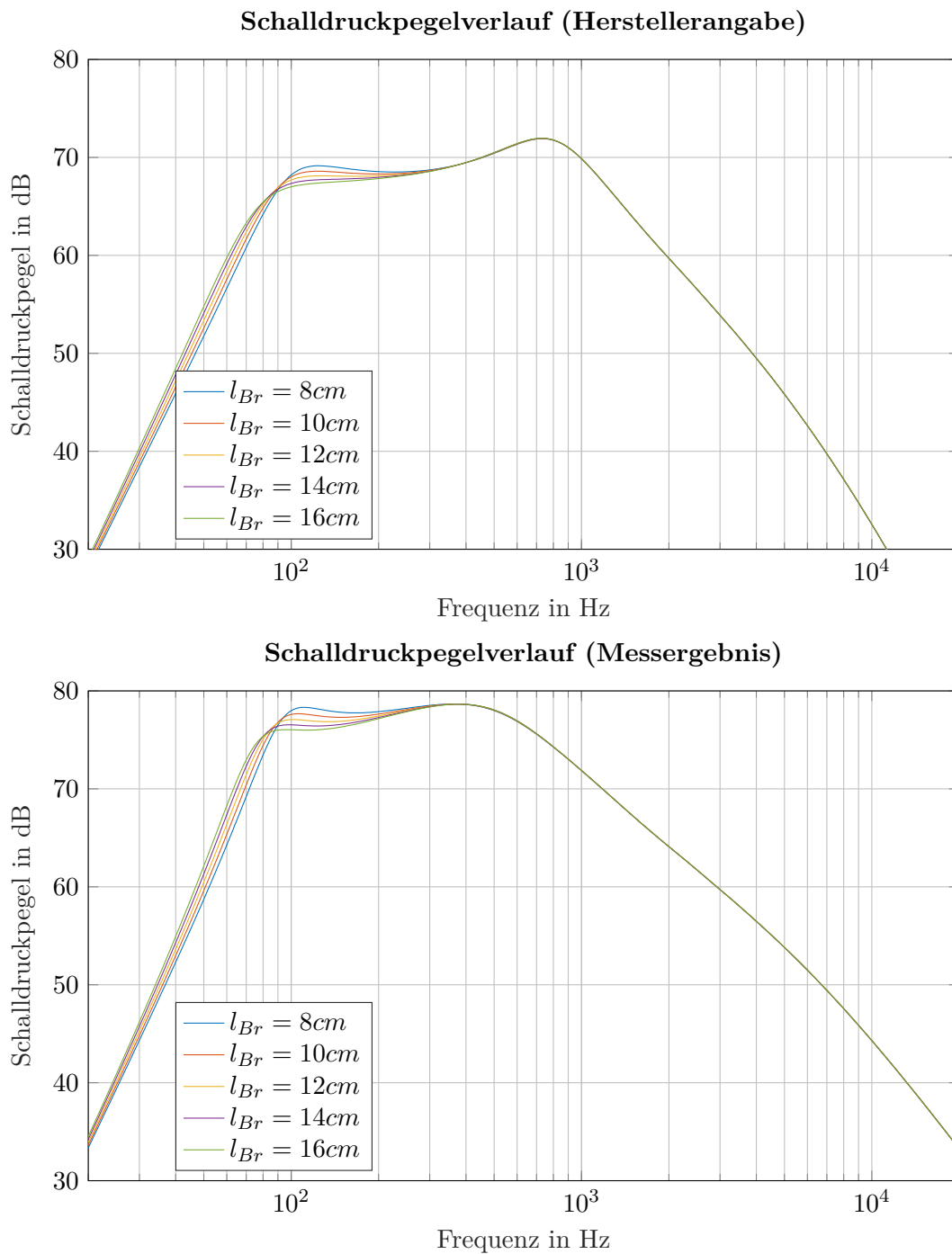


Abbildung 4.9: Simulierte Schalldruckpegelverläufe für verschiedene Tunnellängen

## 5

## Alternativchassis & Simulation

Aus den Ergebnissen der Simulationen für das Lautsprecherchassis B&C 8CX21 (Kapitel 4) zeigt sich bereits ein allgemeiner Trend für den finalen Lautsprecher. Zwar lässt sich das Verhalten bei tiefen Frequenzen anpassen, allerdings immer nur in einem gewissen Rahmen, was auch in den Simulationsergebnissen erkennbar ist. Das ursprüngliche Ziel dieser Arbeit war es, lediglich einen Vergleich zweier Gehäusearten anzustellen. Um die Vergleichbarkeit der beiden Lautsprecher zu gewähren, wurde deshalb das selbe Chassis wie im Referenzdesign in (1) verwendet. Es zeigt sich allerdings, dass dieses Chassis aufgrund seiner physikalischen Eigenschaften nicht oder nur schlecht für den Einbau in ein ventiliertes Gehäuse geeignet ist.

Daher wird in diesem Kapitel dieser Vergleich erweitert, indem die Anforderungen an das Chassis angepasst werden. Es wird daher ein vergleichbares Chassis der gleichen Größe gesucht, wobei bereits bei der Auswahl auf gewisse Faktoren geachtet wird um nach Möglichkeit bessere Ergebnisse im Schalldruckpegelverlauf zu erzielen, als es mit dem B&C Chassis möglich zu sein scheint.

### 5.1 Auswahl des neuen Chassis

Das neue Chassis soll nun so gewählt werden, dass die zuvor festgestellten Schwachpunkte, vor allem die eher *hohe Resonanzfrequenz* von 74Hz (laut Hersteller), korrigiert werden, während die beiden Systeme untereinander möglichst vergleichbar bleiben. Aus diesem Grund wurde fixiert, dass auch das Vergleichschassis einen Membrandurchmesser von acht Zoll haben muss, da bei größeren Membranen die Resonanzfrequenz meist tiefer liegt. Neben dieser Bedingung soll auch das Volumen des Lautsprechers mit dem Volumen von etwa 20l, das aus den vorangegangenen Simulationen stammt, vergleichbar sein.

Eine Entstraffung der Spezifikationen soll durch die *Chassisart* erfolgen. Koaxialchassis sind durchaus praktisch aufgrund ihres geringeren Platzverbrauchs und auch teilweise verbesserten Abstrahleigenschaften aufgrund der namensgebenden Koaxialbauweise. Jedoch wird dadurch auch die Konstruktion des Chassis komplexer, wodurch solche Chassis oft hochpreisiger sind. Zudem ist bei Chassis in Koaxialbauweise die Kombination der zwei Chassis bereits unveränderlich vorgegeben.

Für die Auswahl des neuen Chassis wurde das Matlab Tool *SpeakerAnalyzer* von Loacker-Schöch (10) verwendet, mit dem es sehr einfach möglich ist, bei gegebenen Thiele-Small Parametern und Volumen ein ungefähres Ergebnis abzuschätzen. Vor allem in dieser frühen Auswahlphase ist dieses Tool ein sehr nützliches Werkzeug zum Vergleich verschiedener Lautsprecherchassis und ermöglicht sehr schnell die Entscheidung, ob ein Chassis für ein bestimmtes Design geeignet ist oder nicht. Nachdem zunächst allgemeine *Systeme* (Kombinationen aus Hoch- und Tieftönern) zusammengetragen waren, wurden die verschiedenen Basschassis mithilfe des zuvor genannten *SpeakerAnalyzer* betrachtet und verglichen. Auf Basis dieses Vergleichs fiel die Wahl schlussendlich auf die Kombination aus Dayton Audio DC200 (Tieftonchassis, Abbildung 5.3 rechts unten) und Dayton Audio DC28F (Hochtonchassis, Abbildung 5.3 rechts oben). In der nachstehenden Tabelle (Tabelle 5.1) sind die Thiele-Small Parameter beider Tieftonchassis (B&C und Dayton Audio) zum Vergleich angeführt. Während das äquivalente Volumen  $V_{as}$  des Day-

ton Audio Chassis deutlich größer ist als das des B&C Chassis, ist die Resonanzfrequenz  $f_s$  um einiges tiefer. Diese deutlich tiefere Resonanzfrequenz zeigt sich dann auch in der unteren Systemgrenzfrequenz der vorläufigen Simulationsergebnisse (Abbildungen 5.1 und 5.2).

Um die ausgewählten Chassis miteinander vergleichen zu können, wurden für beide Chassis jeweils die Thiele-Small Parameter des Herstellers angegeben und mit einem 20l Volumen kombiniert. Das Bassrohr wurde von der Software entsprechend der Optimierungsauswahl (*Bessel*) angepasst. Zu sehen ist, dass die 3dB Grenzfrequenz  $f_{3dB}$ , bei der der Schalldruckpegel 3dB unter dem Maximum liegt, für das Dayton Audio Chassis etwa 60Hz unter der des B&C Chassis liegt (Abbildungen 5.1:  $f_{3dB} \approx 100\text{Hz}$ ; 5.2:  $f_{3dB} \approx 45\text{Hz}$ ). Dabei wird nicht beachtet, dass aufgrund der geringeren linearen Auslenkung des Dayton Audio Chassis des Gesamtpegel etwa 10dB unter dem des B&C Chassis liegt.

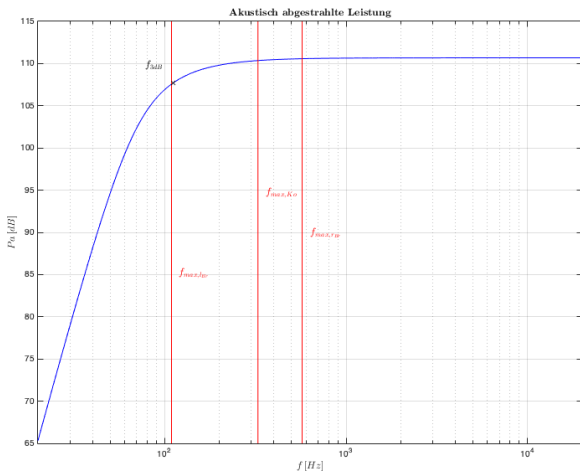


Abbildung 5.1: Speaker Analyzer Simulationsergebnis für B&C Chassis (Bessel Optimierung)

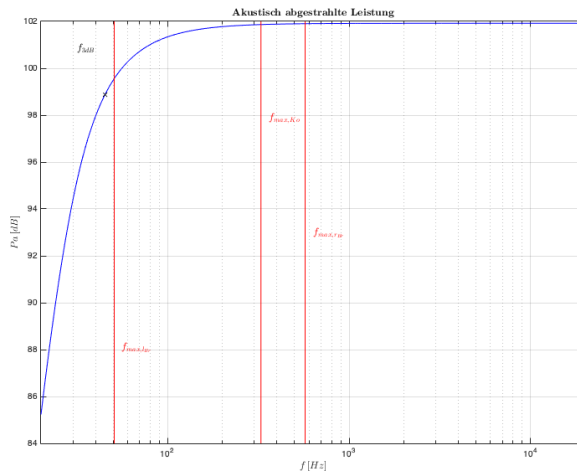


Abbildung 5.2: Speaker Analyzer Simulationsergebnis für Dayton Audio Chassis (Bessel Optimierung)

(Thiele-Small) Parameter		B&C 8CX21 (2)	Dayton Audio DC200 ((3))
Resonanzfrequenz [Hz]	$f_s$	74Hz	30,3Hz
Mechanische Güte	$Q_{ms}$	4,1	3,06
Elektrische Güte	$Q_{es}$	0,39	0,49
Gesamtgüte	$Q_{ts}$	0,36	0,42
Gleichstromwiderstand [ $\Omega$ ]	$R_e$	5,2 $\Omega$	6,41 $\Omega$
Schwingspuleninduktivität [mH]	$L_e$	1,2mH	2,32mH
Wandlerkonstante [Tm]	B1	11,5Tm	9,5Tm
Gesamte bewegte Masse [g]	$M_{ms}$	21,0g	24,297g
Äquivalentes Volumen [l]	$V_{as}$	15l	45l
Membranfläche [ $\text{cm}^2$ ]	$S_d$	210 $\text{cm}^2$ (Messung)	211,2 $\text{cm}^2$

Tabelle 5.1: Vergleich einiger (Thiele-Small) Parameter (B&C 8CX21; Dayton Audio DC200)





Abbildung 5.3: links: B&C 8CX21  
rechts: Dayton Audio DC28F (oben, Hochtöner) und DC200 (unten, Tieftöner)

## 5.2 Simulation des Dayton Audio Systems

Im Anschluss an die *Vorsimulation* und die darauf basierende Auswahl der neuen Chassis wurde entsprechend der Simulationen in Kapitel 4 auch dieses Chassis genauer mithilfe von *LspCAD6* untersucht. Dabei wurden für dieses Chassis ausschließlich die Thiele-Small Parameter, die der Hersteller für dieses Chassis bereitstellt, verwendet. In Abbildung 5.4 sind die Simulationsergebnisse für den Schalldruckpegelverlauf zu sehen. Wie bereits die Ergebnisse des *SpeakerAnalyzer* zeigten, weist der Frequenzgang dieser Anordnung eine deutlich besser Abdeckung im Bereich der tiefen Frequenzen auf. Schlussendlich sollte dieses Chassis (Abbildung 5.3, links) in Verbindung mit dem Hochtönerchassis (Abbildung 5.3, rechts) auch bei den abschließenden Messungen an den fertigen Lautsprechern zu einer deutlichen Verbesserung im Vergleich zu der B&C Anordnung liefern. Hier ist anzumerken, dass das Gehäusevolumen von 20l eigentlich zu klein für das deutlich weniger steife Dayton Audio Chassis ist. Da dieser Lautsprecher aber auch mit dem B&C Lautsprecher vergleichbar bleiben soll, wurde dieses Volumen gewählt, wodurch die Systemgrenzfrequenz schlussendlich deutlich höher liegt, als es möglich wäre.

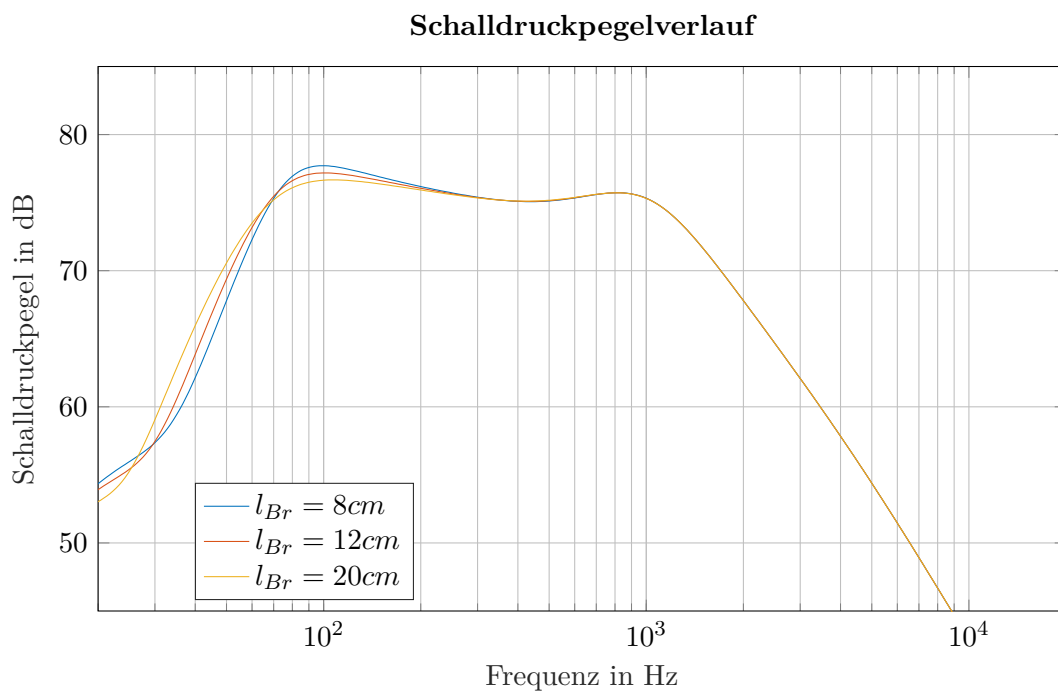


Abbildung 5.4: Simulierte Schalldruckpegelverläufe für diverse Tunnellängen

## 6

## Entwurf & Konstruktion der Lautsprecherboxen

Zum Entwurf eines Lautsprechergehäuses stehen mehrere Möglichkeiten zur Verfügung. Der Entwurf anhand sogenannter Konstruktions- bzw. *alignment charts* (8) wurde bereits in Kapitel 3 kurz angesprochen und wird hier detaillierter und für den allgemeinen Fall erklärt. Der zweite Ansatz, der schlussendlich auch für dieses Projekt angewandt wurde, erfolgt mithilfe der Simulationsergebnisse aus Kapitel 4 und Kapitel 5, also mithilfe der Software *LspCAD6*.

### 6.1 Entwurf mit Konstruktionscharts bei gegebenem Chassis

Nach (8) sind für den Entwurf mit Konstruktionscharts die Kleinsignalparameter  $f_s$  (Resonanzfrequenz des Chassis),  $Q_{ts}$  (Güte des Chassis bei  $f_s$ ) und  $V_{as}$  (akustisch äquivalentes Volumen) notwendig, deren Herleitungen in (11) weiter ausgeführt werden. In Abbildung 6.1 ist ein solches Konstruktionschart dargestellt.

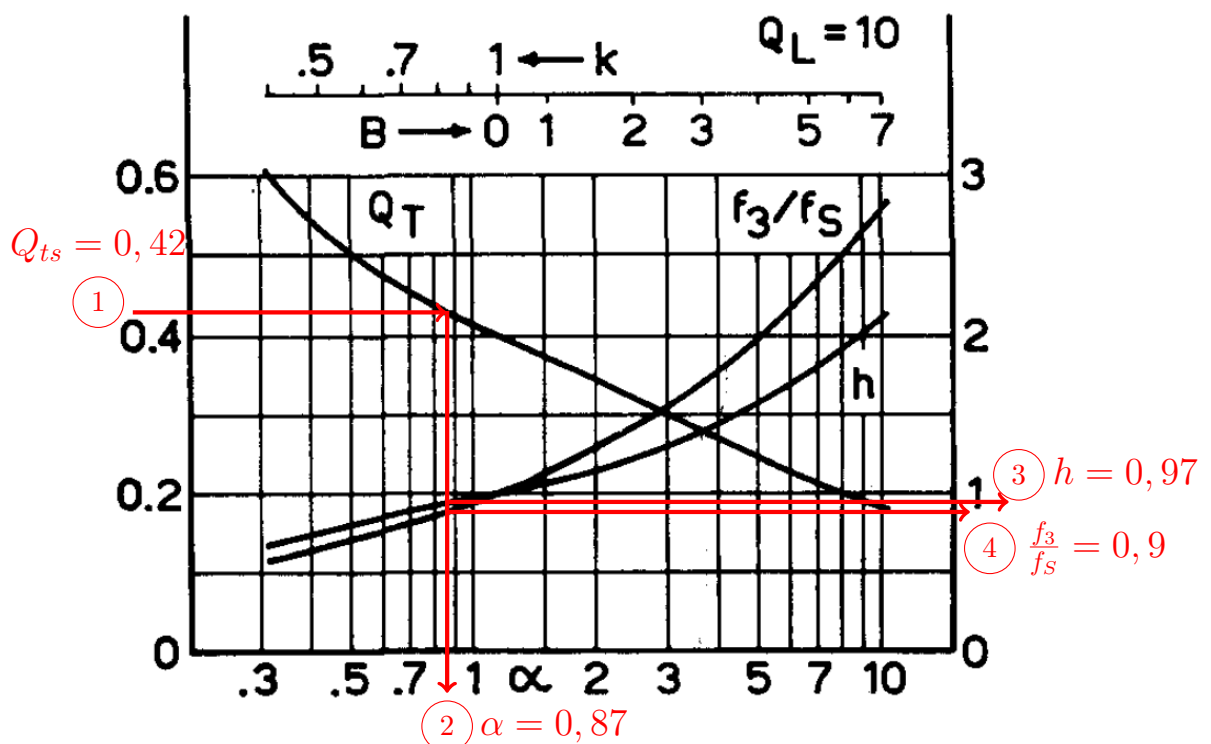


Abbildung 6.1: Konstruktionschart aus (11), S. 322

### 6.1.1 Bestimmen des Gehäuses

Der Entwurfsvorgang beginnt mit der Größe  $Q_{ts}$ : Der gemessene Wert  $Q_{ts}$  wird auf der *linken Ordinate* ( $Q_T$ ) eingetragen. Während  $Q_{ts}$  die Gesamtgüte des Chassis bei Resonanz beschreibt, ist bei  $Q_T$  die komplette (engl. total) Güte des Lautsprechersystems gemeint. Für  $Q_T$  nennt Small hier eine obere Grenze von  $Q_T < 0,6$ , die auch für  $Q_{ts}$  gültig ist, um überhaupt eine sinnvolle Anwendung des Chassis in einem ventilierten Lautsprecher zu ermöglichen. Betrachtet man Konstruktionscharts für andere Verlustgüten  $Q_L$ , verschiebt sich diese Grenze für  $Q_{ts}$  nach oben, bleibt aber in diesem Bereich.

Von der linken Ordinate kann nun der zugehörige Punkt am Graph für  $Q_T$  gesucht werden, indem eine horizontale Linie vom Wert auf der linken Ordinate bis zum Schnittpunkt mit dem Graph von  $Q_T$  gezogen wird (Abbildung 6.1: 1). Durch den senkrechten Schnitt dieses Punktes mit der Abszisse erhält man den zugehörigen Wert für  $\alpha$  (Abbildung 6.1: 2). Dieser Wert liefert ein Verhältnis von äquivalentem Volumen  $V_{as}$  zum tatsächlichen Nettoinnenvolumen des Gehäuses  $V_{vG}$  und wird *Systemnachgiebigkeitsverhältnis* (engl.: system compliance ratio) genannt. Aus diesem Verhältnis und der bekannten Resonanzfrequenz des Chassis  $f_s$  kann im Anschluss das optimale Gehäuseinnenvolumen  $V_{vG}$  bestimmt werden (Gleichung 6.1).

$$\alpha = \frac{V_{as}}{V_{vG}} \Rightarrow V_{vG} = \frac{V_{as}}{\alpha} \quad (6.1)$$

Zudem lassen sich durch den Wert von  $\alpha$  mithilfe der entsprechenden Graphen die Werte für  $\frac{f_3}{f_s}$  sowie für  $h$  an der rechten Ordinate ablesen. Dazu wird vom Schnittpunkt einer vertikalen Linie des  $\alpha$ -Wertes an der Abszisse und dem jeweiligen Graph  $f_3/f_s$  beziehungsweise  $h$  der zugehörige Wert an der rechten Ordinate abgelesen (Abbildung 6.1: 3&4).

Das Verhältnis  $f_3/f_s$  ist die Relation von 3dB-Grenzfrequenz des Lautsprechersystems  $f_3$  zu Resonanzfrequenz des Chassis  $f_s$ . Das heißt über diesen Wert kann die Grenzfrequenz des Systems bestimmt werden, wie in Gleichung 6.2 durchgeführt (dazu wird hier die Variable  $x_f$  eingeführt).

Der Parameter  $h$  gibt ein Systemabstimmungsverhältnis an und setzt die Größen  $f_B$  (Resonanzfrequenz des Tunnels) und  $f_s$  ins Verhältnis (Gleichung 6.3). Das heißt, dieses Verhältnis wird zur weiteren Bestimmung der Abmessungen des Resonanztunnels verwendet.

$$\frac{f_3}{f_s} = x_f \Rightarrow f_3 = f_s \cdot x_f \quad (6.2)$$

$$h = \frac{f_B}{f_s} \Rightarrow f_B = h \cdot f_s \quad (6.3)$$

### 6.1.2 Bestimmen des Bassreflexrohrs

Nachdem das Gehäusevolumen  $V_{vG}$ , die untere Systemgrenzfrequenz  $f_3$  und die Resonanzfrequenz des ventilierten Gehäuses/des Bassreflexrohrs  $f_B$  fixiert wurden, sind die Tunnelabmessungen zu bestimmen. Dazu kann das Nomogramm aus Abbildung 6.2 verwendet werden. Die bereits bestimmten Parameter  $V_{vG}$  und  $f_B$  werden auf der jeweiligen ordinatenparallelen Achse eingetragen und durch eine Gerade verbunden. Der Schnittpunkt dieser Geraden mit der nächsten Senkrechten ( $L_V/S_V$ ) bildet dann den Ausgangspunkt für eine zur Abszisse parallelen Gerade über den Bereich des Nomogramms. Im Nomogramm selbst sind mehrere Kurven eingezeichnet, die je einem Rohrdurchmesser entsprechen. Jeder Schnittpunkt dieser Kurven mit der zuvor eingezeichneten Horizontalen definiert in Kombination mit dem Wert der unteren (in Zoll)

oder oberen Abszisse (in cm) einen möglichen Resonanztunnel. In dieser Grafik ist die Tunnelbestimmung für beide Gehäuse mit einem Volumen von 20l und Tunnelresonanzfrequenzen von  $f_{B,BC} = 70\text{Hz}$  und  $f_{B,DA} = 40\text{Hz}$  eingetragen.

Zum besseren Verständnis wurde der gesamte Prozess in Abbildung 6.3 zusammengefasst.

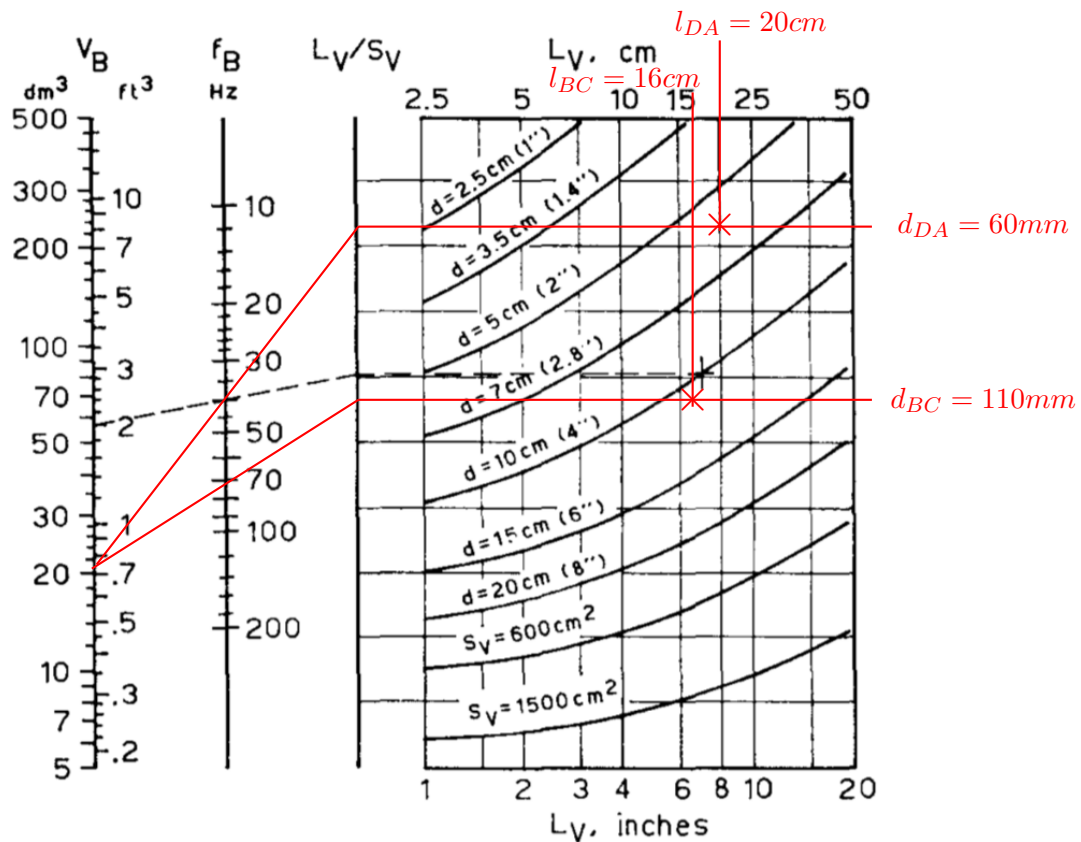


Abbildung 6.2: Nomogramm zur Bestimmung von Tunnelfläche und -durchmesser aus (8), S. 551

### Zusatz Tunnelbestimmung

Da die Tunnelbestimmung mithilfe des Nomogramms (Abbildung 6.2) relativ ungenau und vor allem *unflexibel* ist, wird hier zusätzlich eine rechnerische Bestimmung des Tunnels besprochen. Diese ist vor allem dann nützlich, wenn der ausgewählte Tunnel nicht oder nur mit ähnlichen Dimensionen im Handel erhältlich ist.

Für diese Schritte empfiehlt es sich trotzdem, mithilfe der zuvor diskutierten Methode im Nomogramm das Bassrohr ungefähr zu dimensionieren. So kann sehr schnell ein Ausgangspunkt für die Anpassung gefunden werden, bei der die zwei voneinander abhängige Größen  $l_{Br,eff}$  und  $r_{Br}$  adaptiert werden.

Durch Variation des Radius lässt sich mit Gleichung 6.4 die effektive Länge des Bassreflexrohrs bestimmen. Bei der effektiven Länge handelt es sich jedoch nicht um die tatsächliche geometrische Länge des Rohrs, sondern um die akustisch wirksame Länge des Rohrs, bei der auch die mitschwingende Luftmasse an den beiden Enden des Rohrs berücksichtigt wird. Daher muss diese akustisch wirksame Länge wie in Gleichung 6.5 korrigiert werden.

$$l_{Br,eff} = \frac{c^2 \cdot A_{Br}}{4\pi^2 \cdot f_B^2 \cdot V_{vG}} = \frac{c^2 \cdot r_{Br}^2}{4\pi \cdot f_B^2 \cdot V_{vG}} \quad (6.4)$$

$$l_{Br} = l_{Br,eff} - 2\Delta l_{Br} = l_{Br,eff} - 1,7 \cdot r_{Br} \quad (6.5)$$

Zur einfachen Bestimmung der Länge oder des Radius in Abhängigkeit des jeweils anderen, wurde Gleichung 6.5 in Gleichungen 6.6 und 6.7 aufgeteilt.

$$l_{Br}(r_{Br}) = \frac{c^2 \cdot r_{Br}^2}{4\pi \cdot f_B^2 \cdot V_{vG}} - 1,7 \cdot r_{Br} \quad (6.6)$$

$$r_{Br}(l_{Br}) = \frac{1,7 + \sqrt{2,89 + \frac{l_{Br} \cdot c^2}{\pi \cdot f_B^2 \cdot V_{vG}}}}{c^2} \cdot 2\pi \cdot f_B^2 \cdot V_{vG} \quad (6.7)$$

In Abbildung 6.3 ist der Entwurfsprozess grafisch zusammengefasst. Natürlich ist dieser Ablauf nicht streng fixiert, sondern kann auch mit der Vorgabe eines Gehäusevolumens begonnen werden, woraus sich geforderte Parameter an das Chassis ergeben das erst im Anschluss ausgewählt wird.

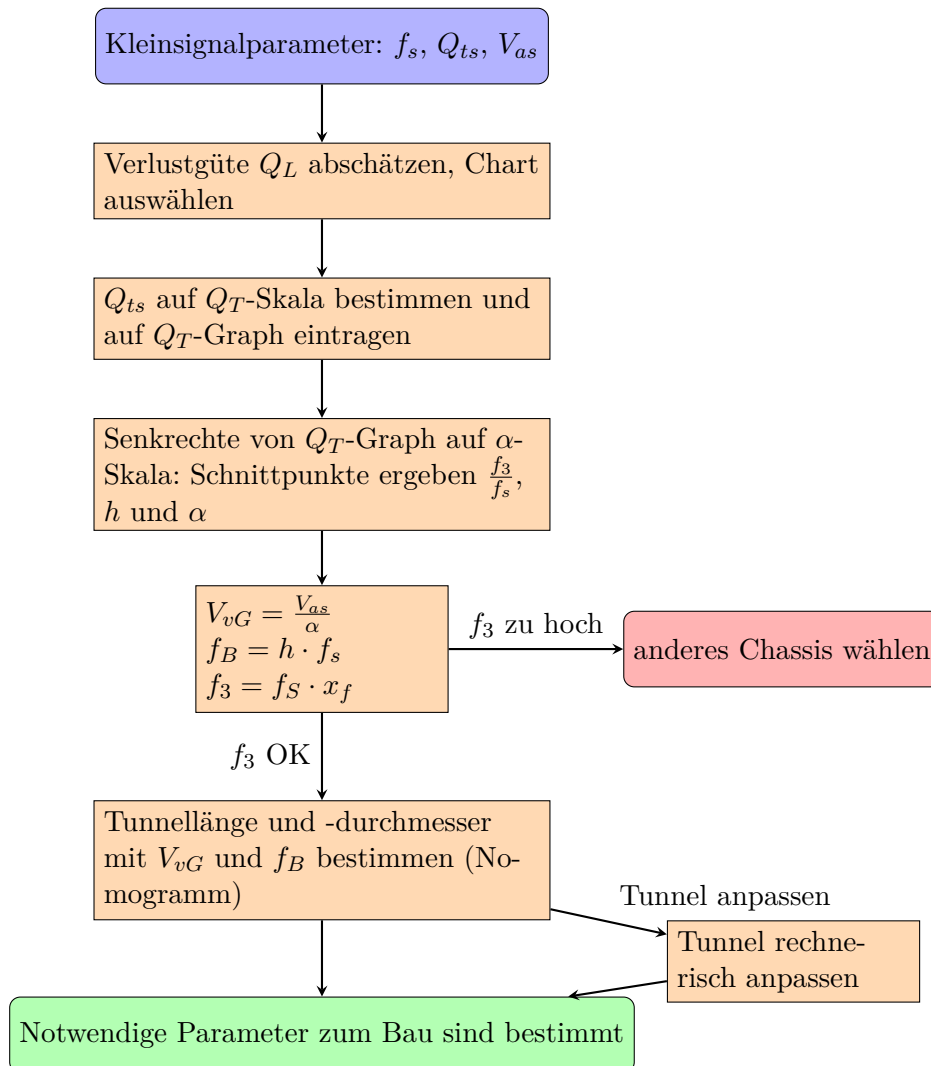


Abbildung 6.3: Flussdiagramm zum Entwurf mit Konstruktionscharts bei gegebenem Chassis

### 6.1.3 Zusammenfassung des Entwurfs

Anhand all dieser Entwurfsvorgaben zeigt sich, dass nicht jedes Chassis für den Einbau in ein ventilertes Gehäuse geeignet ist. Diese Qualifikation hängt vor allem von der mechanischen Güte  $Q_{ms}$  ab, aber auch von der Kombination dieser mit weiteren Chassisparametern wie dem äquivalenten Volumen sowie der Resonanzfrequenz des Chassis.

Der Entwurf von Lautsprechern mit Konstruktionscharts bietet hier einige Vorteile. Bei gegebenen Chassis-Parametern ist der Entwurf sehr schnell und auch einfach, da das Arbeiten mit diesen Charts relativ intuitiv erfolgt. Auch ist hier keine teure Software notwendig, die wiederum eine gewisse Einarbeitungszeit und Fachwissen voraussetzt. Allerdings ergeben sich aus diesen Einfachheiten auch nicht zu vernachlässigende Nachteile gegenüber dem softwaregestützten Entwurf.

Durch den Einsatz von Konstruktionscharts ist der gesamte Entwurfsvorgang unflexibel und führt unter Umständen zu Schwierigkeiten im Tunnelentwurf. Während mithilfe des Tunnel-Nomogramms (Abbildung 6.2) die Abmessungen des Tunnels sehr schnell bestimmt sind, ist nicht garantiert, dass Rohre mit exakt diesen Abmessungen verfügbar sind. Auch sind bei diesen Charts gewisse Ablesefehler nicht oder nur schwer zu vermeiden, was das schlussendliche Ergebnis verändern kann. Mithilfe von Simulationssoftware ist es hingegen sehr einfach, Änderungen am Gehäuse vorzunehmen, da die Auswirkung einer Veränderung sofort ersichtlich wird. Es ist also durchaus sehr einfach möglich einen Lautsprecher mithilfe dieser Charts zu entwerfen, jedoch deutlich schwieriger den Lautsprecher bei vorgegebenem Chassis und Volumen zu optimieren.

## 6.2 Entwurf mit Simulationsergebnissen

Wie bereits zuvor angedeutet, steht neben dem Entwurf mithilfe von Konstruktionscharts auch die Planung mithilfe einer Simulation zur Verfügung. Dazu ist ein relativ ausführlicher Satz von Chassisparametern und die entsprechende Software (wie *LspCAD6*) erforderlich.

Ein wichtiges Kriterium an die finalen Lautsprecher für dieses Projekt ist die *Vergleichbarkeit*, was auch bedeutet, dass die Volumina der Gehäuse möglichst ähnlich groß sein sollten. Da zudem die Software *LspCAD6* sowie ein detaillierter Satz an Chassisparametern zur Verfügung stehen, wurde die Anpassung der Gehäuse nicht auf Basis der zuvor diskutierten Konstruktionscharts, sondern simulationsgestützt durchgeführt. Dadurch war es besser möglich, einen direkten Vergleich bei ähnlichem Volumen zwischen den beiden Lautsprechern anzustellen und so das Volumen für beide Lautsprecher möglichst optimal zu wählen. Zusätzlich konnte das Bassreflexrohr ausgehend vom Gehäusevolumen gewählt und verändert werden, um den Frequenzgang weitestgehend zu optimieren. Daher werden für die weiteren Planungsschritte die Dimensionierungsvorgaben aus Kapitel 4 und Kapitel 5 verwendet (siehe Tabelle 6.1). Das Sollvolumen wurde je um 1 l erhöht, da durch das Bassrohr und das Chassis zusätzlich Volumen im inneren der Box benötigt wird, das so berücksichtigt wird.

### 6.2.1 Auswahl der Bassreflexrohre

Bevor die Maße der eigentlichen Gehäuse festgelegt werden können, werden die Bassreflexrohre ausgewählt, da diese die Dimensionen genau so wie Chassis und Volumen beeinflussen. Aufgrund der Tiefe der Chassis wird vorerst eine maximale Rohrlänge von etwa 20 cm angenommen. Durch das Annehmen dieser maximalen Länge kann nun in *LspCAD6* der Radius des Rohrs abgestimmt und fixiert werden. Durch zusätzliches Anpassen der Rohrlänge (im *zugelassenen* Bereich) lässt sich ein Bereich für Radius und Länge des Rohrs *abstecken*. Mit diesen Richtwerten wurde im Internet nach Bassreflexrohren gesucht, die diese Anforderungen erfüllen und anschließend als

konkrete Werte in das Simulationstool eingetragen und überprüft.

Da für das B&C Chassis zwei Thiele-Small Datensätze vorhanden sind, wurde nach einem Rohr gesucht, das für beide Anordnungen anwendbar sein soll. Dazu eignen sich vor allem Bassreflexrohre mit veränderbarer Länge, da so bei fixiertem Radius die Länge des Basskanals (und dadurch  $f_B$ ) während der Messung immer noch angepasst werden kann. Aus Gründen der Vergleichbarkeit wurde daher auch für das Dayton Audio Gehäuse ein Rohr mit variabler Länge gesucht, was jedoch für diese Spezifikationen nicht zu finden war. Aus diesem Grund wurde ein System entworfen und mit einem 3D-Drucker gedruckt (siehe Abbildungen 6.4 und 6.5), bei dem durch den Bajonettverschluss ein Wechsel der Rohre schnell und ohne zusätzlichem Werkzeug möglich ist.

Die Radien wurden schließlich mit  $r_{Br,BC} = 55\text{mm}$  und  $r_{Br,DA} = 30\text{mm}$  fixiert (siehe Tabelle 6.1). So sind Helmholtzresonanzfrequenzen von  $74\text{Hz} \leq f_{B,BC} \leq 90\text{Hz}$  und  $40\text{Hz} \leq f_{B,DA} \leq 56\text{Hz}$  einstellbar.

Gehäuse	Rohr	Innenradius	$l_{min}$	$l_{max}$
B&C	Intertechnik BR100V/SW	55 mm	80 mm	150 mm
Dayton Audio	Gedrucktes Rohrsystem	18 mm	80 mm	200 mm

### 6.3 Festlegen der Maße

Nachdem in *LspCAD* mit verschiedenen Verhältnissen von Volumina und Bassreflexrohren für beide Chassis Betrachtungen angestellt wurden, kann das Design der Lautsprecherbox fixiert werden.

Die erste Anforderung an die Lautsprecher ist das *Volumen*. Dieses wurde mit jeweils 21 l für beide Chassis fixiert, um zusätzlich zu den geplanten 20 l das Volumen von Chassis und Bassreflexrohr zu berücksichtigen.

Anschließend muss sichergestellt werden, dass die *Chassis auf allen Seiten ausreichend Platz* haben. An der Front sollte ein gewisser *Rand* am Holz bleiben, da die verwendeten Holzplatten bei zu schmalen Rändern leicht ausbrechen können. Speziell auf seitliche Belastung (also parallel zur Membranebene) brechen **Mitteldichte Faserplatten** (MDF) relativ leicht, wie ein erster Bauversuch zeigte. Da das Chassis des B&C Chassis achteckig ist, ergeben sich die minimal notwendige Breite und Höhe aus dem Inkreisdurchmesser des Achtecks, welcher in etwa 208 mm beträgt. Mit diesen Anforderungen müssen die Fronten der Boxen mindestens 208 mm × 208 mm (B&C Chassis) und 205 mm × 205 mm (Dayton Audio Chassis) plus Ränder messen. Die gewählten Maße sollten daher unbedingt so gewählt werden, dass das Material über das Chassis hinausragt.

Die letzten Bauteile, die die Dimensionen der Boxen beeinflussen, sind die *Bassreflexrohre*, welche hier rückseitig eingebaut werden. Für die Bassreflexrohre wurde keine genau Länge fixiert, sondern Rohre variabler Länge ausgewählt. So kann wie in Kapitel 4 der Schalldruckpegelverlauf nachträglich weiter angepasst werden. Für die Außenmaße der Lautsprechergehäuse muss daher jeweils das längste Rohr mit  $l = 150\text{ mm}$  (B&C Chassis) und  $l = 200\text{ mm}$  (Dayton Audio Chassis) berücksichtigt werden, wobei hier die Länge des Rohrs inklusive einer einseitigen Längenkorrektur für das Chassisinnere (Abschnitt 6.1.2, Zusatz Tunnelbestimmung) mitberechnet werden muss. Daher ergeben sich die hier zu berücksichtigenden Längen zu  $l = 196,75\text{ mm}$  (B&C Chassis) und  $l = 225,5\text{ mm}$  (Dayton Audio Chassis). Zudem muss an diesem Punkt auch der Einbau von Chassis und Rohr berücksichtigt werden. Obwohl das für das B&C Chassis verwendete Bassreflexrohr mit  $d = 110\text{ mm}$  einen sehr großen Durchmesser hat, kann hier die Einbauhöhe so gewählt werden, dass Bassreflexrohr und Chassis *übereinander* liegen (siehe Abbildung 6.6 und Abbildung 6.8). Das Bassreflexrohr des Dayton Audio Chassis ist etwas dünner ( $d = 60\text{ mm}$ ),



was in diesem Fall vorteilhaft ist, da zwei separate Chassis verbaut werden müssen. So kann das Rohr in der Höhe *zwischen* den beiden Chassis platziert werden (siehe Abbildung 6.7 und Abbildung 6.9). Da für beide Konfigurationen die Kanallänge größer als die Chassistiefe ist, ergibt sich eine *minimale Tiefe* von 196,75 mm für das B&C Chassis, beziehungsweise 225,5 mm für das Dayton Audio Chassis.

Um diese minimalen Tiefen zu gewährleisten, muss die jeweilige Höhe nun so erweitert werden, dass der *vertikale Einbau* möglich ist. Das bedeutet die minimale Höhe des B&C Chassis ergibt sich durch 208 mm Chassishöhe und 110 mm Rohrdurchmesser zu  $h_{BC} = 318$  mm. Die minimal notwendige Höhe der Box für das Dayton Audio Chassis setzt sich aus Tieftonchassisdurchmesser (205 mm) und Hochtonchassisdurchmesser (110 mm) zu insgesamt  $h_{DA} = 315$  mm zusammen.

In Tabelle 6.1 sind diese minimal notwendigen Innenmaße sowie die tatsächlich gewählten Innenmaße, die auch die Sollvolumina von 21 l erfüllen, zusammengefasst.

	B&C Chassis		Dayton Audio Chassis	
	Minimum	Gewählt	Minimum	Gewählt
Sollvolumen	21 l		21 l	
Breite	208 mm	230 mm	205 mm	225 mm
Höhe	318 mm	357 mm	315 mm	367 mm
Tiefe	196,75 mm	255 mm	225,5 mm	255 mm
Leervolumen	20,94 l		21,06 l	
	Intertechnik BR100V/SW		Gedrucktes Rohrsystem	
Bassreflexrohr	$r_{Br} = 55\text{mm}$	$l_{min} = 80\text{mm}$ $l_{max} = 150\text{mm}$	$r_{Br} = 30\text{mm}$	$l_{min} = 80\text{mm}$ $l_{max} = 200\text{mm}$

Tabelle 6.1: Dimensionierung von Lautsprechern und Bassreflexrohren

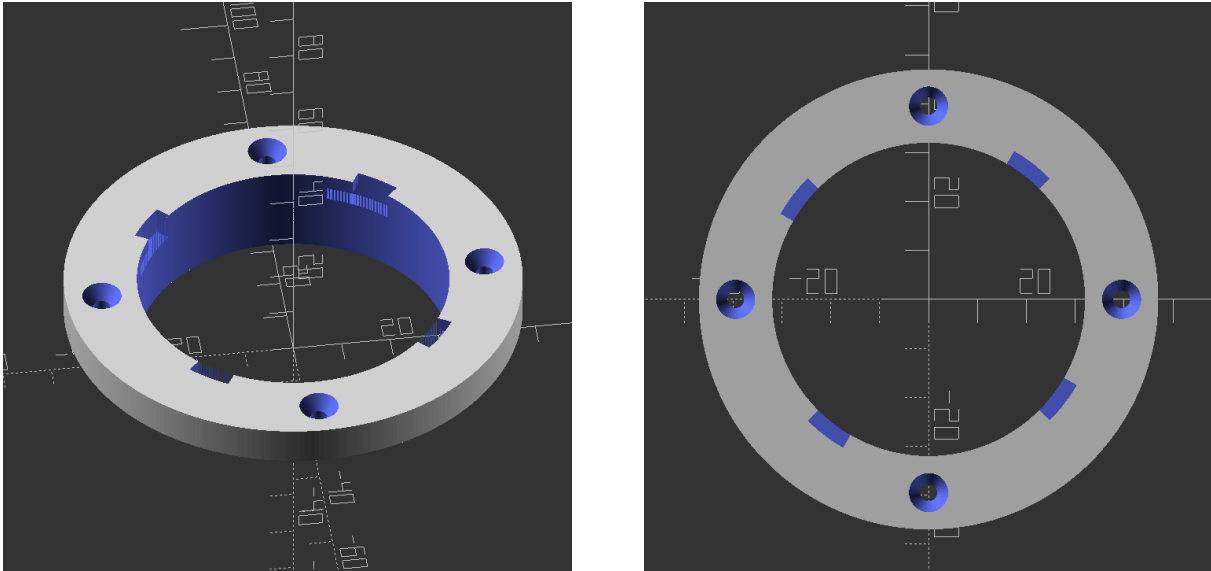


Abbildung 6.4: 3D Modell der Rohrhalterung (Angaben in mm)

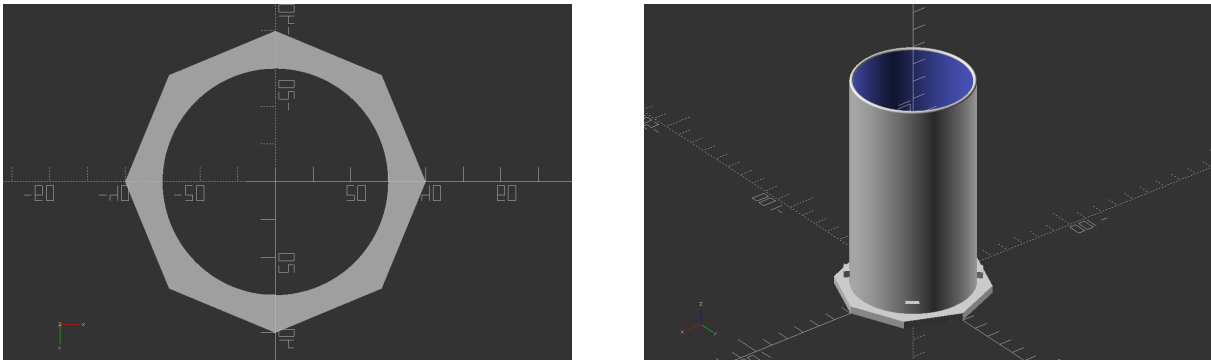


Abbildung 6.5: 3D Modell eines Rohrs ( $l_{Br} = 12\text{cm}$ , Angaben in mm)

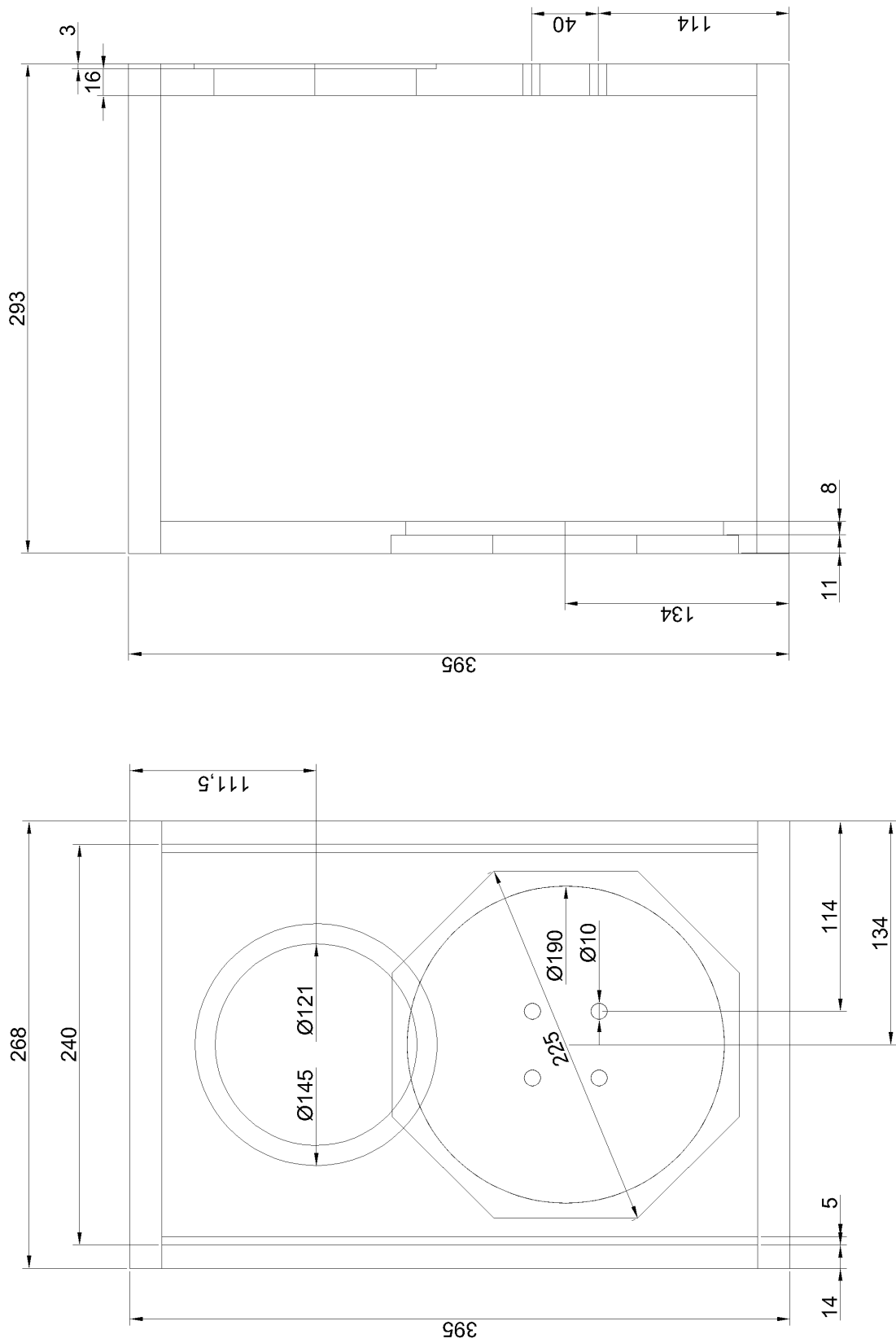


Abbildung 6.6: Bemaßung des B&C Gehäuses (links: Front, rechts: seitlich, von rechts)

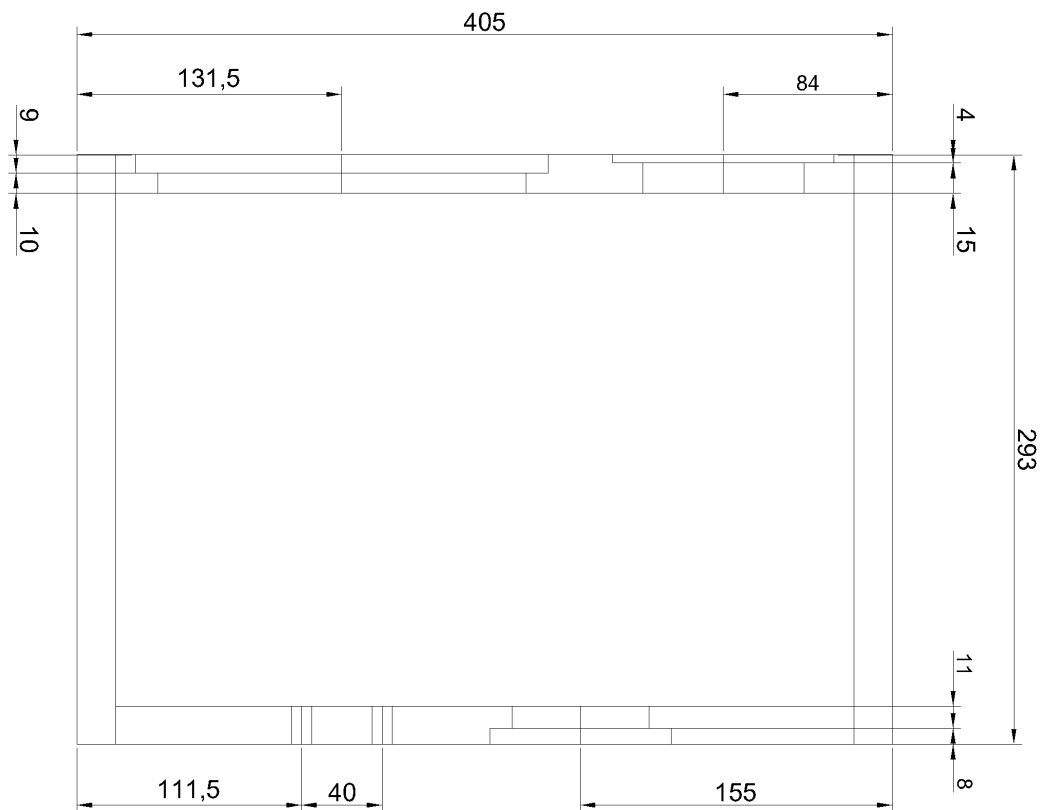
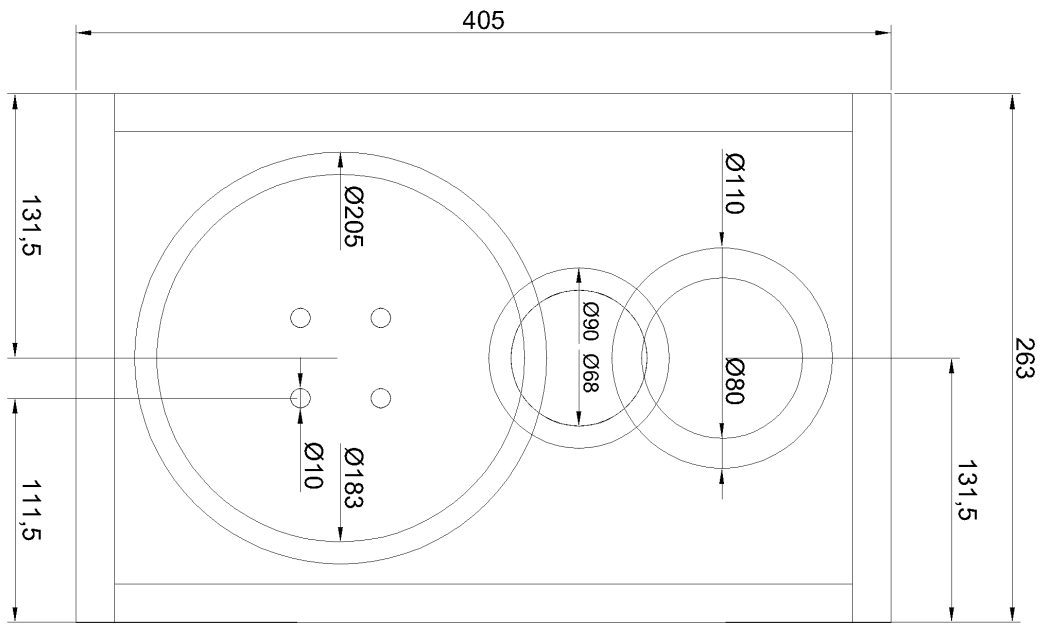


Abbildung 6.7: Bemessung des Dayton Audio Gehäuses (links: Front, rechts: seitlich, von rechts)

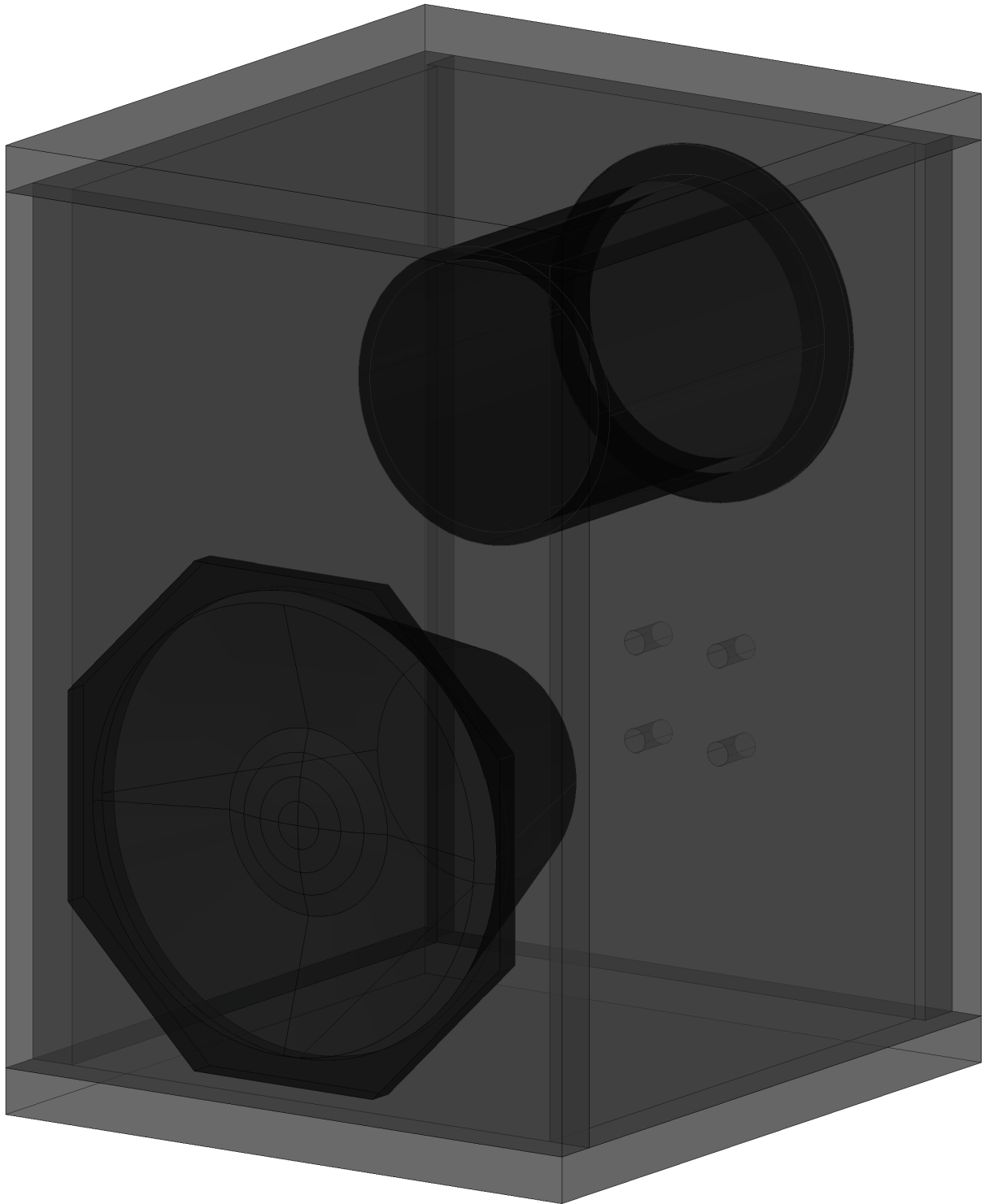


Abbildung 6.8: Modell des B&C Lautsprechers

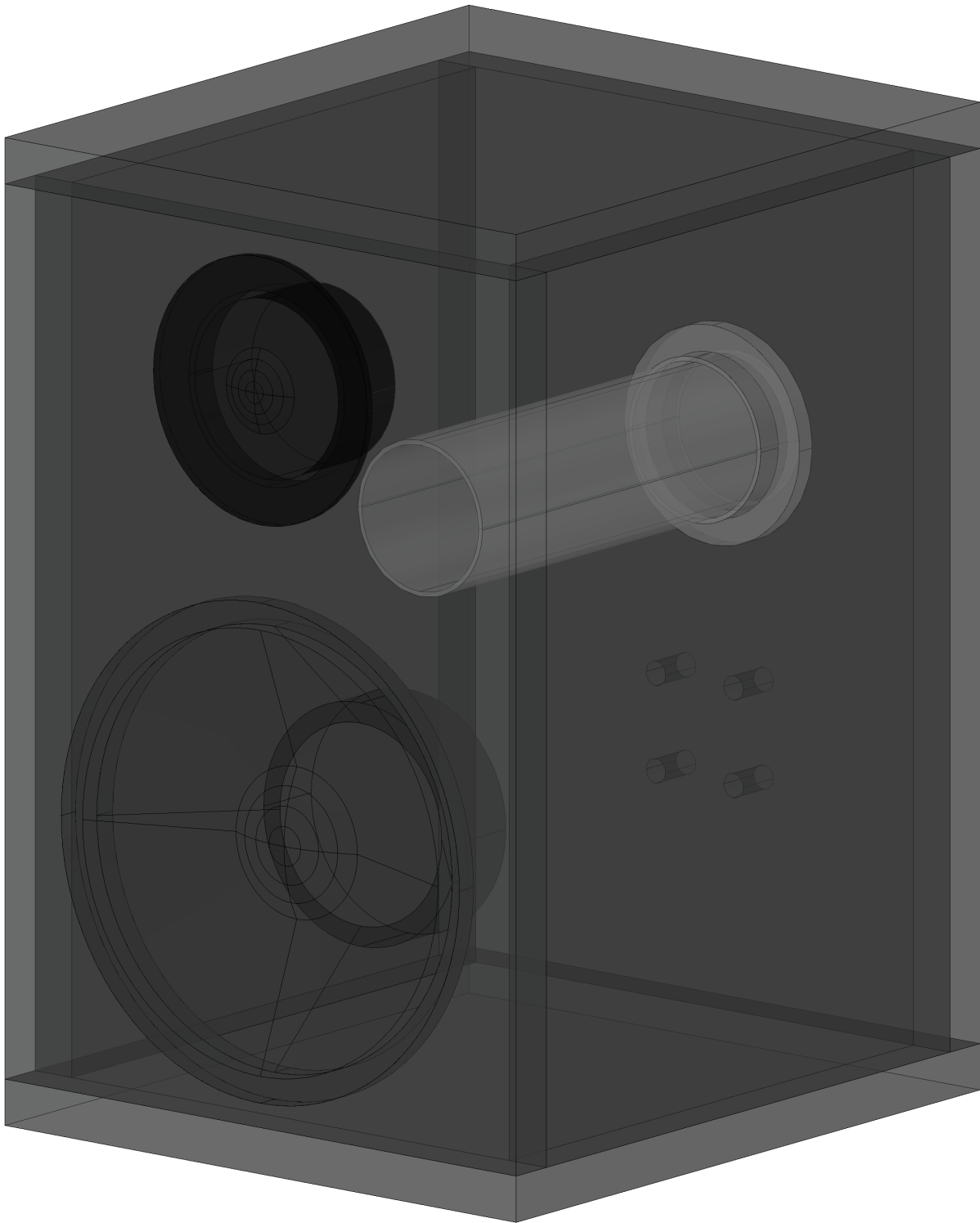


Abbildung 6.9: Modell des Dayton Audio Lautsprechers

## 7

## Frequenzweiche

Um die Vergleichbarkeit der Lautsprecher zu erhalten, wurden 2 sehr ähnliche Frequenzweichen aufgebaut. Während die Impedanzkorrektur jeweils passend zum Chassis entworfen werden musste, wurde bei der Frequenztrennung auf ähnliche Trennfrequenzen geachtet ( $f_{c,BC} = 1,6\text{kHz}$ ,  $f_{c,DA} = 1,3\text{kHz}$ ). Die Frequenzweiche für das B&C Chassis wurde von Loacker-Schöch für die Arbeit *Entwurf von ventilierten Lautsprechern in modularem Design* ((10)) entworfen, in der auch die Herleitung der einzelnen Teile sehr ausführlich besprochen wird. Da die Frequenzweiche nicht das zentrale Thema dieser Arbeit ist, wird sie in dieser Arbeit nicht so detailliert behandelt.

### 7.1 Funktion der Frequenzweiche

Die Frequenzweiche besteht aus zwei größeren Teilen. Jeweils ein *Kanal* für den Hochtöner und den Tieftöner. Beide Kanäle bestehen wiederum aus je einem Filter zweiter Ordnung und der sogenannten Impedanzanpassung.

Das Filter übernimmt die Aufgabe der Frequenzaufteilung. Dadurch wird sichergestellt, dass nur die Signalanteile von jenem Chassis wiedergegeben werden, das in diesem Frequenzbereich eine geeignetere Übertragung bietet. Hierzu wurde eine Trennfrequenz von  $f_{c,BC} = 1,6\text{kHz}$  für das B&C Chassis beziehungsweise  $f_{c,DA} = 1,3\text{kHz}$  für die Dayton Audio Chassis definiert. Zusätzlich werden durch die spektrale Auftrennung des Signals die Chassis geschützt. Dieser Schutz betrifft vor allem das Hochtonchassis, da dieses bei Bespielung mit zu tiefen Frequenzen beschädigt oder zerstört werden kann. Um eine möglichst gute Trennung zu erreichen, wurden Filter 2. Ordnung verwendet, die eine Sperrdämpfung von  $-12\frac{\text{dB}}{\text{Okt}}$  aufweisen.

Die Impedanzanpassung stellt sicher, dass das Filter schließlich tatsächlich so funktioniert wie es gewünscht ist. In Abbildung 7.1 ist das elektro-mechanische Ersatzschaltbild eines Lautsprecherchassis zu sehen in dem eine nichtlineare Beschaltung nach den Chassisklemmen zu erkennen ist. Durch diese elektrischen Elemente wird das Filter *verzogen* und verhält sich nicht so wie es geplant ist. Um die korrekte Funktion der Filter zu gewährleisten, wird daher eine Impedanzanpassung des Filters an die in Abbildung 7.1 dargestellte elektro-mechanische Impedanz des dynamischen Wandler durchgeführt.

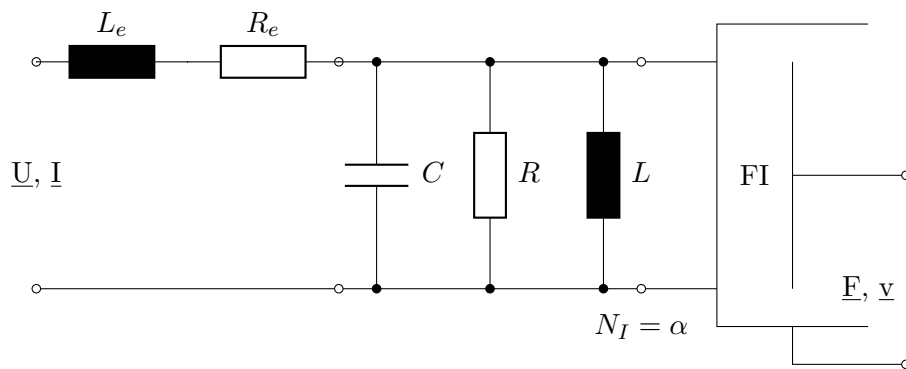


Abbildung 7.1: Allgemeines elektro-mechanisches Ersatzschaltbild eines Lautsprecherchassis (5)

## 7.2 Tieftonkanal

Der erste Teil des Tieftonkanals der Frequenzweiche bildet mit der Spule  $L_1$  und dem Kondensator  $C_1$  ein Tiefpassfilter zweiter Ordnung. Der zweite Teil besteht aus der Parallelbeschaltung des Chassis durch die Kompensationselemente  $R_K$  und  $C_K$ . Aufgrund dieser Kompensation kann die Grenzfrequenz für das unbeschaltete LC-Filter nach Gleichung 7.1 berechnet werden. Diese Gleichung gilt auch für das Hochpassfilter, das im Hochtonkanal (Abbildung 7.3) verwendet wird. Die hier benötigten Kompensationselemente werden nach Gleichungen 7.2 und 7.3 bestimmt.

$$f_c = \frac{1}{2 \cdot \pi \cdot \sqrt{L_1 \cdot C_1}} = 1,6 \text{ kHz} \quad (7.1)$$

$$R_K = R_e \quad (7.2)$$

$$C_K = \frac{L_e}{R_e^2} \quad (7.3)$$

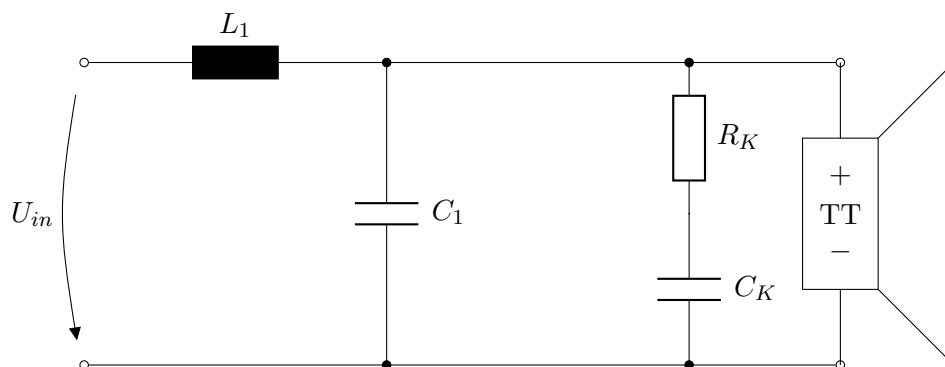


Abbildung 7.2: Frequenzweiche Tieftöner



Bauteilbezeichnung	Bauteilwert	
	B&C	Dayton Audio
$L_1$	1,0mH	2,2mH
$C_1$	10,0μF	6,8μF
$R_K$	5,6Ω	6,6Ω
$C_K$	33,0μF	54,0μF
$f_c$	1,6kHz	1,3kHz

Tabelle 7.1: Bauteilwerte zu Abbildung 7.2

### 7.3 Hochtönerausgang

Der Aufbau der Hochtönerfrequenzweiche ist dem der Tieftönerfrequenzweiche sehr ähnlich. Die ersten beiden Elemente bilden das zum vorher besprochenen Tiefpassfilter inverse Hochpassfilter und hat somit die gleiche Grenzfrequenz von  $f_c = 1,6kHz$ . Die Bauteilwerte für das Filter ( $L_1$ ,  $C_1$ ) werden daher ebenfalls mithilfe von Gleichung 7.1 bestimmt. Die Impedanzanpassung an das Chassis besteht hier aus drei/vier Elementen und ist etwas aufwendiger, übernimmt allerdings die selbe Aufgabe wie bereits besprochen. Der Drosselwiderstand  $R_D$  ist nur für das B&C Chassis notwendig, da der Schalldruckpegel des Hochtöners allgemein abgesenkt werden muss, da dieser sonst zu laut wäre. Für die Berechnung der restlichen Kompensationselemente am Hochtöner werden Gleichungen 7.4 bis 7.6 verwendet ( $f_{S,HT}$ : Resonanzfrequenz des Hochtönerchassis).

$$R_K = R_e + \frac{Q_{es} \cdot R_e}{Q_{ms}} \quad (7.4)$$

$$L_K = \frac{Q_{es} \cdot R_e}{2\pi f_{s,HT}} \quad (7.5)$$

$$C_K = \frac{1}{Q_{ms} \cdot R_e \cdot 2\pi f_{s,HT}} \quad (7.6)$$

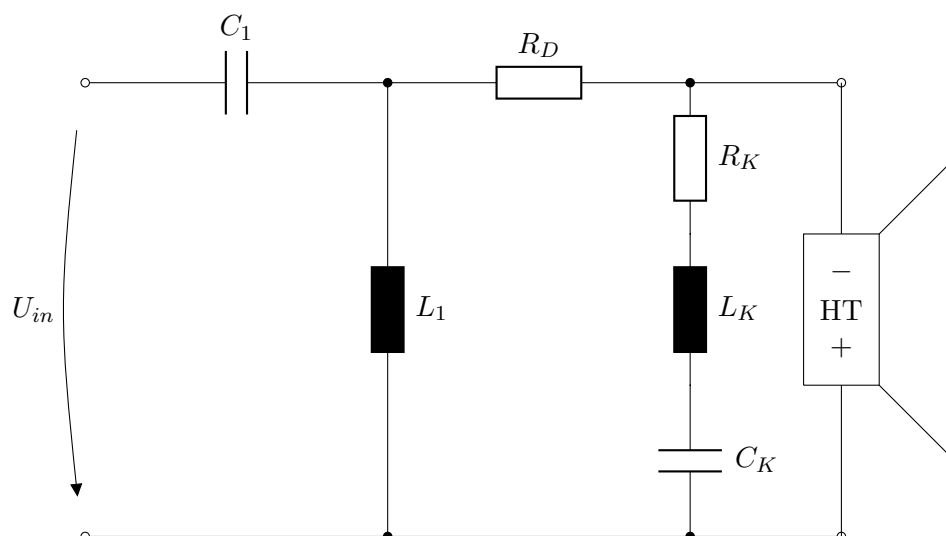


Abbildung 7.3: Frequenzweiche Hochtöner

Bauteilbezeichnung	Bauteilwert	
	B&C	Dayton Audio
$L_1$	$4,7mH$	$2,2mH$
$C_1$	$2,2\mu F$	$6,8\mu F$
$R_D$	$18,0\Omega$	kA
$R_K$	$10,0\Omega$	$15,0\Omega$
$L_K$	$1,5mH$	$1,2mH$
$C_K$	$6,8\mu F$	$47,0\mu F$
$f_c$	$1,6kHz$	$1,3kHz$

Tabelle 7.2: Bauteilwerte zu Abbildung 7.3

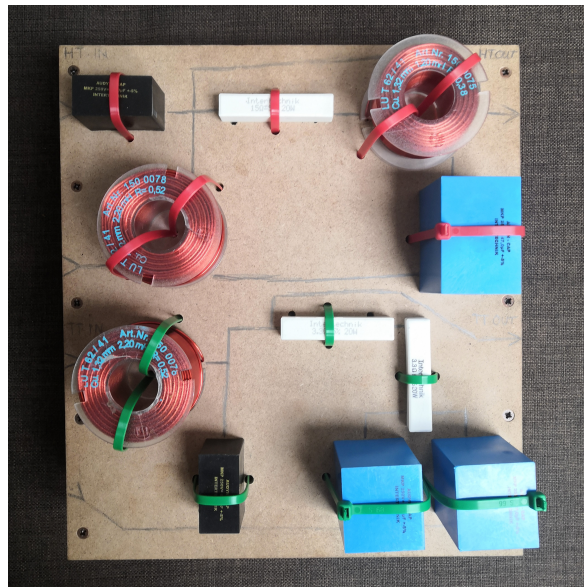
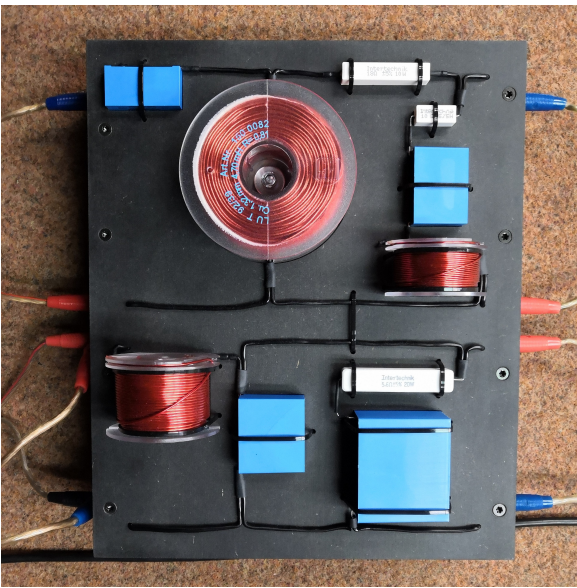


Abbildung 7.4: Aufgebaute Frequenzweichen (links: B&amp;C ((10)), rechts: Dayton Audio)

## 8

## Vermessen der Lautsprechersysteme

Für die messtechnische Analyse der beiden Lautsprechersysteme wird eine *simulierte Freifeldmessung* durchgeführt. Bei dieser Art der Schalldruckpegelmessung werden Nah- und Fernfeldmessungen miteinander kombiniert um einen Schalldruckpegelverlauf über den gesamten Hörbereich zu ermitteln. Die Fernfeldmessung ist allerdings nur bis zu einer unteren Grenzfrequenz ( $f_{uG}$ ) gültig, da diese Messung aufgrund von Reflexionen im Raum gefenstert werden muss. Aus diesem Grund wird diese Messmethode auch als *simulierte Fernfeldmessung* bezeichnet. Für den tieffrequenten Bereich wird eine Nahfeldmessung durchgeführt für die eine obere Grenzfrequenz  $f_{oG}$  gilt. Durch Verändern des Messabstandes ist daher sicherzustellen, dass ein Überschneidungsbereich dieser beiden Frequenzen erreicht wird. Nachdem alle Messungen korrekt in den Frequenzbereich transformiert wurden, können die einzelnen Schalldruckpegelverläufe zu einem Gesamtschalldruckpegelverlauf kombiniert werden.

Zur Messung des Schalldruckpegelverlaufs der Lautsprecher wird neben den zu untersuchenden Lautsprechern folgendes Equipment benötigt.

Hardware:

- Messmikrofon: NTI mit Kalibrator
- Mikrofonstativ
- Audioverstärker: QSC CX168 (Abbildung 8.1)
- Audiointerface: RME Fireface (Abbildung 8.1)
- Multimeter: Fluke
- diverse Kabel (entsprechend der Verbindungen in Tabelle 8.1)

Software:

- ARTA
- Audiointerface Treiber/Software (falls nötig): RME TotalMix



Abbildung 8.1: Messrack (von oben nach unten: Audioverstärker, Audiointerface, Klippel Distortion Analyzer)

## 8.1 Kalibrierung des Messaufbaus

Um nicht nur *qualitative* Messungen durchzuführen, sondern auch *quantitativ* korrekte Messergebnisse zu erzeugen, wird der Messaufbau *kalibriert*. Für diese Messungen wird eine kalibrierte Einkanalmessung durchgeführt.

Die Kalibrierung dieses Messaufbaus wird im Fenster *Soundcard and Microphone Calibration* durchgeführt. Dazu wird in der ersten Spalte (Soundcard full scale output) ein Sinussignal bei  $400\text{Hz}$  mit einem Pegel von  $-3\text{dB}$  erzeugt. Während die Messsoftware dieses Signal spielt, kann die Spannung an den Lautsprecherklemmen mit einem Multimeter gemessen werden. Da ein Schalldruckpegelverlauf in der Regel bei  $1\text{W}$  elektrischer Leistung am Chassis bestimmt wird, sollte in diesem Schritt die Verstärkung des Leistungsverstärkers entsprechend eingestellt werden. Die Leistung am Chassis kann über die Spannung eingestellt werden, da es sich bei beiden Chassis um ein  $8\Omega$  Chassis handelt.

$$U = R \cdot I \Rightarrow I = \frac{U}{R} \quad (8.1)$$

$$P = U \cdot I = U \cdot \frac{U}{R} = \frac{U^2}{R} \Rightarrow U = \sqrt{P \cdot R} \quad (8.2)$$

Durch Einsetzen von  $1\text{W}$  für die Leistung  $P$  und  $8\Omega$  für den Widerstand  $R$  in das umgeformte Ergebnis von Gleichung 8.2 ist die Soll-Messspannung mit  $U = \sqrt{1 \cdot 8} = 2,83\text{V}$  bestimmt. Da Audioverstärker nicht zwangsweise stufenlos einstellbar sind, wird hier die Verstärkung so eingestellt, dass die gemessene Klemmspannung möglichst nahe an  $2,83\text{V}$  liegt und anschließend (in Millivolt) in das Eingabefeld unter *Enter voltmeter (scope) value* eingetragen und mit *Estimate Peak Output mV* übernommen.

Die zweite Spalte kann für diese Kalibration vernachlässigt werden, da in diesem Schritt die Unterschiede zwischen den für die Zweikanalmessung verwendeten Kanälen abgeglichen werden würde.

Im letzten Schritt wird nun die Mikrofonempfindlichkeit ermittelt, da diese abhängig vom verwendeten Mikrofon ist. Dazu wird das Mikrofon an das Audiointerface angeschlossen und in einen passenden Mikrofonkalibrator gesteckt (Abbildung 8.2). Hierbei ist unbedingt zu beachten,



dass die Kalibratoröffnung exakt zum verwendeten Mikrofon passen muss oder ein passender Adapter verwendet wird um eine korrekte Kalibrierung zu ermöglichen. Der Pegel der vom Mikrofonkalibrator erzeugt wird muss nun unter *Attach sound calibrator* eingetragen werden und die Empfindlichkeit des Mikrofons wird über *Estimate Mic. Sensitivity* bestimmt.

Nachdem diese Schritte durchgeführt wurden, können alle Kabel entsprechend Abbildung 8.5 angeschlossen und die Impulsantworten gemessen werden.



Abbildung 8.2: Messmikrofon und Kalibrator während der Mikrofonkalibrierung

Audiointerface	Richtung	Peripheriegerät
In Left (Ch. 9)	«	Messmikrofon
Main Out	»	Audioverstärker
USB	«/»	PC mit <i>ARTA</i>
Audioverstärker	Richtung	Chassis
CH1	»	Chassis

Tabelle 8.1: Belegung der Ein-/Ausgänge von Audiointerface und Verstärker

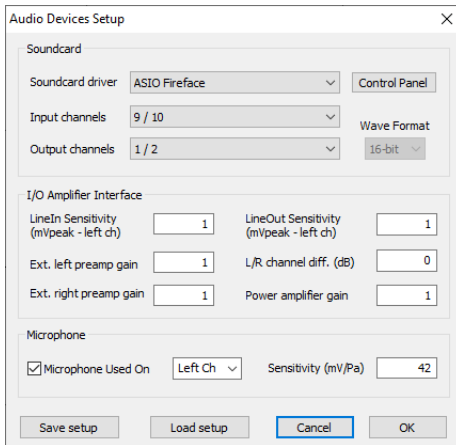


Abbildung 8.3: Audiogeräte-Einstellungen

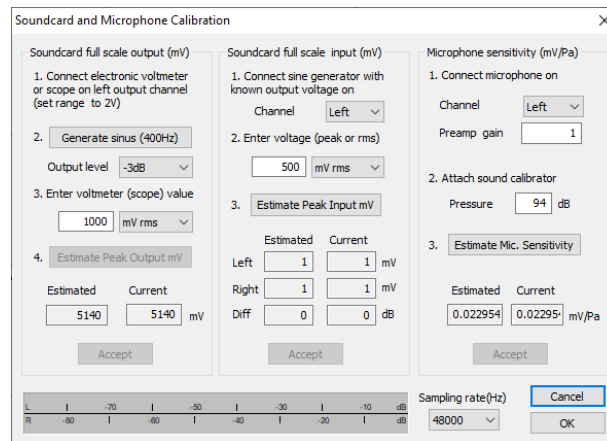


Abbildung 8.4: Kalibrierung des Messaufbaus (Mikrofonempfindlichkeit)

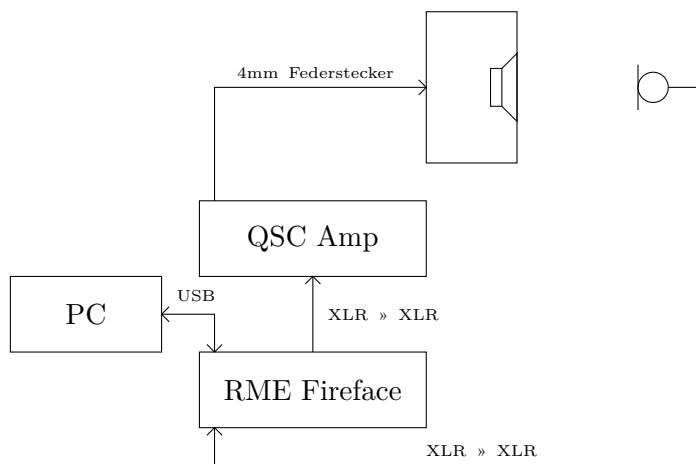


Abbildung 8.5: Signalflussplan für Messaufbau

## 8.2 Messen des Schalldruckpegelverlaufs

Die Messungen für die Schalldruckpegelverläufe werden an beiden Lautsprechergehäusen gleich durchgeführt und für insgesamt 7 verschiedene Bassrohrängen wiederholt. Daher wird der Messablauf für alle Messungen jeweils nur einmal besprochen.

Die Position des Lautsprechers wurde so gewählt, dass sowohl Mikrofon als auch Lautsprecher möglichst weit von der nächstgelegenen Wand entfernt sind (siehe Abbildung 8.6). Die Absorberwände im Aufnahmezimmer wurden keilförmig an den Seitenwänden verteilt aufgestellt und alle Vorhänge an den Wänden geschlossen. Weiters wurde sämtliches leicht bewegliches Mobiliar aus dem Aufnahmezimmer entfernt. Lediglich der Flügel konnte nicht aus dem Aufnahmezimmer entfernt werden, wurde aber wie in Abbildung 8.6 positioniert.

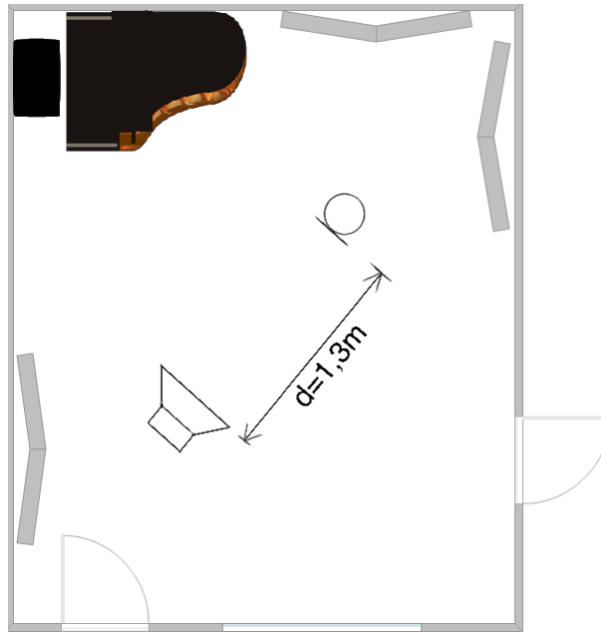


Abbildung 8.6: Messaufstellung im Aufnahmezimmer des SPSC Tonstudios

### 8.2.1 Messsignal

Zur Bestimmung des Schalldruckpegelverlaufs wird die Impulsantwort des Systems in den Frequenzbereich transformiert. Diese Messung ist deshalb ausreichend, weil ein Lautsprechersystem als *lineares* System betrachtet werden kann und so die Beschreibung durch die Impulsantwort ( $h_{LSP}(t)$ ) ausreichend ist. Da es sehr schwer ist, mithilfe eines einfachen Impulses das System ausreichend anzuregen, wird für das Anregungssignal ein logarithmischer Sweep ( $x_{Sweep}(t)$ ) verwendet. Dieses Anregungssignal weist eine höhere Energie auf und resultiert für die Messung mit diesem Anregungssignal in einer besseren *Signal-To-Noise-Ratio* (13). Um aus einem logarithmischen Sweep wieder eine Impulsantwort zu erhalten, wird die Antwort des Systems ( $y(t)$ ) auf den Sweep mit einem zum Anregungssignal inversen Sweep gefaltet. Diese Faltung von Systemantwort und inversem Sweep ergibt dann die *Impulsantwort* des Systems.

$$y(t) = x_{Sweep}(t) * h_{LSP}(t) \Rightarrow h_{LSP}(t) = y(t) * x_{Sweep}^{-1}(t) \quad (8.3)$$

Die so erhaltene Impulsantwort  $h_{LSP}(t)$  wird dann in den Frequenzbereich transformiert was den eigentlich gesuchten *Schalldruckpegelverlauf*  $H_{LSP}(f)$  des Lautsprechersystems ergibt.

$$H_{LSP}(f) = \mathcal{L}\{y(t) * x_{Sweep}^{-1}(t)\} = Y(f) \cdot X_{Sweep}(f) \quad (8.4)$$

Für die Messungen an den Lautsprechern wurde immer der selbe *logarithmische Sweep* verwendet. Das **Record**-Fenster in dem das Messsignal definiert wird ist in Abbildung 8.7 zu sehen. Für die Auflösung wurde der höchst mögliche Wert gewählt, um anschließend auch im Frequenzbereich die höchst mögliche Auflösung zu erhalten. Die Systemantwort wird je Messung 3 mal durchgeführt und anschließend gemittelt um eine weitere Verbesserung des Messsignals zu erreichen.

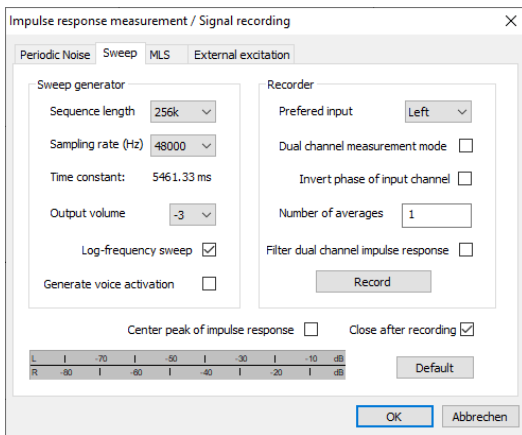


Abbildung 8.7: Record-Fenster, ARTA

Einstellung	Wert
Signalart	Logarithmischer Sweep
Signallänge	256k Samples ( $\approx 5,3s$ )
Samplingrate	48 kHz
Anzahl Mittelungen	3 Messungen
Messmethode	Einkanalig, kalibriert

Abbildung 8.8: Einstellungen des Messsignals

## 8.2.2 Fernfeldmessung

Bei der Fernfeldmessung ist der Abstand zwischen Membran und Mikrophonkapsel zu beachten. Bei zu großem Abstand ist die Zeit zwischen dem Ankommen von Direktschall und der ersten Reflexion von der nächstgelegenen Reflexionsfläche zu klein und die spektrale Auflösung wird zu gering. Es ist daher zu empfehlen, 8.5 nicht zu überschreiten.

Ebenfalls wichtig ist, dass die Mikrophonkapsel weit genug vom Lautsprecher entfernt steht, da die Messung sonst nicht im Fernfeld erfolgt. Diese Entfernung hängt von der *größten linearen Abmessung*  $M$  ab, welche im Fall dieser Lautsprecher die Raumdiagonale mit etwa 0,56 m ist (siehe Gleichung 8.9).

$$d_{FF} \geq 3 \cdot M \quad (8.5)$$

Aus Gleichung 8.5 folgt somit ein Messabstand von mehr als 1,68 m. Mit Gleichung 8.6 kann nun die untere Grenzfrequenz der Fernfeldmessung bestimmt werden, wobei  $h$  die Länge der Nebenachse eines Ellipsoids ist, das durch das Chassis, das Mikrophon und die nächst reflektierende Fläche beschrieben wird. Diese Flächen sind in diesem Fall Decke und Boden des Aufnahme-raums, weshalb  $h = 2,8$  m entspricht.

$$f_{uG} = \frac{c}{\sqrt{h^2 + d^2} - d} \quad (8.6)$$

Setzt man nun diese Werte in Gleichung 8.6 ein, so erhält man eine Grenzfrequenz  $f_{uG} = \frac{340}{\sqrt{2,8^2 + 1,68^2} - 1,68} = 214,5$  Hz mit der es zu keiner Überschneidung zwischen Nah- und Fernfeldmessung kommt. Um eine Überschneidung zu erreichen, muss daher der Messabstand  $d_{FF}$  auf 1,3 m ( $d_{FF} = 1,3m \approx 2,32 \cdot M$ ) verringert werden, woraus die untere Grenzfrequenz für die Fernfeldmessung

$$f_{uG} = \frac{340}{\sqrt{2,8^2 + 1,3^2} - 1,3} = 190,26$$
 Hz (8.7)

folgt. So ist ein Überlappungsbereich im Frequenzbereich gegeben, wobei der etwas zu geringe Messabstand nicht optimal für die Fernfeldmessung ist, was die Ergebnisse dieser beeinflussen kann. Da das Tonstudio des SPSC allerdings an Decke, Boden und Wänden stark bedämpft ist, wurde diese Einschränkung akzeptiert und der verringerte Messabstand von  $d_{FF} = 1,3m$  gewählt.



### 8.2.3 Nahfeldmessung am Chassis

In Abbildungen 8.9 und 8.10 ist die Aufstellung des Messmikrofons für die Nahfeldmessung an beiden Lautsprechern zu sehen. Dabei ist sicherzustellen, dass das Mikrophon möglichst nahe an der Membran positioniert ist, ohne dabei mit der Membran in Berührung zu kommen. Es empfiehlt sich daher, die Mikrofonposition während einer Kontrollmessung zu überprüfen. Zudem ist auf eine möglichst genaue Ausrichtung auf den Mittelpunkt der jeweiligen Membran zu achten.



Abbildung 8.9: Nahfeldmessung am B&C Chassis



Abbildung 8.10: Nahfeldmessung am Dayton Audio Chassis

Da die Nahfeldmessung für den tieffrequenten Bereich des Schalldruckpegelverlaufs verwendet wird, ist es notwendig eine *obere Grenzfrequenz* für die Gültigkeit dieser Messung zu definieren. Für ventilierte Lautsprechersysteme kann dazu Gleichung 8.8 verwendet werden ((5)).

$$f_{oG} = \frac{c}{M \cdot \pi} \quad (8.8)$$

Der Parameter  $M$  steht in dieser Gleichung für die *größte lineare Ausdehnung* der Lautsprechergehäuse, also die Raumdiagonale der Aussendimensionen. Mit den Maßen der Lautsprecher ergibt sich für

$$M \stackrel{B\&C}{\approx} \sqrt{268^2 + 293^2 + 395^2} \stackrel{Dayton\ Audio}{\approx} \sqrt{263^2 + 293^2 + 405^2} = 0,56483 \text{ m} \quad (8.9)$$

und damit als obere Grenzfrequenz für die Nahfeldmessung

$$f_{oG} = \frac{340}{0,56483 \cdot \pi} \approx 191,6 \text{ Hz}. \quad (8.10)$$

Das heißt auch, dass die Fernfeldmessung bis zu diesem Bereich oder zu noch tieferen Frequenzen verwendbar sein sollte. Diese Bedingung wird durch die zuvor bestimmte untere Grenzfrequenz  $f_{uG} = 190,26 \text{ Hz}$  erfüllt.

### 8.2.4 Nahfeldmessung am Bassrohr

Ebenso wie am Chassis ist auch eine Messung am Bassrohr notwendig. Da das Bassrohr allerdings nur im sehr tiefen Bereich wirksam ist, ist es hier ausreichend, lediglich eine Nahfeldmessung durchzuführen. Der Messaufbau ist hier der selbe wie zuvor bei der Nahfeldmessung am Chassis (Abschnitt 8.2.3).

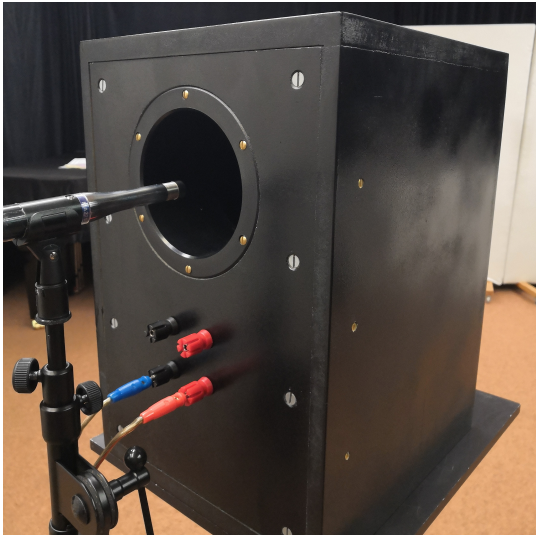


Abbildung 8.11: Nahfeldmessung am Bassrohr des B&C Lautsprecher

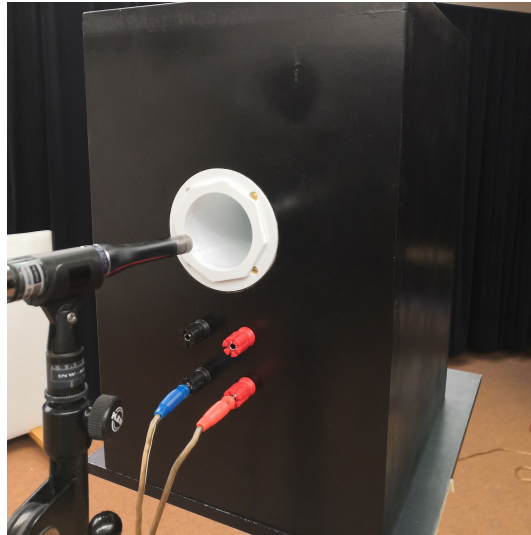


Abbildung 8.12: Nahfeldmessung am Bassrohr des Dayton Audio Lautsprecher

## 8.3 Auswertung der Messdaten

Die Auswertung der einzelnen Messungen wurde mithilfe von *ARTA* und Matlab in Kombination durchgeführt. Die Erstellung der Schalldruckpegelverläufe kann jedoch auch zur Gänze in *ARTA* ausgeführt werden, was sich vor allem anbietet, wenn nicht mehrere Messdaten betrachtet werden. Aufgrund der variablen Länge der Bassreflexrohre werden hier die Schalldruckpegelverläufe für Tief- und Hochtöner in *ARTA* erstellt und für die Aufarbeitung in Matlab exportiert.

### 8.3.1 Messung am Tieftonchassis

**Fernfeldmessung:** Zuerst wird die Fernfeldmessung geladen, wobei diese Messung *gefenstert* wird, da sonst auch Reflexionen in die Berechnung des Schalldruckpegels miteinfließen und diesen verfälschen können. Dieses Fenster wird durch die linke (Anfang des Fensters) und rechte (Ende des Fensters) Maustaste definiert (siehe Abbildung 8.13). Die Länge des Fensters wird in Millisekunden am linken unteren Rand angegeben und kann mit

$$T = \frac{\sqrt{h^2 + d^2} - d}{c} \quad (8.11)$$

bestimmt werden. Die Länge des Zeitfensters entspricht der Inversion von Gleichung 8.6, da Fensterlänge und untere Grenzfrequenz zusammenhängen ( $T = \frac{1}{f_{uG}}$ ) und hat für diese Messung eine Länge von 5,22 ms. Ist das Fenster korrekt definiert, wird die Impulsantwort mit dem Befehl `Analysis » Single-gated-smoothed frequency response / Spectrum` in den Frequenzbereich transformiert was ein neues Fenster mit dem Schalldruckpegelverlauf erstellt

(Abbildung 8.14). Da diese Messung in einem Abstand von 1,3m durchgeführt wurde, muss diese auf den normierten Abstand von 1m angepasst werden. Dies geschieht über den Skalierungsfaktor

$$ScaleLevel_{FF} = 20 \cdot \log\left(\frac{d_{Mess}}{1}\right) = 20 \cdot \log(1,3\text{m}) \approx 2,2789\text{ dB} \quad (8.12)$$

Dieser Korrekturwert kann über `Edit » Scale Level` angewandt werden. Für die spätere Anpassung der Nahfeldmessung sollte nun auch noch der Pegel an der Stelle abgelesen werden, an dem nachher die Kombination der Schalldruckpegelverläufe erfolgt, also im Bereich von  $f_{uG} \leq f \leq f_{oG}$ . Mit dem Befehl `Overlay » Set as overlay` wird dieser Schalldruckpegelverlauf nun in dieser Ansicht für die spätere Verwendung gespeichert und dieses Fenster kann geschlossen werden.

**Nahfeldmessung:** Im Anschluss wird im Hauptfenster die Nahfeldmessung am Bassreflexrohr geladen und mit `Edit » Scale Amplitude` entsprechend Gleichung 8.13 angepasst, bevor über `Load and Sum` die Nahfeldmessung am Chassis geladen und zur Nahfeldmessung des Bassrohrs addiert wird.

$$S_{Br \rightarrow Ch} = \frac{r_{Br}}{r_M} \quad (8.13)$$

Für die hier durchgeführten Messungen ergeben sich die Skalierungsfaktoren

$$S_{Br \rightarrow Ch, BC} = \frac{55\text{mm}}{83,5\text{mm}} = 0,6587 \quad S_{Br \rightarrow Ch, Da} = \frac{30\text{mm}}{81,5\text{mm}} = 0,3681. \quad (8.14)$$

die in dieser Form als Bruch in das entsprechende Textfeld der Dialogbox eingetragen werden können. Sind beide Messungen geladen, wird das Fenster so gewählt, dass es das gesamte Messsignal beinhaltet und wieder mit dem Befehl `Analysis » Single-gated-smoothed frequency response/Spectrum` in den Frequenzbereich transformiert. Hier ist nun ein deutlicher Pegelunterschied zu sehen, der korrigiert werden muss. Bevor diese Pegelkorrektur bestimmt und angewandt werden kann, muss der Einfluss der Schallwand berücksichtigt werden. Durch die Messung *direkt* am Chassis wird die Nahfeldmessung verfälscht. Im Normalfall tritt zu tiefen Frequenzen hin der Effekt der *Beugung* auf. Das bedeutet, dass während *hohe* Frequenzen nur nach vorne in den Halbraum abgestrahlt werden, werden *tiefe* Frequenzen abhängig von ihrer Frequenz um das Gehäuse herum *gebeugt* und die Abstrahlung erfolgt in den gesamten Raum vor und hinter dem Lautsprecher. Dadurch verringert sich natürlich die Lautstärke an der Hörposition *vor* dem Lautsprecher. Zum Zweck dieser Korrektur bietet die *ARTA* den Befehl `Edit » LF Box Diffraction`, dem Höhe und Breite der Schallwand, also der Vorderseite des Lautsprechers, übergeben werden. Anhand dieser Werte wird dann die Korrektur nach

$$W(f) = \frac{1 + j\frac{f}{f_0}}{2 + j\frac{f}{f_0}} \quad (8.15)$$

durchgeführt ((12), Seite 97), wobei  $f_0$  anhand der Schallwandgröße bestimmt wird. Nun kann an der zuvor gewählten Übernahmefrequenz mit dem zuvor notierten Pegel die Pegeldifferenz bestimmt werden und erneut in `Edit » Scale Level` eingetragen werden. Nachdem diese Skalierung durchgeführt wurde, muss erneut der Befehl `LF Box Diffraction` durchgeführt werden. So sollte sich an der Übernahmefrequenz nun eine perfekte Überschneidung ergeben.

**Kombination der Schalldruckpegelverläufe:** Um nun beide Schalldruckpegelverläufe miteinander zu kombinieren, wird der Befehl `Edit » Merge overlay above cursor` verwendet der bewirkt, dass sämtliche Werte oberhalb des gesetzten Cursors im aktiven Schalldruckpegelver-

lauf (in diesem Fall der Schalldruckpegelverlauf der Nahfeldmessung) durch das Overlay (in diesem Fall der Schalldruckpegelverlauf der Fernfeldmessung) ersetzt werden. Der so erhaltene Graph entspricht dann dem Schalldruckpegelverlauf des Tieftonchassis, die in Abbildungen 8.15 und 8.16 zu sehen sind.

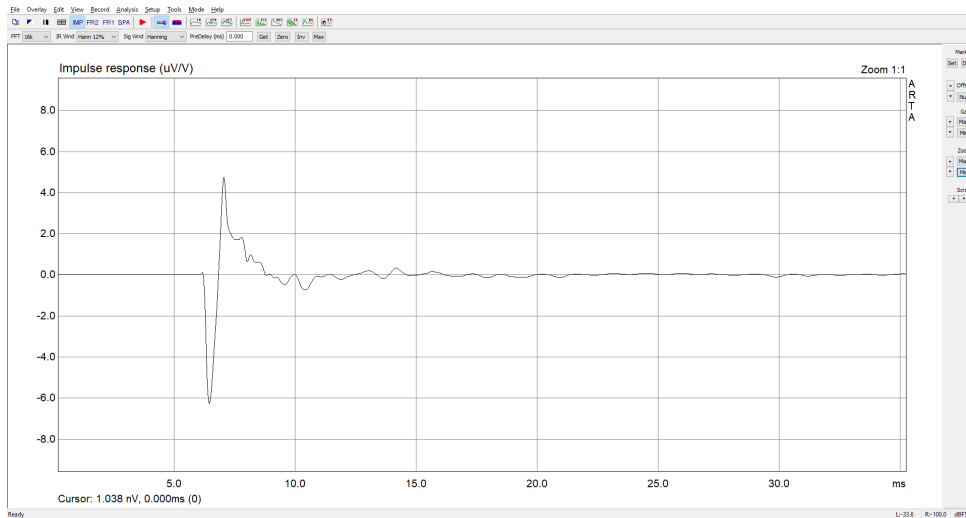


Abbildung 8.13: Hauptfenster: Impulsantwort ( $B\&C$ ,  $l_{Br} = 8\text{cm}$ ) in ARTA

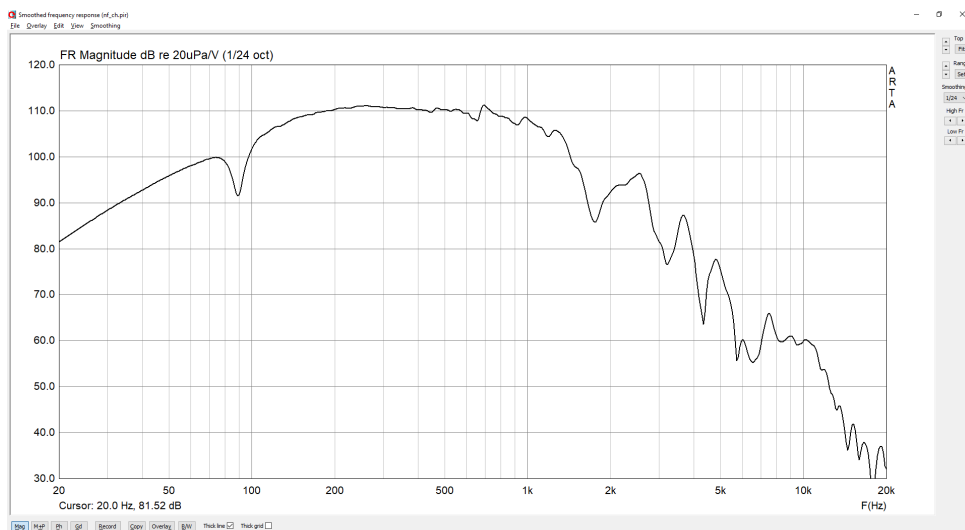


Abbildung 8.14: Schalldruckpegelverlauf ( $B\&C$ ,  $l_{Br} = 8\text{cm}$ ) in ARTA

### 8.3.2 Messung am Hochtonchassis

Für den Schalldruckpegelverlauf des Hochtonchassis wurde lediglich eine Fernfeldmessung durchgeführt. Zuvor wurde bereits die untere Grenzfrequenz für die Fernfeldmessung (Gleichung 8.6,  $f_{uG} = 190,26\text{Hz}$ ) ermittelt, die weit unterhalb der Trennfrequenzen der Frequenzweichen ( $f_{c,BC} = 1,6\text{kHz}$ ,  $f_{c,DA} = 1,3\text{kHz}$ ) liegt, was eine Nahfeldmessung am Hochtonchassis überflüssig macht. Die Fernfeldmessung wurde auf die selbe Weise durchgeführt wie die Fernfeldmessung am Tieftonchassis (Abschnitt 8.2.2). Auch die Auswertung der gemessenen Systemantwort wurde analog mit der selben Fensterlänge (Gleichung 8.11) und der selben Skalierung (Gleichung 8.12) ausgeführt.

Zur Auswertung der Schalldruckpegelverläufe in Matlab werden die Ergebnisse über **File » Export » ASCII File** als Textdateien exportiert und anschließend in Matlab geladen.

## 8.4 Ergebnisse der Messungen

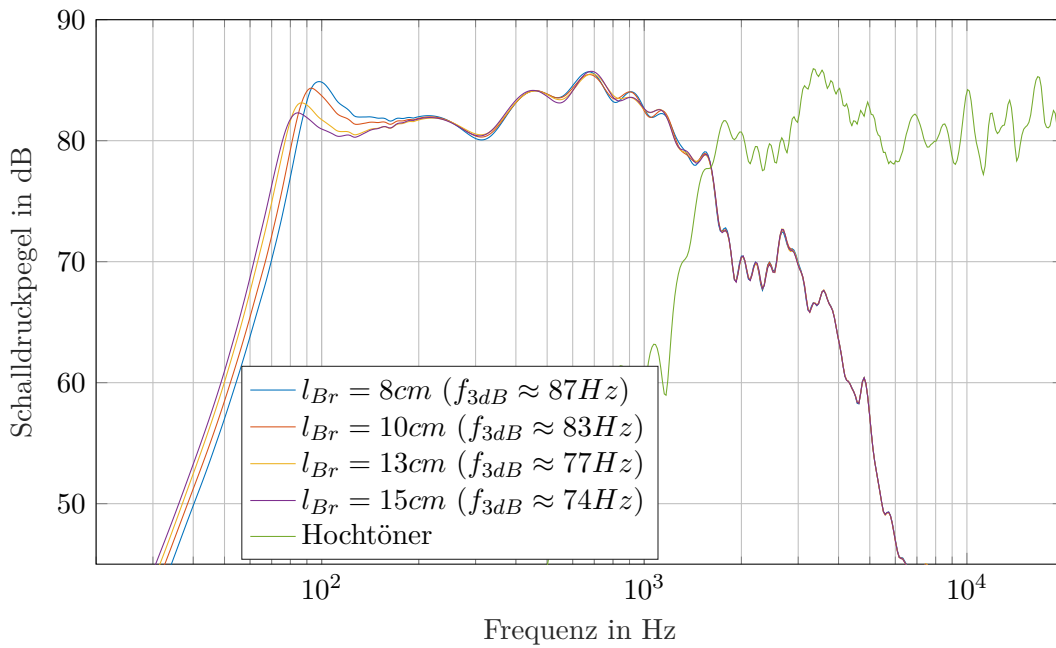


Abbildung 8.15: Gemessene Schalldruckpegelverläufe am B&C Chassis bei variabler Tunnellänge

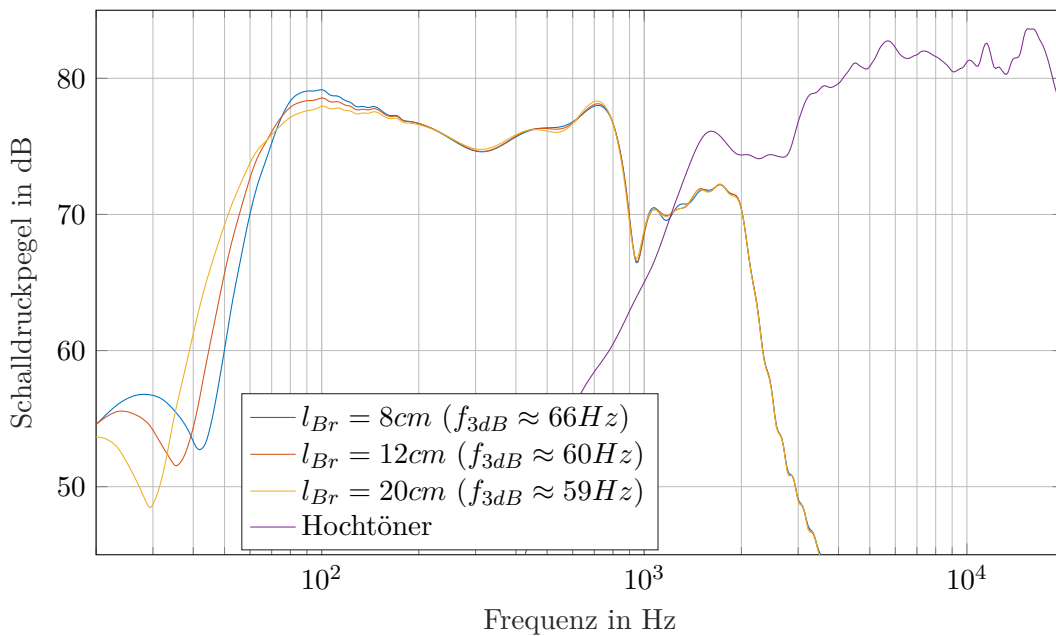


Abbildung 8.16: Gemessene Schalldruckpegelverläufe am Dayton Audio Chassis bei variabler Tunnellänge

## 9

## Zusammenfassung

### 9.1 Vergleich der Chassis

Bevor nun die eigentlichen Messergebnisse verglichen werden, werden auch die verwendeten Chassis einander gegenüber gestellt, da sie sich in ihren Bauweisen doch deutlich voneinander unterscheiden und damit gewisse Vor- oder Nachteile mit sich bringen.

Das *Ausgangschassis* vom Hersteller B&C ist in zweierlei Hinsicht besonders, oder zumindest stark unterschiedlich zum Dayton Audio Chassis. Einerseits, weil es sich um ein Koaxialchassis, bei dem das Hochtonchassis im Zentrum des Tieftonchassis sitzt. Während diese Bauweise den Vorteil der geringen Aussenmaße hat, ist diese Chassisform deutlich aufwendiger im Bau als *einfache* Chassis. Diese zusätzliche Komplexität resultiert schlussendlich auch in einem höheren Preis für das Chassis. Da der Kosteneinsatz im Lautsprecherbau ebenso wie das finale Klangerlebnis (und weitere Faktoren) von Interesse sind, ist die Entscheidung der Chassiswahl unter diesem Aspekt sehr situationsbedingt. Von Vorteil ist bei dieser Chassisart ebenso das Abstrahlverhalten. Während bei Mehrwegsystemen durch die räumliche Verteilung der Chassis eine *Drehung* der Abstrahlrichtung erfolgen kann, muss dieser Aspekt für Lautsprecher mit Koaxialchassis nicht weiter berücksichtigt werden (solange zum Koaxialchassis keine weiteren Chassis verbaut werden).

Die zweite Besonderheit ist die höhere Steifigkeit der Membranaufhängung von  $Q_{ms,BC} = 4,1$  ((2)) im Vergleich zur Steifigkeit  $Q_{ms,DA} = 3,06$  des Dayton Audio Chassis ((3)). Diese größere Steifigkeit erfordert ein ebenso steiferes Luftvolumen im Lautsprechergehäuse und resultiert schließlich in einem kleinen Gehäusevolumen. Für das weichere Dayton Audio Chassis wäre ein größeres Volumen von etwa 50 L deutlich besser geeignet. Das heißt durch eine weitere Auflockerung der Anforderungen im Sinne eines größeren Lautsprechergehäuses wäre mit den Dayton Audio Chassis eine noch tiefere Systemgrenzfrequenz erreichbar gewesen.

### 9.2 Vergleich der Gehäusearten

So wie nun die Unterschiede der Chassis diskutiert wurden, sollen hier auch die Unterschiede sowie Vor- und Nachteile der beiden Gehäusearten diskutiert werden. Dabei fließen einerseits messtechnische Erkenntnisse, sowie andererseits persönliche Erfahrungen mit ein. Da die hier produzierten Lautsprechergehäuse auf einer früheren Projektarbeit aufbauen, wird auch die Bauform dieser früheren Arbeit zuerst besprochen.

Der offensichtlichste Unterschied und damit auch Nachteil von Basshornlautsprechern ist die Größe. Für eine ordentliche Anpassung im tieffrequenten Bereich muss die Hornöffnung sehr groß und das Horn sehr lang sein. Die Hornlänge lässt sich zwar durch ein exponentiell verlaufendes Rohr verringern, bleibt allerdings weiterhin sehr groß. Weiter muss das Horn berechnet und auch entsprechend der Berechnung sehr genau aufgebaut werden, was die Baukomplexität des Gehäuses deutlich anhebt und ein gewisses handwerkliches Geschick verlangt. Die Komplexität der Bestimmung von Hornlänge und Mündungsfläche ist dabei auch von der Art des Horns abhängig. Ist das Gehäuse mit Horn allerdings entworfen und aufgebaut, bringt diese Gehäuseform

natürlich einige Vorteile mit sich. So ist beispielsweise der Wirkungsgrad eines Hornlautsprechers sehr hoch, speziell im Vergleich mit ventilierten Gehäusen die allgemein einen sehr geringen Wirkungsgrad aufweisen. Informiert man sich im Internet, scheint der allgemein Tenor der zu sein, dass Hornlautsprecher (nicht nur aufgrund der Größe sondern auch klanglich) wenig für kleine Räume geeignet sind, in größeren Räumen allerdings sehr gut klingen und einen sehr glatten Frequenzgang aufweisen (vgl. (1), Kapitel 8).

Dem gegenüber steht das ventilierte Gehäuse. Dieses Gehäuse ist deutlich kleiner, da kein zusätzliches Volumen für eine Hornkonstruktion notwendig, jedoch das Volumen des Bassreflexrohres zu berücksichtigen ist. Aufgrund dieser geringen Größe ist auch die Anwendung von Lautsprechern dieser Art in kleinen Räumen leichter. Zudem ist der Bau des Gehäuses deutlich simpler, da lediglich eine zusätzliche Öffnung für das Bassreflexrohr notwendig ist. Betrachtet man allerdings die Abstimmung von Chassis und Bassrohr, vor allem in Kombination mit tatsächlich verfügbaren Bassreflexrohren, wird hier der Entwurf deutlich aufwendiger. So war es beispielsweise nötig, ein passendes Rohr für das Gehäuse zu den Dayton Audio Chassis zu entwerfen und herzustellen. Diese Problematik ist natürlich für ein fixiertes Rohr etwas entschärft, trotzdem sind Bassreflexrohre nur in *diskreten* Radien erhältlich, was berücksichtigt werden muss. Entgegen dem Wirkungsgrad eines Hornlautsprechers, der durchaus im zweistelligen Prozentbereich liegen kann ((5)), ist der Wirkungsgrad eines Bassreflexlautsprechers etwa um den Faktor 10 geringer. Außerdem ist bei Bassreflexlautsprechern bereits beim Chassiskauf verstärkt darauf zu achten, welches Chassis gewählt wird, da sich hier bereits große Unterschiede für das Endprodukt ergeben. Klanglich wird Bassreflexlautsprechern nachgesagt dass sie zwar in kleinen Räumen relativ gut klingen, im Allgemeinen jedoch einen wenig linearen Frequenzgang aufweisen, was durch Abbildungen 8.15 und 8.16 bestätigt wird.

### 9.3 Vergleich von Simulation und Schalldruckpegelmessung

Nachdem nun sowohl Chassis als auch Gehäusearten diskutiert und verglichen wurden, ist es ebenso interessant, die Simulationen, die in Kapitel 4 und Kapitel 5 angestellt wurden, mit den tatsächlichen Messergebnissen aus Kapitel 8 zu vergleichen. Zur besseren Vergleichbarkeit zwischen Simulationsergebnissen und Messergebnissen wurden die Absolutpegel der Simulationen so korrigiert, dass eine gewisse Überdeckung mit der Schalldruckpegelmessung gegeben ist.

In Abbildung 9.1 ist eine eindeutige Ähnlichkeit zu den Simulationsergebnissen zu sehen. Während die untere Grenzfrequenz eher mit der Grenzfrequenz der Simulation mit den gemessenen Parametern übereinstimmt in der auch eine leichte Überhöhung erkennbar ist, ist ab etwa 400Hz eine eindeutig stärkere Ähnlichkeit zur Simulation mit den Herstellerparametern zu sehen. Nicht nur ist die Resonanzüberhöhung durch die Frequenzweiche im Bereich um etwa 750Hz, sondern auch der Pegelabfall oberhalb dieser Resonanz klar zu erkennen.

Auch in Abbildung 9.2 ist eine deutliche Vergleichbarkeit zwischen Simulation und Schalldruckpegelmessung zu erkennen, vor allem die sehr ähnliche untere Flanke. Deutlich steiler als erwartet fällt die Sperrdämpfung direkt unterhalb der Systemgrenzfrequenz ab etwa 60 Hz aus.



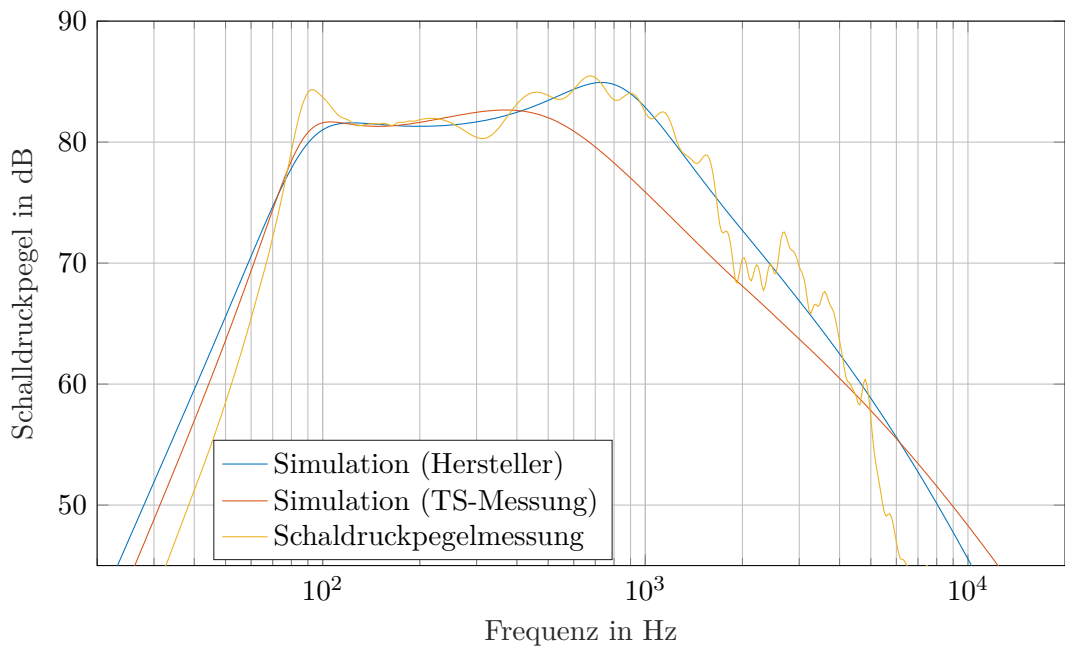


Abbildung 9.1: Vergleich von Simulation und Messung bei  $l_{Br} = 10\text{cm}$  (B&C)

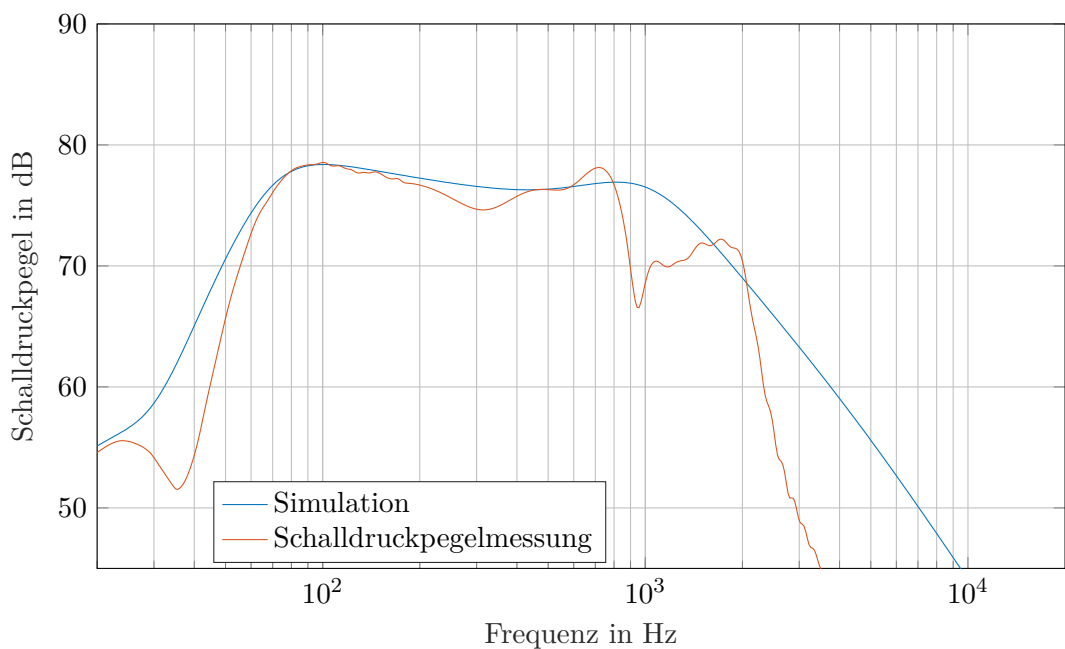


Abbildung 9.2: Vergleich von Simulation und Messung bei  $l_{Br} = 12\text{cm}$  (Dayton Audio)

## 9.4 Vergleich der Lautsprecher

Anhand der Messergebnisse in Abbildungen 8.15 und 8.16 sind bereits einige Erkenntnisse erhältlich. Einerseits kann man den Vergleich zum Hornlautsprecher aus (1) (Abbildung 9.3) anstellen. Dabei zeigt sich dass sich rein durch die Gehäuseart nicht unbedingt eine Verbesserung einstellt, was unter anderem aufzeigt, dass unterschiedliche Gehäuse unterschiedlich gut für ein Chassis geeignet sind. Vielmehr zeigt sich jedoch, dass die richtige Kombination aus Chassis und Gehäuse das Ergebnis maßgeblich verändert. So konnte durch die Wahl der Dayton Audio Chassis das Wiedergabeverhalten des Lautsprechers im tieffrequenten Bereich spürbar verbessert werden,

wobei das Gehäusevolumen ident blieb. Wäre an dieser Stelle ein größeres Volumen verwendet worden, das dem weicheren Chassis besser entsprechen würde, könnte eine noch tiefere Systemgrenzfrequenz erreicht werden. Zum Zwecke der Vergleichbarkeit der Lautsprecher wurde jedoch am Volumen von 20l festgehalten.

Abschließend wurde natürlich auch ein subjektiver Hörtest durchgeführt, bei dem die Lautsprecher mit Musik bespielt wurden.

**B&C Lautsprecher:** Die B&C Lautsprecher klingen sehr definiert und angenehm, vor allem sind die Höhen sehr klar und angenehm. Wie die Simulation und auch die Messungen bereits erwarten ließen, ist die Basswiedergabe dieser Lautsprecher schwächer als wünschenswert. Subjektiv war die Musikwiedergabe bei längerem Bassreflexrohr angenehmer, was vermutlich an der etwas tieferen Systemgrenzfrequenz ( $f_{3dB} \approx 75Hz$ ) und geringeren Überhöhung bei dieser Frequenz liegt.

**Dayton Audio Lautsprecher:** Dem gegenüber steht der Dayton Audio Lautsprecher. Durch das speziell gewählte Chassis ist die Wiedergabe tieffrequenter Anteile deutlich verbessert. Die Musikwiedergabe war für größere Rohrlängen angenehmer als bei kurzen, da das Klangbild ausgewogener erschien. Der Hochtöner war jedoch im Verhältnis zum Tieftöner lauter als bei dem B&C Lautsprecher was auch in den Messergebnissen erkennbar ist (Abbildung 8.16).

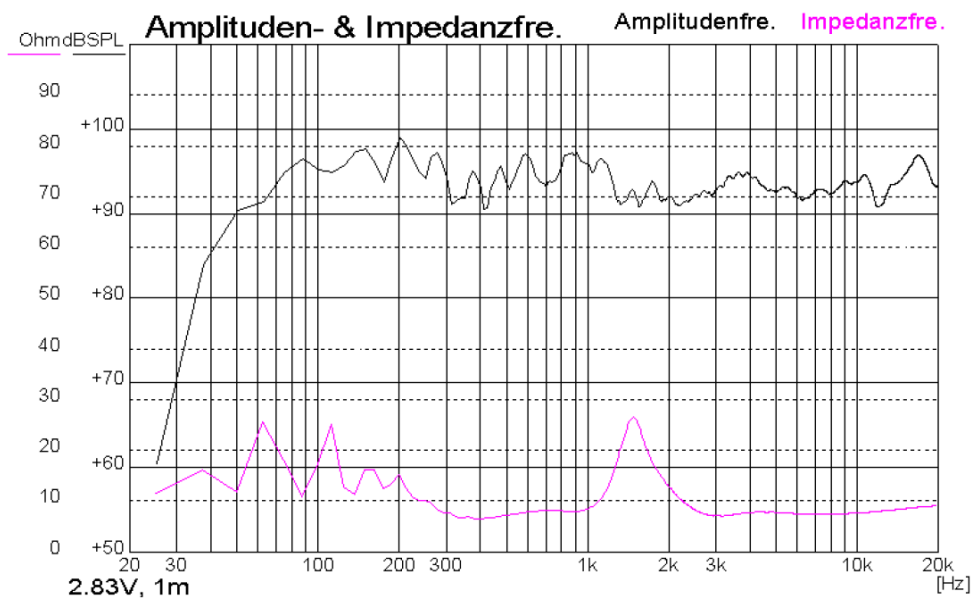


Abbildung 9.3: Schalldruckpegelverlauf des Hornlautsprechers ((1), S. 69)

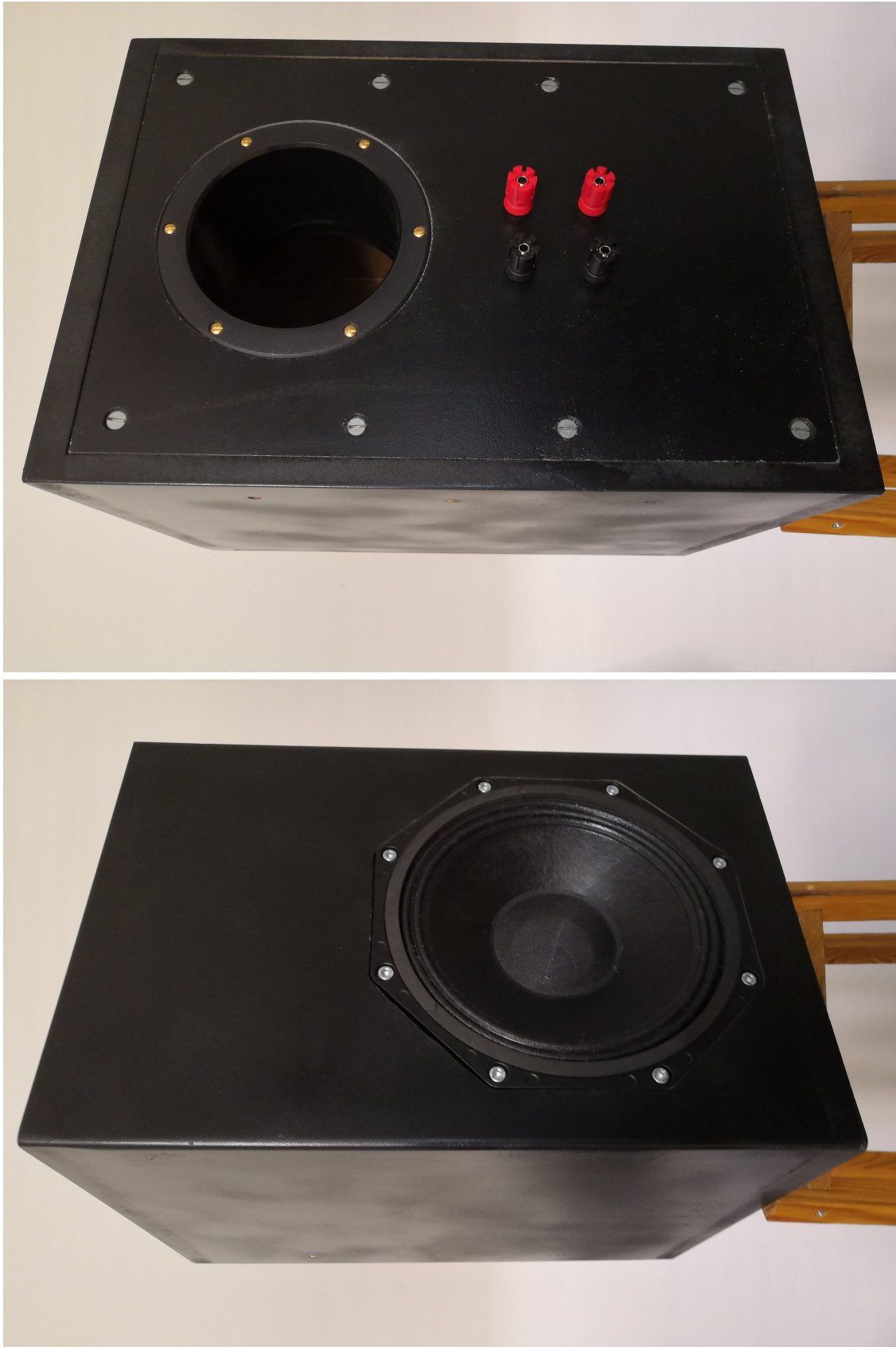


Abbildung 9.4: Lackierter B&C Lautsprecher





Abbildung 9.5: Lackierter Dayton Audio Lautsprecher

# 10

## Appendix

Parameter	Bezeichnung	Beschreibung
$S_d$	Membranfläche	Akustisch effektive Membranfläche
$Bl$	Kraftfaktor	Faktor zur Beschreibung der Kraftübertragung der Schwingspule
$\eta_0$	Referenz-Systemwirkungsgrad	Wirkungsgrad, um Lautsprechersysteme in ihrer Effizienz zu vergleichen
$f_s$	Resonanzfrequenz Chassis	Frequenz, bei der Auslenkung und Schnelle der Membran maximal sind
$f_B$	Resonanzfrequenz ventilierten Gehäuses	Frequenz bei der der Schalldruckpegel hauptsächlich durch das Bassreflexrohr abgestrahlt wird
$L_e$	Induktivität der Schwingspule	
$M_{ms}$	Gesamte bewegte Masse	Masse der bewegten Teile des Chassis
$Q_{es}$	elektrische Güte	Dämpfung durch elektrische Komponenten
$Q_{ms}$	mechanische Güte	Dämpfung durch mechanische Komponenten
$Q_{ts}$	Gesamtgüte	Gesamte Dämpfung durch elektrische und mechanische Komponenten
$R_e$	Wirkwiderstand der Schwingspule	
$V_{vG}$	Gehäusevolumen	Nettoinnenvolumen des ventilierten Gehäuses
$V_{as}$	äquivalentes Volumen	Luftvolumen, das eine äquivalente Nachgiebigkeit/Steifigkeit wie die Membranaufhängung aufweist
$x_{max}$	größte lineare Auslenkung	maximale Auslenkung der Membran, bevor nichtlineare Effekte auftreten

Tabelle 10.1: Auflistung und Erklärung von Thiele-Small Parametern

# Abbildungsverzeichnis

2.1	Elektrisches Ersatzschaltbild eines dynamischen Lautsprechers im Bassreflexgehäuse (zusammengefasste Form) (5)	12
3.1	Chassis B&C 8CX21	13
3.2	Quantitative Impedanzkurve	14
3.3	Schematisches Konstruktionschart aus (11), S. 322	17
4.1	Hauptfenster <i>Edit</i>	20
4.2	Hauptfenster <i>Simulate</i>	20
4.3	Eingabe der Thiele-Small Parameter des Chassis (Tabelle 3.2, Spalte Herstellerangabe (2))	21
4.4	Eingabe der Gehäusedaten	21
4.5	Hauptfenster: <i>Edit</i>	22
4.6	Hauptfenster: <i>Simulate</i>	22
4.7	Eingabe der Thiele-Small Parameter (Tabelle 3.2, Spalte „Messwert“) des Chassis	22
4.8	Eingabe der Gehäusedaten	22
4.9	Simulierte Schalldruckpegelverläufe für verschiedene Tunnellängen	24
5.1	Speaker Analyzer Simulationsergebnis für B&C Chassis (Bessel Optimierung)	26
5.2	Speaker Analyzer Simulationsergebnis für Dayton Audio Chassis (Bessel Optimierung)	26
5.3	links: B&C 8CX21 rechts: Dayton Audio DC28F (oben, Hochtöner) und DC200 (unten, Tieftöner)	27
5.4	Simulierte Schalldruckpegelverläufe für diverse Tunnellängen	28
6.1	Konstruktionschart aus (11), S. 322	29
6.2	Nomogramm zur Bestimmung von Tunnelfläche und -durchmesser aus (8), S. 551	31
6.3	Flussdiagramm zum Entwurf mit Konstruktionscharts bei gegebenem Chassis	32
6.4	3D Modell der Rohrhalterung (Angaben in mm)	36
6.5	3D Modell eines Rohrs ( $l_{Br} = 12cm$ , Angaben in mm)	36
6.6	Bemaßung des B&C Gehäuses (links: Front, rechts: seitlich, von rechts)	37
6.7	Bemaßung des Dayton Audio Gehäuses (links: Front, rechts: seitlich, von rechts)	38
6.8	Modell des B&C Lautsprechers	39
6.9	Modell des Dayton Audio Lautsprechers	40
7.1	Allgemeines elektro-mechanisches Ersatzschaltbild eines Lautsprecherchassis (5)	42
7.2	Frequenzweiche Tieftöner	42
7.3	Frequenzweiche Hochtöner	43
7.4	Aufgebaute Frequenzweichen (links: B&C ((10)), rechts: Dayton Audio)	44
8.1	Messrack (von oben nach unten: Audioverstärker, Audiointerface, Klippel Distortion Analyzer)	46
8.2	Messmikrofon und Kalibrator während der Mikrofonkalibrierung	47
8.3	Audiogeräte-Einstellungen	48
8.4	Kalibrierung des Messaufbaus (Mikrofonempfindlichkeit)	48
8.5	Signalflussplan für Messaufbau	48
8.6	Messaufstellung im Aufnahmezimmer des SPSC Tonstudios	49
8.7	Record-Fenster, ARTA	50
8.8	Einstellungen des Messsignals	50
8.9	Nahfeldmessung am B&C Chassis	51

---

8.10	Nahfeldmessung am Dayton Audio Chassis . . . . .	51
8.11	Nahfeldmessung am Bassrohr des B&C Lautsprecher . . . . .	52
8.12	Nahfeldmessung am Bassrohr des Dayton Audio Lautsprecher . . . . .	52
8.13	Hauptfenster: Impulsantwort (B&C, $l_{Br} = 8cm$ ) in <i>ARTA</i> . . . . .	54
8.14	Schalldruckpegelverlauf (B&C, $l_{Br} = 8cm$ ) in <i>ARTA</i> . . . . .	54
8.15	Gemessene Schalldruckpegelverläufe am B&C Chassis bei variabler Tunnellänge .	56
8.16	Gemessene Schalldruckpegelverläufe am Dayton Audio Chassis bei variabler Tunnellänge . . . . .	56
9.1	Vergleich von Simulation und Messung bei $l_{Br} = 10cm$ (B&C) . . . . .	59
9.2	Vergleich von Simulation und Messung bei $l_{Br} = 12cm$ (Dayton Audio) . . . . .	59
9.3	Schalldruckpegelverlauf des Hornlautsprechers ((1), S. 69) . . . . .	60
9.4	Lackierter B&C Lautsprecher . . . . .	61
9.5	Lackierter Dayton Audio Lautsprecher . . . . .	62

# Tabellenverzeichnis

3.1	Belegung der Ein-/Ausgänge des Distortion Analyzer . . . . .	15
3.2	(Thiele-Small) Parameter des Chassis B&C 8CX21 . . . . .	18
5.1	Vergleich einiger (Thiele-Small) Parameter (B&C 8CX21; Dayton Audio DC200)	26
6.1	Dimensionierung von Lautsprechern und Bassreflexrohren . . . . .	35
7.1	Bauteilwerte zu Abbildung 7.2 . . . . .	43
7.2	Bauteilwerte zu Abbildung 7.3 . . . . .	44
8.1	Belegung der Ein-/Ausgänge von Audiointerface und Verstärker . . . . .	47
10.1	Auflistung und Erklärung von Thiele-Small Parametern . . . . .	63



# Literaturverzeichnis

- [1] W. Maurer, “Entwurf und Aufbau eines Basshornlautsprechersystems.”
- [2] Produktseite B&C 8CX21. [Online]. Available: <https://www.bcspeakers.com/en/products/coaxial/8-0/8/8cx21>
- [3] Produktseite Dayton Audio DC200. [Online]. Available: <http://www.daytonaudio.com/index.php/dc200-8-8-classic-woofer.html>
- [4] Produktseite Dayton Audio DC28F. [Online]. Available: <http://www.daytonaudio.com/index.php/dc28f-8-1-1-8-silk-dome-tweeter.html>
- [5] G. Graber and W. Weselak, “Elektroakustik Skript.”
- [6] W. Weissensteiner, “Angewandte Lautsprechermesstechnik im Klein- und Großsignalbereich am Beispiel des Klippel-Messsystems.”
- [7] Produktseite Klippel R&D System. [Online]. Available: <https://www.klippel.de/products/rd-system.html>
- [8] R. H. Small, “Vented-box loudspeaker systems-part 3: synthesis,” *Journal of the Audio Engineering Society*, vol. 21, no. 7, pp. 549–554, 1973.
- [9] *LspCAD 6*.
- [10] F. Loacker-Schöch, “Entwurf von ventilierten Lautsprechern im modularen Design.”
- [11] R. H. Small, “Vented-Box Loudspeaker Systems–Part 1: Small-Signal Analysis,” *Journal of the Audio Engineering Society*, vol. 21, no. 5, pp. 363–372, 1973.
- [12] *ARTA user manual*.
- [13] T. Sielaff, “Verfahren zur simulierten Freifeldmessung an elektroakustischen Übertragern,” *DAGA 2008 - Dresden*, p. 57, 2008. [Online]. Available: [http://pub.dega-akustik.de/DAGA\\_1999-2008/data/articles/003297.pdf](http://pub.dega-akustik.de/DAGA_1999-2008/data/articles/003297.pdf)