

---

# **BACHELORARBEIT**

---

Herr  
**Jonas Richter**

**Entwicklung und Konstruktion  
eines Breitbandlautsprecher-  
treibers**

**2020**

Fakultät: Medien

---

# **BACHELORARBEIT**

---

## **Entwicklung und Konstruktion eines Breitbandlautsprecher- treibers**

Autor:  
**Herr Jonas Richter**

Studiengang:  
**Media and Acoustical Engineering**

Seminargruppe:  
**MG16wA-B**

Erstprüfer:  
**Prof. Dr.-Ing. Michael Hösel**

Zweitprüfer:  
**M.Sc. Thomas Engelmann**

Einreichung:  
**Grimma, 24.01.2020**

# **BACHELOR THESIS**

---

## **Development and Construction of a Full Range Speaker Driver**

author:  
**Mr. Jonas Richter**

course of studies:  
**Media and Acoustical Engineering**

seminar group:  
**MG16wA-B**

first examiner:  
**Prof. Dr.-Ing. Michael Hösel**

second examiner:  
**M.Sc. Thomas Engelmann**

submission:  
**Grimma, 24.01.2020**

---

## **Bibliografische Angaben**

Richter, Jonas:

Entwicklung und Konstruktion eines Breitbandlautsprechertreibers

Development and Construction of a Full Range Speaker Driver

51 Seiten, Hochschule Mittweida, University of Applied Sciences,  
Fakultät Medien, Bachelorarbeit, 2020

## **Abstract**

Diese Bachelorarbeit behandelt die Entwicklung und Konstruktion eines Breitbandlautsprechertreibers sowie dessen Vermessung in einem eigens dafür angefertigtem Testgehäuse. Problematiken von dynamischen Lautsprechertreibern, insbesondere von Breitbandlautsprechertreibern sollen aufgezeigt und in den Entstehungsprozess mit eingebunden werden, sodass diese im Idealfall verbessert oder sogar vermieden werden können. Der entstehende Breitbandlautsprechertreiber kann zusätzlich zu Verständniszwecken des Funktionsprinzips eines dynamischen Wandlers genutzt werden.

# Inhaltsverzeichnis

<b>Inhaltsverzeichnis .....</b>	<b>II</b>
<b>Abkürzungsverzeichnis .....</b>	<b>IV</b>
<b>Formelverzeichnis .....</b>	<b>V</b>
<b>Abbildungsverzeichnis .....</b>	<b>VII</b>
<b>Tabellenverzeichnis .....</b>	<b>VIII</b>
<b>Danksagung.....</b>	<b>IX</b>
<b>1 Einleitung.....</b>	<b>1</b>
<b>2 Theoretische Grundlagen zu Breitbandlautsprechertreibern .....</b>	<b>2</b>
2.1 Lautsprecher nach dem elektrodynamischen Prinzip .....	2
2.2 Breitbandlautsprecher .....	4
2.3 Komponenten eines dynamischen Lautsprechers .....	5
2.3.1 Magneteinheit .....	5
2.3.2 Lautsprecherkorb .....	7
2.3.3 Schwingspule.....	7
2.3.4 Membran .....	12
2.3.5 Zentrierspinne und Sicke .....	13
<b>3 Materialfindung .....</b>	<b>15</b>
3.1 Magneteinheit .....	15
3.2 Lautsprecherkorb .....	18
3.3 Schwingspule.....	19
3.4 Membran.....	22
3.5 Zentrierspinne und Sicke.....	23
<b>4 Herstellung und Zusammenführung der einzelnen Baugruppen.....</b>	<b>24</b>
4.1 Herstellung der einzelnen Baugruppen .....	24
4.1.1 Magneteinheit .....	24
4.1.2 Lautsprecherkorb .....	26
4.1.3 Schwingspule.....	29
4.1.4 Membran .....	31
4.1.5 Zentrierspinne und Sicke .....	33
4.2 Zusammenführung der einzelnen Baugruppen.....	36

---

<b>5</b>	<b>Konstruktion eines Testgehäuses .....</b>	<b>38</b>
5.1	Messung des Lautsprechertreibers .....	38
5.1.1	Impedanzkurve .....	38
5.1.2	Thiele Small Parameter.....	40
5.2	Simulation des Testgehäuses .....	42
5.3	Herstellung des Testgehäuses .....	43
5.4	Messung des Testgehäuses .....	46
<b>6</b>	<b>Beurteilung des Klangs .....</b>	<b>50</b>
<b>7</b>	<b>Fazit und Ausblick .....</b>	<b>51</b>
	<b>Literaturverzeichnis .....</b>	<b>X</b>
	<b>Anlagen.....</b>	<b>XII</b>
	<b>Eigenständigkeitserklärung .....</b>	<b>XV</b>

## Abkürzungsverzeichnis

BxL	Breite * Länge	[mm]
BxLxT	Breite * Länge * Tiefe	[mm]
BxT	Breite * Tiefe	[mm]
MDF	Mitteldichte Holzfaserverplatte	[-]
MPX	Multiplex	[-]
M	Metrisches Gewinde	[mm]
Nawi	Nicht Abwickelbare Membran	[-]

## Formelverzeichnis

Formel 1	(Gl. 2.1.1)	Lorentzkraft.....	2
Formel 2	(Gl. 2.3.1.1)	Energieprodukt eines Magneten .....	6
Formel 3	(Gl. 2.3.4.1)	Induktivität Luftspule in Zylinderform.....	8
Formel 4	(Gl. 2.3.4.2)	Gleichstromwiderstand Spule .....	9
Formel 5	(Gl. 2.3.4.3)	Drahtlänge .....	9
Formel 6	(Gl. 2.3.4.4)	elektrische Impedanz.....	10
Formel 7	(Gl. 2.3.4.5)	Überhang Überhangspule.....	11
Formel 8	(Gl. 2.3.4.6)	Unterhang Unterhangspule.....	11
Formel 9	(Gl. 3.3.1)	Windungszahl Spulendurchmesser.....	20
Formel 10	(Gl. 3.3.2)	Spulenlänge auf Schwingspulenträger.....	20
Formel 11	(Gl. 5.1.2.1)	Gesamtgüte .....	41

$\mu_0$	Magn. Feldkonstante/ Permeabilität Spulenmaterials	[H/m]
A	Spulenquerschnitt	[mm <sup>2</sup> ]
B	Magnetische Flussdichte	[T]
B	Magnetisches Feld	[T]
B <sub>L</sub>	Flussdichte im Luftspalt	[T]
BL	Kraftfaktor	[Tm]
C (Abb. 2)	Bewegte Masse	[F]
E	Energieprodukt Magnet	[-]
F	Lorentzkraft/Antriebskraft	[N]
F <sub>s</sub>	Resonanzfrequenz	[Hz]
I	Stromfluss	[A]
L	Induktivität	[H]
l	Länge des Leiters	[m]
L (Abb. 2)	Nachgiebigkeit Membranaufhängung	[H]
L <sub>vc</sub>	Induktivität Schwingspule	[H]
N	Windungszahl	[-]
Q	Elektrische Ladung	[C]



---

Qes	Elektrische Güte	[-]
Qms	Mechanische Güte	[-]
Qts	Gesamtgüte	[-]
R	Widerstand	[ $\Omega$ ]
R (Abb. 2)	Strahlungswiderstand Membranfläche	[ $\Omega$ ]
R <sub>DC</sub>	Gleichstromwiderstand	[ $\Omega$ ]
R <sub>sense</sub>	Kalibrationswiderstand	[ $\Omega$ ]
r <sub>w</sub>	Radius des Spulenträgers	[mm]
SPL	Schalldruck	[dB]
Ü	Überhang/Unterhang	[mm]
v	Geschwindigkeit der Ladungsträger in m/s	[m/s]
Vas	Äquivalentes Volumen	[l]
V <sub>L</sub>	Luftspaltvolumen	[l]
V <sub>M</sub>	Magnetvolumen	[l]
X <sub>max</sub>	Lin. Bereich Schwingspule im Magnetspalt	[mm]
Z	Impedanz	[ $\Omega$ ]
Z <sub>el</sub>	Elektrische Impedanz	[ $\Omega$ ]
Z <sub>me</sub>	Mechanische Impedanz	[ $\Omega$ ]
$\kappa$	Elektrische Leitfähigkeit	[ $\Omega/\text{mm}^2$ ]
$\rho$	Spezifischer Elektrischer Widerstand	[ $\Omega \cdot \text{mm}^2/\text{m}$ ]
$\sigma$	Streufaktor	[-]
$\tau$	Widerstandsfaktor	[-]

# Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1: <b>Querschnitt eines elektrodynamischen Lautsprechers</b> [modifiziert nach Klippel Q8, S.2] .....	3
Abbildung 2: <b>Vereinfachtes Ersatzschaltbild eines dynamischen Lautsprechers</b> [Q13, S. 118].....	3
Abbildung 3: <b>Frequenzgang Alpair 6M</b> [Q11, S. 3].....	4
Abbildung 4: <b>Optimale Konzentration Magnetischer Fluss im Luftspalt</b> [Q13, S. 79].....	6
Abbildung 5: <b>Unterschiedliche Schwingspulentypen</b> [Q13, S. 77f].....	11
Abbildung 6: <b>Unterschied zwischen konischer- und NAWI-Membran</b> [Q9, S. 407].....	12
Abbildung 7: <b>Simulierte Magneteinheit</b> [Jonas Richter, 2019] .....	17
Abbildung 8: <b>Polplatten mit Polkern und Impedanzkontrollring</b> [Jonas Richter, 2019].....	25
Abbildung 9: <b>Zusammengesetzte Magneteinheit</b> [Jonas Richter, 2019].....	26
Abbildung 10: <b>Grundeinteilungen des Lautsprecherkorbs</b> [Jonas Richter, 2019] .....	27
Abbildung 11: <b>Untere und Obere Korbansicht</b> [Jonas Richter, 2019] .....	28
Abbildung 12: <b>Gedruckter Korb aus PA12</b> [Jonas Richter, 2019].....	28
Abbildung 13: <b>Schwingspulenrohling</b> [Jonas Richter, 2019].....	29
Abbildung 14: <b>Positionierung des Schwingspulenträgers auf dem Wickelkörper</b> [Jonas Richter, 2019] .....	30
Abbildung 15: <b>Schwingspule mit Schwingspulenträger</b> [Jonas Richter, 2019].....	31
Abbildung 16: <b>Membran im Rohzustand</b> [Jonas Richter, 2019].....	32
Abbildung 17: <b>Membran nach Festigkeitsbehandlung</b> [Jonas Richter, 2019] .....	33
Abbildung 18: <b>Bemaßungsgrundlage Zentrierspinne- und Sickenform (v.l.n.r.)</b> [Jonas Richter, 2019] .....	34
Abbildung 19: <b>Herstellung der Zentrierspinne und der Sicke</b> [Jonas Richter, 2019] .....	35
Abbildung 20: <b>Fertige Zentrierspinne und Sicke</b> [Jonas Richter, 2019].....	35
Abbildung 21: <b>Masse-Feder-System</b> [Jonas Richter, 2019] .....	36
Abbildung 22: <b>Lautsprechertreiber</b> [Jonas Richter, 2019] .....	37
Abbildung 23: <b>Schaltplan Impedanzmessbox</b> [Jonas Richter, 2019] .....	38
Abbildung 24: <b>Impedanzmessbox mit Testsetup</b> [Jonas Richter, 2019].....	39
Abbildung 25: <b>Impedanzkurven des Lautsprechertreibers</b> [Jonas Richter, 2019].....	39
Abbildung 26: <b>Simuliertes Testgehäuse</b> [Jonas Richter, 2020] .....	43
Abbildung 27: <b>Seitenansicht Lautsprecher</b> [Jonas Richter, 2020] .....	45
Abbildung 28: <b>Frontalansicht Lautsprecher</b> [Jonas Richter, 2020] .....	45
Abbildung 29: <b>Frequenzgang und Phase bei 0 Grad</b> [Jonas Richter, 2020].....	46
Abbildung 30: <b>Frequenzgang bei 0, 15 und 30 Grad</b> [Jonas Richter, 2020] .....	47
Abbildung 31: <b>Impulsantwort</b> [Jonas Richter, 2020].....	48
Abbildung 32: <b>Verzerrungen</b> [Jonas Richter, 2020].....	49

---

## Tabellenverzeichnis

Tabelle 1: <b>Technische Eigenschaften eines Ringmagnets</b> [Q15, S. 1].....	16
Tabelle 2: <b>Bemaßung der Magneteinheitenbestandteile</b> [Jonas Richter, 2019].....	18
Tabelle 3: <b>Bemaßung der Spulenbestandteile</b> [Jonas Richter].....	21
Tabelle 4: <b>Bemaßung der Multiplexrohlinge</b> [Jonas Richter, 2019].....	33
Tabelle 5: <b>Thiele Small Parameter</b> [Jonas Richter, 2019].....	40
Tabelle 6: <b>Schnittliste</b> [Jonas Richter, 2020].....	44

## **Danksagung**

Ich danke Thomas Engelmann und der Firma Engelstein bei der tatkräftigen Unterstützung in dieser Arbeit sowie in außerstudentischen Tätigkeiten. Weiterhin möchte ich meiner Familie danken, die mir in jeder Lebenslage zur Seite steht.

# 1 Einleitung

Betrachtet man die Auswahl eines üblichen Lautsprecherhandels, so stellt man fest, dass vermehrt Lautsprecherboxen im Handel sind, die auf dem Prinzip des Breitbandlautsprechertreibers bestehen. Ohne diesen wären Konstruktionen wie Bluetooth-Lautsprecher, Küchenradios, Kopfhörer und Lautsprecher in Mobiltelefonen nicht möglich. Durch die Wiedergabe des (vorzugsweise) vollen Frequenzspektrums sind qualitativ hochwertige Lautsprecherkonstruktionen auf engstem Raum realisierbar. Auch im Bereich der Studioteknik setzt sich dadurch der Breitbandlautsprecher immer mehr durch und bereichert die Abhörsituation als Referenzmonitor zu Consumer-Geräten und bietet zugleich ein phasenrichtiges Abstrahlen aller wiedergegebenen Frequenzen bei einer optimalen Ortbarkeit.

In Fortsetzung an ein studiengebundenes Praktikum bei der Firma *Engelstein* soll in dieser Arbeit auf die Entwicklung und Konstruktion eines Breitbandlautsprechertreibers eingegangen werden. Dabei sollen die Probleme, die sich insbesondere im Design und der Bauweise aufzeigen, betrachtet und bestmöglich vermieden werden.

Ziel ist es, einen hochwertigen Breitbandlautsprechertreiber in einem Testgehäuse zu entwickeln und zu konstruieren, der das allgemeine Funktionsprinzip eines dynamischen Lautsprechertreibers sowie deren Vor- und Nachteile eines Breitbandlautsprechertreibers zeigt.

Neben theoretischen Betrachtungen soll sich diese Arbeit mit den verschiedensten Material- und deren Herstellungsprozessen auseinandersetzen. Dabei wird Wert darauf gelegt, dass der Breitbandlautsprechertreiber so gut wie möglich reproduzier- und modifizierbar ist. Die Konstruktion des Treibers erfordert neben handwerklichem Geschick ebenso eine Einarbeitung in verschiedenste Softwareprogramme. Für Mess- und Präsentationszwecke soll für den Breitbandlautsprechertreiber ein Testgehäuse entworfen und designt werden.

## 2 Theoretische Grundlagen zu Breitbandlautsprechertreibern

### 2.1 Lautsprecher nach dem elektrodynamischen Prinzip

Breitbandlautsprechertreiber lassen sich zu den dynamischen Lautsprechertreibern einordnen, die nach dem elektrodynamischen Prinzip arbeiten. Dabei werden elektrische Signale in mechanische Schwingungen umgewandelt, die als Schall wahrzunehmen sind. Durch einen Permanentmagneten wird das Feld des Membranantriebs, der einen stromdurchflossenen Leiter besitzt, verändert. Bei elektrodynamischen Lautsprechern bewegt sich der Leiter mit den Ladungsträgern, sowie die magnetische Flussdichte und die Stromflussrichtung immer aufeinander. Dieses Prinzip beruht auf der Lorentzkraft, die sich mit folgender Formel berechnen lässt [Q6, S. 508]:

$$F = Q * v * B \qquad \text{Formel 1 (Gl. 2.1.1)}$$

Dabei ist:

- F: Lorentzkraft in Newton, N
- Q: Ladung in Coulomb, C
- v: Geschwindigkeit der Ladungsträger in m/s
- B: Magnetische Flussdichte in Tesla, T

Jeder dynamische Lautsprecher besitzt bestimmte Komponenten, die für die Tonwiedergabe verantwortlich sind. Die Magneteinheit, die aus einem üblicherweise ringförmigen Permanentmagneten besteht und von zwei Polplatten umgeben ist, bildet den Antrieb des Treibers. Im Mittelpunkt der Einheit befindet sich der Polkern, der zusammen mit den Polplatten das Magnetfeld auf den resultierenden Luftspalt konzentriert, in dem sich zugleich die Schwingspule, die auf einem Träger gewickelt ist, befindet. Diese wird durch eine Zentrierspinne geführt. Mit der Schwingspule ist eine Membran verbunden, die normalerweise konusförmig ist. Diese ist mit einer Sicke verbunden, die ebenfalls als Führung dient und Resonanzen unterdrückt. Über dem Luftspalt befindet sich auf der Membran eine Staubschutzkappe, die Verschmutzungen im Luftspalt vermeidet. Ein Lautsprecherkorb verbindet die Magneteinheit, die Zentrierspinne und die Sicke miteinander [Q16, S. 424].

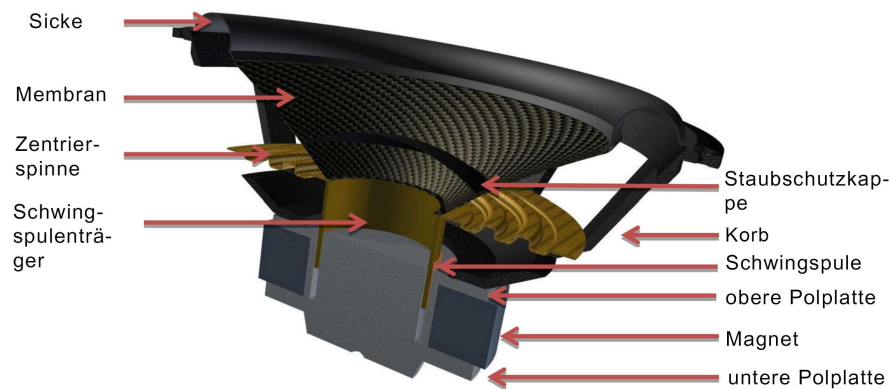


Abbildung 1: **Querschnitt eines elektrodynamischen Lautsprechers** [modifiziert nach Klippel Q8, S.2]

Ein dynamischer Lautsprechertreiber lässt sich auch als Ersatzschaltbild darstellen, bei dem alle Bauteile, die bei einem Lautsprechertreiber elektrisch sowie mechanisch sind, als analoge, elektrische Bauteile ersetzt und veranschaulicht werden<sup>1</sup>.

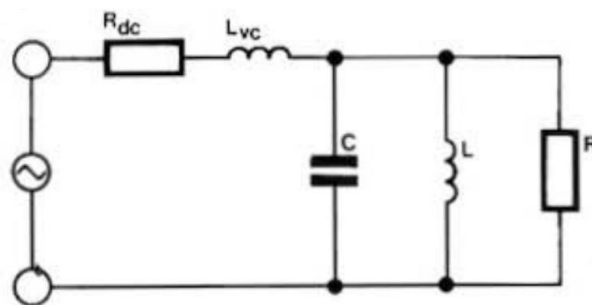


Abbildung 2: **Vereinfachtes Ersatzschaltbild eines dynamischen Lautsprechers** [Q13, S. 118]

Dabei ist  $R_{DC}$  der Gleichstromwiderstand der Spule (in Ohm) und  $L_{vc}$  die Induktivität dieser (in Henry). Der Kondensator  $C$  verdeutlicht die bewegte Masse des Treibers (in Farad). Die Spule  $L$  gibt die Nachgiebigkeit der Membranaufhängung wieder (in Henry). Der Widerstand  $R$  steht für den Strahlungswiderstand der Membranfläche<sup>2</sup> (in Ohm). Das Ersatzschaltbild ist für diese Arbeit für weitere Betrachtungen jedoch nicht von Bedeutung.

<sup>1</sup> Vgl. Q13, S. 117 f.

<sup>2</sup> Vgl. Q13, S. 118

## 2.2 Breitbandlautsprecher

Ein dynamischer Lautsprecher, bei dem das - idealerweise - komplette hörbare Frequenzspektrum über eine Punktschallquelle und ohne Frequenzweiche<sup>3</sup> wiedergegeben wird, bezeichnet man als Breitbandlautsprecher. Durch den einzelnen Treiber entsteht, im Gegensatz zu Mehrwege-Lautsprechern, eine phasenrichtige Wiedergabe aller abgestrahlten Frequenzen. Es können außerdem durch die Verwendung von nur einem Treiber keine Interferenzen entstehen (Frequenzauslöschung- und Überhöhungen bei der Überlagerung von zwei Wellen). Der Nachteil von Breitbandlautsprechern ist, dass sie nur bis zu einer bestimmten akustischen Leistung uneingeschränkt funktionieren. Um eine gute Wiedergabe tiefer Frequenzen zu erreichen, ist eine große Membranfläche vonnöten, diese schränkt jedoch das Wiedergabeverhalten hoher Frequenzen ein [Q13, S. 100]. Durch die Wiedergabe des vollen Frequenzspektrums kommt es zu Membranresonanzen und einem ungleichmäßigen Übergang der Frequenzen, die die Membran gleichzeitig wiedergibt und somit die Membran in mehrere Teilmembranen aufteilt. Es entsteht eine ungewollte Frequenzweiche, die bei einem Breitbandlautsprecher nicht elektrisch, sondern mechanisch erfolgt<sup>4</sup>. Der folgende Frequenzgang des Breitbandlautsprechers *Alpair 6M* der Firma *Markaudio* verdeutlicht dieses Problem [Q11, S3].

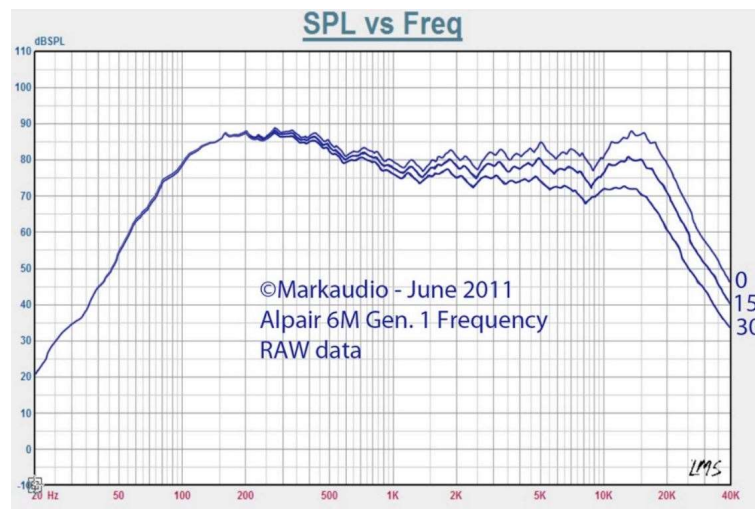


Abbildung 3: Frequenzgang Alpair 6M [Q11, S. 3]

<sup>3</sup> Üblicherweise werden jedoch Entzerrschaltungen in Form von Sperrkreisen verbaut, um den Frequenzgang zu linearisieren.

<sup>4</sup> Vgl. Q13, S. 102



Der Frequenzgang veranschaulicht, dass im Bereich von 2 kHz und 5 kHz deutliche Membranresonanzen auftreten. Ebenso stellt die Senkung des Frequenzgangs bei 9 kHz eine mechanische Frequenzweiche dar, bei der die Membran in zwei Teilmembranen geteilt wird.

## 2.3 Komponenten eines dynamischen Lautsprechers

### 2.3.1 Magneteinheit

Die Magneteinheit eines Breitbandlautsprechers setzt sich normalerweise aus vier Komponenten zusammen: Magnet, untere und obere Polplatte und Polkern [Q9, S 406].

Der Hauptantrieb des Lautsprechers ist ein Permanentmagnet, der für gewöhnlich aus Ferrit oder Neodym besteht. Permanentmagnete können ferromagnetische Materialien anziehen und erzeugen ein magnetisches Feld [Q1, S. 9].

Ferritmagnete bestehen aus oxidierten Metallen, welche bei der Stahlherstellung als Abfall entstehen. Dadurch ergibt sich ein geringer Preis und die entsprechend häufige Verwendung im Lautsprecherbau. Bei der Herstellung wird Eisenoxid ( $\text{Fe}_2\text{O}_3$ ) mit Strontiumcarbonpulver ( $\text{SrCO}_3$ ) vermischt und vorgesintert<sup>5</sup>, anschließend wird das Material gemahlen und nass oder trocken gepresst. Ferritmagnete besitzen eine geringe Remanenz, das heißt, dass sie ihre magnetische Flussdichte schlecht beibehalten, die ihnen zuvor durch die Magnetisierung, wie beispielsweise durch eine stromdurchflossene Spule zugeführt wurde. Allerdings besitzen sie eine hohe Koerzitivfeldstärke, die dafür verantwortlich ist, dass der Magnet seine Magnetisierung in einem Gegenfeld gut behält [Q1, S. 22].

Neodymmagnete sind die zurzeit stärksten Dauermagnete. Sie beinhalten eine Legierung aus Neodym, Eisen und Bor ( $\text{Nd}_2\text{Fe}_{14}\text{B}$ ). Die einzelnen Bestandteile werden miteinander verschmolzen und in eine Form gebracht. Diese wird erneut zermahlen und gesintert. Da Neodymmagnete schnell oxidieren und porös werden können, werden sie mit einer Schutzlegierung versehen, die üblicherweise aus Nickel oder Zinn besteht. Die entstandenen Magnete haben gegenüber Ferritmagneten den Vorteil, dass sie bei gleicher Größe eine deutlich höhere Remanenz und Koerzitivfeldstärke aufweisen und damit durch ein niedrigeres Gewicht dieselbe Leistung erzeugen können [Q1, S. 29].

---

<sup>5</sup> Verbinden oder Verdichten von pulverförmigen Stoffen durch Erwärmung, jedoch ohne Schmelzvorgang.

Der verwendete Permanentmagnet eines Lautsprechers, der meist ringförmig ist, ist von zwei Polplatten umgeben, der oberen und der unteren, und besitzt in seinem Zentrum einen Polkern. Die Einheiten bilden einen Luftspalt. Die Polplatten und der Polkern sind aus einem ferromagnetischen Material gefertigt, welches meist Weicheisen ist. Dadurch wird das Magnetfeld im Luftspalt der Magneteinheit konzentriert. Dieser bildet sich aus der oberen Polplatte mit dem Polkern. Je schmaler der Luftspalt ist, desto größer ist der Wirkungsgrad der Magneteinheit in Verbindung mit einer Schwingspule [Q13, S. 71].

Die untere Polplatte dient neben der Konzentration des Magnetfeldes zur Positionierung des Polkerns im Zentrum des Permanentmagneten. Untere Polplatte und Polkern können aber auch aus einem Stück bestehen. Die untere Polplatte begrenzt gleichzeitig auch den Hub der Schwingspule. Die obere Polplatte bildet gemeinsam mit dem Polkern den Luftspalt, in welchem das Magnetfeld konzentriert wird [Q10, S. 3].

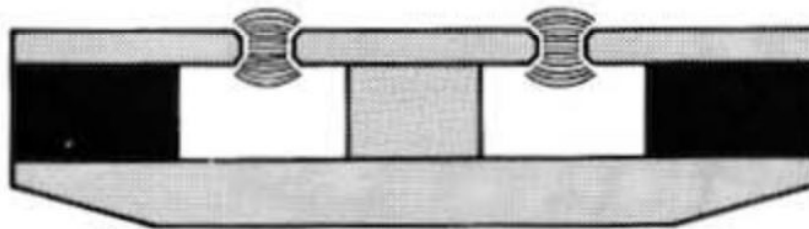


Abbildung 4: **Optimale Konzentration Magnetischer Fluss im Luftspalt** [Q13, S. 79]

Um das beste Energieprodukt eines Magneten zu errechnen, sodass das Magnetfeld optimal im Luftspalt konzentriert ist und es zu keinen Streuverlusten kommt, eignet sich folgende Formel<sup>6</sup>:

$$E = \frac{(B_L)^2}{\mu_0} * \frac{V_L}{V_M} * \sigma * \tau \quad \text{Formel 2 (Gl. 2.3.1.1)}$$

Dabei ist:

- E: Energieprodukt des Magneten
- $B_L$ : Flussdichte im Luftspalt (nicht  $B \cdot I$ -Produkt)
- $V_M$ : Magnetvolumen
- $V_L$ : Luftspaltvolumen

<sup>6</sup> Vgl. Q13, S. 79

- $\sigma$ : Streufaktor (wenn nicht anders angegeben 1)  
 $\tau$ : Widerstandsfaktor (etwa 1)  
 $\mu_0$ : Magnetische Feldkonstante ( $1,257 \cdot 10^{-6}$  H/m)

Polkerne werden oft mit einer Polkernbohrung versehen, die zur thermischen Kühlung der Schwingspule dient. Vereinzelt befindet sich um den Polkern auch ein Impedanzkontrollring aus Kupfer. Dieser wirkt wie eine Sekundärwicklung einer Spule (eine einzelne Windung). Er verhindert einen Impedanzanstieg bei steigenden Frequenzen, die die Schwingspule aufgrund der Induktivität erzeugt [Q13, S. 83].

### 2.3.2 Lautsprecherkorb

Der Lautsprecherkorb ist die mechanische Verbindung zwischen Magnet- und Schwingeinheit eines Lautsprechertreibers. Er ermöglicht außerdem einen Einbau in ein Lautsprechergehäuse. Größtenteils wird, vor allem bei niedrigpreisigen Treibern ein Lautsprecherkorb aus Stahlblech verwendet. Das bringt allerdings den Nachteil mit sich, dass sich dieser, vor allem bei schweren Magneten, schnell verziehen kann und nicht resonanzarm ist. Bei hochwertigen Lautsprechern wird deshalb vermehrt auf Lautsprecherkörbe aus Aluminiumdruckguss gesetzt. Durch das Gussverfahren kann sich dieser Korb nicht verziehen und unterdrückt somit Resonanzen [Q13, S. 63]. Vermehrt setzen viele Lautsprecherhersteller auf Lautsprecherkörbe aus Kunststoff. Diese sind bei gleicher Stabilität leichter als Metall, beeinflussen das Magnetfeld des Magnetsystems nicht und verziehen sich, im Vergleich zu Stahlblechkörben, nicht [vgl. Q11, S.1].

### 2.3.3 Schwingspule

Die Schwingspule eines Lautsprechertreibers, welche auf einen Träger gewickelt ist, befindet sich, vertikal beweglich, im Luftspalt der Magneteinheit und ist mit der Lautsprechermembran verbunden. Durch den Stromfluss  $I$ , der durch den Draht der Spule fließt und das magnetische Feld  $B$ , welches im Luftspalt der Magneteinheit vorliegt, entsteht eine Antriebskraft  $F$ , die die Schwingspule samt Membran bewegt. Die Antriebskraft  $F$  beruht auf der Lorentzkraft (vgl. Gl. 2.1.1).

Spulen in Lautsprechertreibern sind häufig aus Kupfer, das eine gute elektrische Leitfähigkeit ( $\kappa_{\text{Cu}}=58 \text{ m}/(\Omega \text{ mm}^2)$ ) besitzt. Silber besitzt eine bessere Leitfähigkeit als Kupfer von 6%, allerdings sind die anfallenden Rohstoffkosten deutlich höher als bei Kupfer. Um Kosten einzusparen werden vereinzelt auch Spulen aus Aluminium gefertigt, die zwar eine schlechtere elektrische Leitfähigkeit als Kupfer ( $\kappa_{\text{Al}}=37 \text{ m}/(\Omega \text{ mm}^2)$ ) haben, jedoch neben den Rohstoffkosten ein deutlich geringeres Gewicht

aufweisen [Q5, S. 96]. Dies wird sich im Lautsprecherbau häufig zu nutzen gemacht. Indem die Schwingspule die gleiche Masse wie die Membran besitzt, arbeitet der Treiber auch bei hohen Frequenzen mit einem optimalen Wirkungsgrad. Vor allem Breitbandlautsprechertreiber mit großen Schwingspulendurchmessern profitieren von diesem Vorteil [Q13, S. 79].

Jede Spule besitzt eine Induktivität und eine Impedanz. Die Induktivität ( $L$ , Einheit: Henry) einer Schwingspule erzeugt einen (normalerweise ungewollten) Tiefpass erster Ordnung. Je niedriger die Induktivität einer Schwingspule, desto höher ist auch der Frequenzbereich, den der Lautsprecher wiedergeben kann. Die Induktivität einer Schwingspule verändert sich bauartbedingt mit dem Spulenquerschnitt, was sich mit folgender Formel bestimmen lässt (Luftspulen mit Zylinderform,  $l \geq 0,6 \cdot r_w$ )<sup>7</sup>.

$$L = \frac{\mu_0 \cdot N^2 \cdot A}{l + 2 \cdot r_w / 2,2} \quad \text{Formel 3 (Gl. 2.3.4.1)}$$

Dabei ist:

- L: Induktivität der Spule
- $\mu_0$ : Permeabilität des Spulenmaterials
- N: Windungszahl
- A: Spulenquerschnitt
- l: mittlere Feldlinienlänge/Spulenlänge (hier:  $l = h_{\text{Spule}}$ )
- $r_w$ : Radius des Spulenträgers

Daraus lässt sich folgern, dass mit steigendem Spulenquerschnitt auch die Induktivität dieser Spule ansteigt. Die Problematik wird allerdings durch die Windungszahl bei einem größeren Spulenquerschnitt eingeschränkt, da dieser bei gleichbleibendem Gleichstromwiderstand sinkt.

Ist die Impedanz bei tiefen Frequenzen noch gleich dem Gleichstromwiderstand, so nimmt diese bei steigenden Frequenzen durch den Blindwiderstand der Induktivität zu<sup>8</sup>. Im Zusammenhang dazu steht der Impedanzkontrollring, der im Kapitel 2.3.1 erwähnt wurde. Ist ein Impedanzkontrollring vorhanden, so wird in diesen durch den anliegenden Strom der Schwingspule ein entgegengesetzter Strom induziert. Das daraus resultierende Magnetfeld besitzt ebenfalls die entgegengesetzte Richtung, welches das

<sup>7</sup> Vgl. Q5, S. 29

<sup>8</sup> Vgl. Q9, S. 407 f.

störende Magnetfeld, und die damit in der Schwingspule induzierten Gegenströme, aufhebt<sup>9</sup> und die Impedanz mit steigender Frequenz nur noch langsam steigen lässt.

Die Impedanz ( $Z$ , Einheit: Ohm) entsteht frequenzabhängig aus dem elektrischen Widerstand (hier: Gleichstromwiderstand,  $R$ , Einheit: Ohm), der die elektrische Stromstärke definiert, die bei einer vorhandenen Spannung entsteht. Der Gleichstromwiderstand lässt sich mit folgender Formel berechnen<sup>10</sup>:

$$R = \rho * \frac{l}{A} = \rho * \frac{4 * l}{\pi * d^2} \quad \text{Formel 4 (Gl. 2.3.4.2)}$$

Dabei ist:

- R: Gleichstromwiderstand in Ohm
- $\rho$ : spezifischer Elektrischer Widerstand in Ohm\*mm<sup>2</sup>/m
- l: Länge des Leiters in m
- A: Querschnitt des Leiters in mm<sup>2</sup>

Die Impedanz eines Lautsprechertreibers und damit die einer Schwingspule, muss auf den angeschlossenen Verstärker abgestimmt sein. So haben sich Werte zwischen 4 und 16 Ohm durchgesetzt. Je niedriger die Impedanz einer Schwingspule ist, desto niedriger ist auch die Windungszahl und folglich auch die Induktivität. Jedoch fließt gleichzeitig aufgrund des geringeren Widerstands mehr Strom durch die Spule. Sie erwärmt sich schneller und erzeugt einen Anstieg des Gleichstromwiderstands [Q13, S. 78].

Um die Drahtlänge für eine Schwingspule zu berechnen, lässt sich folgende Formel verwenden<sup>11</sup>:

$$l = \frac{A * R}{\rho} \quad \text{Formel 5 (Gl. 2.3.4.3)}$$

Bei Schwingspulen unterscheidet man zwischen Kurzhub- und Langhubspulen. Kurzhubspulen besitzen nur eine minimal kleinere Spulenhöhe als der Luftspalt der

---

<sup>9</sup> Vgl. Q13, S. 83

<sup>10</sup> Vgl. Q5, S. 22

<sup>11</sup> Umgestellt aus: Q5, S. 22

Magneteinheit. Mit einer kleinen Magneteinheit kann ein hohes BI-Produkt erreicht werden. Durch die Bewegung der Spule verändert sich auch die Spulenlänge, die sich im Luftspalt befindet und damit die elektrische Impedanz, die sich mit folgender Formel berechnen lässt<sup>12</sup>:

$$Z_{el} = \frac{(Bl)^2}{Z_{me}} \quad \text{Formel 6 (Gl. 2.3.4.4)}$$

Dabei ist:

- $Z_{el}$ : Elektrische Impedanz in Ohm
- $Z_{me}$ : Mechanische Impedanz in Ohm
- $B$ : Magnetische Flussdichte in T
- $l$ : Länge des Leiters im Luftspalt in m

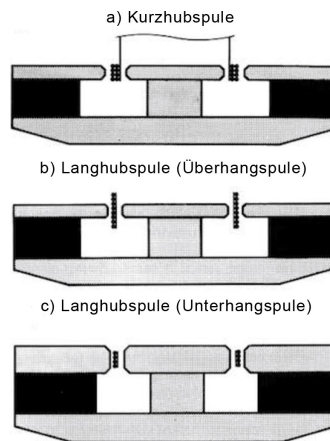
Hierbei stellt die mechanische Impedanz die Impedanz des Masse-Feder-Systems aus Schwingspule und Membran dar. Die elektrische Impedanz verändert sich bei einer anliegenden Spannung drastisch durch die Erhöhung und Verringerung der Leiterlänge im Luftspalt. Es resultiert eine nichtlineare Auslenkung der Schwingspule. Bei einer großen Auslenkung der Schwingspule steigert sich die Kraft für eine noch weitere Auslenkung<sup>13</sup>. Die Auslenkung kann nur mit einer Membranaufhängung geschwächt werden, die dem nichtlinearen Antriebsverhalten entgegenwirkt. Da dies ohne hohen Kostenaufwand in der Entwicklung nicht möglich ist, werden vorrangig Langhubspulen als linearer Antrieb verwendet.

Langhubspulen können entweder über beide Seiten des Luftspalts herausstehen oder in einem deutlich größeren Luftspalt als die eigentliche Spulenhöhe sitzen. Bei der ersten Variante, der Überhangspule, ist es vonnöten die magnetische Flussdichte zu erhöhen, zum Beispiel mit einem größer dimensionierten Magneten, da sich immer nur ein Teil der Spule im Luftspalt befindet. Ist der Luftspalt deutlich größer als die Höhe der Spule (Unterhangspule), befindet sich die Spule dauerhaft im Luftspalt. Eine Erhöhung des BI-Produktes ist hier nicht nötig [Q13, S. 76ff].

---

<sup>12</sup> Vgl. Q13, S. 76

<sup>13</sup> Vgl. Q13, S. 77

Abbildung 5: **Unterschiedliche Schwingspulentypen** [Q13, S. 77f]

Somit kann der Überhang einer Überhangspule berechnet werden, sodass diese vertikal im Luftspalt zentriert ist. Gleichzeitig definiert dies den  $X_{\max}$ -Wert<sup>14</sup> des Treibers.

$$\ddot{U} = \frac{(h_{Spule} - h_{Pol})}{2} \quad \text{Formel 7 (Gl. 2.3.4.5)}$$

Dabei ist:

- Ü: Überhang Schwingspule
- $h_{Spule}$ : Spulenlänge Schwingspule
- $h_{Pol}$ : Polplattenhöhe

Bei Unterhangspulen wird der beste Wirkungsgrad erreicht, indem die Mitte der Wickelhöhe und die Mitte der Polplattenhöhe auf einer waagerechten Ebene liegen. Um dies und ebenso den  $X_{\max}$ -Wert zu berechnen, wird folgende Formel verwendet:

$$\ddot{U} = \frac{(h_{Pol} - h_{Spule})}{2} \quad \text{Formel 8 (Gl. 2.3.4.6)}$$

Kurzhubspulen sind jeweils bündig zur oberen Polplatte.

<sup>14</sup> Linearer Bereich der Schwingspule im Magnetfeld, bei dem sich die Magnetfeldstärke maximal um  $\pm 20\%$  verändert.

### 2.3.4 Membran

Neben der Schwingspule stellt die Membran den größten Teil der bewegten Masse eines Lautsprechertreibers dar. Das am meisten verwendete Membranmaterial ist Papierguss, welches sich vor allem durch den niedrigen Preis und das niedrige Gewicht auszeichnet. Daneben wird auch Aluminium verwendet, das zwar ein höheres Gewicht besitzt, aber auch eine deutlich bessere Steifigkeit sowie mechanische- und chemische bessere Beständigkeit als Papier hat. Vermehrt lassen sich heutzutage auch Membranen auf Basis einer Sandwich-Struktur (hohe Steifigkeit bei geringem Gewicht) oder Kunststoff (hohe innere Dämpfung, ausgeglichener Frequenzgang) finden [Q13, S. 84].

Üblicherweise besitzt die Membran die Form eines Konus. Um entstehende Partial-schwingungen<sup>15</sup> zu vermeiden, werden aber bevorzugt „NAWI-Membranen“ verwendet. Diese nicht abwickelbaren Membranen sind stabiler als eine Konusmembran und erzeugen erst bei hohen Frequenzen Partial-schwingungen. Im Mittelpunkt der Membran ist häufig eine Staubschutzkappe aufgeklebt, die ein Eindringen von Staub in den Luftspalt hinein vermeiden soll. [Q9, S. 407]

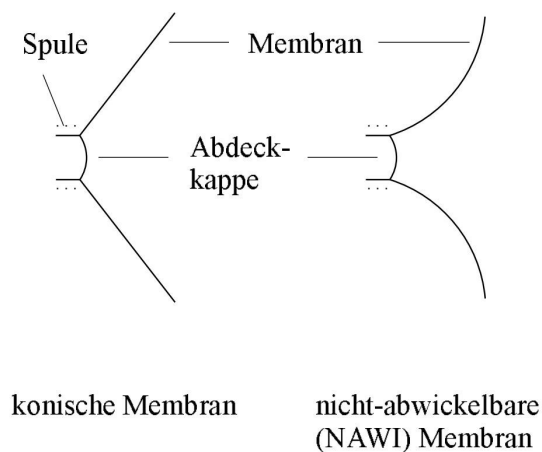


Abbildung 6: Unterschied zwischen konischer- und NAWI-Membran [Q9, S. 407]

Bei Breitbandlautsprechern ist darauf zu achten, dass die Membran eine niedrige Masse besitzt, um einen hohen Wirkungsgrad zu erreichen, zugleich aber eine hohe innere Steifigkeit besitzen muss, um keine Membranresonanzen aufzuweisen. Um tiefe Frequenzen wiedergeben zu können, ist aber die Membranfläche und damit der

<sup>15</sup> Ungewollte Teilschwingung der Membran bei Schwingungen mit mehreren Frequenzen.



Durchmesser der Membran entscheidend. Ist dieser zu niedrig, kann nicht optimal das komplette hörbare Frequenzspektrum wiedergegeben werden [Q13, S. 100].

Um der Bündelung eines Breitbandlautsprechers bei hohen Frequenzen entgegenzuwirken, ist die Wahl des Winkels der Membran entscheidend. Ist der Winkel zu hoch gewählt, kommt es zu einer starken Bündelung, ähnlich der eines Horns. Wird der Winkel jedoch zu flach, häufen sich Resonanzen, da die Membran weniger steif ist (Erfahrungen aus früheren Prototypen).

Die Membran sollte zusammen mit der Sicke als eine Einheit gesehen werden, die Membranresonanzen bedämpft. Zusammen mit der Sicke oder der Spinne bildet die Membran einen mechanischen Schwingkreis, der als Resonanzfrequenz bezeichnet wird. Diese Resonanzfrequenz definiert zum einen die Frequenz, mit der der Schwingkreis ausschwingt, nachdem er keine Kraft mehr von außen zugeführt bekommt und zum anderen die größte Auslenkung auf den Schwingkreis von außen [Q13, S. 64f.].

Je größer der Membrandurchmesser, desto besser ist die Wiedergabe von tiefen Frequenzen. Durch die größere Form muss allerdings auch mehr Masse bewegt werden, wodurch der Hochtonbereich leidet. Zur Vermeidung wird ein Kompromiss zwischen den beiden extremen gesucht.

Geläufige Membrandurchmesser von Breitbandlautsprechern liegen zwischen 7,5 cm und 20 cm.

### **2.3.5 Zentrierspinne und Sicke**

Damit die Schwingspule im Luftspalt geführt werden kann und sich die Membran vor und zurück bewegt, bedarf es einer Führung, die durch eine gewellte Zentrierspinne erfolgt. Sie führt die Schwingspule im Luftspalt (im idealen Fall nur vertikal), begrenzt die Auslenkung der Schwingspule, ohne dabei deren Linearität zu beeinflussen und versetzt diese wieder in den Ausgangspunkt der Membranstellung [Q13, S. 62].

Zur Optimierung werden oft auch zwei Zentrierspinnen verwendet (bevorzugt bei PA-Treibern), die noch mehr Verwindungssteifheit bieten und zudem auf eine Sicke, die mögliche Verzerrungen verursacht, verzichten (Edgeless-cone; Hifi-Treiber). Darunter leidet jedoch die Membran, da entstehende Membranresonanzen nicht mehr durch die Sicke bedämpft werden können [Q13, S. 62].

Wie die Membran muss auch die Zentrierspinne so leicht wie möglich gehalten werden, ohne dabei an Stabilität zu verlieren. Der Großteil der heute verwendeten Zentrierspinnen besteht aus Gewebe, welches mit Harz in einem bestimmten Muster benetzt und

---

mit Hitze gepresst wird und so seine Festigkeit behält, durch die Wellenform aber in eine Richtung (horizontal) definiert beweglich ist. Bei der Konstruktion von Zentrierspinnen ist zu beachten, dass das Material, je nach Luftdurchlässigkeit, zur Belüftung der Schwingspule beitragen kann [Q13, S. 103; vgl. Q2].

Sicken stellen den zweiten Teil der Lautsprecherzentrierung da. Sie verbinden die Membran mit dem Lautsprecherkorb, bedämpfen ebendiese und vermeiden bestimmte Membranresonanzen. Daher muss jede Sicke individuell an eine Membran angepasst sein, um bestmöglich arbeiten zu können [Q13, S. 103].

Als Sickenmaterialien haben sich Schaumstoff und Gummi bewährt. Schaumstoff ist leicht und hat eine dreidimensionale Bläschenstruktur, die eine gute Steifigkeit und eine innere Dämpfung bildet. Die Lebensdauer des Materials ist aber begrenzt, da es mit der Zeit porös wird. Sicken aus Gummi sind hingegen, bei restlichen gleichen Eigenschaften, deutlich schwerer als Schaumstoff, aber zeitlich beständig [vgl. Q4].

## 3 Materialfindung

Damit der selbst entworfene Breitbandlautsprecher so gut wie möglich reproduzierbar ist, wird Wert darauf gelegt, dass alle Teile bis auf den Lautsprecherkorb, ohne Sonderanfertigungen von weiteren Firmen auskommen.

### 3.1 Magneteinheit

Bei der Auswahl des Magnetmaterials entscheidet sich der Verfasser dieser Arbeit für einen konventionellen Ferritmagneten in Ringform. Ein Neodymmagnet ist bei gleicher Masse durchaus kräftiger. Der große Nachteil besteht aber darin, dass er durch die kleine Oberfläche bei verhältnismäßigem hohen Preis als Stabmagnet ausgeführt ist und innerhalb der Schwingspule sitzen muss. Das hat zur Folge, dass die Polplatten ein komplexes Konstrukt annehmen müssen, das dem der Form eines Ringes entspricht und ohne aufwendige Dreharbeiten von verhältnismäßig großen Stahl- oder Eisenwerkstoffen nicht möglich ist.

Der Ferritmagnet wird von der Firma *Webcraft GmbH* bezogen. Aus früheren Prototypen hat sich für einen Breitbandlautsprecher ein ringförmiger Ferritmagnet mit einem äußeren Durchmesser von 100 mm, einem inneren Durchmesser von 60 mm und einer Höhe von 20 mm bewährt.

Die technischen Eigenschaften des Magneten lassen sich in folgender Tabelle festhalten<sup>16</sup>:

Tabelle 1: **Technische Eigenschaften eines Ringmagnets** [Q15, S. 1]

Werkstoff	Ferrit
Form	Ring
Ø <sub>Außen</sub>	100 mm (± 1,6 mm)
Ø <sub>Innen</sub>	60 mm (± 0,8 mm)
Höhe	20 mm (± 0,1 mm)
Magnetisierungsrichtung	Axial
Haftkraft	Ca. 157 N (16 kg)
Gewicht	487,57g
Remanenz Br	0,40 – 0,41 T
Koerzitivfeldstärke bHc	175 – 195 kA/m
Koerzitivfeldstärke iHc	180 – 200 kA/m
Energieprodukt (B*H) max	30,0 – 32,0 kJ/m <sup>3</sup>
Max. Einsatztemperatur	250°C
Curietemperatur	450°C

---

<sup>16</sup> Vgl. Q15, S. 1

Zur Konzentrierung des Magnetfeldes und zur Bildung des Luftspaltes sind zwei Polplatten und ein Polkern vonnöten. Um eine hohe Konzentration des magnetischen Flusses im Luftspalt zu erreichen, hat sich Weicheisen und Stahl als Material bewährt. Nach einer Berechnung der Auswirkung der Flussdichte mit dem Simulationsprogramm *FEMM*, entscheidet sich der Verfasser dieser Arbeit für S235 Baustahl, mit dessen Eigenschaften er eine hohe simulierte Flussdichte von ca. 1 Tesla im Luftspalt, bei einer Leistung von ca. 40 Watt erreicht. Zur Verbesserung der Impedanz bei hohen Frequenzen und Senkung der Induktivität wird auf den Polkern ein Impedanzkontrollring aus einem Kupferrohr aufgesetzt, mit dem sich der Verfasser dieser Arbeit eine bessere Hochtonwiedergabe des Breitbandlautsprechertreibers erhofft.

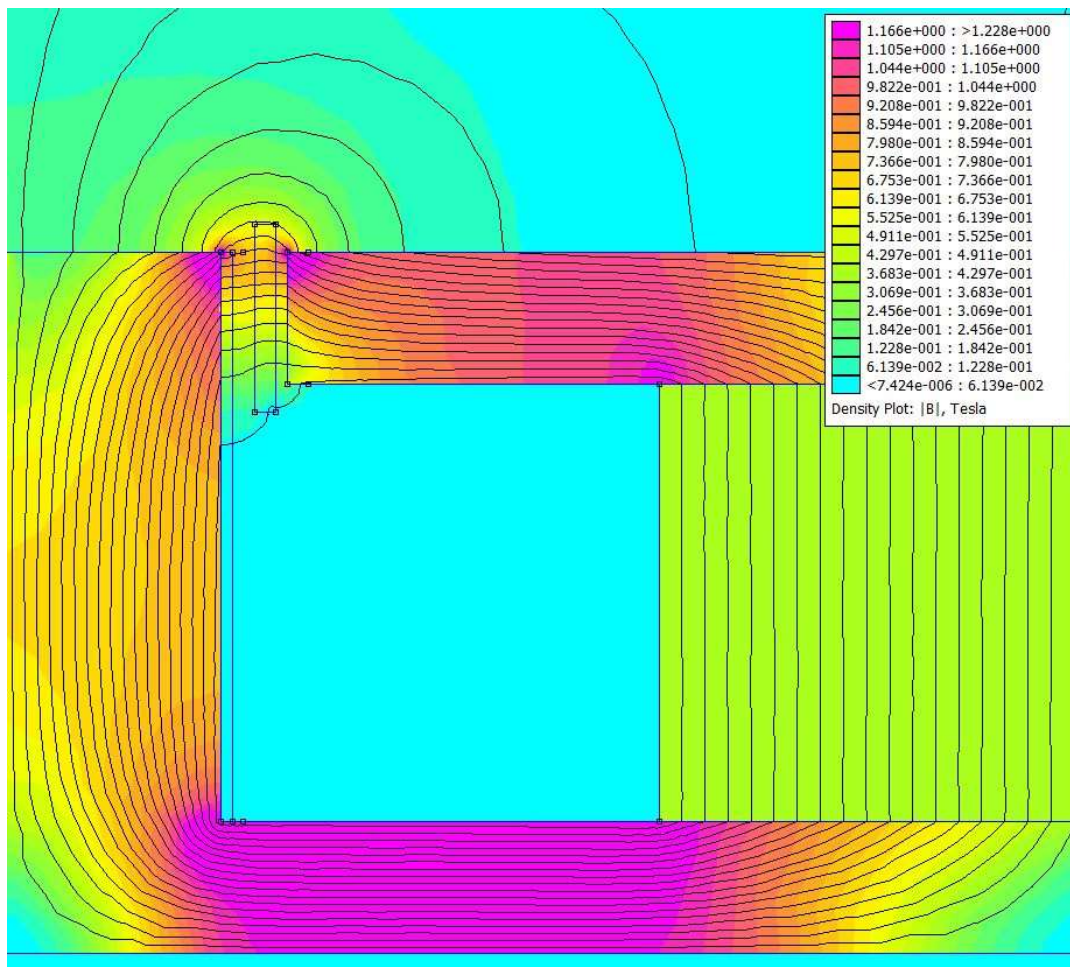


Abbildung 7: **Simulierte Magneinheit** [Jonas Richter, 2019]

In der Abbildung ist der Querschnitt der simulierten Magneinheit bis zum Mittelpunkt zu sehen. Durch das diamagnetische Kupfer als Impedanzkontrollring vergrößert sich der Luftspalt. Als Kompromiss dazu sinkt die elektrische Impedanz zu hohen Frequenzen.

Die Eigenschaften der gewählten Werkstoffe werden in folgender Tabelle veranschaulicht:

Tabelle 2: **Bemaßung der Magneteinheitenbestandteile** [Jonas Richter, 2019]

	Obere Polplatte	Untere Polplatte	Polkern	Impedanzkontrollring
Material	S235	S235	S235	Kupfer
Ø <sub>außen</sub> in mm	100	100	20	21
Ø <sub>innen</sub> in mm	26	4	M4 Gewinde; einseitig; 10 mm tief	20
Höhe in mm	6	6	26	26
Material	Baustahl S235	Baustahl S235	Baustahl S235	Kupfer
Gewicht in g	304	360	63	8
Besonderheiten	4 x M4 Gewinde	-	2 x M4 Gewinde	-

Zur Verklebung der Magneteinheit wird *UHU MAX REPAIR* Reparaturkleber verwendet. Auch bei starken Vibrationen hält dieser Klebstoff auf porösen und nichtporösen Materialien. Frühere Versuche haben gezeigt, dass Zweikomponentenkleber von *J-B Weld* ebenso gut haftet, durch das freihändige Mischen der Bindemittel jedoch nie ein reproduzierbares Ergebnis erreicht werden kann.

## 3.2 Lautsprecherkorb

Das Material des Lautsprecherkorbs kann aus Aluminiumdruckguss, Stahlblech oder Kunststoff bestehen. Durch die vergleichsweise aufwändige Produktion mit hohen Fertigungskosten für einen einzelnen Lautsprechertreiber der ersten beiden genannten Materialien, beruft sich der Verfasser dieser Arbeit auf Polyamid 12 (PA 12), welches mittels 3D-Druckverfahren bei der Firma *Rapidobject* hergestellt wird. Schon in einem früheren Prototyp kam dieses Material zum Einsatz. Durch den vergleichsweise geringen

Kostenaufwand gegenüber Aluminiumdruckguss- und Stahlblechkörben für Prototypen profitiert das 3D-Druckverfahren durch die individuelle Anpassung des Designs und der Stabilität des Korbes. In Anlehnung an einen früheren Prototypen erstellt der Verfasser dieser Arbeit ein neues Design für einen Lautsprecherkorb mit der Software *FreeCAD*. Dabei wird Wert auf eine Materialreduzierung bei gleichbleibender Festigkeit gelegt. Als Anschlussterminal, welches mit der Schwingspule verbunden ist, eignet sich eine zweifache Lötleiste.

### 3.3 Schwingspule

Die Schwingspule des Treibers kann entweder aus Aluminiumlackdraht oder Kupferlackdraht gefertigt werden. Kupferlackdraht eignet sich aufgrund des geringen Materialpreises und der hohen Leitfähigkeit als Spulenmaterial. Aluminium besitzt eine schlechtere Leitfähigkeit als Kupfer ( $\rho_{\text{Cu}}$ :  $0,0172 \Omega \cdot \text{mm}^2/\text{m}$ ;  $\rho_{\text{Al}}$ :  $0,0265 \Omega \cdot \text{mm}^2/\text{m}$ ), profitiert aber durch eine leichtere Masse, die immer noch nach Erhöhen des Querschnittes zur Kompensation der Leitfähigkeit bestehen bleibt. Durch Erfahrungen aus früheren Prototypen entscheidet sich der Verfasser dieser Arbeit für Kupferlackdraht, dessen Durchmesser mit  $0,15 \text{ mm}$  (Querschnitt =  $0,0177 \text{ mm}^2$ ) gewählt wird.

Der Gleichstromwiderstand der Lautsprecherspule wird mit  $8 \Omega$  gewählt, um den Lautsprechertreiber an gängigen Verstärkern zu betreiben. Mit dem gegebenen Widerstand lässt sich nun die Länge des Kupferlackdrahtes berechnen, der für die Spule benötigt wird:

$$l = \frac{A \cdot R}{\rho} = \frac{0,0177 \text{ mm}^2 \cdot 8 \Omega}{\frac{0,0172 \Omega \cdot \text{mm}^2}{\text{m}}} = \frac{0,1416 \text{ m}}{0,0172} \quad (\text{vgl. Gl. 2.3.4.3})$$

$$= 8,233 \text{ m}$$

Als Trägermaterial der Schwingspule, welches wie alle anderen beweglichen Teile des Treibers leicht sein, aber trotzdem eine hohe Festigkeit besitzen sollte, kommt, ebenfalls aus Erfahrungen von früheren Prototypen Kraftpapier mit einem Flächengewicht von  $120 \text{ g/m}^2$  zum Einsatz, welches mit selbstklebender Aluminiumfolie der Firma *SELITstop* verklebt wird. Das hat den Vorteil, dass das Aluminium neben der Versteifung des Kraftpapiers als Wärmeableitung für die Spule dient. Der Durchmesser des Schwingspulen-trägers wird, um den Luftspalt des Treibers klein zu halten,  $1 \text{ mm}$  größer als der Durchmesser des Impedanzkontrollrings gewählt, also  $23 \text{ mm}$ . Die Höhe des Schwingspulen-trägers wird so gewählt, dass das obere Ende  $2,275 \text{ mm}$  über dem Membrananfang liegt. Das untere Ende des Schwingspulen-trägers steht  $1 \text{ mm}$  über die Schwingspule hinaus. Die Membran befindet sich  $16 \text{ mm}$  über der Zentrierspinne, die

durch die Grundhöhe des Lautsprecherkorbes 6,725 mm über dem Ende der Schwingspule liegt. Daraus erfolgt eine Schwingspulenhöhe von 34,55 mm.

Mit dem resultierenden Umfang des Schwingspulenträgers von 72,256 mm lässt sich die Windungszahl der Spule berechnen:

$$N = \frac{l}{U} = \frac{8,233m}{0,072256m} = 113,8 \quad \text{Formel 9 (Gl. 3.3.1)}$$

Da die spätere Wicklung nur ganze Umdrehungen zählt, wird die Windungszahl auf 114 Windungen aufgerundet. Wird die Windungszahl mit dem Durchmesser des Kupferlackdrahtes multipliziert, so ergibt sich die Spulenlänge.

$$l_{Spule} = N * d_{Cu} = 114 * 0,15mm = 17,1mm \quad \text{Formel 10 (Gl. 3.3.2)}$$

Das übertriebene Verhältnis zwischen Spulenlänge (17,1 mm) und Polplattenhöhe (6 mm) wird kompensiert, indem der Verfasser dieser Arbeit die Spule zweilagig wickelt und die Spulenlänge dadurch auf 8,55 mm verkürzt.

Es entsteht dadurch eine Überhangspule mit einem Überhang von:

$$\ddot{U} = \frac{(h_{Spule} - h_{Pol})}{2} = \frac{8,55mm - 6mm}{2} = 1,275mm \quad (\text{vgl. Gl. 2.3.4.5})$$

Mit den errechneten Werten lässt sich nun die Induktivität der Schwingspule berechnen:

$$\begin{aligned} L &= \frac{\mu_0 * N^2 * A}{h_{Spule} + 2 * \frac{r_w}{2,2}} = \frac{0,9999936H * m^{-1} * 114^2 * 0,0177mm^2}{8,55mm + 2 * 11,5mm/2,2} \quad (\text{vgl. Gl. 2.3.4.1}) \\ &= \frac{230H * mm^2}{19000mm^2} = 0,0121H = 12,1mH \end{aligned}$$

Hierbei ist zu beachten, dass die Schwingspuleninduktivität später durch den Impedanzkontrollring gesenkt wird, folglich auch die reale Impedanz der Schwingspule.

Zur Festigung der einzelnen Wicklungen hat sich aus früheren Prototypen *Pattex Kraftkleber* bewährt, sowie *Tesa Malerband* als Markierungsmittel für den Wicklungsbeginn und den Zusammenhalt des Schwingspulenträgers. Um die Spulenenden der Schwingspule zu den Anschlüssen am Lautsprecherkorb zu führen, eignet sich abisolierte Lautsprecherlitze, deren Querschnitt mindestens 0,75 mm<sup>2</sup> betragen soll. Zur Verbindung und Fixierung aller weiteren Materialien am Schwingspulenträger hat sich *Uhu Sekundenkleber* bewährt.



In der folgenden Tabelle werden die ermittelten Daten und verwendeten Materialien der Schwingspuleneinheit zusammengefasst:

Tabelle 3: **Bemaßung der Spulenbestandteile** [Jonas Richter]

	Schwingspule	Schwingspulenträger
Material	Kupferlackdraht (d= 0,15 mm)	Kraftpapier, Alumin- umklebeband, Maler- band
Höhe (in mm)	8,55	34,55
Durchmesser (in mm)	23	23
Windungszahl	114	-
Windungslänge (in m)	8,233	-
Gleichstromwiderstand (in $\Omega$ )	8	-
Induktivität (in mH)	12,1	-
Klebmaterial	Pattex Kraftkleber	Selbstklebende Ma- terialien, UHU Sekun- denkleber

Die Schwingspule kann auf einer eigens gefertigten, aus einem vorhergehenden Praktikum der Hochschule Mittweida bei der Firma *Engelstein*, Wickelvorrichtung gewickelt werden. Bei jeder vollen Umdrehung schaltet ein sich an der Welle befindlicher Magnet einen Reed-Kontakt. Dieser ist mit der „Gleichheitszeichen-Taste“ eines Taschenrechners verbunden. Bei vorheriger Eingabe von „1 + =“ zählt der Taschenrechner bei jeder vollen Umdrehung der Welle „+1“.

### 3.4 Membran

Als Membranmaterial des Treibers eignet sich ebenfalls Kraftpapier. Es besticht durch die höchste Festigkeit aller Papiersorten und ist zudem sehr leicht. Das gewählte Kraftpapier hat, wie das des Schwingspulenträgers, ein Flächengewicht von  $120 \text{ g/m}^2$ . Der Verfasser dieser Arbeit entscheidet sich gegen eine Nawi-Membran. Die anfangs erwähnten Vorteile überwiegen zwar, jedoch ist dessen Produktion erheblich komplizierter und ohne eine (nicht vorhandene) Hitzepresse nicht möglich. Frühere Prototypen haben jedoch gezeigt, dass sich Kraftpapier in Konusform als Membranmaterial gut eignet und formstabil bleibt. Als zusätzliche Versteifung wird die Membran als Sandwichmembran ausgeführt, indem das Kraftpapier mit handelsüblicher Alufolie und einer weiteren Schicht Kraftpapier mit *Pattex Kraftkleber* verklebt wird. Zur weiteren Stabilisierung des Materials wird die Membran mit einem Flüssigsteife-Wasser-Gemisch bepinselt, damit die Membran auf lange Sicht ihre Form behält. Außerdem erhält sie eine Membranbeschichtung der Firma *Visaton* (LTS 50). Diese soll die innere Dämpfung erhöhen und Partialschwingungen unterdrücken<sup>17</sup>.

Den äußeren Durchmesser der Membran wählt der Verfasser dieser Arbeit mit 100 mm, der sich aus vorherigen Prototypen als gut verwendbar ergeben hat, um einen Kompromiss zwischen Masse und Tiefenwiedergabe zu erreichen. Der innere Durchmesser der Membran wird an den Schwingspulenträger angepasst, dessen Durchmesser 23 mm beträgt. Die Höhe der Membran wählt der Verfasser dieser Arbeit mit 25 mm. Versuche mit vorherigen Prototypen haben ergeben, dass sich eine ausgeprägtere Membranhöhe bei diesem Außendurchmesser negativ auf die Abstrahlcharakteristik auswirkt.

Zur Berechnung der Abwicklungsfläche, die für die Membran vonnöten ist, um diese auszuschneiden, wird ein Online-Konusrechner der Website [rnc-sachsen.de](http://rnc-sachsen.de) verwendet<sup>18</sup>.

---

<sup>17</sup> Vgl. Q14

<sup>18</sup> Vgl. Q12

### 3.5 Zentrierspinne und Sicke

Für die Zentrierspinne eignen sich Gewebestoffe aus Polyester-Baumwoll-Verbunden. Wurden bei früheren Prototypen noch Ausschnitte von herkömmlichen Stoffbeuteln benutzt, deren Zusammensetzungseigenschaften nicht bekannt waren, entscheidet sich der Verfasser dieser Arbeit für den Stoff *Cameleon* der Firma *Swafing* mit einer Zusammensetzung aus 80 % Baumwolle und 20 % Polyester, dessen Flächengewicht 200 g/m<sup>2</sup> beträgt.

Das gleiche Material wird als Sickenmaterial verwendet. Da sich Schaumstoff und Gummi nur mit einer Hitzepresse in die gewünschte Form bringen lassen, entfallen diese als geeignete Stoffe. Sickenringe aus Gewebestoffen profitieren vor allem durch die exakte Reproduzierbarkeit und einer identischen Zug- und Druckrichtung, die die Membran exakt linear schwingen lassen.<sup>19</sup>

In früheren Versuchen benutzte der Verfasser dieser Arbeit Epoxidharz zur Versteifung der Zentrierspinne. Nach mehreren Versuchen hat sich aber gezeigt, dass das beste Ergebnis erreicht wird, wenn der Stoff auf einer eigens dafür gefertigten gedrehten Form zuerst mit Flüssigsteife der Firma *Hoffmanns* im Verhältnis 2:1 getränkt und nach dem Trockenvorgang mit Flüssiggummi bepinselt wird. Die Flüssigsteife bewirkt dabei, dass sich der Stoff nach einer Trocknung in einer bestimmten Form versteift. Der Flüssiggummi unterstützt die Festigkeit, indem er ihn langzeitstabil und widerstandsfähig gegen Feuchtigkeit macht. Das gleiche Verfahren hat sich auch für die Sicke bewährt. Durch das luftundurchlässige Material kann keine Luft mehr zur Kühlung an die Schwingspule gelangen. Kompensiert wird dies, indem die Membran keine Staubschutzkappe erhält und so eine Luftzufuhr zur Schwingspule gewährt wird.

Der Vorteil von identischen Sicken- und Spinnenmaterialien besteht darin, dass diese gleich schwingen können und sich nicht durch verschiedene Materialeigenschaften beeinflussen.

Für alle Verbindungen, bei dem der Klebstoff nicht explizit genannt ist, eignet sich *Pattex Kraftkleber*.

---

<sup>19</sup> Vgl. Q4

## 4 Herstellung und Zusammenführung der einzelnen Baugruppen

### 4.1 Herstellung der einzelnen Baugruppen

#### 4.1.1 Magneteinheit

Für die Zusammensetzung der Magneteinheit werden zuerst die obere und untere Polplatte vorbereitet. Die untere Polplatte erhält im Mittelpunkt mittels einer Schablone eine 4 mm große Bohrung, welche an der Unterseite versenkt wird. Diese Bohrung dient als Schraubaufnahme, um den Polkern zu befestigen. Die obere Polplatte erhält ebenfalls im Mittelpunkt eine Bohrung mit einem Durchmesser von 26 mm, die zusammen mit dem Polkern den Luftspalt bildet. Außerdem werden vier 3,5 mm große Bohrungen erstellt, die von den Bohrungen des Lautsprecherkorbes übertragen wurden und die Magneteinheit mit dem Lautsprecherkorb verbinden. Anschließend wird in die vier Bohrungen ein M4 Gewinde geschnitten.

Der Polkern wird aus 30 mm starkem S235 Rundstahl an einer Drehbank auf 20 mm rund gedreht und erhält eine Länge von 26 mm. Diese ergibt sich aus der Summe von Magnethöhe und oberer Polplattenhöhe und ist somit bündig mit der oberen Polplatte. Zusätzlich werden an beiden Enden des Polkerns 3,5 mm Bohrungen angefertigt und mit einem M4 Gewinde mit einer Länge von 10 mm geschnitten. So kann der Polkern später mit der unteren Polplatte verschraubt werden. Auf der anderen Seite können je nach Bedarf Phase Plugs<sup>20</sup> angebracht und nach Belieben ausgetauscht werden.

Zur Herstellung des Impedanzkontrollrings verwendet der Autor dieser Arbeit ein Kupferrohr, dessen Innendurchmesser 20 mm und dessen Außendurchmesser 22 mm beträgt. Das Rohr wird auf 30 mm gekürzt, auf einen Außendurchmesser von 21 mm gedreht, und auf 26 mm plan gedreht. Es ist zu überprüfen, ob der Impedanzkontrollring spielfrei auf den Polkern gleiten kann. Ist dies durch Toleranzabweichungen des Kupferrohres nicht der Fall, so muss die Innenseite des Impedanzkontrollringes entsprechend abgedreht werden.

---

<sup>20</sup> Aus Aluminium, Kupfer, Messing oder Holz gedrehte Form, die das Abstrahlverhalten eines Lautsprechertreibers beeinflussen soll.

Für die Verschraubung zwischen Polkern und unterer Polplatte ist eine M4 x 12 mm Senkkopfschraube zu verwenden.

Nachdem alle Teile der Magneteinheit vorbereitet, entgratet, entfettet und auf das korrekte Maß überprüft wurden, sowie alle Bauteile aus Baustahl mit *Hammerite Metall-Schutzlack* behandelt wurden, ist die Magneteinheit zusammenzuführen.

Zuerst wird der Impedanzkontrollring auf den Polkern aufgeschoben und mit Sekundenkleber fixiert. Anschließend wird die Einheit mit der unteren Polplatte mit der benannten M4 Senkkopfschraube verschraubt. Dabei ist eine Schraubensicherung zu nutzen. Zusätzlich wird die Verbindung mit Sekundenkleber fixiert.

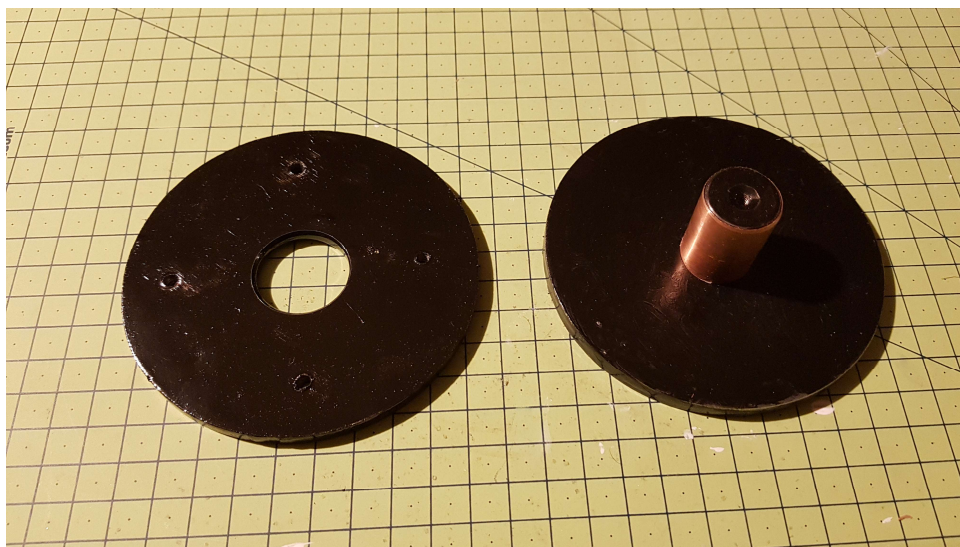


Abbildung 8: **Polplatten mit Polkern und Impedanzkontrollring** [Jonas Richter, 2019]

Nach einer Trockenzeit von 5 Minuten und nach einer erneuten Reinigung der bisher verwendeten Bauteile wird der Magnet auf der unteren Polplatte angebracht. Vorher muss jedoch die Polung des Magneten bestimmt werden, da dessen Nordpol in Richtung Membran zeigen soll. Dazu wird ein Kompass benötigt, der auf eine der beiden Flächen des Ringmagnets ausgerichtet wird. Zeigt die Nadel auf den Südpol des Kompass, so definiert diese Seite den Nordpol des Magneten. Dieser wird, zur besseren Sichtbarkeit, mit einem weißen Filzstift gekennzeichnet.

Zur Verbindung des Magneten mit der unteren Polplatte verwendet der Verfasser dieser Arbeit eine Montagehilfe aus Multiplex, die auf der Drechselbank zu einem Rohr gedreht wurde. Der Innendurchmesser entspricht dem Durchmesser der Polkerneinheit, der Außendurchmesser dem Innendurchmesser des Magneten. Die Montagehilfe wird vor dem Aufbringen des Magneten auf die untere Polplatte über die Polkerneinheit gestülpt. Das garantiert, dass der Abstand zwischen Magnet und Polkerneinheit, sowie

der Abstand zwischen Magnet und Schwingspule, an jedem Punkt exakt gleich lang ist. Der Magnet wird nun über die Montagehilfe gestülpt und mit *UHU Max Repair* auf der unteren Polplatte fixiert. Der markierte Nordpol des Magneten zeigt dabei in Richtung Membran, beziehungsweise zur oberen (noch nicht montierten) Polplatte. Besondere Vorsicht ist geboten, um Quetschungen an Gliedmaßen durch die Kraft des Magneten zu vermeiden. Nach 24 Stunden Trockenzeit kann die Montagehilfe an der Magneteinheit wieder entfernt und mit der Weiterverarbeitung begonnen werden.

Für die Verklebung der oberen Polplatte mit der Magneteinheit kommt erneut eine gedrechselte Rohrmontagehilfe aus Multiplex zum Einsatz. Diese besitzt einen Innendurchmesser, der dem Durchmesser der Polkerneinheit entspricht. Der Außendurchmesser beläuft sich auf den Innendurchmesser der oberen Polplatte (26 mm). Somit wird eine Öffnung von 2,5 mm an jedem Punkt des Luftspalts gewährleistet. Ist die Montagehilfe über die Polkerneinheit gestülpt, so kann die obere Polplatte mittels *UHU Max Repair* mit dem Magneten verklebt werden. Nach einer erneuten Trockenzeit von 24 Stunden ist die Montage der Magneteinheit beendet und kann zur Weiterverarbeitung genutzt werden.

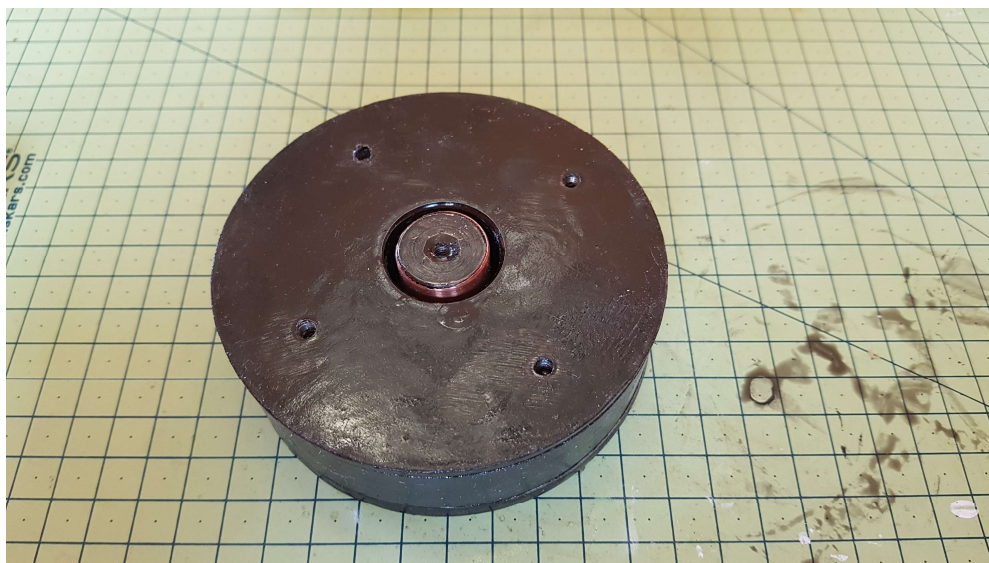


Abbildung 9: **Zusammengesetzte Magneteinheit** [Jonas Richter, 2019]

### 4.1.2 Lautsprecherkorb

Da der Lautsprecherkorb die Magneteinheit mit den schwingenden Bauteilen des Lautsprechers verbindet, muss dieser verwindungssteif und vibrationsarm sein. Der 3D-Druck des Lautsprecherkorbes erfolgt über die Firma *Rapidobject* (Abbildung 12). Das Design entwirft der Verfasser dieser Arbeit mit der Software *FreeCAD* (Abbildung 10, Abbildung 11).

Der Lautsprecherkorb lässt sich zur Vereinfachung der Problematik in drei Teile einteilen (Abbildung 10): dem unteren (c) und oberen (a) Ring, sowie den Querverstreibungen (b).

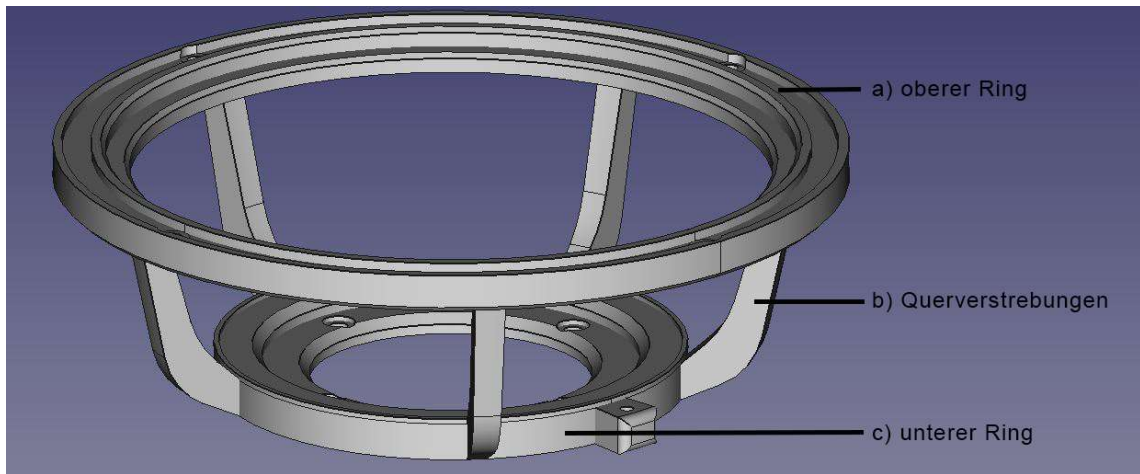


Abbildung 10: **Grundeinteilungen des Lautsprecherkorbs** [Jonas Richter, 2019]

Der untere Ring bildet mit einer Höhe von 8 mm die Aufnahme für die Magneteinheit und besitzt denselben Außendurchmesser wie ebendiese von 100 mm. Der Innendurchmesser des unteren Rings beträgt 60 mm. Bei einem Radius von 35 mm besitzt der untere Ring eine Vertiefung des Materials von 4 mm und teilt den Ring so in zwei Abschnitte. Der innere, vertiefte Abschnitt bildet mit vier 4 mm Bohrungen die Aufnahme für die Magneteinheit. Der äußere Abschnitt bildet die Auflage- und Klebefläche für die Zentrierspinne. Als Begrenzung für diese ist bei einem Radius von 49 mm eine Erhöhung von 1 mm angebracht. Durch die Vertiefung des inneren Abschnittes wird eine Montage der Magneteinheit ermöglicht, bei der die Zentrierspinne immer noch frei schwingen kann, ohne andere Bauteile zu berühren. Zur Gewichtsreduzierung und zur Erzeugung von Stabilität sind an der Unterseite des unteren Ringes 36 rechteckige Vertiefungen mit den Maßen 4 mm x 7 mm x 2 mm (BxLxT) vorgesehen. Außerdem besitzt der untere Ring eine Montagevorrichtung für die Schwingspulenanschlüsse von 10 mm x 10 mm x 10 mm (BxLxT), an welcher eine 3 mm Bohrung vorgesehen ist.

Zur Montage in einem Lautsprechergehäuse sowie zur Halterung der Lautsprechersicke dient der obere Ring des Lautsprecherkorbes, der ebenfalls eine Höhe von 8 mm besitzt. Dieser hat einen Außendurchmesser von 168 mm und bietet eine Auflagefläche für ein Lautsprechergehäuse von 10 mm. Wie der untere Ring ist auch der obere Ring in zwei Abschnitte eingegliedert. Der innere Abschnitt senkt sich bei einem Radius von 146 mm um 4 mm. Dieser Abschnitt bildet die Montagefläche für die Lautsprechersicke. Der äußere Abschnitt beinhaltet vier 4 mm Bohrungen, die die Montage in einem Lautsprechergehäuse ermöglichen. Wie beim unteren Ring befinden sich an der Unterseite des oberen Rings rechteckige Vertiefungen (40 Stück) zur Gewichtsreduzierung und Stabilisierung mit dem Maßen 4 mm x 10 mm x 1 mm (BxLxT). Außerdem besitzt der äußere

Abschnitt eine Vertiefung von 1 mm, die einen inneren Durchmesser von 152 mm und einen äußeren Durchmesser von 164 mm besitzt. Alle Bohrungen des Lautsprecherkorbes sind mit einer 7 mm x 1 mm (BxT) Senkbohrung versehen.

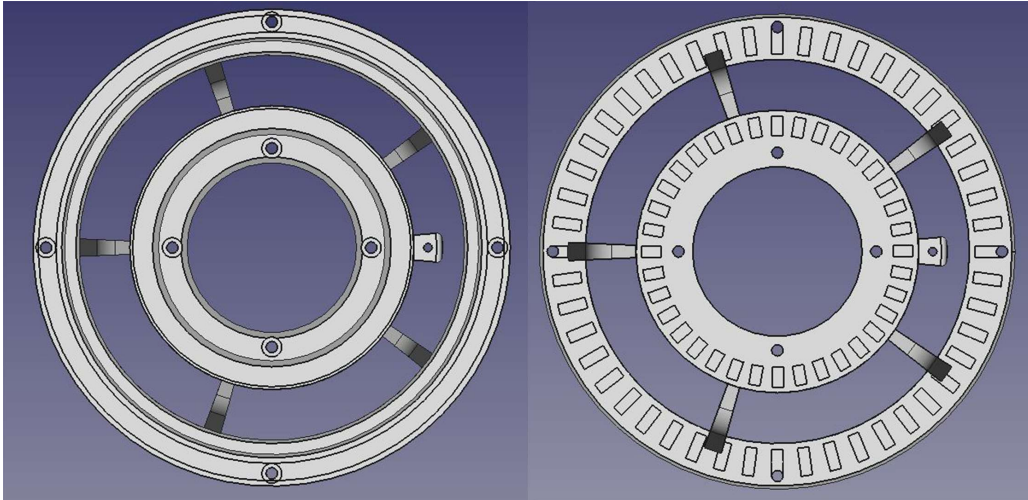


Abbildung 11: **Untere und Obere Korbansicht** [Jonas Richter, 2019]

Fünf Querverstreben verbinden den unteren Ring mit dem oberen Ring und gewährleisten eine Stabilisierung des Lautsprecherkorbes. Diese sind so entworfen, dass die Gesamthöhe des Lautsprecherkorbes 53 mm beträgt. Eine Querstrebe hat eine Höhe von 45 mm, bei einer Breite von 5,9 mm. Die Tiefe am oberen Ring beträgt 6 mm, die Auflagefläche am unteren Ring 8 mm. Aus optischen Gründen werden die Querverstreben im Verlauf ihrer Höhe verrundet.

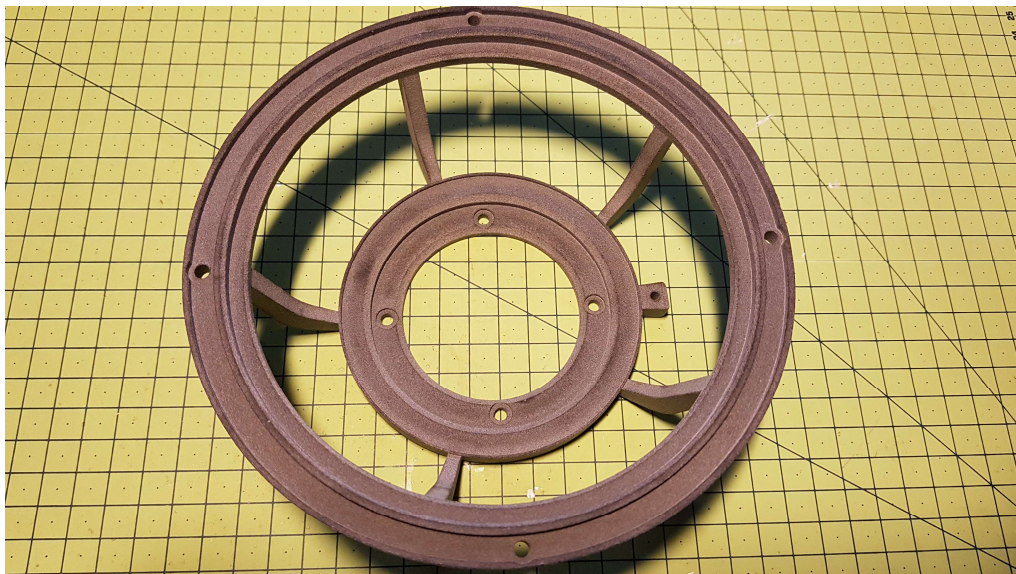


Abbildung 12: **Gedruckter Korb aus PA12** [Jonas Richter, 2019]



### 4.1.3 Schwingspule

Zur Herstellung der Schwingspuleneinheit wird zu Beginn der Schwingspulenträger gefertigt. Eine rechteckiger Streifen Kraftpapier mit den Maßen 50 mm x 80 mm (BxL), wird mit dem selbstklebenden Aluminiumklebeband mit denselben Maßen verklebt. Anschließend wird der Schwingspulenträger mittels einer Schneidemaschine auf das gewählte Maß von 34,55 mm x 72,256 mm (BxL) geschnitten (Abb. 13). Parallel zur langen Seite des Schwingspulenträgers werden mit einem Filzstift Markierungen gesetzt, die später als Hilfslinien zur Montage der einzelnen Bauteile am Schwingspulenträger dienen. Diese befinden sich bei 1 mm (Beginn Schwingspule), 9,55 mm (Ende Schwingspule), 16,275 mm (Zentrierspinnenverklebung) und 32,275 mm (Membranverklebung).

Mithilfe eines runden Stiftes, der auf der Kraftpapierseite aufliegt, und einem Finger auf der Aluminiumseite wird über die gesamte Länge des Verbundes gestrichen. So kann der Schwingspulenträger in eine runde Form gebracht werden, bei der sich das Aluminiumklebeband an der Außenseite befindet. Um den Schwingspulenträger auf der Wickelmaschine zu befestigen, wird ein Wickelkörper aus Buchenholz mit einem Durchmesser von 22,8 mm gedreht, welcher eine Innenbohrung von 8 mm besitzt. Nachdem der Wickelkörper auf der Wickelmaschine montiert wurde (Abb. 14), wird der Schwingspulenträger um den Wickelkörper gelegt, wobei sich zwischen Schwingspulenträger und Wickelkörper vier Folienstreifen mit einer Dicke von 0,1 mm befinden müssen, die über das Ende des Schwingspulenträgers hinausstehen, damit sich der Schwingspulenträger nach der Wicklung ordentlich lösen lässt.

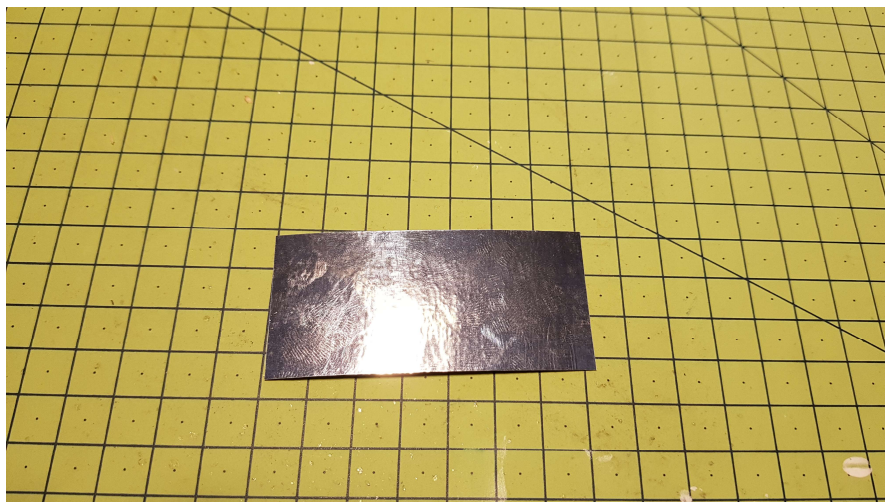


Abbildung 13: **Schwingspulenrohling** [Jonas Richter, 2019]

Mit einem 25 mm x 20 mm (BxL) Streifen Malerklebeband, welcher bündig zur 9.55 mm Markierung anschließt, wird der Schwingspulenträger nun fixiert, sodass dieser einen Durchmesser von 23 mm erhält.

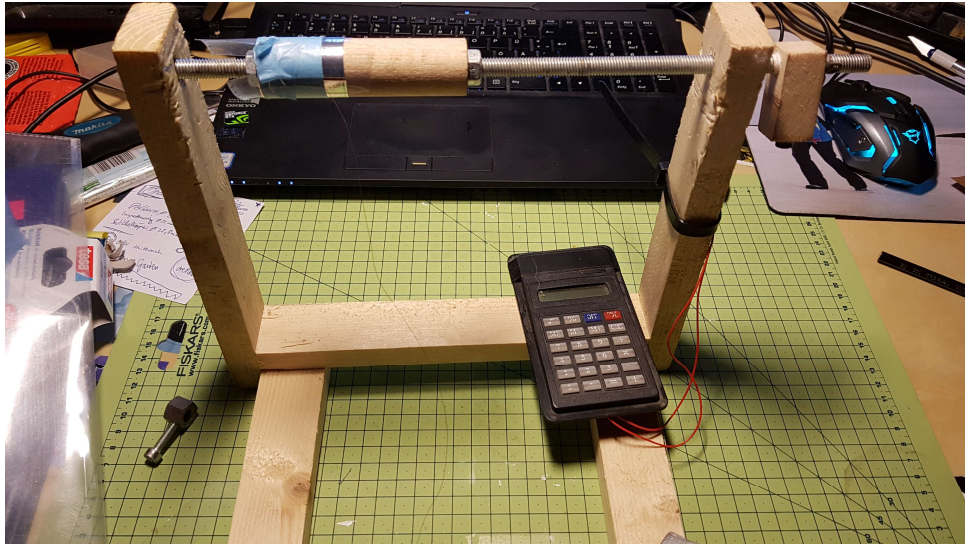


Abbildung 14: **Positionierung des Schwingspulenträgers auf dem Wickelkörper** [Jonas Richter, 2019]

Nach der Fixierung des Schwingspulenträgers wird der 0,15 mm dicke Kupferlackdraht mit einem Überhang von 10 cm unter dem Malerklebeband befestigt. Dies bildet den positiven Anschluss der Schwingspule. Um den Schwingspulenträger, zwischen der 1 mm und der 9,55 mm Markierung (Platz der Wicklung), wird nun *Pattex Kraftkleber* aufgetragen und verstrichen. Anschließend wird die erste Windung der Spule per Hand gewickelt. Diese muss exakt parallel verlaufen. Fortfolgend wird die Wickelmaschine in Betrieb genommen und die Spule bis zur 9,55 mm Markierung gewickelt. An dieser Position hat die Spule 57 Windungen. Über die bereits vorhandene Wicklung wird eine erneute Schicht Kraftkleber aufgetragen und verstrichen. Danach wird über der ersten Wicklung die zweite Lage der Spule in die entgegengesetzte Richtung gewickelt. Befindet sich der Kupferlackdraht wieder an der Ausgangsposition, so ist die Windungsanzahl von 114 Windungen erreicht und das Spulenende wird wie der Spulenanfang unter dem Malerband befestigt. Dessen Überstand beträgt dabei 6 cm. So kann der Plus- und Minuspol der Spule unterschieden werden. Eine letzte Schicht Kraftkleber wird über der Spule aufgetragen. Mit einem Föhn wird die entstandene Spule für 5 Minuten bei gleichmäßiger Temperatureinwirkung getrocknet und anschließend 15 Minuten luftgetrocknet. Nach der Wartezeit wird das Malerklebeband entfernt. Ein neuer Streifen 25 mm breites Malerklebeband mit der doppelten Länge des Umfangs des Schwingspulenträgers wird angefertigt. Dieser wird bündig am Spulenende eine volle Umdrehung um den Schwingspulenträger gewickelt, wobei sich die Spulenenden oberhalb des Malerklebebandes befinden. Danach werden mit einer Nadel zwei Löcher in das verbleibende Malerklebeband an der Position der Spulenenden gestochen. Die Höhe der Löcher bildet dabei die Hälfte der Breite des Malerklebebandes (12,5 mm). Durch die beiden Löcher werden nun die Spulenenden hindurchgefädelt und der Rest des Malerklebebandes um den Schwingspulenträger geklebt. Mit einem Markierstift wird der Pluspol der Spule markiert (Spulenanfang). Der Isolierlack der nun freiliegenden Spulenenden wird mit Schleifpapier (K80)

abgeschliffen, um einen späteren Anschluss von Lautsprecherkabeln zu gewähren (Abb. 15).

Der Gleichstromwiderstand an den Spulenenden und das Gewicht der Schwingspuleneinheit werden gemessen. Die Schwingspuleneinheit hat einen Widerstand von 7,9 Ohm und ein Gewicht von 4 g.

Zuletzt werden zwei abisolierte Lautsprecherkabel mit einer Länge von 60 mm und einem Querschnitt von 0,75 mm<sup>2</sup> verdrillt. Diese werden beim Zusammensetzen am Schwingspulenträger befestigt und verbinden die Schwingspuleneinheit mit den Anschlüssen des Lautsprecherkorbes.

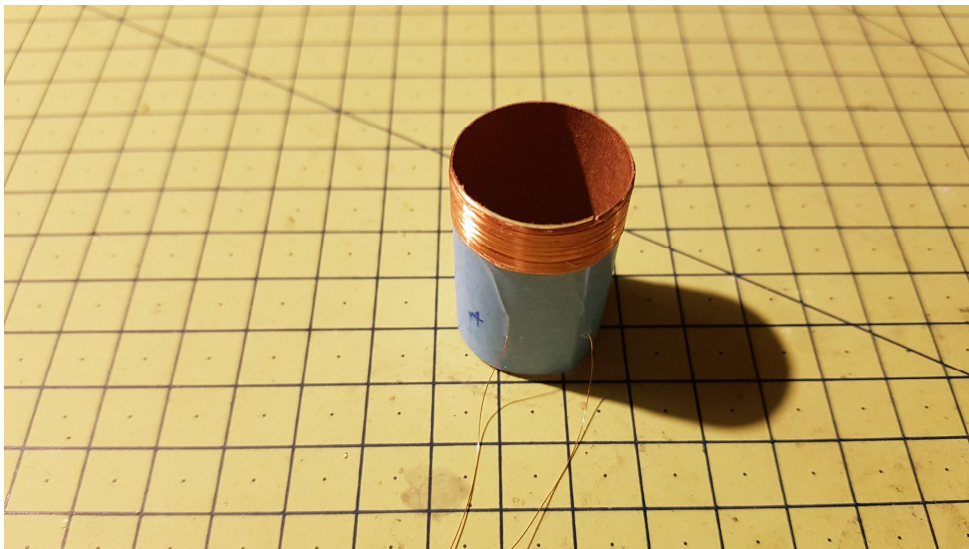


Abbildung 15: **Schwingspule mit Schwingspulenträger** [Jonas Richter, 2019]

#### 4.1.4 Membran

Das Sandwichmaterial der Lautsprechermembran besteht aus einem Verbund aus Kraftpapier und Aluminiumfolie. Einseitig wird ein Blatt DIN-A4-Kraftpapier, sowie ein Ausschnitt handelsüblicher Aluminiumfolie mit den Maßen eines DIN-A4-Blattes, mit Kraftkleber eingestrichen. Nach einer Wartezeit von 15 Minuten wird das Kraftpapier mit der Aluminiumfolie verklebt und verpresst. Dabei berühren sich die beiden Seiten, die mit Kraftkleber eingestrichen worden sind. Anschließend wird die noch freie Seite der Aluminiumfolie und ein weiteres Blatt Kraftpapier (einseitig) mit Kraftkleber bestrichen. Nach einer erneuten Wartezeit von 15 Minuten wird das Kraftpapier mit dem Verbund aus Kraftpapier und Aluminiumfolie verklebt und gepresst. Die beiden mit Kraftkleber

eingestrichenen Seiten berühren sich erneut. So ist ein Verbund aus Kraftpapier-Aluminium-Kraftpapier entstanden.

Die ermittelten Werte der Abwicklung des Konus werden auf das Kraftpapier mittels Zirkel und Lineal übertragen. Alternativ kann die Schablone auch mit einem Zeichenprogramm erstellt und auf das Membranmaterial gedruckt werden. Anschließend wird die Konusform mit einem Skalpell ausgeschnitten. Erneut werden ein runder Stift und ein Finger als Hilfsmittel verwendet, um den Konus zu formen. Danach werden die Klebeflächen mit Kraftkleber bestrichen und nach einer Wartezeit von 15 Minuten fest miteinander verklebt (Abb. 16). Um eine größere Kontaktfläche für die Verklebung zu erhalten, wird das untere Ende der Membran, welches später mit dem Schwingspulenträger verklebt wird, 16-mal kreisförmig mit einer Schere 2 mm tief eingeschnitten.

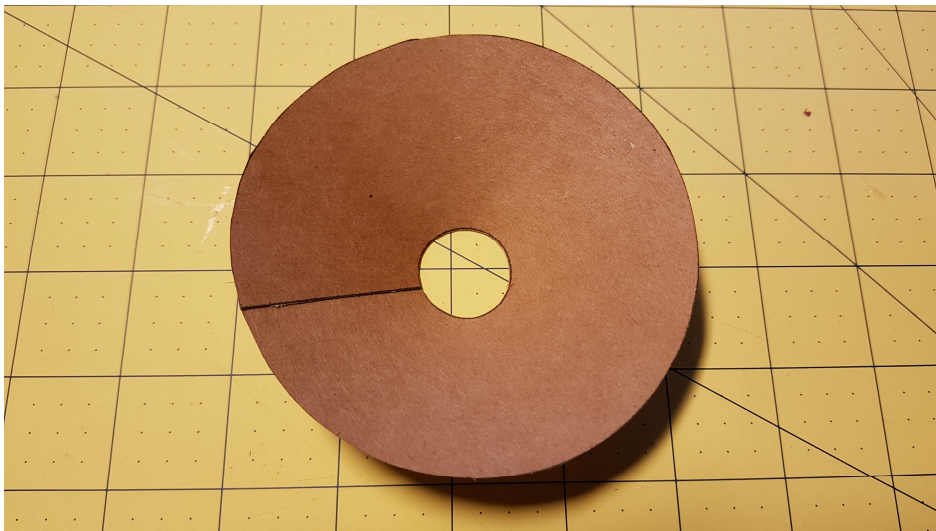


Abbildung 16: **Membran im Rohzustand** [Jonas Richter, 2019]

Nach einer Trockenzeit von 12 Stunden wird die entstandene Membran mit einem Flüssigsteife-Wasser-Gemisch (Mischverhältnis 2:1) bepinselt und die verbleibende Flüssigkeit mit einem Tuch abgewischt. Anschließend wird die Membran mit einem Föhn getrocknet, bis das Kraftpapier wieder seine ursprüngliche Farbe angenommen hat, wobei auf ihr ein Gewicht platziert ist, um ihre endgültige Form zu bestimmen. Nach der Trockenzeit von 12 Stunden wird die Membran von beiden Seiten mit *Visaton LTS 50* bepinselt und erneut 12 Stunden getrocknet.

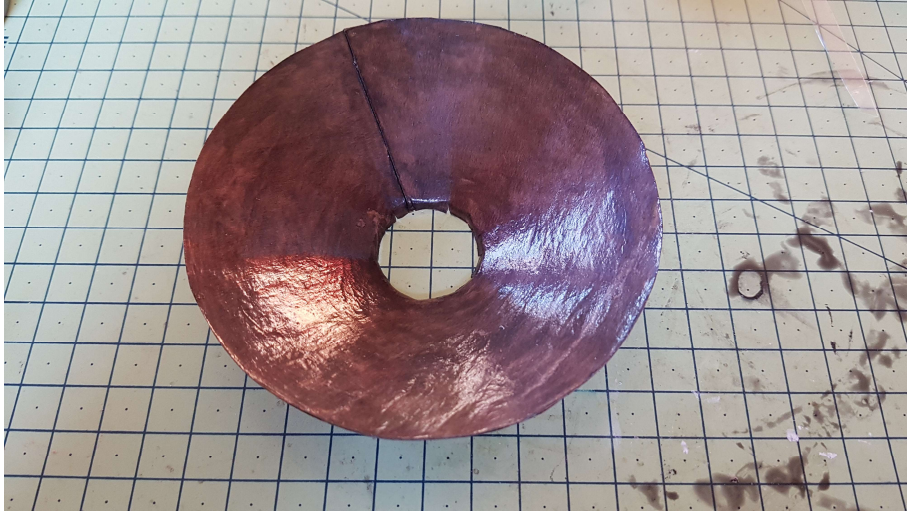


Abbildung 17: **Membran nach Festigkeitsbehandlung** [Jonas Richter, 2019]

Die Membran hat ein Rohgewicht von 4 g. Nach der Verarbeitung mit Flüssigsteife und der Beschichtung mit *Visaton LTS 50* beträgt das Gewicht 5g.

#### 4.1.5 Zentrierspinne und Sicke

Zur Fertigung der Zentrierspinne und der Sicke, werden zwei 18 mm starke Multiplexrohlinge gedrechselt, die den Schwingbauteilen ihre Form geben sollen. Diese erhalten folgende Maße (vgl. Tabelle 4 mit Abb. 18):

Tabelle 4: **Bemaßung der Multiplexrohlinge** [Jonas Richter, 2019]

Durchmesser/Höhe (in mm)	Zentrierspinne	Sicke
$\varnothing_1$	23	90
$\varnothing_2$	35	100
$\varnothing_3$	50	115
$\varnothing_4$	65	135
$\varnothing_5$	80	144
$\varnothing_6$	100	k.A.
<b>h</b>	8	8

Dabei definiert die angegebene Höhe die Tiefe der unterschiedlichen Höhenebenen der Form.

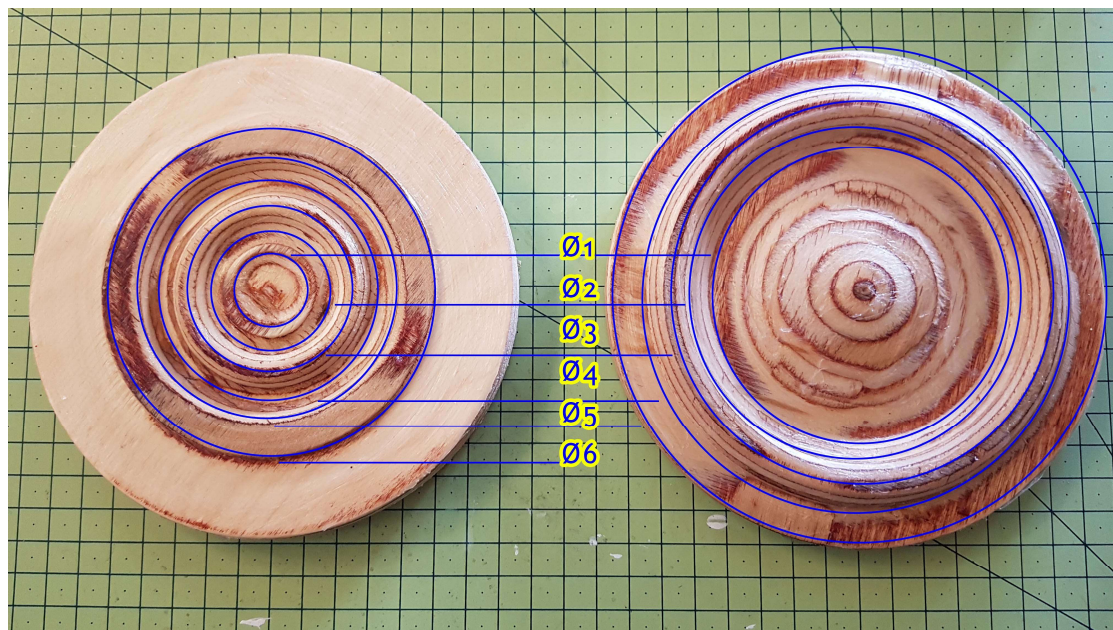


Abbildung 18: **Bemaßungsgrundlage Zentrierspinne- und Sickenform (v.l.n.r.)** [Jonas Richter, 2019]

Nach der Fertigung der Formen werden diese mit Silikon bestrichen, um ein Quellen des Holzes zu vermeiden und eine leichte Lösbarkeit der aufgelegten Materialien zu erreichen.

Die ausgewählten Stoffe werden auf ein grobes Maß von 20 cm x 20 cm zugeschnitten, in einem Flüssigsteife-Wasser-Gemisch im Verhältnis 2:1 getränkt und ausgewrungen. Danach werden die Stoffe auf die Formen aufgelegt und mit den Fingern den Strukturen der Formen angepasst (Abb. 19a)). Ist dies geschehen, werden die Stoffe mit einem Föhn getrocknet. Dabei werden die Stoffe, falls nötig, immer wieder an die Formen angepasst. Nachdem die Stoffe nach ca. 30 Minuten getrocknet sind, werden die steif gewordenen Rohlinge von beiden Seiten zwei Mal mit *mibenco Flüssiggummi* bestrichen und nach jeder Schicht mit einem Föhn getrocknet (Abb. 19b)). Dabei befinden sich die Rohlinge in der diesbezüglichen Form.

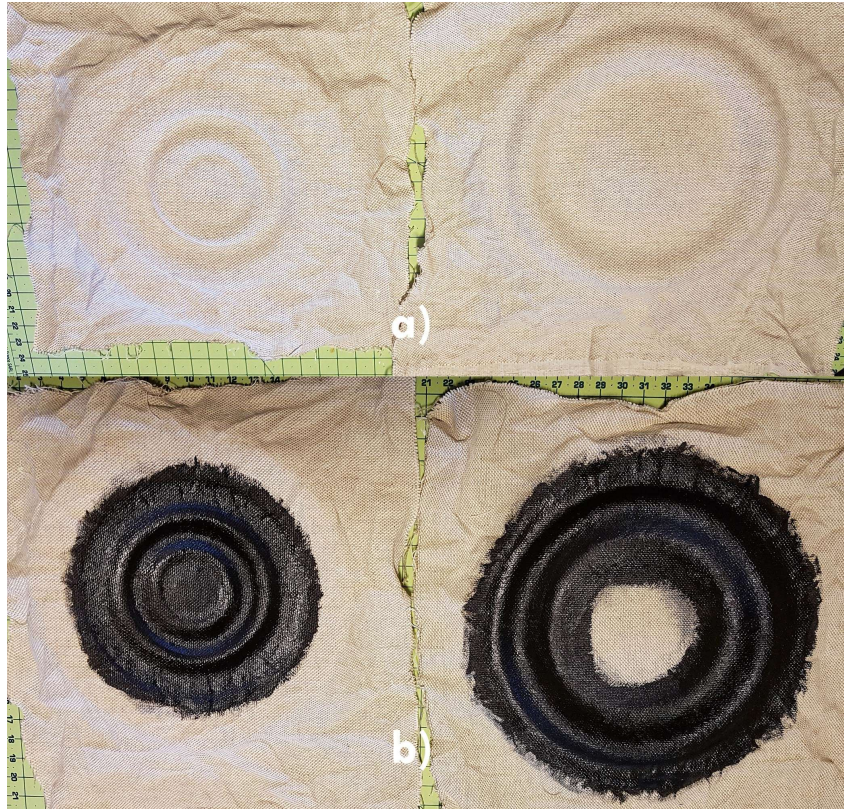


Abbildung 19: **Herstellung der Zentrierspinne und der Sicke** [Jonas Richter, 2019]

Nach einer 24-stündigen Trockenzeit sind die gewählten Durchmesser an den Formen mittels eines Skalpellts auszuschneiden. Die Zentrierspinne erhält einen inneren kreisrunden Ausschnitt von 23 mm, um am Schwingspulenträger befestigt zu werden und wird außen auf einen 95 mm Durchmesser beschnitten. Der innere kreisrunde Ausschnitt der Sicke beträgt 95 mm und deren äußere Ausschnitt 143 mm.



Abbildung 20: **Fertige Zentrierspinne und Sicke** [Jonas Richter, 2019]

## 4.2 Zusammenführung der einzelnen Baugruppen

Nachdem alle Baugruppen gefertigt wurden, sind diese zu einem Lautsprechertreiber zusammenzuführen.

Der Lautsprecherkorb wird mit der Magneteinheit mittels vier M4 x 8 mm Zylinderkopfschrauben verbunden. Dabei wird jede Schraube vorher mit Schraubensicherung eingepinselt, sodass diese gegen ein versehentliches Lösen durch Vibrationen gesichert sind. Die zweipolige Lötbleiste wird an der vorgesehenen Bohrung mit einer M3 x 15 mm (BxL) Gewindeschraube befestigt.

Die Zentrierspinne wird auf die Schwingspuleneinheit aufgeschoben und an der 16,275 mm-Markierung mittels Kraftkleber verklebt. Die Spulenden befinden sich dabei oberhalb der Zentrierspinne. Direkt am Schwingspulenträger werden die zwei vorbereiteten Lautsprecherkabel mit den jeweiligen Spulenden verlötet, die zweipolige Lötbleiste an diesen befestigt und der Pluspol der Spule an der Lötbleiste beschriftet. Der überstehende Kupferdraht der Spule wird mit einem Seitenschneider abgeschnitten. Über die Lautsprecherkabel wird auf dem Schwingspulenträger Sekundenkleber aufgetragen, um diese zu fixieren. Nach einer jeweiligen Trockenzeit von 10 Minuten kann die Membran über die Schwingspuleneinheit geschoben und wieder mit Kraftkleber an der dafür vorgesehenen Markierung von 32,275 mm verklebt werden. Das Masse-Feder-System wird fertiggestellt, indem die Sicke zentrisch mittels Kraftkleber auf die Membran geklebt wird. Die Wulst der Sicke zeigt dabei von der Membran weg (Abb. 21).



Abbildung 21: **Masse-Feder-System** [Jonas Richter, 2019]



Für die Trockenzeit der Sicken-Membran-Verklebung sind 12 Stunden vorgesehen, wobei die Sicke auf einer geraden Oberfläche liegt und auf den Schwingspulenträger ein Gewicht aufgesetzt wird. Das Masse-Feder-System kann anschließend über den Polkern gestülpt werden.

Damit die Schwingspuleneinheit bei der Verklebung der Sicke und der Zentrierspinne zentrisch im Luftspalt der Magneteinheit platziert wird, verwendet der Verfasser dieser Arbeit 5 mm x 60 mm (BxL) Streifen aus Kunststoffolie, die in einer gleichmäßigen Anzahl zwischen Polkerneinheit und Schwingspule geschoben werden, bis sich die Schwingspule nicht mehr in eine horizontale Richtung bewegen kann. Ist die Schwingspule zentriert, so wird zuerst Kraftkleber auf die Auflagefläche für die Zentrierspinne auf den Lautsprecherkorb aufgetragen und die Zentrierspinne auf diese geklebt. Dasselbe wird nach einer Trocken- und Anpresszeit von 10 Minuten für die Sicke wiederholt. Zentrierspinne und Sicke werden bei der Verklebung mit einem Wattestäbchen auf die Auflageflächen gedrückt, um einen Anpressdruck zu erreichen. Zuletzt werden die Zentrierstreifen aus dem Luftspalt entfernt. Die Trockenzeit für die Verklebungen soll 12 Stunden betragen.



Abbildung 22: Lautsprechertreiber [Jonas Richter, 2019]

## 5 Konstruktion eines Testgehäuses

### 5.1 Messung des Lautsprechertreibers

Damit der entstandene Lautsprechertreiber in ein Testgehäuse eingebaut werden kann, bedarf es einer Messung der Impedanzkurve und der Thiele Small Parameter des Lautsprechertreibers. Diese definieren die mechanischen und elektrischen Eigenschaften des Lautsprechertreibers, mit dessen Werten sich ein Gehäuse erstellen lässt, dass optimal auf den Lautsprechertreiber angepasst ist.

#### 5.1.1 Impedanzkurve

Die Messung der Impedanzkurve des Lautsprechers erfolgt mit der Messsoftware *Room EQ Wizard*. Es wird eine Messbox (Abb. 24) mit folgendem Schaltplan erstellt, die den Lautsprechertreiber über eine Soundkarte (*PreSonus AUDIOBOX USB*) mit dem PC verbindet.

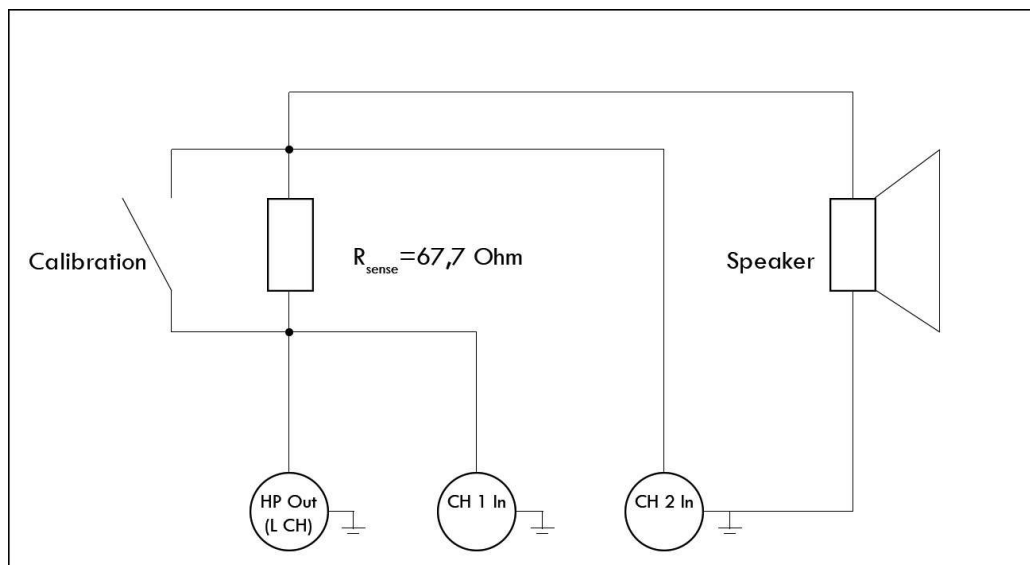


Abbildung 23: Schaltplan Impedanzmessbox [Jonas Richter, 2019]

Der Widerstand  $R_{\text{sense}}$ , welcher nicht-induktiv sein muss, dient zur Strommessung, die dem Lautsprechertreiber zugeführt wird. Der Wert des Widerstands muss exakt bekannt sein, um ein exaktes Messergebnis zu erhalten. Wird der Lautsprechertreiber wie in Abbildung 23 über den Kopfhörerausgang des Audiointerfaces angesteuert, so eignen sich Werte im Bereich von 100 Ohm. Neben dieser Messmethode lässt sich die Impedanzkurve auch noch über einen zwischengeschalteten Verstärker messen. Darauf wird hier allerdings nicht eingegangen [Q7, S. 41].

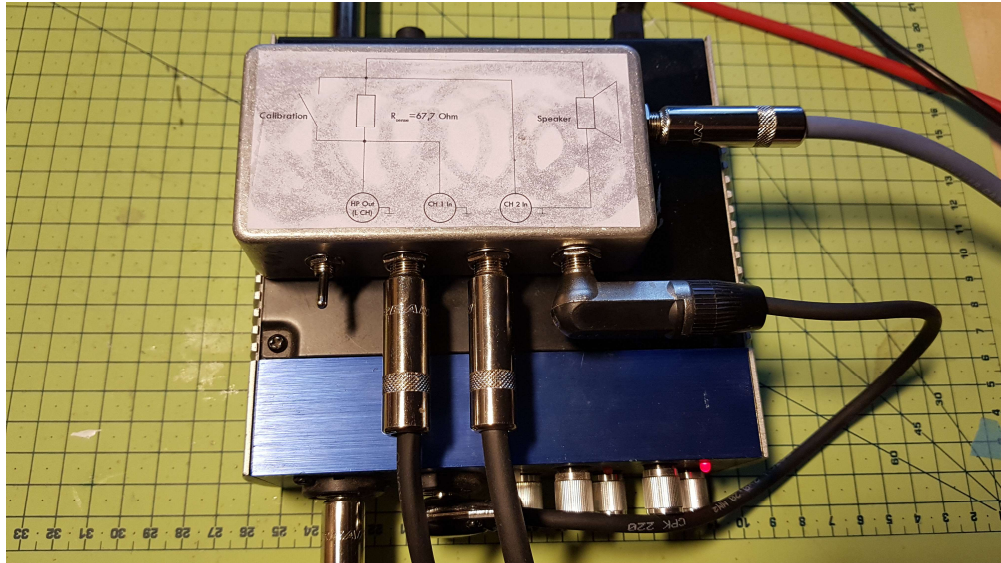


Abbildung 24: Impedanzmessbox mit Testsetup [Jonas Richter, 2019]

Vor der Messung wird die Soundkarte in der Messsoftware kalibriert, indem der Widerstand kurzgeschlossen sowie die Last (Lautsprechertreiber) von der Messbox entfernt wird. Nach erfolgreicher Kalibrierung wird die erste Impedanzmessung am Lautsprechertreiber durchgeführt (Abb. 25, blaue Kurve).

Anschließend wird ein definiertes Gewicht (Knetmasse, 4 g) mittig auf der Lautsprechermembran aufgebracht und eine erneute Impedanzmessung durchgeführt (Abb. 25, rote Kurve). Durch das zusätzliche Gewicht sinkt die Resonanzfrequenz des Lautsprechertreibers. Dies simuliert eine bewegte Luftmasse, die entsteht, wenn der Lautsprechertreiber in ein Gehäuse eingebaut ist. Mit den beiden Messungen lassen sich nun die Thiele Small Parameter bestimmen.



Abbildung 25: Impedanzkurven des Lautsprechertreibers [Jonas Richter, 2019]

### 5.1.2 Thiele Small Parameter

Mit den ermittelten Impedanzkurven werden mittels der Software *Room EQ Wizard* die Thiele Small Parameter des Lautsprechertreibers berechnet. Zur Berechnung wird das dazugehörige Tool in der Software geöffnet und die jeweiligen Impedanzmessungen ausgewählt. Manuell wird der Gleichstromwiderstand des Lautsprechertreibers, die Fläche der Membran (inkl. Sicke) und die hinzugefügte Masse der zweiten Messung eingegeben. Anschließend gibt das Programm die errechneten Werte aus, dessen wichtigste in folgender Tabelle zu sehen sind.

Tabelle 5: **Thiele Small Parameter** [Jonas Richter, 2019]

Re	8,56 $\Omega$
Z	8,87 $\Omega$
Le	0,097 mH
$\varnothing_{\text{Membran}}$	14,5 cm
Membranfläche	165,1 cm <sup>2</sup>
Fs	185,4 Hz
Qms	5,579
Qes	11,981
Qts	3,807
SPL	85,52 dB
BL	2,382 Tm
Vas	4,18 l

$R_e$  definiert dabei den Gleichstromwiderstand des Lautsprechertreibers<sup>21</sup>, sowie  $Z$  dessen minimale Impedanz, gemessen nach dem Peak der Resonanzfrequenz  $F_s$ . In den Impedanzkurven ist zu erkennen, dass die Impedanz bei einer Frequenz von 20 kHz nur auf 16 Ohm ansteigt. Dies lässt sich durch den Impedanzkontrollring begründen, der die Schwingspuleninduktivität,  $L_e$ , mit 0,097 mH definiert. Die hohe Resonanzfrequenz<sup>22</sup> von 185,4 Hz lässt sich auf die hohe Steifigkeit der Zentrierspinne und der Sicke zurückführen.

Die Güte des Lautsprechertreibers zeigt das Verhalten bei der Resonanzfrequenz des Lautsprechertreibers. Zu hohe Güten können zu einem Dröhnen bei der Resonanzfrequenz führen, die sich schmalbandig auswirken [Q6, S. 960].

Die mechanische Güte  $Q_{ms}$  liegt mit einem Wert von 5,579 im Rahmen der üblichen mechanischen Güte von 2 bis 6 und definiert das Verhalten des Masse-Feder-Schwingkreises, bestehend aus Membran und deren Aufhängungen [Q13, S. 71].

Die elektrische Güte  $Q_{es}$  gibt das Verhalten zwischen Magnet und Schwingspule an und ist mit einem Wert von 11,981 deutlich höher als übliche Lautsprechertreiber [Q13, S. 106 ff; Q11, S. 2]. Den hohen Wert begründet sich der Verfasser dieser Arbeit durch den noch zu großen Luftspalt, in dem die Schwingspule sitzt und den vergleichsweise schwachen Magneten, der verwendet wird.

$Q_{ts}$  ist die Gesamtgüte des Lautsprechertreibers, welche entscheidend für die Gehäusewahl ist. Sie ergibt sich aus  $Q_{ms}$  und  $Q_{es}$  [Q13, S. 217].

$$Q_{ts} = \frac{Q_{es} * Q_{ms}}{Q_{es} + Q_{ms}} \quad \text{Formel 11 (Gl. 5.1.2.1)}$$

Durch die geringe elektrische Güte ist  $Q_{ts}$  mit einem Wert von 3,807 auch dementsprechend hoch.

---

<sup>21</sup> Nicht zu verwechseln mit  $R_{DC}$ , dem Gleichstromwiderstand der Schwingspule.

<sup>22</sup> Die Schwingung mit höchster Amplitude, da Trägheits- und Rückstellkräfte gleich groß sind (vgl. Q13, S. 16).

Dagegen sind der Schalldruckpegel SPL des Lautsprechertreibers mit 85,52 dB und der Kraftfaktor Bl des Antriebs mit 2,382 Tm für einen Breitbandlautsprechertreiber vergleichsweise hoch<sup>23</sup>.

Vas ist das Volumen einer vergleichbaren Federsteife<sup>24</sup> und somit das Äquivalentvolumen des Lautsprechertreibers, welches 4,18 l beträgt. Je niedriger das Volumen, desto steifer ist die Membranaufhängung [Q6, S. 958].

## 5.2 Simulation des Testgehäuses

Mit den gemessenen Thiele Small Parametern lässt sich nun ein Gehäuse mit der Software *WinISD* simulieren.

Nach der Eingabe der Thiele Small Parameter in die Software simuliert diese die Frequenzkurve des Lautsprechertreibers von 10 bis 1000 Hz und schlägt ein Boxengehäuse vor, welches in diesem Fall ein geschlossenes ist. Über das Konfigurationsfenster lässt sich das Gehäusevolumen verändern. Durch die prägnante Resonanzfrequenz von 185,4 Hz ist es mit keinem simulierten Volumen möglich, einen Tiefgang von weniger als 122 Hz (-3 dB) zu erreichen, was jedoch mit einem Volumen von über 300 l jegliche Kompaktheit des Lautsprechergehäuses überschreiten würde. Der Verfasser dieser Arbeit entscheidet sich für einen Kompromiss zwischen Kompaktheit und Tiefgang für ein Gehäusevolumen von 11,4 l (Abbildung 26), dessen simulierte Grenzfrequenz 141 Hz beträgt.

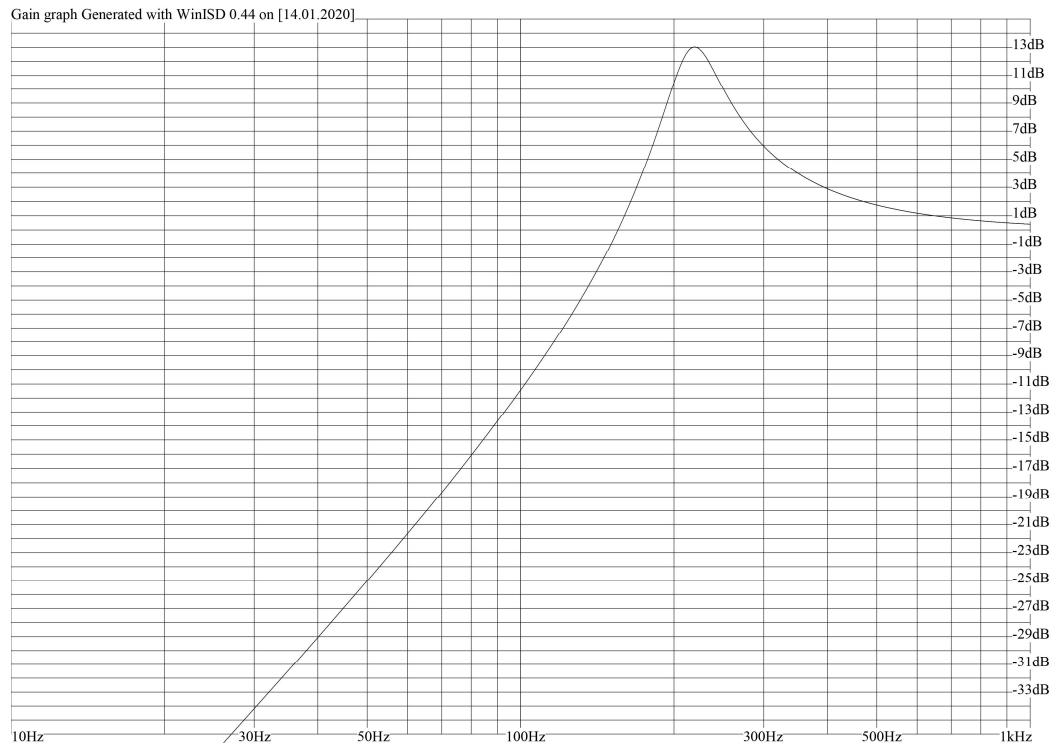
Die Simulation zeigt weiterhin einen Frequenzpeak bei 220 Hz, der auf die Resonanzfrequenz zurückzuführen ist. Erfahrungen haben gezeigt, dass diese Überspitzung im realen Gehäuse kaum vorhanden ist. Sie kann daher vernachlässigt werden.

Über die Software lassen sich außerdem die Außendimensionen des Gehäuses errechnen, welche 22 cm x 22 cm x 32 cm (BxLxT) bei einer Materialstärke von 12 mm betragen sollen.

---

<sup>23</sup> Die Werte ähneln denen des Markaudio Alpair 6M stark (vgl. Q11, S. 2).

<sup>24</sup> Vgl. Q13 S. 73

Abbildung 26: **Simuliertes Testgehäuse** [Jonas Richter, 2020]

### 5.3 Herstellung des Testgehäuses

Mit den erforderlichen Gehäusemaßen (Tabelle 6) fertigt der Verfasser dieser Arbeit eine Schnittliste (Tabelle 6) an. Das Hauptmaterial soll aus Multiplex (MPX) bestehen, welches sich aufgrund der Stabilität und der leichten Verarbeitbarkeit aus früheren Versuchen durchgesetzt hat. Die dünne Wandung von 12 mm reicht für den Lautsprechertreiber aus, da eine Wiedergabe von tiefen Frequenzen, die das Gehäuse resonieren lassen könnten, nicht zu erwarten ist. Die Vorderseite, an der der Lautsprechertreiber eingelassen wird, soll mit 18 mm starkem MPX verstärkt werden, um eine stabile Verschraubung zwischen Lautsprechertreiber und Gehäuse zu gewährleisten. Damit für spätere Präsentationen eine Einsicht auf den Aufbau des Lautsprechertreibers gewährleistet werden kann, ohne diesen aus dem Gehäuse zu entfernen, soll an einer Seitenwand des Gehäuses eine weitere Präsentation eine 4 mm starke Plexiglas-scheibe eingelassen werden. Zum Schutz vor Staub soll an der Gehäusefront ein abnehmbarer mit Stoff bespannter Rahmen eingefügt werden. Damit dieser nicht hervorsteht, wird die Gehäuselänge 2 cm verlängert und die Gehäusefront dementsprechend 2 cm nach hinten versetzt, um das Volumen von 11,4 l beizubehalten.

Tabelle 6: **Schnittliste** [Jonas Richter, 2020]

Material	Breite (in cm)	Länge (in cm)	Anzahl	Verwendung
12 mm MPX	19,6	19,6	2	Vorder/Rückseite
12 mm MPX	19,6	34	2	Seiten
12 mm MPX	22	34	2	Ober/Unterseite
18 mm MPX	19	19	1	Stabilisierung Vorderseite
4 mm Plexiglas	15	26	1	Sichtfenster
8 mm MDF	19	19	1	Rahmen

Nachdem alle Teile auf die gewünschten Maße geschnitten sind, werden diese auf K120 geschliffen und alle erforderlichen Ausschnitte gefräst (Lautsprechertreiber, Sichtfenster, Anschlusspanel, Rahmen).

Alle MPX-Zuschnitte werden stumpf miteinander verleimt und für zwei Stunden getrocknet. Anschließend kann das Gehäuse auf K240 geschliffen werden. Aus optischen Gründen entscheidet sich der Verfasser dieser Arbeit für eine Oberflächenbehandlung mit brauner Beize, sowie einer anschließenden Lackierung mit Klarlack. Letzterer Schritt wird zwei Mal (mit Zwischenschliff K320) durchgeführt und für 24 Stunden getrocknet. In der Zwischenzeit wird der Rahmen mit *Cameleon*-Stoff bespannt, welcher auch schon für die Herstellung von Zentrierspinne und Sicke zur Verwendung kam.

Auf weitere exakte Maßangaben zu den zu fertigenden Teilen wird hier verzichtet, da die verwendeten Maße dem Lautsprechertreiber und den weiteren zum Einsatz kommenden Materialien entnommen werden können oder aus rein optischen Gründen erfolgen und den Klang der Testbox nicht beeinflussen.

Für die Verklebung des Plexiglas-Sichtfensters im Lautsprechergehäuse wird *UHU Max Repair* verwendet und für 24 Stunden getrocknet. Danach werden alle benötigten Bohrungen gesetzt und vier Einschlagmuttern auf der Rückseite der Vorderseite gesetzt, die den Lautsprechertreiber fixieren sollen. Zuletzt wird der Lautsprechertreiber mittels vier M4 x 30 mm Messing-Gewindeschrauben mit dem Lautsprechergehäuse verschraubt und mittels eines 40 cm langen Lautsprecherkabels mit dem Anschlusspanel verlötet,



dass aus einer Cinchbuchse besteht, welche mit zwei 3 mm x 12 mm Messingschrauben mit dem Gehäuse unter Verwendung einer Stratocaster-Anschlussplatte verschraubt wird. Zur Dichtung des Gehäuses wird dabei zusätzlich eine Schaumstoffdichtung zwischen Lautsprechertreiber und Gehäuse eingesetzt.



Abbildung 27: **Seitenansicht Lautsprecher** [Jonas Richter, 2020]



Abbildung 28: **Frontalansicht Lautsprecher** [Jonas Richter, 2020]

## 5.4 Messung des Testgehäuses

Zur Beurteilung des hergestellten Lautsprechertreibers und des dazugehörigen Testgehäuses wird die Einheit vermessen. Dies erfolgt in einer akustisch optimierten Messkammer der Firma Engelstein. Als Messmikrofon kommt ein *Beyerdynamic MM1* zum Einsatz, welches über ein *Tascam US-16x08* Audiointerface mit der Software *Room EQ Wizard* verbunden ist. Zuvor wird das Testsetup mit einem *Neumann KH 120* und einem Behringer *Feedback Destroyer Pro DSP1124P* kalibriert. Alle Messungen erfolgen in einem Abstand von 40 cm, sowie einer Höhe von Messmikrofon und Lautsprecher von 140 cm.

Abbildung 29 zeigt den Frequenzgang des Lautsprechers in einem Winkel von 0 Grad sowie dessen Phase.

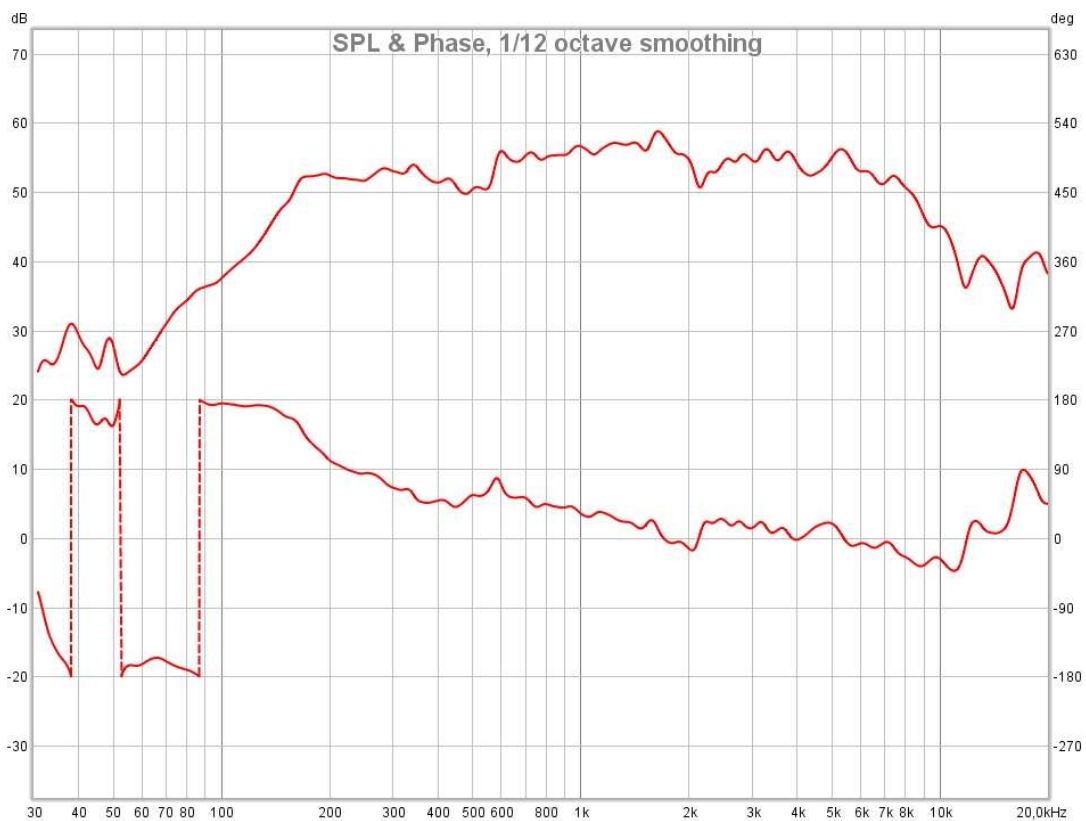


Abbildung 29: Frequenzgang und Phase bei 0 Grad [Jonas Richter, 2020]

Deutlich zu erkennen ist der sinkende Schalldruck ab einer Frequenz von 180 Hz, was mit der Simulation des Testgehäuses (vgl. Kapitel 5.2) übereinstimmt. Ab dieser Frequenz ist der Frequenzgang des Lautsprechers bis zu einer Frequenz von 9 kHz für einen Breitbandlautsprecher sehr linear. Die Überhöhung der Resonanzfrequenz im Schalldruck, wie sie in der Simulation zu sehen war, hat sich nicht eingestellt.

Im Bereich von 500 Hz und 2 kHz, sind die im Kapitel 2.2 erwähnten mechanischen Frequenzweichen zu erkennen, die durch die unterschiedlichen Membranresonanzen erzeugt werden.

Die Phase des Lautsprechers ist, wie es für einen Breitbandlautsprecher üblich ist, fast linear und weist bis zu einer Frequenz von 85 Hz keine großen Sprünge auf.

In Abbildung 30 sind neben dem Frequenzgang in einem Messwinkel von 0 Grad (rote Kurve) auch die Frequenzgänge in einem Winkel von 15 Grad (grüne Kurve) und 30 Grad (blaue Kurve) zu sehen.

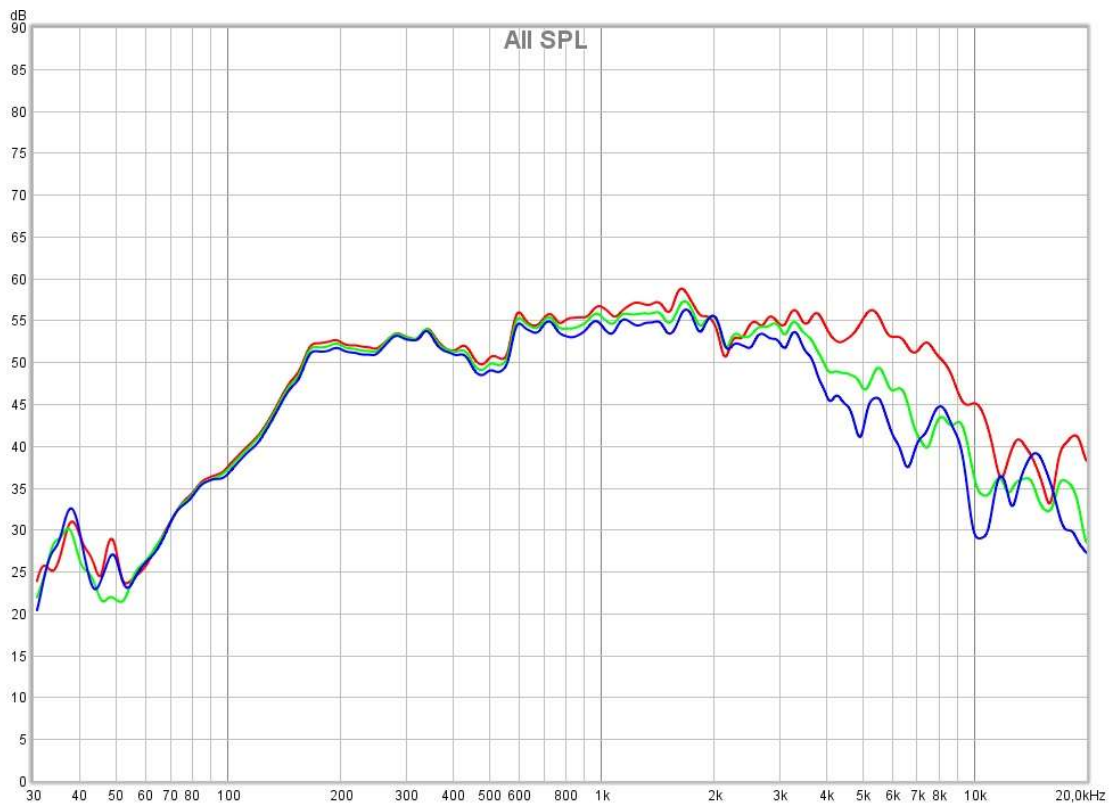


Abbildung 30: Frequenzgang bei 0, 15 und 30 Grad [Jonas Richter, 2020]

Entsprechend zu sehen ist die Bündelung hoher Frequenzen (vgl. Kapitel 2.3.4) ab einer Frequenz von 4 kHz. Unter dieser Frequenz bleibt das Wiedergabeverhalten des Lautsprechers annähernd gleich.

Die Impulsantwort von nur 40 ms (Abbildung 31) macht sichtbar, dass es sich um einen sehr impulstreuen Breitbandlautsprecher handelt (ab seinem Wiedergabebereich). Dies liegt vor allem an der sehr steifen Aufhängung.

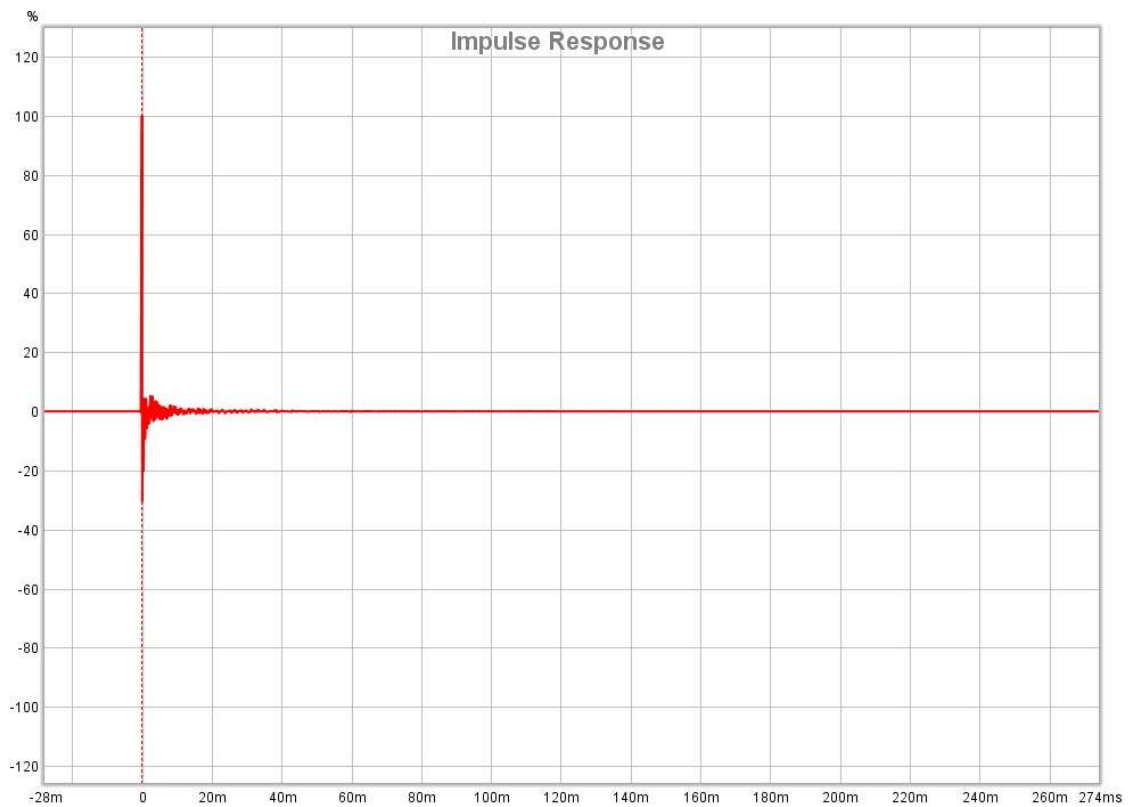
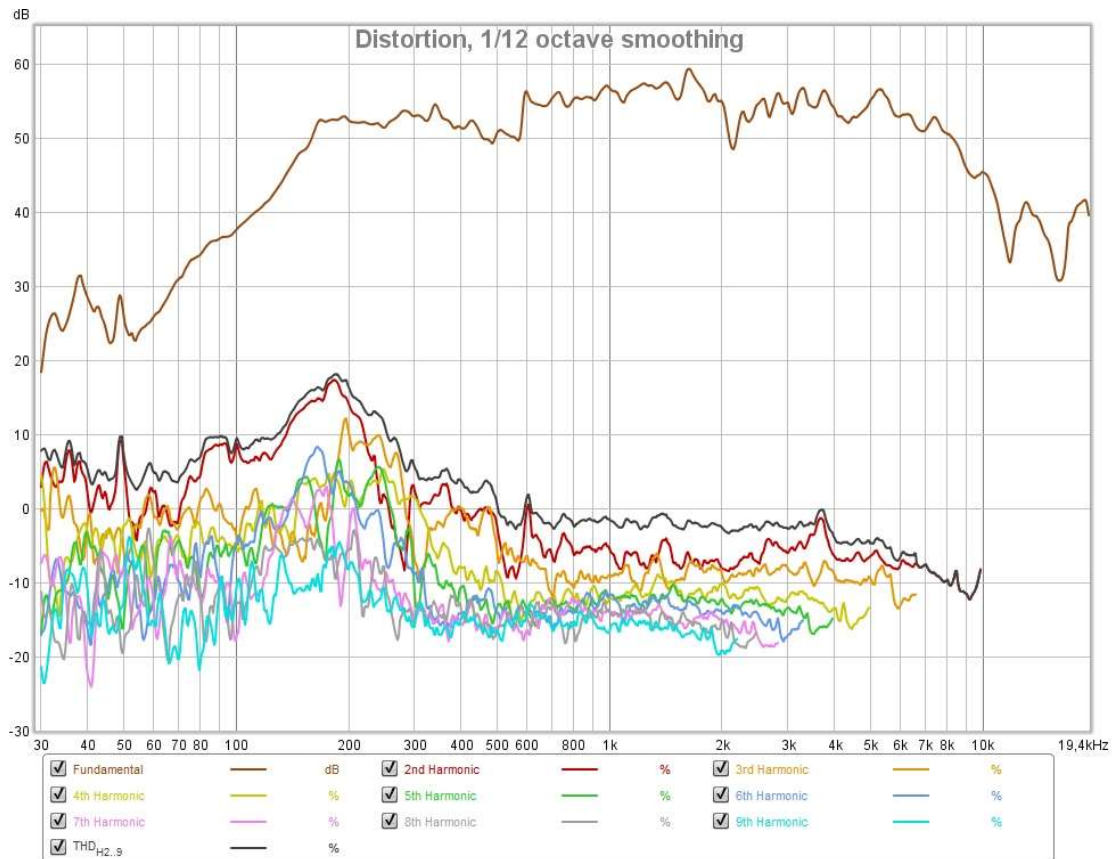


Abbildung 31: **Impulsantwort** [Jonas Richter, 2020]

Die Verzerrungen in Abbildung 32 verdeutlichen das Problem von Resonanzen der Masse-Feder-Einheit an deren Grenzfrequenz (185,4 Hz), sowie auftretende Membranresonanzen durch die Wiedergabe des kompletten Frequenzspektrums über einen Lautsprecher. Diese sind, verglichen mit der entstehenden Verzerrung der Resonanzfrequenz, zu vernachlässigen. Verzerrungen unter der Resonanzfrequenz steigen über 10 dB an.

Abbildung 32: **Verzerrungen** [Jonas Richter, 2020]

Die Messergebnisse des Lautsprechers zeigen, dass dieser einen (gemessenen) Frequenzbereich von 153 Hz bis 9,1 kHz besitzt und in diesem mit einer Abweichung von  $\pm 4$  dB linear Frequenzen wiedergibt.

Durch die straffe Aufhängung ist es möglich, eine außergewöhnlich kurze Impulsantwort zu erreichen und Verzerrungen und Membranresonanzen nach der Resonanzfrequenz des Lautsprechertreibers zu unterdrücken.

## 6 Beurteilung des Klangs

Neben den Messungen ist das persönliche Empfinden des Klangs stark mit entscheidend. Dieses hat sich im Vergleich zu früheren Prototypen stark verbessert. Das fehlende Fundament an tiefen Frequenzen wird mit einer erstaunlich guten Hochtonwiedergabe für einen Breitbandlautsprecher kompensiert. Durch die steife Membranaufhängung und die steife Membran selbst sind Verzerrungen ab 200 Hz quasi nicht hörbar.

Der Breitbandlautsprecher glänzt bei Musikstücken von Jazz bis akustischem Pop. Jedoch ist er durch den fehlenden Tieftonbereich nicht für Musik mit viel Bassanteil ausgelegt.

Beachtlich ist, dass selbst feinste Nuancen durch den Breitbandlautsprecher wiedergegeben werden und nichts verwaschen klingt. Einzig die nicht vorhandene Tieftonwiedergabe lassen den Breitbandlautsprecher teilweise „boxig“ klingen.

Für einen Breitbandlautsprecher ist die Bündelung hoher Frequenzen relativ gering, was sich durch die flache Membranbauweise begründen lässt.

Bis zu einem Hörabstand von 50 cm eignet sich der Breitbandlautsprechertreiber jedoch gut als Referenzmonitor für Audioproduktionen, da er den Frequenzgang eines Alltagsradios oder den eines Smartphones optimal wiedergeben kann.

## 7 Fazit und Ausblick

In dieser Arbeit wurden ein Breitbandlautsprecher und ein Testgehäuse entwickelt und konstruiert. Dabei wurde besonderer Wert auf die Reproduzierbarkeit der verwendeten Materialien gesetzt. Es wurde durch Experimente versucht, möglichst jedes Bauteil von Hand zu fertigen, ohne dabei auf eine qualitative Herstellung und Verarbeitung zu verzichten.

Aufgrund der Komplexität eines Lautsprechertreibers, vor allem aber auch der eines Breitbandlautsprechertreibers, war es oft nicht möglich, mehrere Versuche zu verschiedenen Baugruppen durchzuführen, ohne dabei einen erheblichen Material- und Kostenaufwand in Kauf zu nehmen (verschiedene Sicken- und Zentrierspinnenformen, Membranmaterialien, größere Magneteinheiten).

Im Vergleich zu früheren Prototypen ist ein Breitbandlautsprechertreiber entstanden, der sich sowohl im Abstrahl- und Verzerrungsverhalten als auch im Frequenzgang deutlich von früheren Modellen abgrenzt. Durch eine zu steife Aufhängung der Membran und einen noch zu großen Magnetspalt, beziehungsweise einer zu schwachen Magneteinheit, ist es nicht gelungen, das Wiedergabeverhalten von tiefen Frequenzen zu optimieren. Dahingegen wurde das Impedanzverhalten des Lautsprechers zu hohen Frequenzen durch einen Impedanzkontrollring deutlich minimiert und ist gleichauf mit käuflich zu erwerbenden Breitbandlautsprechern.

Neben der handwerklichen Fertigung und Materialkunde schuf diese Arbeit ebenso eine Einarbeitung und technisches Verständnis in die 3D-CAD-Software *FreeCAD*, die Messsoftware *Room EQ Wizard* und die Boxensimulationssoftware *WinISD*.

Für spätere Verbesserungen am Breitbandlautsprechertreibermodell hat es sich der Verfasser dieser Arbeit zum Ziel gemacht, auf eine stärkere Magneteinheit zu setzen und den Magnetspalt zu verkleinern. In Kombination mit einer weicheren Aufhängung ist dies der Grundstein für einen leistungsstarken, frequenzflachen und verzerrungsarmen Breitbandlautsprechertreiber.

---

## Literaturverzeichnis

- Q1 Cassing, Wilhelm; Kuntze, Karl; Ross, Gunnar: Dauermagnete: Mess- und Magnetisieretechnik, 2. Auflage, Renningen, expert, 2014.
- Q2 Dr. Kurt Müller: Gewebezentrirungen. Herausgegeben von kurtmueller.com 2010. URL: <http://www.kurtmueller.com/index.php?id=10&L=0>  
Stand: 17.12.2019.
- Q3 Dr. Kurt Müller: Membranen. Herausgegeben von kurtmueller.com 2010. URL: <http://www.kurtmueller.com/index.php?id=15&L=0>  
Stand: 17.12.2019.
- Q4 Dr. Kurt Müller: Sickenringe. Herausgegeben von kurtmueller.com 2010. URL: <http://www.kurtmueller.com/index.php?id=12&L=0>  
Stand: 17.12.2019.
- Q5 Fleischer, Jürgen; Hagedorn, Jürgen; Sell-Le Blanc, Florian: Handbuch der Wickeltechnik für Hocheffiziente Spulen und Motoren. Ein Beitrag zur Energieeffizienz, Berlin, Springer Vieweg, 2016.
- Q6 Friesecke, Andreas: Die Audio-Enzyklopädie. Ein Nachschlagewerk für Ton-techniker, 2. Auflage, Berlin, De Gruyter, 2014.
- Q7 John Mulcahy: REW V5.19 Help. Herausgegeben von roomeqwizard.com 2018. URL: <https://www.roomeqwizard.com/REWhelp.pdf>  
Stand: 20.12.2019.
- Q8 Klippel GmbH: Hands-On Training 1. Linear Lumped Parameter Measurement. Herausgegeben von klippel.de 2013. URL: [https://www.klippel.de/training/attachments/training1/Training\\_1\\_Linear\\_Lumped\\_Parameter\\_Measurement\\_en.pdf](https://www.klippel.de/training/attachments/training1/Training_1_Linear_Lumped_Parameter_Measurement_en.pdf)  
Stand: 17.12.2019.
- Q9 Lerch, Reinhard; Sessler, Gerhard; Wolf, Dietrich: Technische Akustik. Grundlagen und Anwendungen, Berlin, Springer, 2009.



- 
- Q10 Magna-C GmbH: Magnettechnische Informationen. Herausgegeben von magna-c.com o.D. URL: [https://www.magna-c.com/fileadmin/user\\_upload/Magnettechnische-Informationen.pdf](https://www.magna-c.com/fileadmin/user_upload/Magnettechnische-Informationen.pdf)  
Stand: 17.12.2019.
- Q11 Markimage Limited: Alpair 6M (metal cone) Generation 2 mini-fullrange emitter. Herausgegeben von markaudio.com 2011. URL: [https://www.markaudio.com/wp-content/uploads/2019/07/Alp6M\\_Gen.2-june2011.pdf](https://www.markaudio.com/wp-content/uploads/2019/07/Alp6M_Gen.2-june2011.pdf)  
Stand: 17.12.2019.
- Q12 Michael Helmert: Online-Konusberechnung. Herausgegeben von rmc-sachsen.de o.D. URL: <https://www.rmc-sachsen.de/?nav=konus>  
Stand: 17.12.2019.
- Q13 Römer, Rainer; Schwamkrug, Götz: Lautsprecher. Dichtung und Wahrheit, Aachen, Elektor, 1989.
- Q14 Visaton GmbH & Co KG: LTS 50. Herausgegeben von visaton.de o.D. URL: <https://www.visaton.de/de/produkte/zubehoer/sonstiges/lts-50>  
Stand: 5.12.2019.
- Q15 Webcraft GmbH: Datenblatt Artikel FE-R-100-60-20. Herausgegeben von supermagnete.de 2012. URL: [https://www.supermagnete.de/data\\_sheet\\_FE-R-100-60-20.pdf](https://www.supermagnete.de/data_sheet_FE-R-100-60-20.pdf)  
Stand: 17.12.2019.
- Q16 Weinzierl, Stefan: Handbuch der Audiotechnik, Berlin, Springer, 2008.

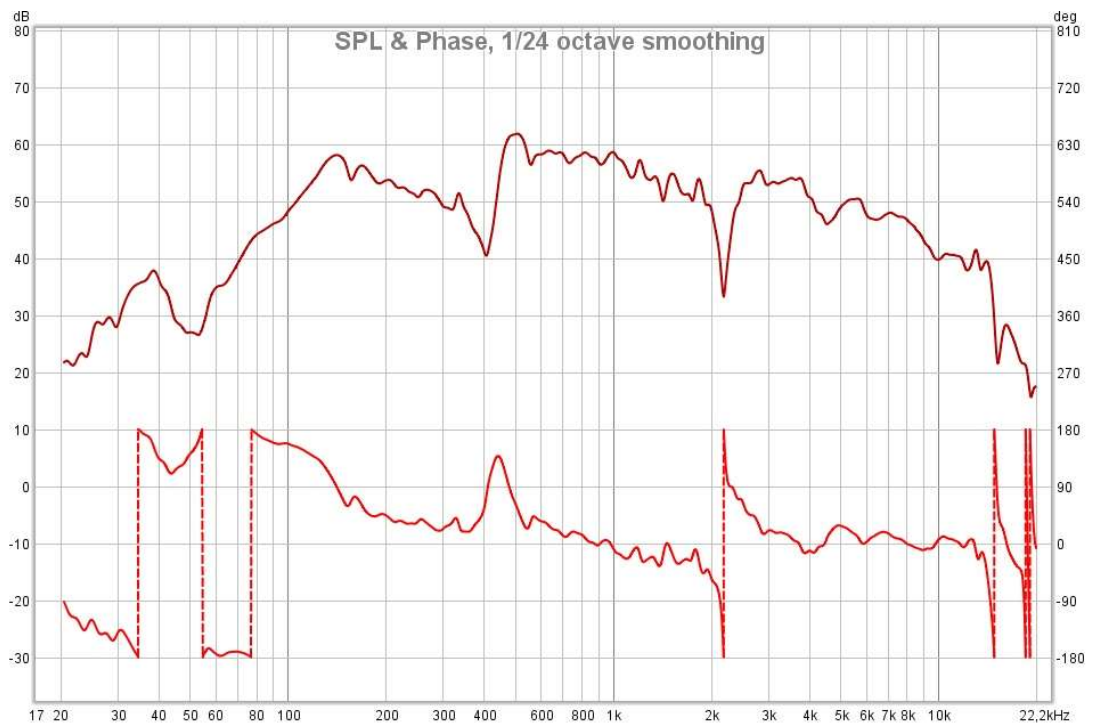
## Anlagen

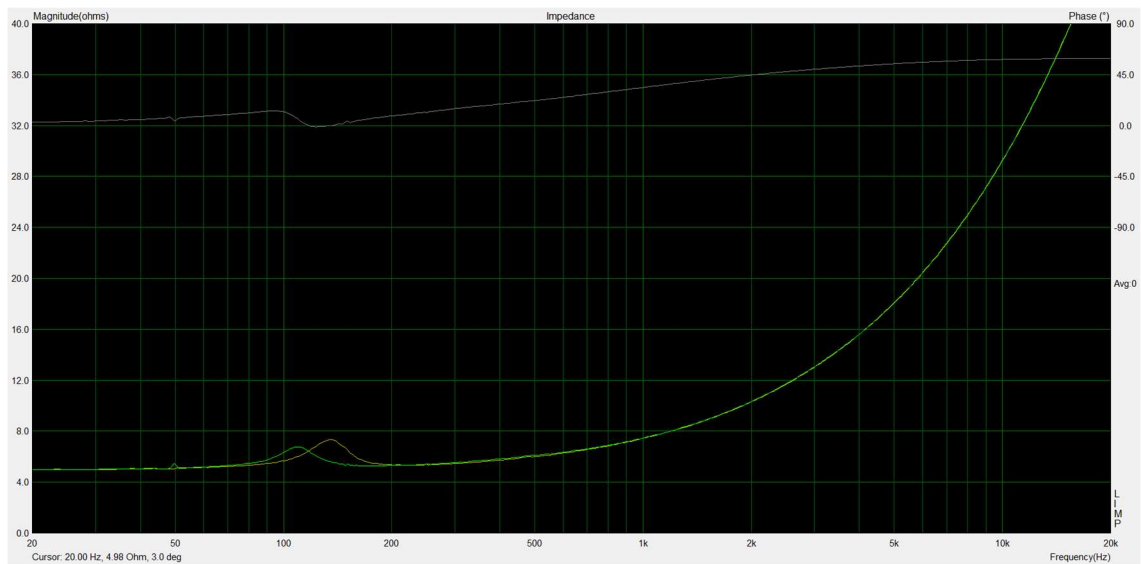


Anlage 1: **Sichtfenster** [Jonas Richter, 2020]



Anlage 2: **Lautsprechertreiber Seitenansicht** [Jonas Richter, 2019]

Anlage 3: **Prototyp Lautsprecher** [Jonas Richter, 2019]Anlage 4: **Frequenzgang Prototyp Lautsprecher** [Jonas Richter, 2019]



Anlage 5: Impedanzkurven Prototyp Lautsprecher [Jonas Richter, 2019]

## **Eigenständigkeitserklärung**

Hiermit erkläre ich, dass ich die vorliegende Arbeit selbstständig und nur unter Verwendung der angegebenen Literatur und Hilfsmittel angefertigt habe. Stellen, die wörtlich oder sinngemäß aus Quellen entnommen wurden, sind als solche kenntlich gemacht. Diese Arbeit wurde in gleicher oder ähnlicher Form noch keiner anderen Prüfungsbehörde vorgelegt.

---

Grimma, 20.01.2020

Jonas Richter