

# Horngeladene Lautsprechersysteme

## Diplomarbeit

Ausgeführt zum Zweck der Erlangung des akademischen Grades  
**Dipl.-Ing. für technisch-wissenschaftliche Berufe**

am Masterstudiengang Digitale Medientechnologien an der Fachhochschule  
St. Pölten, **Masterklasse Audiodesign**

von:

**Jakob Maurer, BSc**  
dm161529

Betreuer/in und Erstbegutachter/in: FH-Prof. Dipl.-Ing. Franz Zotlöterer  
Zweitbegutachter/in: FH-Prof. Dipl.-Ing. Andreas Büchele

[Sarasdorf, 31.12.2019]

# **Ehrenwörtliche Erklärung**

Ich versichere, dass

- ich diese Arbeit selbständig verfasst, andere als die angegebenen Quellen und Hilfsmittel nicht benutzt und mich auch sonst keiner unerlaubten Hilfe bedient habe.
- ich dieses Thema bisher weder im Inland noch im Ausland einem Begutachter/einer Begutachterin zur Beurteilung oder in irgendeiner Form als Prüfungsarbeit vorgelegt habe.

Diese Arbeit stimmt mit der vom Begutachter bzw. der Begutachterin beurteilten Arbeit überein.

.....  
Ort, Datum

.....  
Unterschrift

# Kurzfassung

Line-Array Systeme haben sich in den letzten Jahren in der Live-Sound-Touring Branche durchgesetzt. (Webb & Baird, 2003, S. 1) Dennoch setzen aktuell vermehrt Firmen auf die Weiterentwicklung von Hornlautsprechersystemen.

In dieser Arbeit werden zunächst die physikalischen Gesetzmäßigkeiten der Schallausbreitung betrachtet. Diese bilden die Grundlage für die durchzuführende theoretische Beschreibung von Hornlautsprechersystemen und Line-Array Systemen.

Es werden Interviews mit Experten im Bereich Lautsprechersysteme geführt, um Aufschluss über neue Strategien in der Weiterentwicklung von horngeladenen Lautsprechersystemen zu erhalten. Zusammen mit der theoretischen Betrachtung der Systeme lassen sich so Kompromisse aufzeigen, die bei der Entwicklung von Lautsprechersystemen eingegangen werden müssen.

Es werden neue Strategien für die Entwicklung von Hornlautsprechersystemen vorgestellt, wobei erwähnt werden muss, dass Hersteller nur sehr zurückhaltend in der Offenlegung dieser neuen Strategien sind.

In dieser Arbeit wurde ein Vergleich eines modernen Hornlautsprechersystems und eines Line-Array Systems durchgeführt, um Unterschiede in der Handhabung der beiden Systemarten aufzuzeigen. Dieser Vergleich wird in Form eines Experiments auf zwei Ebenen durchgeführt. Erstens: auf objektiver Ebene durch technische Messungen nach Atkinson (Atkinson, 1997). Es werden Methoden der Durchführung dieser Messungen mittels der Messsoftwarefamilie ARTA präsentiert. (Mateljan, 2019c) Zweitens: auf subjektiver Ebene durch einen Hörtest, welcher durch einen Fragebogen unterstützt wird. Dieser Fragebogen basiert auf den von Atkinson aufgestellten Parametern zur subjektiven Beurteilung von Lautsprechersystemen (Atkinson, 1997). Mittels dieses Fragebogens wird überprüft, ob HörerInnen Unterschiede in der Klangqualität der beiden zu vergleichenden Lautsprechersysteme feststellen können.

Das mittels ARTA aufgestellte Messverfahren bildet gemeinsam mit dem Fragebogen zum Hörtest ein Instrument zum subjektiven und objektiven Vergleich von Lautsprechersystemen.

# Abstract

Line-array systems prevailed in live-sound touring over the last years (Webb & Baird, 2003, S. 1). Nevertheless, the number of companies which focus on the development of new hornloaded loudspeakersystems is on a rise.

This work focuses first on the physical rules of sound propagation. These form the structure for the theoretical description of hornloaded loudspeaker systems and line-array systems, which is also a part of this work.

To get insight in new strategies companies use for the development of hornloaded loudspeakersystems, interviews with experts in loudspeakerdevelopment have been done. Together with the theoretical description of the different systems, compromises where revealed, which need to be done in the area of the developmentent of loudspeakers.

New strategies for the development of hornloadspekersystems are discussed, but it has to be said that companies are not likely to give to much insight into their development strategies.

As a part of this work, a comparison between a modern hornloaded loudspeakersystem and a line-array system in form of an experiment has been conducted, in order to reveal differences in the handling of the two systems. This comparison has been conducted in 2 phases. Phase 1 has been an objective test, which consisted of technical measurments, which follows suggestions made by John Atkinson. (Atkinson, 1997). Methods for measuring these parameters using the ARTA softwarefamily (Mateljan, 2019c) have been shown. In phase 2 a subjective heartest, which was supported by a questionnaire, has been conducted. This questionnaire was based on the parameters for subjective loudspeaker description which where also defined by Atkinson in his paper. (Atkinson, 1997) This questionnaire revealed, if the test persons could hear differences in the soundqualities of the tested loudspeakersystems.

The mode of operation, using ARTA as software, which has been shown and the questionnaire for describing loudspeakersystems form together an instrument which can be used for describing loudspeakersystems objectivley and subjectively.

# Inhaltsverzeichnis

<b>Ehrenwörtliche Erklärung</b>	<b>II</b>
<b>Kurzfassung</b>	<b>III</b>
<b>Abstract</b>	<b>IV</b>
<b>Inhaltsverzeichnis</b>	<b>V</b>
<b>1 Einleitung</b>	<b>1</b>
<b>2 Schallausbreitung</b>	<b>2</b>
2.1 Ebene Welle	2
2.2 Kugelwelle	3
2.3 Zylinderwelle	4
<b>3 Hornlautsprecher</b>	<b>8</b>
3.1 Grundlegende Hornlautsprechertypen	9
3.1.1 Konushorn	9
3.1.2 Zylindrisches Horn	11
3.1.3 Exponentialhorn	11
3.1.4 Konventionelle Systeme	17
3.1.5 Wellenleiter (Waveguides)	17
3.2 Clusterbildung	17
3.3 Neuentwicklungen im Bereich Hornlautsprecher	18
3.3.1 Lambda Labs DH-18	19
3.3.2 Lambda Labs TX-3A	19
3.3.3 Meyer Bluehorn	20
3.3.4 Void Hyperfold	20
3.3.5 Realhorns	20
<b>4 Line Arrays</b>	<b>21</b>
4.1 Gerade Line Arrays	21
4.2 Curved Arrays	23
4.2.1 Krümmung der Wellenfront	25
4.2.2 Gelenkpunkte	25
4.3 Vor und Nachteile von Line-Arrays	25
4.4 aktuelle Line-Array Systeme	28
4.4.1 d&b SL-Serie	28
4.4.2 d&b A-Serie	29
4.4.3 Meyer Sound Lyon	29
4.4.4 JBL VRX900	29
<b>5 Kompromisse in der Entwicklung von Lautsprechersystemen</b>	<b>31</b>
<b>6 Messen von Lautsprechern</b>	<b>33</b>
6.1 Messen im Allgemeinen	33
6.2 Grundsätzlicher Aufbau des Messsetups	33
6.2.1 Kalibrierung des Messsetups	34
6.3 Messparameter	35
6.3.1 Spannungsempfindlichkeit auf einer gewählten Achse (Voltage Sensitivity)	36

6.3.2	Elektrische Impedanz	37
6.3.3	Impulsantwort	38
6.3.4	Sprungantwort	39
6.3.5	Phasenfrequenzgang	40
6.3.6	Amplitudenfrequenzgang auf der Achse	41
6.3.7	Amplitudenfrequenzgang im Nahfeld	42
6.3.8	Polares Verhalten – Abstrahlung in vertikalen und horizontalen Ebenen	44
6.3.9	Amplitudenfrequenzgang im Raum	45
6.3.10	Nicht lineare Verzerrungen verschiedener Arten	45
6.3.11	Wasserfalldiagramm	46
<b>7</b>	<b>Subjektive Feststellung der Qualität eines Lautsprechers durch HörerInnen</b>	<b>47</b>
<b>8</b>	<b>Experiment</b>	<b>49</b>
8.1	Location	49
8.2	Vorbereitungen	50
8.2.1	Vorbereitung des Lautsprechersystem des Stadttheaters	50
8.2.2	Simulation des VRX Systems im Stadttheater	51
8.2.3	Aufbau und Einmessung des Vergleichssystems	53
8.3	Unterschiede in der Handhabung	54
8.3.1	Handhabung JBL VRX System	54
8.3.2	Handhabung Lambda Labs System	54
8.4	Messungen	55
8.4.1	Voltage Sensitivity	56
8.4.2	Impedanz Messung	61
8.4.3	Impulsantworten	64
8.4.4	Sprungantworten	66
8.4.5	Phasenfrequenzgang	68
8.4.6	Amplitudenfrequenzgang auf der Achse	69
8.4.7	Amplitudenfrequenzgang im Nahfeld	71
8.4.8	Amplitudenfrequenzgang im Raum	72
8.4.9	Wasserfalldiagramme	74
8.5	Ergebnisse der Messungen	75
8.6	Hörtest	76
8.6.1	Testmusik	77
8.6.2	Vorbereitungen	80
8.6.3	Ablauf	81
8.6.4	Auswertung	82
8.6.5	Vergleich der Lautsprechersysteme	82
8.6.6	Ergebnis der Auswertung des Fragebogens zum Vergleich von Lautsprechersystemen	93
<b>9</b>	<b>Fazit</b>	<b>95</b>
<b>Literaturverzeichnis</b>		<b>97</b>
<b>Abbildungsverzeichnis</b>		<b>100</b>
<b>Anhang</b>		<b>104</b>
A.	Interview mit Scott Gledhill - Meyersound	104
B.	Interview mit Andreas Plodek – Realhorns, 28.11.2019	109
C.	Interview mit Micheal Pohl – Meyersound, 06.12.2019	116
D.	Interview mit Reinhard Nell – Lambda Labs, 18.12.2019	126
E.	Fragebogen zum Vergleich von Lautsprechersystemen	128

# 1 Einleitung

In den letzten Jahren haben sich Line-Arrays im Bereich der Livesound-Touring Branche durchgesetzt. (Webb & Baird, 2003, S. 1) Dennoch setzen vermehrt Firmen auch auf die Entwicklung neuer horngeladener Lautsprechersysteme.

Aus diesem Grund befasst sich diese Arbeit mit Weiterentwicklungen horngeladener Lautsprechersysteme und deren Einsatz als Public Adress Anlagen (PA-Anlagen).

In dieser Arbeit wurden zunächst die physikalischen Gesetzmäßigkeiten der Schallausbreitung betrachtet, welche die Grundlage für die weitere theoretische Beschreibung von Hornlautsprechersystemen und Line-Array Systemen bilden.

Es werden Interviews mit Experten im Bereich Lautsprechersysteme geführt, um Aufschluss über neue Strategien in der Weiterentwicklung von horngeladenen Lautsprechersystemen zu erhalten. Gemeinsam mit der theoretischen Betrachtung der Systeme sollen sich so Kompromisse aufzeigen lassen, die bei der Entwicklung von Lautsprechersystemen eingegangen werden müssen.

In einem zweiten Schritt beschäftigt sich diese Arbeit mit der subjektiven und objektiven Beschreibung von Lautsprechersystemen. Die Arbeit stützt sich dabei wesentlich auf eine Arbeit von John Atkinson. Atkinson stellt in seinem AES Paper „Loudspeakers: What Measurements Can Tell Us – and What They Can't Tell Us!“ (Atkinson, 1997) subjektive und technischen Parameter zur Beschreibung von Lautsprechersystemen auf. Diese Parameter werden diskutiert, weiters werden Methoden zur ihrer Messung mittels der Messsoftware ARTA (Mateljan, 2019c) aufgezeigt.

Außerdem wird im Rahmen dieser Arbeit ein Experiment durchgeführt, in dem ein horngeladenes Lautsprechersystem mit einem Line-Array System verglichen wird. In diesem Vergleich sollen Unterschiede in der Handhabung zwischen den beiden Systemarten aufgezeigt werden. Außerdem wird überprüft, ob HörerInnen Unterschiede in der Klangqualität der beiden Systeme feststellen können. Zur Bewertung der beiden zu vergleichenden Systeme werden einerseits technische Messungen beider Systeme und andererseits ein subjektiver Hörtest durchgeführt. Für die Durchführung des Hörtests wird außerdem ein Fragebogen erstellt, welcher in Kombination mit den in den Messungen erhobenen objektiven Parametern ein Instrument zum Vergleich von PA-Anlagen darstellt.

## 2 Schallausbreitung

Lautsprechersysteme werden entworfen, um Schalldruck zu erzeugen, weswegen es sinnvoll ist vorerst die physikalischen Gesetze der Schallausbreitung zu betrachten, bevor man sich den Lautsprechern an sich widmet.

Raffaseder beschreibt diese Gesetze der Schallausbreitung wie folgt:

Schallausbreitung folgt den allgemeinen Gesetzen der Wellenausbreitung, die prinzipiell auch für elektromagnetische Wellen, Wasserwellen oder Licht gültig sind. Ein Unterschied ergibt sich lediglich auf Grund anderer Größenordnungen von Frequenz, Wellenlänge und Ausbreitungsgeschwindigkeit.

(Raffaseder, 2010, S. 86)

Zollner und Zwicker betrachten dies genauer:

Die Abstrahlfläche kann als Schallquelle aufgefasst werden, das Empfangsmedium als Schallsenke. Die Schallsenke belastet die Schallquelle, d.h., sie entzieht ihr Energie. Da der Schallsenke in der Regel ein komplexer Widerstand (die Strahlungsimpedanz) zugeordnet werden kann, handelt es sich hierbei um Wirk- und Blindenergie. Auch der Innenwiderstand der Schallquelle wird im allgemeinen Fall komplex sein, man spricht dann von der (akustischen oder mechanischen) Quellimpedanz.

(Zollner & Zwicker, 2003, S. 53)

Die Strahlungsimpedanz ist abhängig von Luftdruck und Temperatur. Mit steigender Temperatur nimmt sie ab und mit steigendem Luftdruck nimmt sie zu. (Zollner & Zwicker, 2003, S. 60–61)

Entscheidend dafür, wie sich ein akustisches Signal im Raum ausbreitet, ist die Form, in der diese Ausbreitung stattfindet. Diese wird durch die Form des Senders bestimmt. (Dipl. Ing. Holtmeyer, 2003, S. 1)

Laut Dipl. Ing. Holtmeyer "hat man je nach Form des Senders drei verschiedene Formen der Wellenausbreitung, die von besonderem Interesse sind. 1. Die ebene Welle (flächenförmiger Sender), 2. die Zylinderwelle (linienförmiger Sender), 3. die Kugelwelle (punktförmiger Sender).“ (Dipl. Ing. Holtmeyer, 2003, S. 1)

### 2.1 Ebene Welle

Eine Ebene Welle ist eine eindimensionale Welle, bei der die Strahlerfläche als unendlich ausgedehnte, homogen schwingende Fläche zu bezeichnen ist. (Dipl. Ing. Holtmeyer, 2003, S. 1)

## 2 Schallausbreitung

---

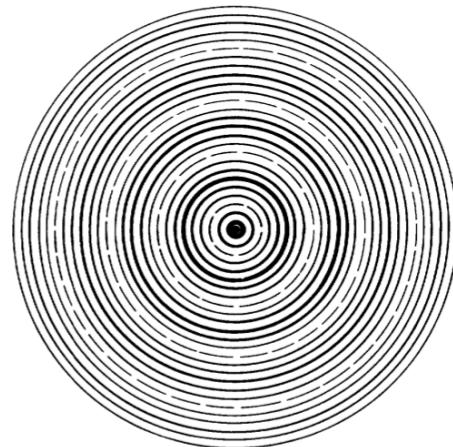
“Die Bezeichnung (ebene Welle), kommt daher, dass zu einem Zeitpunkt alle Raumpunkte gleichen Drucks oder gleicher Schnelle auf Ebenen liegen, die senkrecht zur Ausbreitungsrichtung (x-Achse) liegen.“ (Zollner & Zwicker, 2003, S. 58)

Da die Energiedichte der Ebenen Welle überall gleich groß ist, kommt es zu keinem Pegelabfall bei sich steigernder Entfernung, da der Schalldruck unabhängig von Position und Entfernung überall konstant ist. (Dipl. Ing. Holtmeyer, 2003, S. 1; Zollner & Zwicker, 2003)

## 2.2 Kugelwelle

“Näherungsweise können alle Schallquellen (abgesehen von reinen Dipolen), deren Umfang klein gegen die Wellenlänge der höchsten abgestrahlten Frequenz ist, als Kugelstrahlquellen betrachtet werden.“ (Zollner & Zwicker, 2003, S. 67)

Ist der Sender eine punktähnliche Kugel, also eine Kugelschallquelle, auch genannt Strahler nullter Ordnung, so werden sich die Wellen, die von ihm ausgehen, in konzentrischen Wellen ausbreiten, (Dipl. Ing. Holtmeyer, 2003, S. 1; Zollner & Zwicker, 2003, S. 62,66) wie in folgender Abbildung ersichtlich ist.



*Abbildung 1. Kugelwelle (Zollner & Zwicker, 2003, S. 62)*

Aus Abbildung 1 ist auch ersichtlich, dass Kugelwellen ihre Energie auf eine immer größere Fläche aufteilen. Aus der Verteilung der Energie auf eine größere Fläche resultiert eine Abnahme der Energiedichte.

Diese Abnahme der Energiedichte folgt dem Quadratischen Abstandsgesetz (Inverse Square Law). Sie wird mit  $1/r^2$  berechnet. Bei Verdoppelung der Entfernung, also Vervierfachung der Fläche, wird somit der Schalldruckpegel um die Hälfte (-6 dB) und die Leistungsdichte um ein Viertel (-6 dB) reduziert. (Dipl. Ing. Holtmeyer, 2003, S. 1–2)

Die Vervierfachung der Fläche bei Abstandsverdoppelung ist in folgender Abbildung klar ersichtlich.

## 2 Schallausbreitung

---

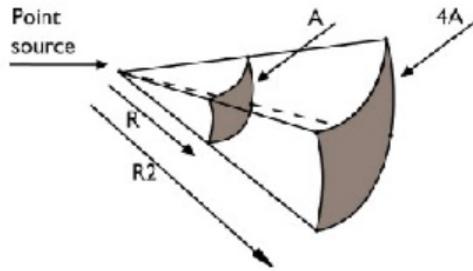


Abbildung 2. Ausbreitungscharakteristik einer Kugelwelle (Dipl. Ing. Holtmeyer, 2003, S. 2)

Zollner und Zwicker halten fest, dass für die Entstehung einer Kugelwelle nicht entscheidend ist, ob die gesamte Kugeloberfläche schwingt. Entscheidend ist, dass der Schall einer solchen Quelle nach allen Seiten abgestrahlt wird, auch wenn nicht die gesamte Kugeloberfläche, sondern nur ein Teil (Lautsprechermembran) schwingt. (Zollner & Zwicker, 2003, S. 67)

Raffaseder weist darauf hin, dass der Charakter einer Kugelwelle sich mit dem Abstand zur Schallquelle verändert. „In weiter Entfernung von der Schallquelle nähern sich die konzentrischen Kugelflächen ebenen Elementen an. Die Kugelwelle verhält sich somit nach und nach wie eine ebene Welle.“ (Raffaseder, 2010, S. 88)

## 2.3 Zylinderwelle

Zylinderwellen sind Wellen, die senkrecht zu einem linienförmigen Sender konzentrisch divergieren. (Dipl. Ing. Holtmeyer, 2003, S. 1; Zollner & Zwicker, 2003, S. 69)

Ein Zylinder mit kleinem Radius, dessen Oberfläche schwingt, stellt eine Linienstrahlquelle dar (Zollner & Zwicker, 2003, S. 77) wie sie in folgender Abbildung gezeigt wird.

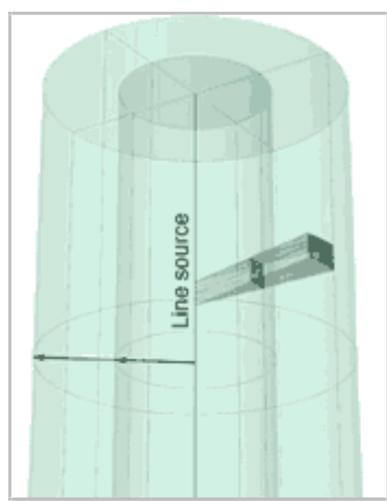
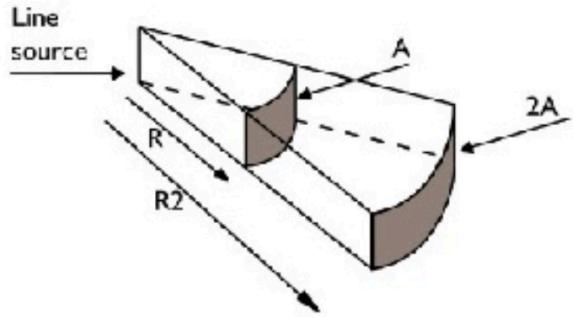


Abbildung 3. Modell einer Linienquelle (Dipl. Ing. Holtmeyer, 2003, S. 1)

## 2 Schallausbreitung

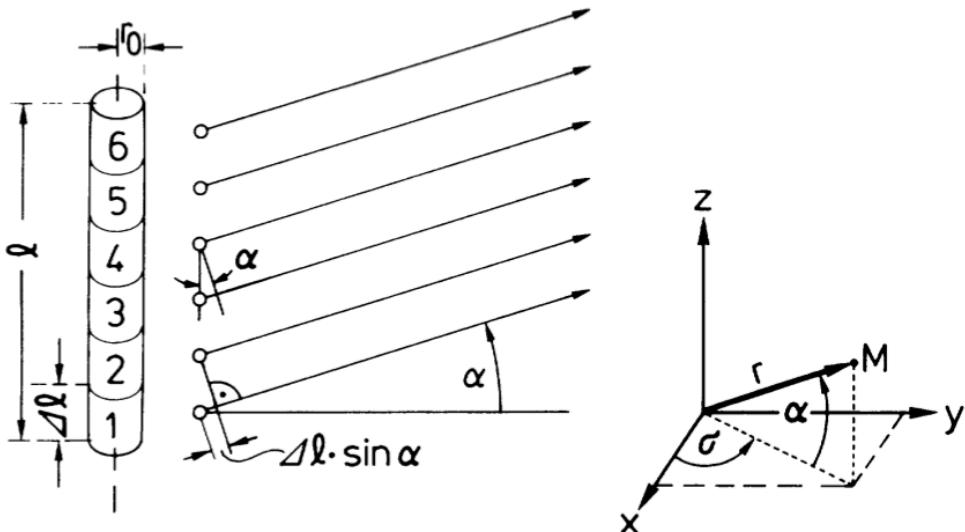
Auch beim Zylinder verteilt sich die Energie auf eine immer größer werdende Fläche, allerdings wächst diese, wie in folgender Abbildung ersichtlich ist, bei Entfernungsverdopplung nur halb so stark wie im Vergleich zum Kugelstrahler.



*Abbildung 4. Ausbreitungscharakteristik einer Linienquelle (Dipl. Ing. Holtmeyer, 2003, S. 1)*

“Damit reduziert sich die Leistungsdichte auf die Hälfte (-3 dB) und der Schalldruckpegel um den Faktor 0.707 (-3 dB).“ (Dipl. Ing. Holtmeyer, 2003, S. 1)

Ein schwingender endlicher Zylinder mit kleinem Radius wird als Linienschallquelle bezeichnet. Die Eigenschaften eines solchen endlichen Zylinders können über mehrere Punktquellen angenähert werden (Zollner & Zwicker, 2003, S. 77), wie in folgender Abbildung zu sehen ist.



*Abbildung 5. Annäherung einer kleinen Linienschallquelle über mehrere Punktschallquellen. (Zollner & Zwicker, 2003, S. 78)*

Der entstehende Gesamtschalldruck ist die Summe der Teilschalldrücke der Punktschallquellen, jedoch ergeben sich unterschiedliche Schalllaufzeiten aufgrund der verschiedenen Weglängen, was zu unterschiedlichen Phasenwinkeln führt, die so stark ausfallen können, dass es zu völligen Auslöschungen kommt. (Zollner & Zwicker, 2003, S. 70–80)

## 2 Schallausbreitung

Lautsprechersysteme, die sich einer Linienquelle bedienen, haben eine endliche Länge, weswegen sich ein Übergang von einem Nahfeld mit zylindrischem Charakter zu einem Fernfeld mit kugelförmiger, auch genannt sphärischer Ausbreitung ergibt. Dieser Übergang ist frequenzabhängig und hängt mit der Länge der Linienquelle zusammen. Im Fernfeld ist der Pegelverlust demnach gleich groß wie bei einer Kugelstrahlquelle. (Dipl. Ing. Holtmeyer, 2003, S. 2–3, 2006, S. 3)

“Näherungsweise lässt sich der Übergang vom Nahfeld zum Fernfeld mit folgender Formel berechnen:

$$d_{Border} = \frac{h^2 f}{2c}$$

Wobei  $h$  das Ausmaß der Strahlerordnung in m,  $f$  die Frequenz in Hz und  $c$  die Schallgeschwindigkeit in m/s ist.“ (Dipl. Ing. Holtmeyer, 2006, S. 4)

Bei einer Raumtemperatur von 20 Grad, endet laut dieser Formel das Nahfeld einer linienförmigen Strahleranordnung bei einer Frequenz von 300 Hz bei 0.437 m. Erhöht man die Frequenz auf 10000 Hz so findet der Übergang erst bei 14,577 m statt.

Erhöht man die Länge der linienförmigen Strahleranordnung auf 10 Meter so führt dies zu folgenden Ergebnissen: 300 Hz: 43.73 m; 10 kHz: 1457.72m

Die Größe des Nahfeldes ist also von der Länge der linienförmigen Strahleranordnung sowie von der wiedergegebenen Frequenz abhängig. (Davis, Patronis, Brown, & Ballou, 2013, S. 400)

Die Formel

$$D_v = 2\sin^{-1}\left(\frac{0.6}{3hf}\right)$$

zeigt, dass auch der Öffnungswinkel der Bündelung der vertikalen Strahleranordnung ( $D_v$ ) abhängig von der Länge des Linienstrahlers und der wiedergegeben Frequenz ist. Mit größerer Länge und zunehmender Frequenz verringert sich der Öffnungswinkel, dadurch entsteht außerhalb der Strahlerachse eine tonale Verschiebung zu tiefen Frequenzen (Dipl. Ing. Holtmeyer, 2006, S. 4), wie in folgender Abbildung ersichtlich ist.

## 2 Schallausbreitung

---

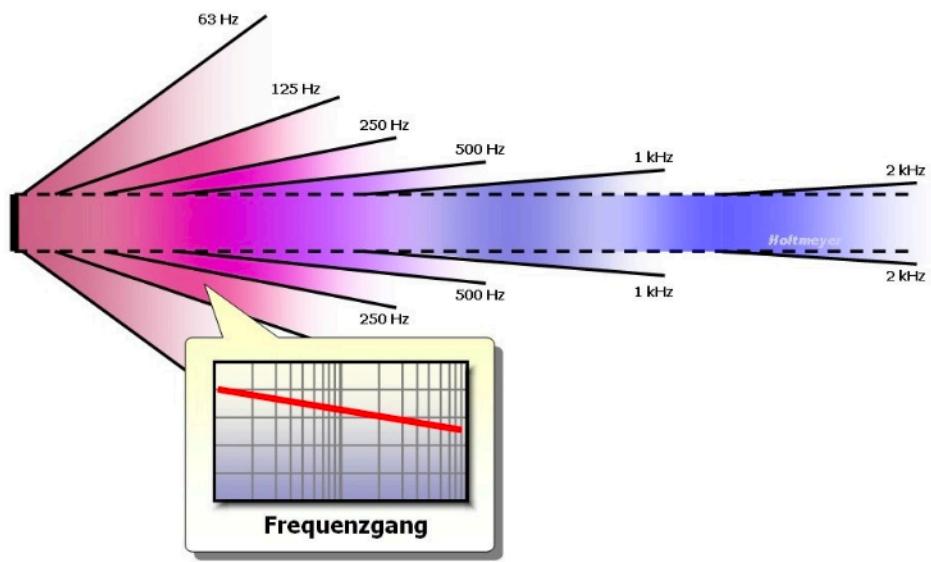


Abbildung 6. Vertikaler Öffnungswinkel beim geraden Linienstrahler. (Dipl. Ing. Holtmeyer, 2006, S. 4)

Dipl.Ing. Volker Holtmeyer stellt fest:

Es sind also zwei Eigenschaften der linienförmigen Strahleranordnung festzustellen, die für Beschallungsaufgaben eigentlich ungeeignet sind:

1. Der Frequenzgang auf Achse wird mit zunehmender Entfernung immer höhenlastiger
2. Der Frequenzgang außerhalb der Symmetriearchse wird mit zunehmendem Winkel immer tiefenlastiger.

(Dipl. Ing. Holtmeyer, 2006, S. 4)

## 3 Hornlautsprecher

Hörner werden schon lange in der Akustik verwendet, weit länger als die Prinzipien ihrer Funktionsweise bekannt sind. Schon sehr früh in der menschlichen Geschichte wurden hohle Tierhörner zur Signalgebung über weite Strecken verwendet. Hörner sind die Basis für eine Vielzahl an Musikinstrumenten und auch die Basis für die ersten hörunterstützenden Geräte. (Davis et al., 2013, S. 369; Eargle, 2003, S. 161)

Hörner spielen zwei fundamentale Rollen in der Akustik. Einerseits als Richtungsgeber, welche die akustische Energie in eine bestimmte Richtung „lenken“ andererseits als Impedanzangleicher ähnlich der Wirkung eines elektronischen Transformators. (Davis et al., 2013, S. 368–369)

In Lautsprecheranwendungen definieren Hornoberflächen eine begrenzte Region, deren Querschnittsfläche  $S$  sich vom Eingang zum Ausgang erhöht. Am Eingang des Horns, wo die Fläche  $S$  klein ist, ist der akustische Druck groß und die Volumengeschwindigkeit für eine gegebene akustische Kraft ist klein. Im Gegenzug ist am Ausgang, wo die Fläche groß ist, auch die Volumengeschwindigkeit groß und der akustische Druck klein für die gegebene akustische Kraft. (Davis et al., 2013, S. 369)

Wie bereits erwähnt ist das Horn die Basis einer Vielzahl musikalischer Instrumente, wobei bei deren Design Resonanzen, welche sich im Inneren des Horns bilden, erwünscht sind. Sie ergeben gemeinsam mit der Art der Tonerzeugung und dem Material, aus dem die Hörner konstruiert sind, die spezifischen Klangeigenschaften eines Instruments. Bei der Schallwiedergabe, also bei der Konstruktion von Lautsprechern, die eine möglichst klanggetreue Wiedergabe erreichen wollen, sind diese Resonanzen unerwünscht und müssen weitgehend minimiert werden. (Davis et al., 2013, S. 369)

Die Theorie zur Berechnung von Hornlautsprechern beruht auf der Webster Horngleichung. Diese ist streng genommen allerdings auf nur drei Hornstrukturen anwendbar. Eine Röhre in der sich eine ebene Welle ausbreitet, ein konisches Horn und ein zylindrisches Horn. Websters Gleichung geht davon aus, dass die akustische Kraft sich gleichmäßig in der Übergangsregion der Hornstruktur verteilt. Sie beinhaltet deshalb nur eine Raumvariable in der achsialen Richtung. Die Anwendung der Webstergleichung auf andere Horntypen ist nur annäherungsweise richtig und dann nur, wenn sich das Horn sehr langsam öffnet, also sehr groß ist. Genau auf diese Größe wird in der Praxis sehr häufig verzichtet. (Davis et al., 2013, S. 369)

Bei jedem Horn mit endender Länge wird eine Reflexion am Öffnungsmund stattfinden, eine sogenannte Mündungsreflexion. Teil der Energie wird in den Trichter zurückgeleitet. Solche Reflexionen können zu stehenden Wellen im Horn

### **3 Hornlautsprecher**

---

führen, welche Resonanzfrequenzen aufweisen, die mit der Länge des Horns zusammenhängen. In der Praxis wurde festgestellt, dass diese Reflexionen nur vernachlässigt werden können, wenn der Mund des Horns mindestens drei Mal so groß ist wie die tiefste anzuregende Frequenz, weswegen Tieffrequenzhörner sehr groß sind. (Davis et al., 2013, S. 370)

In einem gut designten Hornlautsprecher ist die dominante Art vorkommender Verzerrung eine harmonische Verzerrung der zweiten Ordnung. Dies ist ein thermodynamischer Effekt und lässt sich nur reduzieren, indem man die Krümmung des Horns steigert, damit der Schalldruck, welcher sich im Horn ausbreitet, dieses schneller verlassen kann. (Eargle, 2003, S. 200)

Zur Klärung des Begriffes harmonische Verzerrung ist hier ein kurzer Exkurs notwendig. Verzerrungen werden grundsätzlich unterteilt in lineare und nicht lineare Verzerrungen. Lineare Verzerrungen ändern Amplitude oder Phase, nicht lineare Verzerrungen hingegen erzeugen Frequenzen, welche bisher nicht im Übertragungssignal vorhanden waren. Nicht lineare Verzerrungen werden wiederum in harmonische und nicht harmonische Verzerrungen unterteilt. Von harmonischen Verzerrungen spricht man wenn die entstehenden Frequenzen in einem ganzzahligen Vielfachen der Grundfrequenz auftreten. Entsprechen die entstehenden Frequenzen nicht einem ganzzahligen Vielfachen der Grundfrequenz, so spricht man von nicht harmonischen Verzerrungen. (NTi Audio, 2019; Raffaseder, 2010, S. 67–68)

## **3.1 Grundlegende Hornlautsprechertypen**

### **3.1.1 Konushorn**

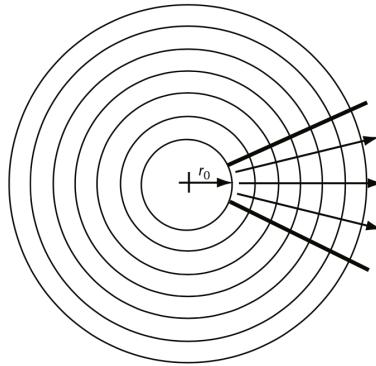
Laut der IATE – European Union terminology wird ein Konushorn definiert als “Trichter in Form eines Kegelstumpfs.“ (IATE European Union terminology, 2003)

“Die einfachste Trichterart ist der Kegeltrichter oder Konustrichter, dessen Querschnitt quadratisch zunimmt.“ (Zollner & Zwicker, 2003, S. 104)

Akustische Energie wird in Form einer sich divergierenden Sphäre in das schmale Ende eines Kegels geleitet und breitet sich dann in diesem aus (Davis et al., 2013, S. 369) wie in folgender Abbildung zu erkennen ist.

### 3 Hornlautsprecher

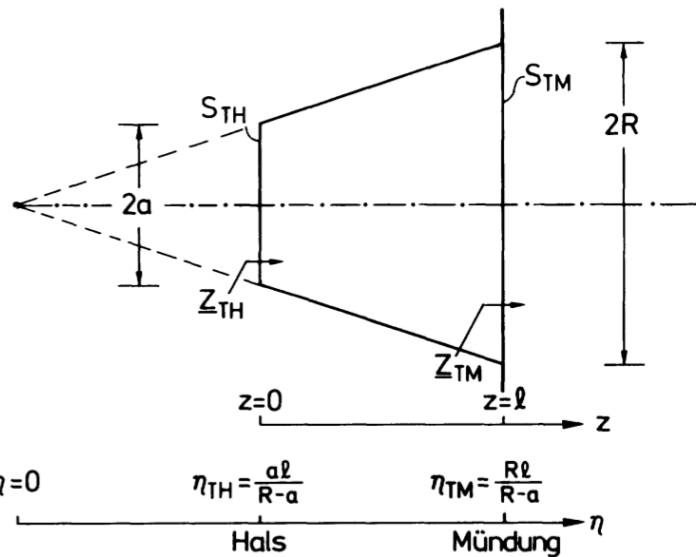
---



*Abbildung 7. Ausbreitung einer sphärischen Welle in einem Konustrichter. (Davis et al., 2013, S. 369)*

Damit dieses Horn funktioniert, müsste die Krümmung der Welle, die am schmalen Ende des Konus eintrifft,  $r_0$  entsprechen, wobei  $r_0$  vom virtuellen Scheitelpunkt des Kegels gemessen wird. Die Wellenfronten in solch einem Kegel wären normal zu den Flächen des Kegels, somit würde alle Energie radial ausgestrahlt werden und dadurch würde sich die Partikelgeschwindigkeit tangential zu den Kegelwänden verhalten, wodurch keine Reflexionen entstehen würden. Reflexionen treten dann auf, wenn die Partikelgeschwindigkeit einen Anteil aufweist, welcher normal zu den Kegelwänden steht. (Davis et al., 2013, S. 369–370)

Um möglichst viel Wirkleistung der Membran zu erzeugen, muss der Realteil der Trichterhalsimpedanz ( $Z_{TH}$ ) möglichst groß sein, was bei  $k_{n_{TH}} \leq 2$  eintrifft. Aus dem folgt  $n_{TH} \geq c/\pi f$  ( $c$  = Schallgeschwindigkeit,  $f$  = Frequenz). Wobei  $n_{TH}$  die Stelle des Trichterhalses ist (Zollner & Zwicker, 2003, S. 106) wie in folgender Abbildung ersichtlich ist.



*Abbildung 8. Konustrichter mit Maßen und Bezeichnungen. (Zollner & Zwicker, 2003, S. 104)*

### 3 Hornlautsprecher

---

Die Länge eines Konustrichters lässt sich mit  $l = n_{TH} \left( \frac{R}{a} - 1 \right)$  berechnen. Je größer  $n_{TH}$  ist, desto spitzer ist der Konustrichter und desto tiefer liegt dessen Grenzfrequenz. (Zollner & Zwicker, 2003, S. 107–108)

Der Mündungsdurchmesser eines konischen Horns wird durch die tiefste Übertragungsfrequenz bestimmt, wobei für eine Frequenz von 50 Hertz bereits ein Durchmesser von 2.2 Metern notwendig ist. Dies zeigt, dass korrekt dimensionierte Konustrichter sehr groß sind, weswegen in der Praxis meist Exponentialtrichter verwendet werden. (Zollner & Zwicker, 2003, S. 107–108)

#### 3.1.2 Zylindrisches Horn

Für die Konstruktion eines zylindrischen Horns wird eine Sektion eines Zylinders, welcher einen großen Radius aufweist, an einem kleineren Radius gekürzt, um eine Öffnung zu erschaffen. Die Bodenplatte und Deckplatte des Horns sind flach und haben einen konstanten Abstand zueinander. Der Abstrahlwinkel des Horns wird durch den Winkel zwischen den Seitenwänden bestimmt. Die Schwierigkeit bei Benutzung dieses Horntyps liegt darin, dass an der gesamten Fläche des Trichterhalses eine gleichmäßige zylindrische Welle zur Anregung erzeugt werden muss. (Davis et al., 2013, S. 371)

#### 3.1.3 Exponentialhorn

Als Exponentialhorn wird ein Trichter bezeichnet, dessen Querschnittsverlauf zylindrisch beginnt und dessen Querschnittsfläche sich exponentiell vergrößert. Besonders günstig ist, wenn die relative Änderung des Querschnitts konstant ist. Im Trichter breiten sich nur Frequenzen oberhalb der Trichterwellengrenzfrequenz aus, die sich aus  $f > f_{TW} = \frac{\varepsilon c}{4\pi}$  ergibt, wobei  $\varepsilon$  die Trichterwellenkonstante, auch genannt das Öffnungsmaß, darstellt. Im realen Trichter breiten sich auch Frequenzen aus, die kleiner als  $f_{TW}$  sind, allerdings verlieren hier die getroffenen Näherungen der ebenen Welle ihre Gültigkeit, was zu komplizierten Differenzialgleichungen führt. (Zollner & Zwicker, 2003, S. 109–110)

Ein Exponentialtrichter besitzt noch eine zweite Grenzfrequenz am Trichtermund, wenn die Strahlungsimpedanz an der Trichtermündung nahezu reell ist. Sie ergibt sich aus  $f_{TM} = \frac{c}{\pi R}$ , wobei  $R$  dem Radius der Trichtermündung entspricht (Zollner & Zwicker, 2003), wie folgender Abbildung zu entnehmen ist.

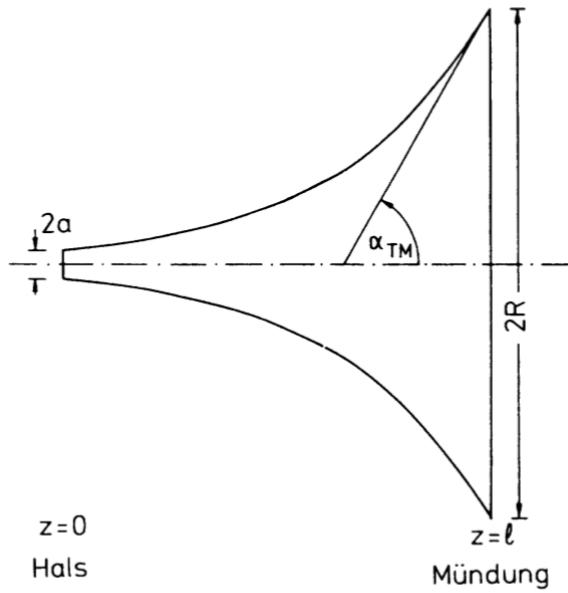


Abbildung 9. Längsschnitt eines Exponentialtrichters. (Zollner & Zwicker, 2003)

Zollner und Zwicker stellen bei ihren Betrachtungen zum Exponentialtrichter grundsätzlich fest:

- 1) Je kleiner das Öffnungsmaß  $\varepsilon$ , desto niedriger liegt die Trichterwellengrenzfrequenz  $f_{TW}$ . Beispiel:  $\varepsilon = 3,7 \text{ m}^{-1} \rightarrow f_{TW} = 100 \text{ Hz}$ .
- 2) Je größer der Mündungsdurchmesser  $2R$ , desto niedriger die Mündungsgrenzfrequenz  $f_{TM}$ , bei welcher der Trichter noch näherungsweise mit  $Z_0$  belastet wird. Beispiel:  $2R = 2.2 \rightarrow f_{TM} = 100 \text{ Hz}$ .
- 3)  $f_{TW} < f_{TM}$ : Im Trichter können störende Reflexionen entstehen (Resonanzen!)  
 $f_{TW} > f_{TM}$ : Weitgehend resonanzfreie Übertragung

(Zollner & Zwicker, 2003, S. 111–112)

Als Beispiel wird hier ein Exponentialtrichter für einen Tieftonlautsprecher (18 Zoll = 45,72 cm) mit einem Übertragungsbereich ab  $f_{gu} = 25$  Hertz berechnet:

1)  $Halsdurchmesser = Membrandurchmesser = 45,72\text{cm} = 2a$

$$a = \frac{45,72\text{cm}}{2} = 22.86\text{cm}$$

### 3 Hornlautsprecher

---


$$2) f_{TW} \approx 0.7f_{gu} = 0.7 * 25 = 17,5 \text{ Hz}; \quad \frac{4\pi f_{TW}}{c} = \frac{4\pi * 17,5 \text{ Hz}}{343 \frac{\text{m}}{\text{s}}} \\ = 0.641 \text{ m}^{-1}$$

3) Trichterresonanzen sollen gering ausgeprägt sein:

$$\text{Annahme } f_{TW} = f_{TM} = 17.5 \text{ Hz} = \frac{c}{\pi R} \rightarrow R = \frac{\frac{343}{\pi}}{17,5} = 6.238 \text{ m} \\ \rightarrow \text{Mündungsdurchmesser} = 2R = 12.47 \text{ m}$$

4) Querschnittsverlauf  $S(z) = (22.86)^2 \pi e^{0.641z/m} = ! R^2 \pi = 12.47\pi$

$$S(l) = (22.86)^2 \pi e^{0.641l/m} = ! R^2 \pi \\ l = \frac{\ln[(623.8\text{cm}/22.86\text{cm})^2]}{0.641/m} = 10.31m$$

Die Formeln zur Berechnung dieses Beispiels wurden dem Buch Elektroakustik von Zollner und Zwicker entnommen. (Zollner & Zwicker, 2003, S. 109–114)

Das Dimensionierungsbeispiel zeigt: Ein Exponentialtrichter im Tieftonbereich braucht eine Länge von über 10 Metern. Bei Lautsprechern dieser Größe ist in der Praxis bezüglich Lagerung, Transport und Positionierung am Veranstaltungsort mit großen Schwierigkeiten zu rechnen.

Zollner und Zwicker halten fest:

Es wird ausdrücklich darauf hingewiesen, dass es nicht „den“ einzig richtigen Exponentialtrichter gibt. Den Rechenschritten 2 und 3 liegen willkürliche Annahmen zugrunde. [...] In vielen Fällen ist die maximale Baugröße ein wesentliches Entwurfskriterium. Die Entwicklung qualitativ hochwertiger Trichter muss auf jeden Fall von Schallmessungen (und ggf. Hörtests) unterstützt werden. Die Genauigkeit der Trichterberechnung ist begrenzt, weil eine Reihe weiterer Effekte vernachlässigt werden.

- a) Die Wellenform im Trichter [...]
- b) Mitschwingende Trichterwände ergeben Resonanzen
- c) Interaktion zwischen Membranresonanzen und Trichterresonanzen

(Zollner & Zwicker, 2003, S. 114)

Dennoch beruhen viele Weiterentwicklungen im Bereich der Hornlautsprecher auf dem Prinzip des Exponentialhorns, wobei meist nur das erste Drittel des Trichters exponentiell größer wird. (Eargle, 2003, S. 183,199)

### 3 Hornlautsprecher

#### 3.1.3.1 Mehrzellenhörner

Das Mehrzellenhorn, wie es in folgender Abbildung zu sehen ist, wurde 1930 entwickelt und wurde hauptsächlich in Kinosälen verwendet, wo es notwendig war, Sound in Richtung von Sitzbereichen zu lenken. Bei niedrigen Frequenzen funktioniert dies allerdings nicht. Mehrzellenhörner wurden später im Allgemeinen von radialen Hörnern abgelöst. (Eargle, 2003, S. 184)

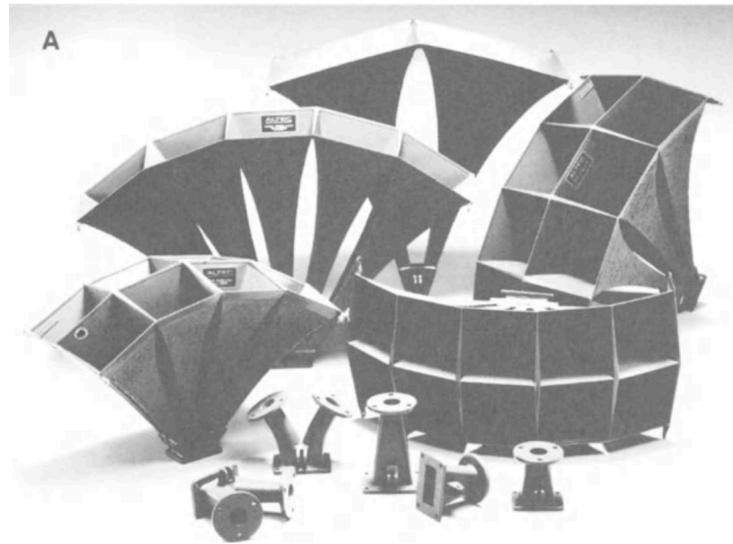


Abbildung 10. Mehrzellenhörner der Firma Altec. (Eargle, 2003, S. 186)

#### 3.1.3.2 Radiale Hörner

Die Bezeichnung radiales Horn wird von der Mündungsöffnung eines solchen Hörns abgeleitet, da diese eine kreisförmige Bogenform hat (Eargle, 2003, S. 186) wie in folgender Abbildung ersichtlich ist.

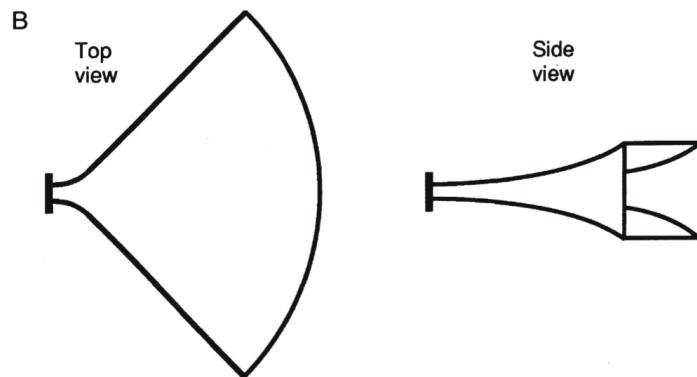


Abbildung 11. Aufsicht und Seitenansicht eines radialen Hörns (Eargle, 2003, S. 186)

Bei Betrachtung der Seitenansicht eines solchen Hörns ist festzustellen, dass die Ausbreitung des Hörns in vertikaler Richtung exponentiell verläuft. So wird in vertikaler Richtung die Ausbreitung der Schallwellen bestimmt, welche bei hohen Frequenzen progressiv enger wird. In horizontaler Richtung ist diese durch den

### **3 Hornlautsprecher**

---

Winkel, welcher durch die geraden Seiten gegeben ist, festgelegt. Dies verliert für Frequenzen, deren Wellenlänge im Vergleich zum Trichter gleich oder größer sind ihre Gültigkeit. Bei Frequenzen, welche 8-10 Kilohertz übersteigen, kann es aufgrund der exponentiellen Größensteigerung in vertikaler Ebene zu Interferenzen im Trichterhals kommen. Radiale Hörner sind ideal für Anwendungen, wo die vertikale Ausbreitung vernachlässigt werden kann. Sie werden häufig in Studiomonitoren verbaut. (Eargle, 2003, S. 186–189)

#### *3.1.3.3 Akustische Linsen*

Akustische Linsen sind ein Instrument zur Dispersion von Schall. (Eargle, 2003, S. 190)

Zollner und Zwicker stellen fest:

Durch den großen Mündungsquerschnitt weisen Hornlautsprecher eine höhere Bündelung auf als Konus- oder Kalottenlautsprecher. Maßnahmen gegen zu große Bündelung sind

- a) Geeignete Formgebung der Hornmündung, z.B. Rechteckquerschnitte, die in horizontaler Ebene weniger bündeln als in vertikaler Ebene,
- b) Unterteilung des Horns durch Trennstege in Teiltrichter, sog. Parzellen,
- c) akustische Linsen.

(Zollner & Zwicker, 2003, S. 118)

Akustische Linsen sind so gebaut, dass der Schall an ihren Seiten einen längeren Weg zurücklegen muss als der Schall in der Mitte der Linse. Dadurch wird die Wellenfront beim Verlassen der Linse gekrümmt, was zu einer größeren Dispersion führt. Sie werden heutzutage nur noch selten eingesetzt, genießen aber in Ingenieurskreisen immer noch eine hohe Wertschätzung. (Eargle, 2003, S. 190)

#### *3.1.3.4 Gleichmäßig abdeckende Hörner*

Keines der bisher betrachteten Hörner strahlt gleichmäßig in vertikaler und horizontaler Ebene ab, meistens wird die vertikale Ebene zugunsten der horizontalen Ebene vernachlässigt. Der initiale Sektor eines solchen gleichmäßig abdeckenden Hornlautsprechers ist exponentiell und geht dann in einen Sektor über, dessen Ausmessungen durch den gewünschten vertikalen Abstrahlwinkel definiert ist. (Eargle, 2003, S. 192–193)

#### *3.1.3.5 Konstant gerichtete Hörner (Constant Directivity Horns)*

Dieser Horntyp vereint Aspekte verschiedener anderer Horntypen. Der initiale Sektor ist auch bei diesem Horn exponentiell, geht dann in eine kreisförmige Übergangsregion über und von dieser dann langsam durch eine rechteckige Übergangsregion in eine Trichtermündung in Form eines Schlitzes. Es ist schwer zwei solcher Hörner zur kombinieren, da durch die Beugung der Schallwellen, die an der schlitzförmigen Trichtermündöffnung entsteht, es so scheint als würde der Schall von mehreren Einzelquellen abgestrahlt werden und nicht von einer Punktquelle. (Davis et al., 2013, S. 374)

### 3 Hornlautsprecher

#### 3.1.3.6 Gefaltete Hörner

“Eine besondere Bauform, durch welche die Trichterlänge verkürzt werden kann, ist das gefaltete Horn [...]. Die Schallablenkung ist aber nicht ganz unproblematisch, weshalb derartige Trichter hauptsächlich im Tieftonbereich oder – im Mitteltonbereich [...] eingesetzt werden.“ (Zollner & Zwicker, 2003, S. 115)

Folgende Abbildung zeigt den Längsschnitt durch einen einfach gefalteten Hornlautsprecher.

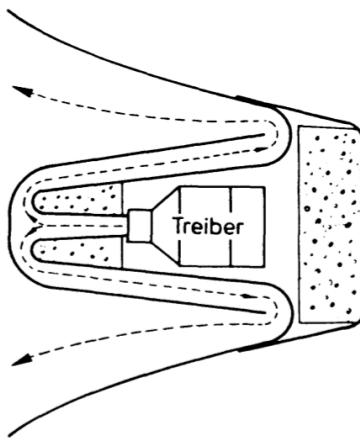


Abbildung 12. Längsschnitt durch einen gefalteten Hornlautsprecher. (Zollner & Zwicker, 2003, S. 115)

Die Berechnung eines solchen Horns stellt sich als schwierig heraus, da die Rate der Vergrößerung des Querschnitts nicht offensichtlich ist, außerdem ist es schwierig festzustellen, wo die Symmetriechse in solch einem Horn liegt und wie sich die Wellenfront an dieser Achse ausbreitet. (Bright, 2003, S. 3–4) Dies ist in folgender Abbildung veranschaulicht.

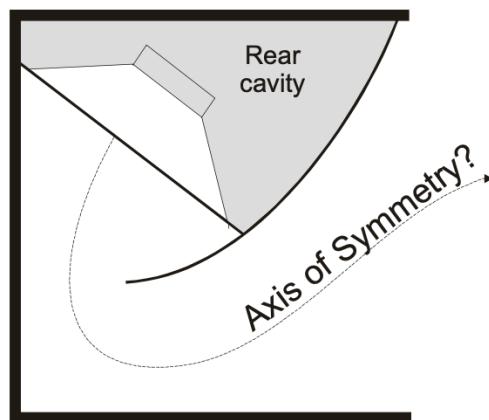


Abbildung 13. Längsschnitt durch einen simpel gefalteten Hornlautsprecher. (Bright, 2003, S. 4)

### 3 Hornlautsprecher

---

#### 3.1.4 Konventionelle Systeme

Unter TontechnikerInnen wird oft der Begriff Punktquelle unkritisch für konventionelle Systeme verwendet. Michael Pohl, zuständig für international technical Support und education bei der Firma Meyersound, hilft im Interview zu dieser Arbeit die Begrifflichkeiten aufzuklären. Er stellt fest, dass der Begriff Pointsource nur für ein System korrekt wäre, das wirklich einen Punkt als Schallquelle besitzt, was bei den meisten Lautsprechern nicht zutrifft. Konventionelle Systeme, so wie Pohl sie nennt, bestehen zu 99% der Fälle aus einem Konuslautsprechertreiber für den Tieftonbereich und einem Kompressionstreiber in Kombination mit einem Horn für den Hochtonbereich. Das Horn dient in diesem Fall einerseits als akustischer Impedanzwandler und andererseits zu Erzeugung einer Richtwirkung im Hochtonbereich. Pohl zitiert in diesem Interview Dr. Harry F. Olsen. Dieser hat, so Pohl im Interview, angemerkt, dass die Richtwirkung, welche von einer Membran erzeugt wird, von der Größe dieser Membran und der Frequenz des erzeugten Tones abhängig ist. Bei steigenden Frequenzen wird die Abstrahlung immer enger. Deswegen kommt es bei konventionellen Systemen zu extrem unterschiedlichen Abstrahlverhalten bei unterschiedlichen Treibergrößen. Um ein vorhersehbares Abstrahlverhalten zu erzeugen werden hier häufig Mehrwegsysteme eingesetzt, welche allerdings den Nachteil mit sich bringen, dass für mehr Wege auch mehr Crossovers verwendet werden müssen. Diese erzeugen wiederum zusätzliche Phasenprobleme, wodurch das System komplexer und schwerer handzuhaben ist. (Michael Pohl, 2019, Anhang C, S. 116)

#### 3.1.5 Wellenleiter (Waveguides)

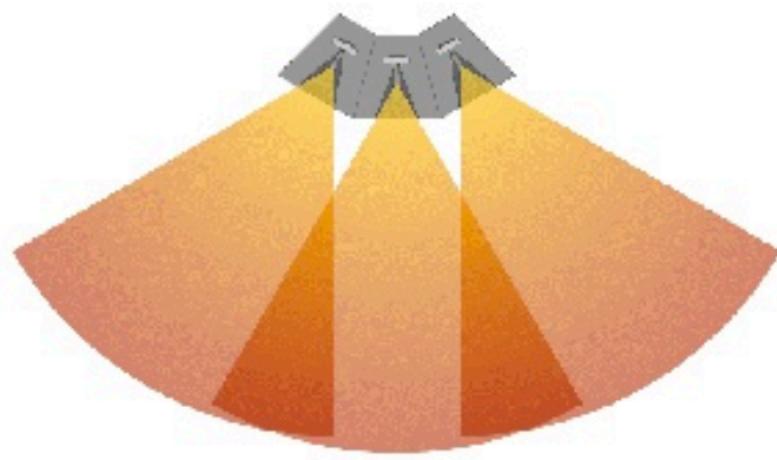
Es ist festzustellen, dass sich die Anforderungen für Hornlautsprecher einem Wandel unterzogen haben. Das Hauptaugenmerk bei modernen Hornkonstruktionen liegt nicht mehr in der Steigerung der Ausgangseffizienz, sondern vielmehr darin, ein Werkzeug zur Kontrolle der Richtwirkung zu erzeugen. Es ist nicht möglich eine bestimmte Schallwellenausbreitung zu erzeugen indem man ihre Bewegung in eine Form einschränkt, es ist aber möglich festzustellen welche Wellenleitercontour der Schallwelle „erlauben“ würde sich in der gewünschten Art und Weise auszubreiten. Earl R. Geddes erläutert dies in der von ihm veröffentlichten Arbeit „Acoustiv Waveguide Theory“. (Geddes, 1989, S. 3–4)

## 3.2 Clusterbildung

Ein Lautsprechercluster stellt die Gruppierung mehrerer einzelner Lautsprecher dar. Lautsprechercluster werden verwendet, um einen höheren Schalldruckpegel über den gesamten Frequenzbereich zu erzeugen. Diese Pegelerhöhung wird dabei auf zwei verschiedene Arten erreicht. Erstens wird die abgestrahlte Energie im Tieftonbereich gekoppelt, zweitens wird sie im Hochtonbereich gebündelt und

### 3 Hornlautsprecher

separiert. Im Tieftonbereich entsteht bei Clusterung eine konstruktive Interferenz, wenn die Wellenlängen der abgestrahlten Frequenzen groß gegenüber dem Abstand der Lautsprecher zueinander sind. Dies führt zu einer Pegelerhöhung im Tieftonbereich. Im Hochtonbereich ist dies aufgrund der kleinen Wellenlängen nicht möglich, weshalb hier stark gebündelte Lautsprecher verwendet werden, welche einen hohen Schalldruck erzeugen. Stärkere Bündelung bedeutet kleinere Öffnungswinkel. Um den gewünschten Abstrahlwinkel aufrecht zu erhalten müssen dem Cluster mehr Lautsprecher hinzugefügt werden, allerdings lassen sich gewisse Überlappungsbereiche, in denen destruktive Interferenzen entstehen, nicht vermeiden. Diese müssen möglichst klein gehalten werden. (Dipl. Ing. Holtmeyer, 2003, S. 3, 2006, S. 1) Die konventionelle Clusterbildung im Hochtonbereich und entstehende Überlappungsbereiche werden in folgender Abbildung veranschaulicht.



*Abbildung 14. Konventionelle Clusterbildung im Hochtonbereich mit Überlappungsbereichen der Abstrahlung. (Dipl. Ing. Holtmeyer, 2003, S. 3)*

Tony Andrews, der Gründer der Firma Funktion-One, welche sich auf den Bau von Hornlautsprechern spezialisiert hat, stellt in einem Interview mit dem Night Magazine im Jahr 2007 fest, dass es sehr schwer ist, ein sich gut verhaltendes Horn zu konstruieren und noch viel schwerer, einen sich gut verhaltenden Cluster zu konstruieren, weswegen nur wenige Firmen sich auf diese spezialisieren. (Howe & Ws, 2007, S. 2)

## 3.3 Neuentwicklungen im Bereich Hornlautsprecher

Wie bereits vorab erwähnt wurde, muss die Entwicklung qualitativ hochwertiger Trichter von Schallmessungen und Hörtests unterstützt werden. (Zollner & Zwicker, 2003, S. 114) Hersteller von Hornlautsprechersystemen sind bei der Offenlegung ihrer technischen Strategien für die Entwicklung dieser Systeme sehr zurückhaltend. Scott Gledhill, International Sales Manager der Firma

### 3 Hornlautsprecher

---

Meyersound, stellt im Interview zu dieser Arbeit fest, dass das Studium der Fortpflanzung einer Soundwelle durch die Halsöffnung eines Horns dabei von hoher Relevanz ist. Wichtig dabei ist eine möglichst hohe Auflösung, um zu sehen was an dieser Stelle tatsächlich passiert. Bei Meyersound wird dies so hoch aufgelöst, dass jedes Molekül, welches sich in dieser Halsöffnung befindet, als ein Datenpunkt dargestellt wird. (Scott Gledhill, 2019, Anhang A, S. 104)

Die nachfolgenden Beschreibungen der beiden Lautsprecher der Firma Lambda Labs werden gegenüber den anderen genauer ausfallen, da diese später im Experiment zu dieser Arbeit verwendet werden.

#### 3.3.1 Lambda Labs DH-18

Lambda Labs beschreibt auf der Firmenhomepage das DH-18 wie folgt:

Der Aufbau basiert auf einer Reihe von finiten Hornsegmenten, die zueinander keine Expansion, sondern unstetige Sprünge, so genannte digitale Hornabschnitte aufweisen. Aufgrund der mathematischen Optimierung der akustischen Transformation wird so ein gleichmäßig hoher Strahlungswiderstand im gesamten Nutzfrequenzband erreicht, welcher dem Digitalhorn ein Höchstmaß an Flexibilität und Einsatzmöglichkeiten bei extremen Leistungsreserven verleiht.

(Lambda Labs, 2019a)

Das DH-18 bietet je nach Anwendung zwei verschiedene Betriebsmodi, um es besser an die gegebenen Anforderungen anpassen zu können. Den „Directivity-Mode“ (D-Mode), welcher eine hohe Bündelung bewirkt und somit eine höhere Effizienz und den „Space-Mode“ (S-Mode), welcher die untere Grenzfrequenz auf 28 Hertz hinabversetzt und somit eine stärkere Infrabasswiedergabe zulässt. (Lambda Labs, 2019a)

Der Wiedergabebereich des DH18 ändert sich je nach Betriebsmodus. Im S-Mode können DH18 von 28-110 Herz betrieben werden. Im D-Mode von 30-120 Herz, jeweils bei Schwankungen von +/- 3 dB. Ebenso ändert sich die Empfindlichkeit je nach Betriebsmodus. Im S-Mode ist diese 102 dB/w/m, im D-Mode liegt diese bei 104 dB/w/m. Die Belastbarkeit wird mit 3600 Watt RMS Verstärkerleistung angegeben. (Lambda Labs, 2019a)

#### 3.3.2 Lambda Labs TX-3A

Das TX-3A der Firma Lambda Labs besteht aus einem 15 Zoll Langhubtreiber. Dieser ist mit einem elliptisch geformten Constant Directivity Horn kombiniert, welches durch eine sogenannte coaxiale True Point Source angetrieben wird. Diese coaxiale True Point Source besteht aus einem 3,5 Zoll und einem 1,5 Zoll Kompressionstreiber. Das TX-3A ist aktiv aufgebaut und besitzt insgesamt 2000 Watt RMS Verstärkerleistung. Das Abstrahlverhalten des TX-3A wird mit 50°x50° angegeben und ist damit sehr eng. Die Empfindlichkeit wird mit 96db/w/m angegeben. Das TX-3A ist für eine Wiedergabe von 60-22000 Herz bei

### **3 Hornlautsprecher**

---

einer Schwankung von +/- 3 dB über den Frequenzgang konzipiert. (Lambda Labs, 2019b)

#### **3.3.3 Meyer Bluehorn**

Das Meyer Bluehorn ist ein Lautsprechersystem für Masteringstudios. Es vereint akustische Präzision mit digitaler Modulation durch leistungsfähige DSP-Prozessoren und verspricht dadurch einen linearen Frequenz- und Phasenverlauf über den gesamten Hörbereich. (Meyer Sound Laboratories Incorporated, 2019a)

Diese akustische Präzision ist, laut Scott Gledhill (International Sales Manager Meyersound) nur erreicht worden, weil alle Komponenten dieses Systems von Meyersound selbst produziert werden und über Jahre hinweg optimiert wurden. (Scott Gledhill, 2019, Anhang A, S. 104)

#### **3.3.4 Void Hyperfold**

Void verrät nicht viel über seine Neuentwicklung, das Hyperfold-Kickbasshorn, außer dass dieses eine Weiterentwicklung gefalteter Hornlautsprecher ist. Besonders sticht heraus, dass 4 Stück 15zöllige Membranen in einem sehr kleinen Gehäuse verbaut sind. Die vorderen Abmessungen dieses Horns sind knapp 75x75 cm mit einer Tiefe von circa 1.2 Metern. Das lässt auf eine sehr starke Faltung im Inneren des Gehäuses schließen. (Void acoustics, 2019)

#### **3.3.5 Realhorns**

Andreas Plodek, Gründer und Entwickler des Realhorns PA Systems, wählt eine andere Herangehensweise. Er baut seine Hörner so groß wie es laut Simulation sinnvoll ist und nicht so klein wie möglich. Sein System besteht aus einem Basshorn, mehreren Lowmidbasshörnern, einem Array aus Bandpässen und gefalteten Hörnern und mehreren Mehrzellenhörnern. Der Umfang des Basshorns ist 10 Meter und es kann Frequenzen bis 35 Herz wiedergeben. Es wird durch 6 Stück 15 Zoll Membranen, welche in einer Druckkammer verbaut sind, angetrieben. Gemeinsam mit dieser Druckkammer ist das Horn 4,6 Meter lang und wiegt 800 Kilo. Insgesamt ist das System über 20 Meter breit. Plodek denkt bei der Dimensionierung seiner Hörner an den Druckwechsel, der in den Hörnern stattfindet, wenn die Membran schwingt. Er möchte, dass die Membran sich wieder in ihrer Ausgangslage befindet, bevor der Schall das Horn verlassen hat. Deshalb baut er seine Hörner in dieser außergewöhnlichen Größe. Das komplette System ist wassergekühlt und besitzt eine sehr genaue Masterclock, welche durch Reclocking im gesamten System stabil gehalten wird. Insgesamt verwendet das System – je nach dem genauem Setup – um die 50 aktive Kanäle. Plodek vertritt außerdem die Philosophie, dass eine Anlage zu einem gewissen Grad den Klang verändern darf, weswegen er in seiner Signalkette viele Elemente zur Beeinflussung des Klanges verbaut hat, wie beispielsweise einen Subharmonicsynthesizer, einen Transientdesigner und einen Analog Digital Wandler welcher die Anzahl der ungeraden harmonischen Frequenzen im Signal erhöhen kann. (Andreas Plodek, 2019, Anhang B, S. 109)

## 4 Line Arrays

Das Prinzip von Line Arrays ist schon seit langem bekannt. Spaltenlautsprecher, wie sie in vielen Kirchen oder Zugstation zu sehen sind, gehen zurück auf das Line Array Konzept, welches bereits 1896 erwähnt wurde. Line Arrays erhöhen die Richtwirkung in vertikaler Ebene, wobei die horizontale Abstrahlung sich gegenüber einem einzelnen Lautsprecher nicht verändert. (Howe & Ws, 2007, S. 1; Webb & Baird, 2003, S. 1)

Michael Pohl stellt folgendes in einem Interview fest:

Wenn man sich das ganze sphärisch betrachtet würde das bedeuten, dass ich wenn ich einen Lautsprecher in 10 Meter anhöre, der da vielleicht noch 100 dB macht, hab ich in 20 Metern nur noch 94 dB und in 40 Metern nur noch 88 dB und das sind signifikante Unterschiede, weil 88 dB im Vergleich zu 100 ist nur noch ein Viertel der empfundenen Lautstärke. Dass ist ein Problem mit dem man bei großen Shows [...] zu kämpfen hat.

(Michael Pohl, 2019, Anhang C, S. 116)

Hier kommt der Ansatz moderner Line Arrays zu tragen, welcher darauf aus ist, die Schallenergie gleichmäßiger über den Raum zu verteilen. (Michael Pohl, 2019, Anhang C, S. 116)

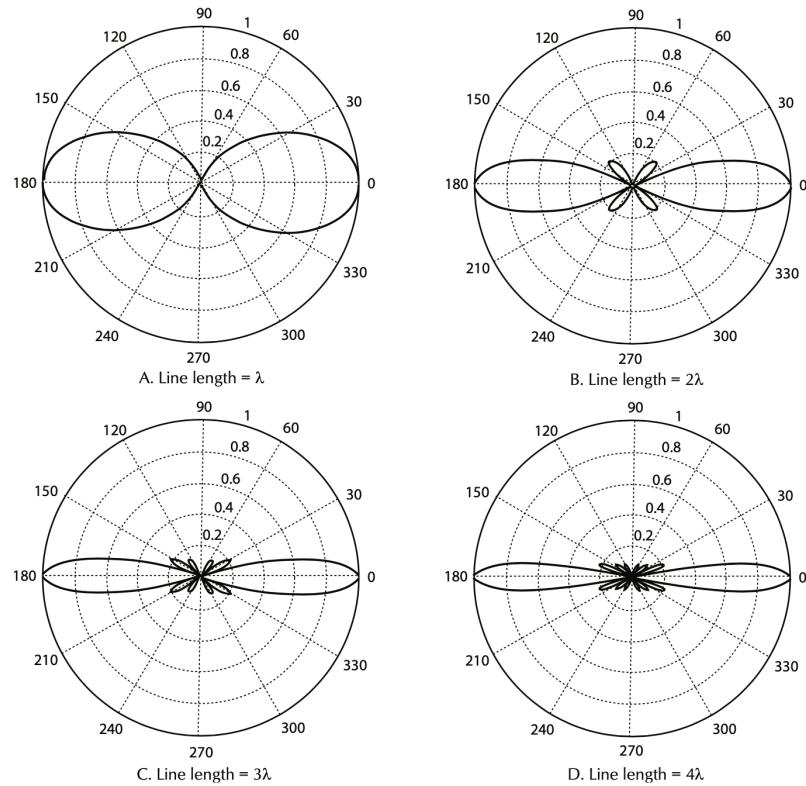
### 4.1 Gerade Line Arrays

Gerade Line Arrays entsprechen den vorab diskutierten Linienstrahlquellen endlicher Länge.

Die Fernfeld-Abstrahlung einer Linienquelle, deren Länge viel kürzer ist als die Wellenlänge der Übertragungsfrequenz, ist isotropisch. Wird die Übertragungsfrequenz soweit erhöht, dass ihre Wellenlänge der Länge des Linienstrahlers entspricht, so entsteht eine Richtwirkung in Art einer zentralen Keule (Webb & Baird, 2003, S. 402), wie in folgender Abbildung zu sehen ist.

## 4 Line Arrays

---



*Abbildung 15. Richtwirkungsdiagramme von Linienquellen für verschiedene Wellenlängen. (Davis et al., 2013, S. 403)*

Wie man aus der Abbildung erkennen kann, verdoppelt sich bei Frequenzverdoppelung auch die Anzahl der seitlichen Keulen der Richtwirkung. Daraus kann man schließen, dass eine gleichmäßig angeregte Linienquelle kein System mit gleichmäßiger Richtwirkung über den Frequenzbereich darstellt. (Davis et al., 2013, S. 403)

Weiters muss festgehalten werden, dass jegliche Abstände zwischen Elementen einer Linienquelle nicht abstrahlend sind und somit Abschnitte entlang der Linienquelle darstellen, welche eine Amplitude von 0 aufweisen. Diese Abstände haben nur wenig Einfluss auf die Hauptkeule der Abstrahlung, verändern allerdings die Struktur der seitlichen Keulen und Nullstellen. (Ureda, 2001, S. 8–10)

Die frequenzabhängige Richtwirkung ergibt in manchen Systemen Abstrahlwinkel im Hochtonbereich, welche kleiner als 1 Grad sind. Außerdem ergibt sich beim Linienstrahler, wie bereits erwähnt wurde, ein Übergang von einem Nahfeld mit zylindrischer Abstrahlung mit 3dB Verlust bei Distanzverdopplung zu einem Fernfeld mit sphärischer Abstrahlung mit 6dB Verlust bei Distanzverdopplung. Dieser Übergang ist frequenzabhängig. Das heißt, der Ort im Raum, an dem dieser Übergang stattfindet, ändert sich je nach betrachteter Frequenz. Näherungsweise findet der Übergang einer 3 Meter langen Linienquelle von Nah- ins Fernfeld, (Webb & Baird, 2003, S. 2–3) bei folgenden Distanz/Frequenzbeziehungen statt:

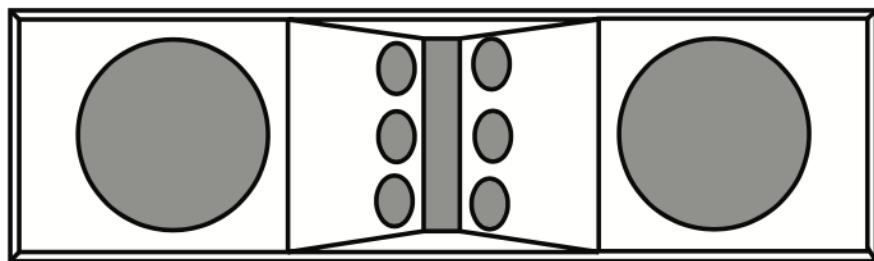
#### 4 Line Arrays

100 Hz	500 Hz	1000 Hz	5000 Hz	10 Kilohz
1.3m	6.5m	13m	65m	130m

(Webb & Baird, 2003, S. 3)

Um die direktionale Kontrolle zu erhalten, muss also die Länge der Quelle vergleichbar mit der niedrigsten Übertragungsfrequenz sein und der Abstand zwischen den Elementen muss vergleichbar mit der höchsten Übertragungsfrequenz sein. Dies legt nahe, separate Arrays für verschiedene Frequenzbereiche zu designen. (Davis et al., 2013, S. 404)

Line Arrays aus diskreten Elementen sind im Normalfall eine Kombination mehrerer Fullrange Lautsprechermodule desselben Typs (Davis et al., 2013, S. 408) welche ähnlich dem Lautsprecher in folgender Abbildung aufgebaut sind.



*Abbildung 16. Fullrange Lautsprechermodul bestehend aus 2 15 Zoll Woofern für die Basswiedergabe, einem Mitteltonhorn bestehend aus mehreren Lautsprechern und einem Coaxial montierten Hochtonelement. (Davis et al., 2013, S. 408)*

Die Verfügbarkeit hochleistungsfähiger Prozessoren und Verstärker ermöglichen eine Maßschneiderei des Anregungssignals für jedes einzelne Element des Line Arrays. Die Elemente werden separat gefiltert, verstärkt, equalisiert und verzögert. Diese Flexibilität erlaubt die Steuerung der Breite, der Richtung und der Fokussierung der Abstrahlung, sowie die Anpassung der effektiven Länge der Linienquelle als Funktion der Frequenz. (Davis et al., 2013, S. 405)

## 4.2 Curved Arrays

Um eine gleichmäßige Abstrahlung in einer typischen Audienzumgebung zu erzeugen, werden beinahe alle Line Arrays gebogen, was als Curving bezeichnet wird. (Webb & Baird, 2003, S. 3)

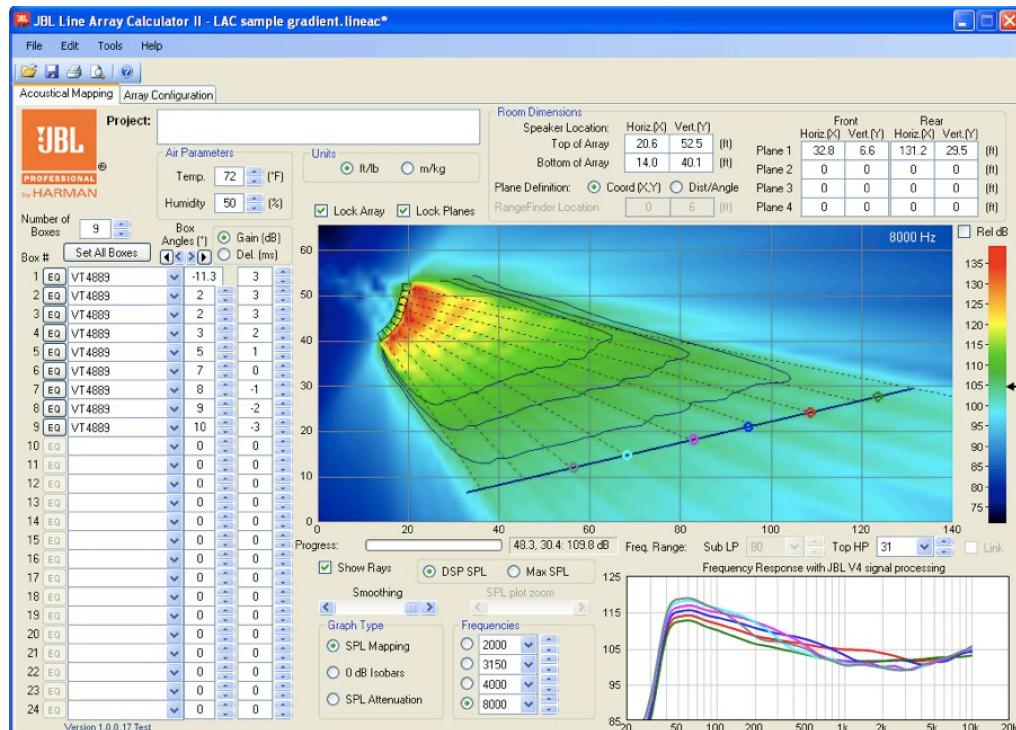
Die gebogenen Elemente einer solchen Anordnung bedürfen separater Ansteuerung und Ausgleiche im Frequenzbereich, um diese gleichmäßige Abstrahlung zu erreichen. (Davis et al., 2013, S. 409)

Um Line Arrays zu biegen muss zuerst der Biegungsgrad festgestellt werden, der notwendig ist, um die gewünschte Richtwirkung für einen bestimmten Veranstaltungsort zu erzeugen. Weiters muss die Krümmung der Wellenfront der einzelnen Elemente des Arrays bestimmt werden, um Interferenzen, welche auf Grund von Überlappungen und Lücken im Abstrahlungsbereich entstehen können,

#### 4 Line Arrays

zu vermeiden beziehungsweise diese zu reduzieren. Da hierfür hochkomplexe Berechnungen notwendig sind werden meist Computerprogramme dafür eingesetzt, welche die akustischen und elektromechanischen Charakteristika der Elemente in einem gegebenen Raum simulieren. (Webb & Baird, 2003, S. 3)

Folgende Abbildung zeigt ein Simulationsprogramm der Firma JBL für das VRX Line Array System, welches im weiteren Verlauf der Arbeit noch genauer betrachtet wird.



*Abbildung 17. Screenshot der JBL Simulationssoftware für das VRX Line Array System.*

Auf der Abbildung deutlich zu erkennen ist die Biegung des Line Arrays, sowie die Hauptachsen der Abstrahlung, welche auf eine schräge Publikumstribüne gerichtet sind. Auffallend hierbei sind die stark unterschiedlichen Entfernung zwischen Lautsprechersystem und Publikumsbereichen. Am linken Rand der Abbildung findet man die einzelnen Elemente des Line-Arrays aufgelistet. Hier sind auch die entsprechenden Winkel zwischen den Elementen und die Gainanpassungen der einzelnen Elemente ersichtlich.

Die stark unterschiedlichen Entfernung zwischen Lautsprechersystem und Publikumsbereichen führen zu Laufzeit- und Pegelunterschieden zwischen den Schallsignalen der einzelnen Elementen des Line-Arrays. Diese müssen durch unterschiedliches Processing der jeweiligen Elemente ausgeglichen werden. Effekte wie die Pegelreduktion über die Entfernung werden außerdem durch die Absorption der Luft, welche abhängig von den Wetterbedingungen ist, beeinflusst. In der Praxis werden Line-Array Systeme deshalb häufig in drei Sektionen unterteilt welche als „short, medium und longthrow Sektionen“ bezeichnet werden. (Webb & Baird, 2003, S. 5)

## 4 Line Arrays

---

### 4.2.1 Krümmung der Wellenfront

Eine gerade Wellenfront kann zu erheblichen Problemen in gebogenen Line Arrays führen, weshalb hier Kompromisse getroffen werden müssen zwischen einem Punkt, an dem die Krümmung zu viel wird, was die Kopplung der einzelnen Elemente im Array stören würde, und keiner Krümmung, welche zu Hot-Spots hoher Frequenzen führt. Ein weiteres Kriterium für Linienquellen ist, wie bereits aufgezeigt wurde, dass der vertikale Abstand zwischen einzelnen Elementen des Arrays kleiner als die höchste zu reproduzierende Übertragungsfrequenz sein muss, da ansonsten die Krümmung der Wellenfront zu stark wird, was allerdings nur für direkt abstrahlende Lautsprecher zutrifft. Hörner können in solchen Systemen weiter auseinander positioniert werden und erzeugen dennoch eine nur leicht gekrümmte Wellenfront. (Webb & Baird, 2003, S. 3–4)

### 4.2.2 Gelenkpunkte

Da Line Arrays wie bereits gezeigt, gebogen werden müssen, werden praktisch alle Line Arrays mittels Fluggesirren verbunden. Diese Fluggesirre haben Gelenkpunkte, die meist an der Vorderkante des Lautsprechersystems liegen um sich verändernde Abstände der einzelnen Lautsprecherkabinette an der Vorderkante zu vermeiden (Webb & Baird, 2003, S. 4). Diese Abstände könnten, wie vorab bereits festgestellt wurde, zu Interferenzen führen. Deshalb werden sie in den Fluggesirren so klein wie technisch möglich gehalten.

## 4.3 Vor und Nachteile von Line-Arrays

Scott Gledhill, International Sales Manager der Firma Meyersound, stellt in einem Interview fest, dass Line Arrays keine zylindrischen Wellen abstrahlen, dies sei nur ein Marketing Mythos, der von einem Hersteller ins Leben gerufen wurde. Er erklärt dies wie folgt: Betrachtet man ein einzelnes Element eines Line-Arrays und den Verlust der Leistung bei Entfernungsverdoppelung zu diesem, stellt man fest, dass dieser -6 dB ist. Es handelt sich also physikalisch gesehen um eine Punktschallquelle. Positioniert man mehrere Elemente eines Line-Arrays übereinander und vergrößert die Entfernung zu diesen wird der Leistungsverlust bei Verdoppelung der Entfernung nicht mehr 6 dB betragen, sondern etwas weniger, da man in den Abstrahlbereich mehrerer Elemente gelangt. (Scott Gledhill, 2019, Anhang A, S. 104)

Vorteile, die Line Arrays versprechen, sind, dass keine destruktiven Interferenzen aufscheinen, der Schallpegel gleichmäßig über den Raum verteilt wird und ihr Handling in Bezug auf Transport und Rigging sehr einfach ist. (Dipl. Ing. Holtmeyer, 2003, S. 7)

Nachteile sind, dass eine genaue Planung mit Simulation unbedingt notwendig ist und dass der horizontale Abstrahlwinkel fest gegeben ist (kann zu Problemen bei sehr breiten oder sehr schmalen Veranstaltungsorten führen). Dazu kommt die Abhängigkeit von der Wetterlage bei großen Entfernungen und eventuell störende

#### 4 Line Arrays

Reflexionen, die an Rückwänden von Veranstaltungsorten auftreten können.  
(Dipl. Ing. Holtmeyer, 2003, S. 7)

Ein weiterer Nachteil tritt aufgrund der bereits beschriebenen Laufzeitunterschiede auf, wie in folgender Abbildung ersichtlich wird.

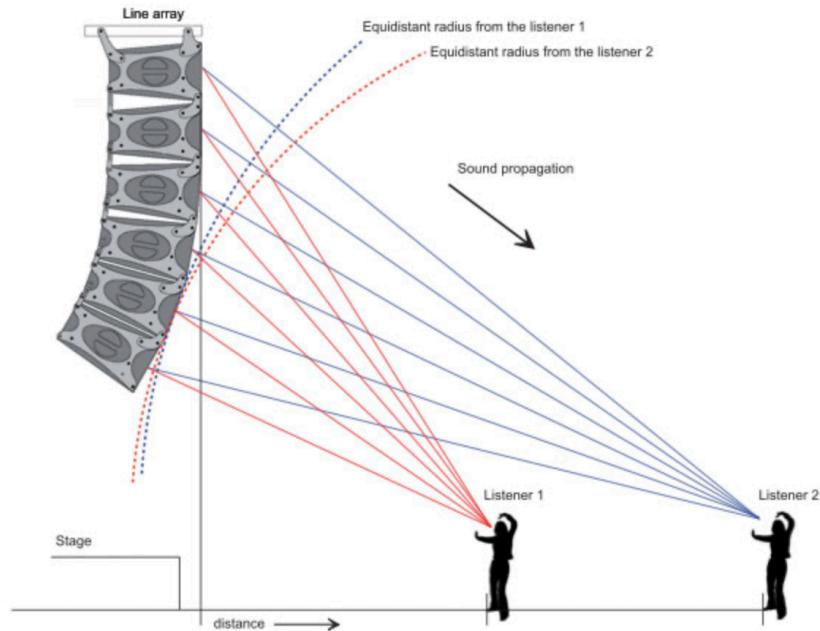


Abbildung 18. Laufzeitunterschiede der Lautsprecher eines Line Arrays zum Zuhörer. (Krampera, 2016, S. 1)

Kampera, Gründer der Firma KV2-Audio, schreibt in seinem Blog:

Bei einem Line Array mit vielen Lautsprechern erreichen deren Schallwellen den Zuhörer mit einem geringen Zeitversatz und verwischen damit die zeitliche Komponente des Signals. Die Voraussetzung für hochauflösende Wiedergabe ist eine kurze Impulsantwort. Die Impulsantwort von Line Arrays ist auf Grund des erwähnten Zeitversatzes nicht mehr korrekt. Viele Hersteller behaupten nun, dass diese Zeitfenster mit elektronischen Delays korrigiert werden können, aber dies kann keine Lösung sein, da der zeitliche Versatz der Tonquellen für jede Hörposition anders ist.

(Krampera, 2016, S. 1)

Der Meinung, diese Unterschiede können nicht mit Delays korrigiert werden, stimmt Scott Gledhill in einem Interview zu. Line Arrays besitzen horizontal über den gesamten Frequenzbereich eine gleichmäßige Abstrahlung. Die vertikale Abstrahlung wird bei steigender Frequenz immer enger, wobei sie in tiefen Frequenzen nahezu omnidiirektional ist. Diesen Fakt nutzt Meyersound aus, um das von Kampera angesprochene Phänomen zu umgehen. Bei nahe aneinander liegenden Elementen ist der Zeitunterschied bei Ankunft beim Hörer so gering, dass er vernachlässigt werden kann. Wenn die Elemente weit auseinander liegen

#### 4 Line Arrays

erreicht den Hörer nur ein Element, weil die Abstrahlung des anderen nicht mehr auf ihn „zielt“. (Scott Gledhill, 2019, Anhang A, S. 104)

Dass der Zeitunterschied vernachlässigbar ist, trifft allerdings nur zu, wenn man sich im Fernfeld des Line Arrays befindet. Im Nahfeld sind die Laufzeitunterschiede so groß, dass sie oft zu einem sehr diffusen und unklaren Klang führen. (Michael Pohl, 2019, Anhang C, S. 116)

Die enger werdende Abstrahlung bei steigender Frequenz kann im MAPP XT Simulationsprogramm von Meyersound einfach veranschaulicht werden, wie in den folgenden zwei Abbildungen ersichtlich ist.

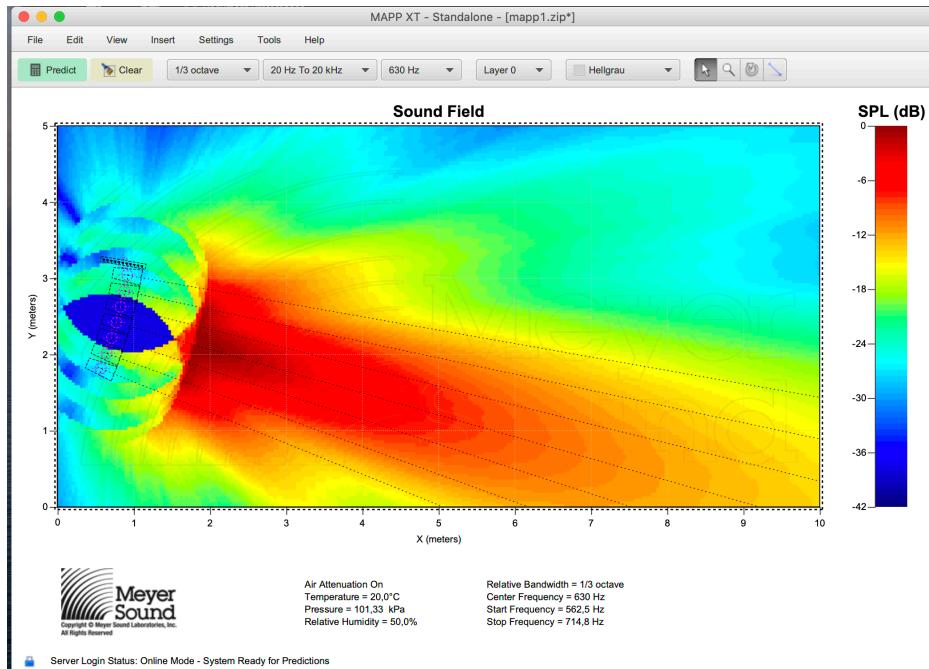
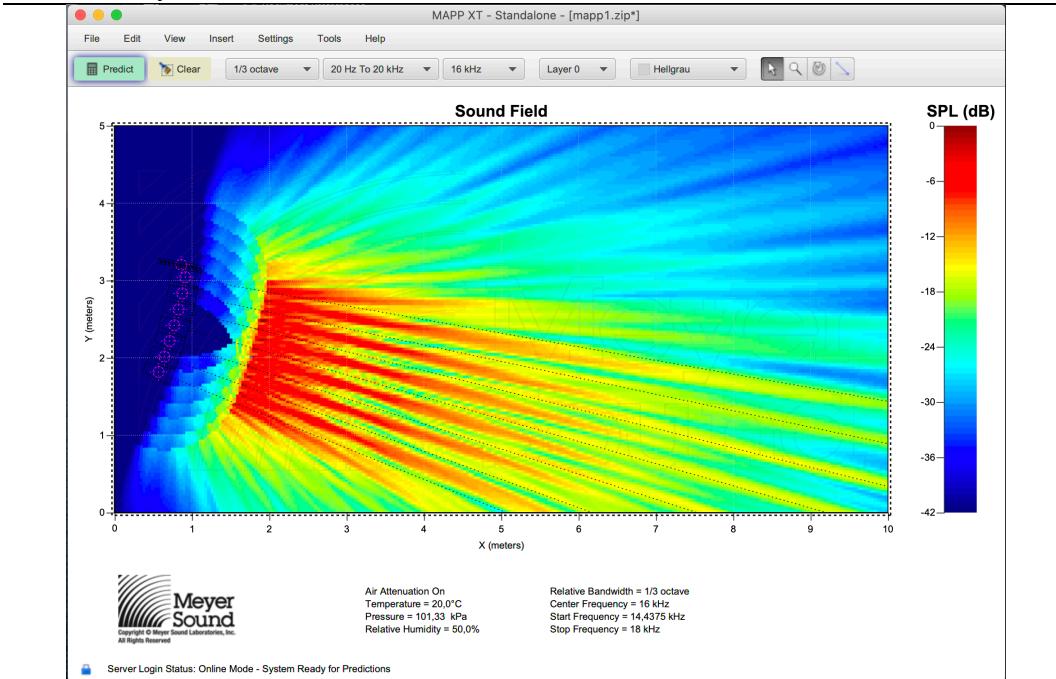


Abbildung 19. Abstrahlverhalten mehrerer Line-Array Elemente bei 630 Herz.  
(Erstellt in der MAPP XT Software der Firma Meyersound)

## 4 Line Arrays



*Abbildung 20. Abstrahlverhalten mehrerer Line Array Elemente bei 16 Kilohertz.  
(Erstellt in der MAPP XT Software der Firma Meyersound)*

In Abbildung 19 und 20 wird das Abstrahlverhalten der gleichen Anordnung von Line Array Elementen für verschiedene Frequenzen gezeigt. In Abbildung 19 ist deutlich zu erkennen, dass die einzelnen Elemente eine Kopplung und somit eine Schalldruckerhöhung erzeugen. In Abbildung 20 hingegen ist die Separierung der einzelnen Elemente im Hochtontbereich ersichtlich.

Bei Line Arrays ergibt sich ein Problem einer zu starken Richtwirkung im Lowmidbereich, welches aufgrund der Länge der Linien auftritt. Um in diesem Bereich die Abstrahlung zu verbreitern werden Manipulationen des Phasengangs der einzelnen Elemente zueinander vorgenommen. Dieser, mitten im Frequenzgang manipulierte Phasengang, beeinträchtigt die Linearität des Systems. Es muss also ein Kompromiss zwischen einer gleichmäßigen Distribution und einer möglichst hohen Linearität gefunden werden. (Michael Pohl, 2019, Anhang C, S. 116)

## 4.4 aktuelle Line-Array Systeme

Die nachfolgende Beschreibung des JBL VRX900 Systems wird gegenüber den anderen technischer ausfallen, da dieses später im Experiment zu dieser Arbeit verwendet wird.

### 4.4.1 d&b SL-Serie

Die SL Serie der Firma d&b Audiotechnik ist ein Line Array System, das für den Einsatz auf großen Veranstaltungen konzipiert wurde. Die einzelnen Elemente

#### **4 Line Arrays**

---

eines Moduls werden mit 2 separaten Verstärkerkanälen betrieben. (d&b audiotechnik GmbH & Co. KG, 2019b)

d&b beschreibt die daraus resultierenden Vorteile wie folgt:

Dieser Aufbau erlaubt eine sehr sanfte Trennung der einzelnen Komponenten mit genau definierten Überlappungen benachbarter Frequenzbänder, sodass ein sehr akkurates und gleichmäßiges horizontales Abstrahlverhalten erzeugt wird. Durch die Anordnung der vorderen und seitlichen Tieftontreiber wird das präzise kontrollierte Abstrahlverhalten von 45 Hz bis über 18 kHz eingehalten.

(d&b audiotechnik GmbH & Co. KG, 2019b)

#### **4.4.2 d&b A-Serie**

Die Firma d&b beschreibt ihre neue A-Serie wie folgt: "Ein System, so flexibel wie ein Point-Source-Cluster und so kontrollierbar wie ein Line-Array. Mit hoch entwickelten Eigenschaften, die die Realität wahrnehmbarer Lösungen in faszinierende Anwendungen umsetzt." (d&b audiotechnik GmbH & Co. KG, 2019a)

Die Serie wird als Augmented Array bezeichnet. Es lassen sich bis zu 4 Elemente mittels Fluggeschriften entweder vertikal oder horizontal gemeinsam verwenden, wodurch sich mit einer kleinen Anzahl an Lautsprechern bereits eine sehr breite Abstrahlung ergibt. (d&b audiotechnik GmbH & Co. KG, 2019a)

#### **4.4.3 Meyer Sound Lyon**

Das Meyer Sound Lyon Line Array System ist ein aktives Lautsprechersystem, das sich laut Herstellerangaben durch eine hohe Flexibilität auszeichnet. Durch seine starke Skalierbarkeit und die Verfügbarkeit verschiedener Elementversionen kann es für eine Vielzahl verschiedener Einsatzzwecke konfiguriert werden. (Meyer Sound Laboratories Incorporated, 2019b)

#### **4.4.4 JBL VRX900**

Die VRX900 Serie von JBL ist ein Line Array System mit konstanter Krümmung und wurde für den Einsatz in kleinen bis mittelgroßen Veranstaltungsorten konzipiert. Es wird als aktives und als passives System angeboten, wobei bei beiden Varianten eine Kooperation mit der Firma Crown eingegangen wurde. So sind die Verstärker, welche in der aktiven Variante verbaut sind, von der Firma Crown hergestellt. Im Gegenzug empfiehlt JBL für das Betreiben der passiven Variante die I-Tech Serie der Firma Crown. Jedes Line-Array Element besitzt an der Rückseite mehrere Schalter, welche die Wiedergabelautstärke im Hochtonbereich und das sogenannte „Amplitude Shading“ beeinflussen. Diese Methode lässt es zu, die oberen Elemente einer Line Array Anordnung als Array zu konfigurieren – dies erhöht den Schalldruck wodurch sich beispielsweise ein entfernter Balkon erreichen lässt – während die unteren Elemente „zurück schattiert“ werden um in den vordersten Reihen eines Veranstaltungsortes nicht

## 4 Line Arrays

---

zu laut zu sein. So kann für jede Sektion im Publikum der Klang optimiert werden, um eine gleichmäßige Abstrahlung im ganzen Raum zu erzeugen. (Harman, 2018c)

### 4.4.4.1 JBL VRX932LA-1

Das JBL VRX932LA-1 Modul ist aufgebaut aus einem 12 Zoll Tieftöner und 3 Einzoll Hochtönnern. Die Empfindlichkeit wird von JBL nicht in dB/w/m sondern mittels eines Maximalschalldrucks (Peak) angegeben. Dieser ist 130 dB. Das Modul besitzt eine RMS Leistung von 800 Watt bei einem Abstrahlwinkel von  $100^\circ \times 15^\circ$ . In der Horizontalen ist es also relativ breit und in der Vertikalen relativ schmal, wie es von einem Line-Array Element zu erwarten ist. Der Übertragungsbereich wird von 75-20000 Herz mit einer Schwankung von bis zu -10 dB angegeben. (Harman, 2018b)

### 4.4.4.2 JBL VRX918s

Das JBL VRX918s Modul ist bestückt mit einem 18 Zoll Tieftontreiber. Es ist konzipiert für einen Übertragungsbereich von 34-220 Herz bei einer Schwankung von bis zu -10 dB. Die RMS Leistung des Subwoofers beträgt 800 Watt. Der angegebene maximale Schalldruck (Peak) liegt bei 130 dB. (Harman, 2018a)

## 5 Kompromisse in der Entwicklung von Lautsprechersystemen

Neben den bereits vorab erwähnten Kompromissen, die bezüglich Krümmung der Wellenfront und bezüglich der Linearität in Konkurrenz zu gleichmäßiger Distribution getroffen werden müssen, ergeben sich in den Interviews, die zu dieser Arbeit geführt wurden noch einige weitere.

Andreas Plodek stellt im Interview zu dieser Arbeit fest, dass Kompromisse dann eingegangen werden müssen, wenn man mit dem zu entwerfenden System kommerziellen Erfolg haben will. (Andreas Plodek, 2019, Anhang B, S. 109)

Häufig ergeben sich Kompromisse aus den persönlichen Ansprüchen der Kunden sowie den baulichen und technischen Voraussetzungen der Veranstaltungsorte. Gewicht und Größe der Elemente spielen hier eine große Rolle, da die meisten Stadien und Veranstaltungsorte nur eine begrenzte Menge Gewicht tragen können und neben Lautsprechersystemen noch eine Vielzahl anderen, schweren Equipments bei solchen Veranstaltungen geflogen werden muss. (Michael Pohl, 2019, Anhang C, S. 116)

Reinhard Nell, Entwickler und Gründer der Firma Lambda Labs bezieht sich, Kompromisse betreffend, nur auf akustische.

Natürlich spielen in der Praxis sämtliche Einflüsse wie Wirtschaftlichkeit, Gewicht, Handling, Rigging, Größe und Oberflächenbeschaffenheit samt Optik eine wichtige Rolle. Einer der wichtigsten Aspekte ist die Abstrahleigenschaft eines Lautsprechers. Diese soll den Publikumsbereich im Idealfall gerade überdecken aber auch nicht mehr. Einerseits um den Directivity Index hoch zu halten und damit die Empfindlichkeit des Lautsprechersystem zu maximieren, andererseits um die umliegende Raumakustik/Nachbarschaft nicht kontraproduktiv mit Energie zu versorgen. Eine hohe Richtwirkung erreicht man üblicherweise mit einer großen abstrahlenden Fläche im Vergleich zur abgestrahlten Wellenlänge. Andere Konzepte wie z.B. eine Kardioide Charakteristik sind neben technischem Aufwand mit anderen Kompromissen behaftet. Hier finden sich etwa Nachteile in der Klangtreue oder in der begrenzten Bandbreite.

(Reinhard Nell, 2019, Anhang D, S. 126)

Ebenfalls kompromissbehaftet ist die Veränderung der Abstrahlcharakteristik durch komplexe DSP-Steuerung. Komplexe DSP-Steuerungen unterliegen Einschränkungen und können unerwünschte Artefakte wie Nebelkeulen, filterbedingte Latenzen und Bandbegrenzung erzeugen. So kommt es bei Mehrwegsystemen oft zu einem Kompromiss, welcher zu leichten Defiziten im Frequenzgang führt, um die Abstrahlcharakteristik des Systems über den

## 5 Kompromisse in der Entwicklung von Lautsprechersystemen

gesamten Frequenzbereich konstant zu halten.(Reinhard Nell, 2019, Anhang D, S. 126)

Weitere Kompromisse werden notwendig, wenn man versucht ein Lautsprecher-system zu erzeugen, welches für möglichst viele Anwendungen genutzt werden kann. Dieser Ansatz ist zwar wirtschaftlich sinnvoll, allerdings leidet darunter die Qualität im Vergleich zu einem auf einen gewissen Anwendungsbereich spezialisierten Lautsprechersystem. (Michael Pohl, 2019, Anhang C, S. 116)

## 6 Messen von Lautsprechern

Das Messverfahren für die technischen Parameter der Lautsprechermessung, welches für die Umsetzung dieser Arbeit ausgewählt wurde, beruht auf einem Paper, welches auf der 103 Audio Engineering Society Konferenz in New York im Jahr 1997 von John Atkinson vorgestellt wurde. (Atkinson, 1997, S. 1)

### 6.1 Messen im Allgemeinen

Beim Begutachten veröffentlichter Messungen von Lautsprechersystemen müssen zwei wichtige Punkte stets im Auge behalten werden. Nur wenn die Gesamtheit aller möglichen Messungen zu einem Lautsprechersystem gemeinsam betrachtet wird und ein in der Zusammenschau kohärentes Bild ergibt, lassen sich aus den Messungen verlässliche Aussagen über dieses Lautsprechersystem ableiten. Dabei kann man nie sicher davon ausgehen, dass ein erhaltenes Messergebnis auch stimmt. Ebenso wenig kann man mit Sicherheit davon ausgehen, dass man überhaupt das misst, was man messen will. Es ist zum Beispiel durchaus möglich, dass das Testsetup einen schön aussehenden Graphen erzeugt, obwohl der zu messende Lautsprecher keinen Sound ausgibt. Deshalb braucht man für ein aussagekräftiges Testergebnis immer Daten aus einer zweiten Quelle. (Atkinson, 1997, S. 2–3)

### 6.2 Grundsätzlicher Aufbau des Messsetups

Die einzelnen Messungen werden mit Programmen der ARTA-Messsoftwarefamilie durchgeführt, welche als Shareware verfügbar ist. (Mateljan, 2019c)

Das grundsätzliche Setup für die meisten der Messungen lässt sich aus folgender Abbildung ableiten, wobei die exakte Position beziehungsweise der Abstand zwischen Mikrofon und Lautsprecher je nach Messung variieren kann.

## 6 Messen von Lautsprechern

---

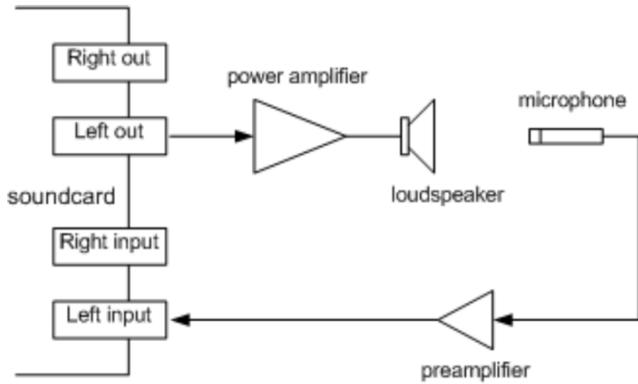


Abbildung 21. Grundsätzlicher Aufbau des Messsetups (Mateljan, 2019a, S. 10)

Aus dieser Abbildung lässt sich auch der Großteil des Equipments, welches für die Messungen notwendig ist, ablesen.

- Audiointerface oder Soundkarte mit extra Mikrofonvorverstärker
- Verstärker
- Zu messender Lautsprecher
- Messmikrofon mit Stativ
- Computer mit installierter Messsoftware

### 6.2.1 Kalibrierung des Messsetups

Die Kalibrierung ist ein Prozess, welcher die Zuordnung digitaler Werte zu externen analogen Spannungswerten definiert. (Mateljan, 2019a, S. 20)

Nur unter Verzicht auf absolute Werte kann die Messkette unkalibriert bleiben, jedoch müssen dann die Einzelkomponenten aufeinander abgestimmt sein. (Weber & Mateljan, 2013, S. 29)

#### 6.2.1.1 Kalibrierung eines Outputs der Soundkarte

Für die Kalibrierung eines Outputs der Soundkarte in der ARTA-Messsoftware wird ein Voltmeter benötigt. ARTA generiert einen Sinus mit festgelegter Frequenz und Amplitude. Der zu kalibrierende Ausgang der Soundkarte wird mittels Voltmeter gemessen und der so gemessene Wert in ARTA eingetragen. (Mateljan, 2019a, S. 21)

#### 6.2.1.2 Kalibrierung der Eingänge der Soundkarte

Für die Kalibrierung der Eingänge kann nun der bereits kalibrierte Ausgang als Signalgenerator verwendet werden. Dafür wird die Soundkarte kurzgeschlossen, also Ein- und Ausgang direkt miteinander verbunden. Wieder wird ein Sinus mit festgelegter Frequenz und Amplitude in ARTA erzeugt und ARTA errechnet die entsprechenden Kalibrierungswerte. (Mateljan, 2019a, S. 21)

## 6 Messen von Lautsprechern

---

### 6.2.1.3 Kalibrierung des Messmikrofons

Gibt es kein Kalibrationsfile ist für die Kalibrierung des Messmikrofons ein Pegelkalibrator notwendig. (Weber & Mateljan, 2013, S. 33)

Die meisten professionellen Messmikrofone werden mit einem Kalibrationsfile ausgeliefert oder dies lässt sich für das entsprechende Mikrofon vom Hersteller beantragen.

Im Rahmen dieser Arbeit wird das MM1 Messmikrofon der Firma Beyerdynamic verwendet. Beyerdynamic stellt ein Kalibrierungsfile für jedes ihrer Messmikrofone zur Verfügung, wenn diese registriert werden.

### 6.2.1.4 Frequenzkompensation

Die Qualität der Messungen hängt von der Qualität der genutzten Sensoren ab. Mittels Frequenzkompensation kann die ARTA-Messsoftware erhaltene Ergebnisse bereinigen, indem die invertierte Frequenzantwort eines Sensors zu der gemessenen Frequenzantwort hinzugefügt wird. (Mateljan, 2019a, S. 22)

Folgende Abbildung zeigt den schematischen Aufbau für die Messung der Frequenzantwort eines einzelnen Gerätes.

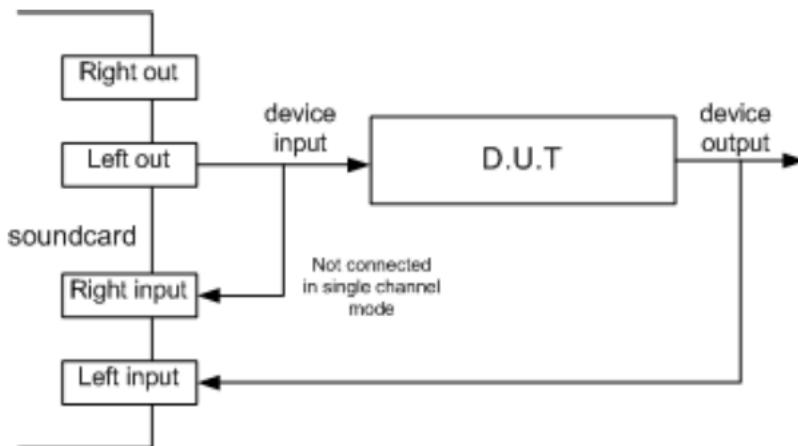


Abbildung 22. Messaufbau für die Messung der Frequenzantwort eines zu testenden Sensors (D.U.T. = device under test) (Mateljan, 2019a, S. 9)

## 6.3 Messparameter

Um Lautsprechermessungen durchzuführen, welche objektiv, praktisch und aussagekräftig sind, bedarf es einer Reihe subjektiver Entscheidungen darüber, welche Parameter gemessen werden sollen und welche gemessenen Parameter miteinander verglichen werden sollen. (Atkinson, 1997, S. 2)

Diese Arbeit orientiert sich bei der Auswahl an der von John Atkinson aufgestellten Liste der Messparameter:

## 6 Messen von Lautsprechern

---

- Spannungsempfindlichkeit auf der gewählten Achse
- Elektrische Impedanz
- Impulsantwort und Sprungantwort
- Amplituden und Phasenfrequenzgang auf der gewählten Achse im Fernfeld
- Amplitudenfrequenzgang im Nahfeld (bei niedrigen Frequenzen)
- Polares Verhalten – Abstrahlung in vertikalen und horizontalen Ebenen
- Amplitudenfrequenzgang im Raum
- Nicht lineare Verzerrungen verschiedener Arten
- Wasserfalldiagramm

(Atkinson, 1997, S. 2)

### 6.3.1 Spannungsempfindlichkeit auf einer gewählten Achse (Voltage Sensitivity)

Die Spannungsempfindlichkeit von Lautsprechern wird allgemein definiert als Schalldruckpegel in Dezibel eines Lautsprechers nach einer Entfernung von einem Meter bei einer gegebenen Eingangsspannung von 2.83V. Dies entspricht der Spannung, die notwendig ist, um 1 Watt Verlustleistung in einem 8 Ohm Widerstand zu erzeugen. Die Spannungsempfindlichkeit eines Lautsprechers ist nicht zu verwechseln mit seiner Effizienz. Die Effizienz eines Lautsprechers ist klar definiert. Sie wird im Normalfall als Schalldruckpegel in Dezibel bei einer spezifischen Entfernung angeben und als dB/w/m bezeichnet. Annäherungsweise lassen sich diese zwei Parameter dennoch vergleichen. Der Vorteil in der Angabe der Spannungsempfindlichkeit gegenüber der Effizienz liegt darin, dass die Spannungsempfindlichkeit sich bei sich verändernder Lautsprecherimpedanz nicht ändert, solange die Eingangsspannung bei 2.83V bleibt. Ein Problem hierbei ist, dass die meisten Lautsprecher keine flach verlaufenden Frequenzgänge haben und die Hersteller dazu neigen, die Spannungsempfindlichkeit anhand einer Spitze im Frequenzverlauf anzugeben. Wenn für die Messung breitbandiges Rauschen verwendet wird, beeinflusst die Bandbreite des Lautsprechers die gemessene Spannungsempfindlichkeit. Zwei Lautsprecher können bei der Wiedergabe von Musik gleich laut wirken. Gemessen mit Rauschen wird der Lautsprecher mit besserer Wiedergabe an den Frequenzextremen eine höhere gemessene Spannungsempfindlichkeit anzeigen, weswegen es notwendig ist, eine Messung zu vorzunehmen, die mit der empfundenen Lautstärke korreliert. Hierfür wird - gemäß der Analyse der kritischen Bänder des Hörens - die Lautheit in Phon berechnet. Alternativ kann für die Korrelation der Messung mit der empfundenen Lautstärke auch ein breitbandiges Rauschen (20kHz) als Anregungssignal für die Messung verwendet werden. Anschließend wird der gemessene Schallpegel B-gewichtet. Die so erhaltenen Messergebnisse weisen eine nachvollziehbare Korrelation mit der empfundenen Lautstärke auf.

## 6 Messen von Lautsprechern

---

(Atkinson, 1997, S. 3–4)

In der ARTA Messsoftware gibt es eine Funktion, die es ermöglicht eine Schalldruck- und Lautheitsmessung durchzuführen, bei der das Ergebnis in Phon ersichtlich ist. (Mateljan, 2019a, S. 172)

Die Messung der Spannungsempfindlichkeit bedient sich des bereits beschriebenen grundsätzlichen Messaufbaus mit der Abänderung, dass bei der Durchführung mittels Voltmeter festgestellt wird, dass der Verstärker genau 2.83V Spannung an den Lautsprecher liefert.

### 6.3.2 Elektrische Impedanz

Wenn der den Lautsprecher antreibende Verstärker wie eine Spannungsquelle wirkt, gibt die Lautsprecherimpedanz an, wieviel Strom vom Verstärker gezogen wird. Dies ist allerdings frequenzabhängig. (Atkinson, 1997, S. 4)

Im Rahmen dieser Arbeit wird die Messung der elektrischen Impedanz der Lautsprecher mittels der Software LIMP, welche zur Familie der ARTA-Messsoftware gehört, durchgeführt. (Mateljan, 2019c)

LIMP stellt zwei Methoden für die Messung der Impedanz von Lautsprechern zur Verfügung. Einerseits eine Methode mit einem gestuften Sinus als Anregungssignal, andererseits eine mit rosa Rauschen als Anregungssignal. (Mateljan, 2019b, S. 4)

Laut Atkinson lassen sich in den Ergebnissen der beiden Varianten im Vergleich nur geringfügige Unterschiede feststellen. (Atkinson, 1997, S. 4)

In LIMP stellt die Methode des gestuften Sinus als Anregungssignal jene dar, welche sich weniger durch Störgeräusche beeinflussen lässt und sich dadurch besser für die Messung im Rahmen dieser Arbeit eignet. (Mateljan, 2019b, S. 6–7)

Die Messung der elektrischen Impedanz von Lautsprechern gibt vor allem Aufschluss darüber, wie schwer es für einen bestimmten Verstärker sein wird, den gemessenen Lautsprecher anzutreiben. Außerdem lassen sich durch diese Messung noch Aussagen darüber treffen, wie viele Wege ein Lautsprecher hat und wie der Lautsprecher aufgebaut (Reflex, Horn, geschlossene Box, ...) ist. Die ungefähre Tieffrequenzleistung des Lautsprechers lässt sich anhand der Form der Kurven im Bassbereich ableiten. (Atkinson, 1997, S. 5)

Für die Messung der elektrischen Impedanz wird ein spezieller Messaufbau benötigt wie er in folgender Abbildung im Benutzerhandbuch der Messsoftware LIMP zu finden ist:

## 6 Messen von Lautsprechern

---

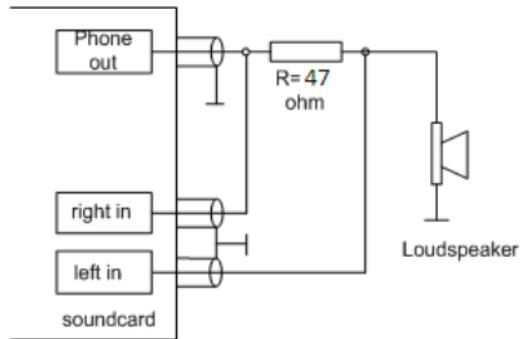


Abbildung 23. Messaufbau für die Messung der Impedanz eines Lautsprechers am Kopfhörerausgang einer Soundkarte (Mateljan, 2019b, S. 9)

Das Ergebnis solch einer Messung ist ein Graph, aus dem sich die frequenzabhängige Magnitude in Ohm sowie der Phasenwinkel ablesen lässt, wie in folgender Abbildung zu sehen ist.

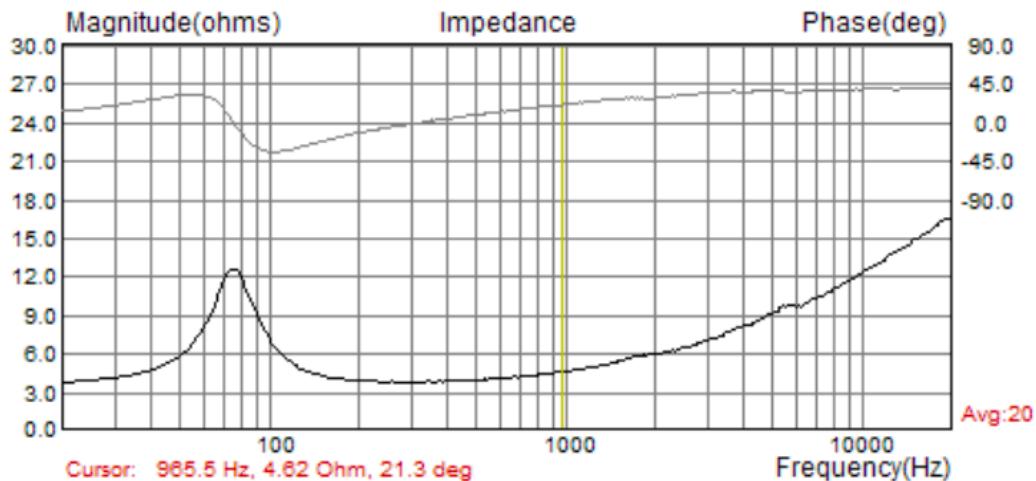


Abbildung 24. Impedanz Messung eines Lautsprechers (Mateljan, 2019b, S. 25)

Es ist hier klar ersichtlich, dass der gemessene Lautsprecher bei einer Frequenz von 965.5 Hertz eine Impedanz von 4.62 Ohm bei einem Phasenwinkel von 21.3 Grad aufweist.

### 6.3.3 Impulsantwort

Raffaseder beschreibt die Impulsantwort wie folgt:

Wird ein Impuls, also ein Signal von sehr kurzer Dauer und endlicher Energie, als Eingangssignal eines Systems verwendet, so erhält man am Ausgang definitionsgemäß die Impulsantwort  $h(t)$ . Es kann gezeigt werden, dass bei linearen Systemen das Spektrum dieser Impulsantwort dem Frequenzgang des Systems entspricht. Demnach ist die Impulsantwort ein geeignetes Mittel zur Beschreibung von Systemen im Zeitbereich.

(Raffaseder, 2010, S. 71)

## 6 Messen von Lautsprechern

Allerdings ergeben sich beim Testen von Lautsprechern wenn man Impulse benutzt einige Probleme, weswegen hier auf andere Methoden zurückgegriffen wird. Atkinson erwähnt diese Probleme, ohne sie genauer zu spezifizieren. (Atkinson, 1997, S. 6).

Die ARTA-Messsoftware bietet verschiedene Methoden zur Messung der Impulsantwort, welche sich hauptsächlich durch das verwendete Anregungssignal unterscheiden. Die Methode, welche als am robustesten präsentiert und deswegen auch als Allzwecksystem bezeichnet wird, ist hierbei die Messung mit periodischen Rosa Rauschen als Anregungssignal. (Mateljan, 2019a, S. 75, 82)

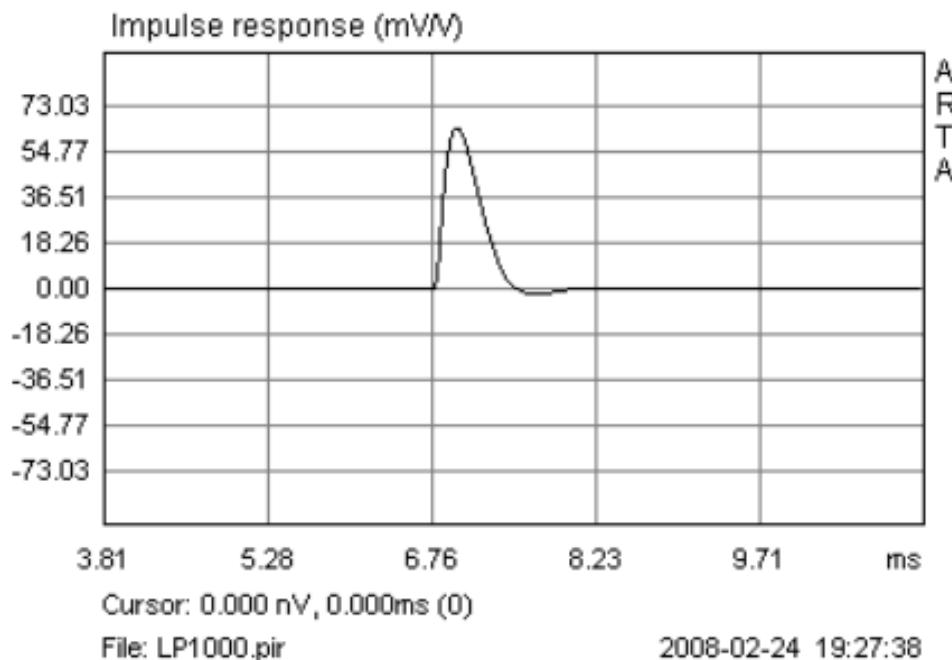


Abbildung 25. Impulsantwort eines 12 dB Tiefpasses mit Eckfrequenz von 1000 Hertz (Weber & Mateljan, 2013, S. 66)

Mithilfe der Impulsantwort können mittels der Messsoftware ARTA noch weitere Analysen durchgeführt werden, wie zum Beispiel die Erstellung einer Sprungantwort oder eines Wasserfalldiagramms zur weiteren Beschreibung des Lautsprechers, welche im weiteren Verlauf der Arbeit ebenfalls betrachtet werden. (Mateljan, 2019a, S. 87)

### 6.3.4 Sprungantwort

Wenn man einen Lautsprecher nicht mit einem einzigen rechteckigen Impuls, sondern mit Spannung antreibt, die sprunghaft von null auf einen positiven Wert steigt und bleibt, erhält man die Sprungantwort eines Lautsprechers. Dies weist in der Praxis einige Probleme auf. Auch diese Probleme werden von Atkinson erwähnt, aber nicht näher erläutert. (Atkinson, 1997, S. 6)

In der ARTA-Messsoftware wird die Sprungantwort als ein Zeitintegral der Impulsantwort erhalten. Aus ihr lassen sich weitere Informationen über das

## 6 Messen von Lautsprechern

Niederfrequenzverhalten des Lautsprechers sowie die zeitliche Anordnung der Lautsprecher in Mehrweglautsprechern ablesen. (Mateljan, 2019a, S. 101) Es lässt sich also auch eine Aussage darüber treffen, wie zeitlich kohärent Lautsprecher sind. Die meisten Hersteller behaupten, dass ihre Systeme zeitlich kohärent sind, bei Betrachtung der Sprungantworten stellt sich allerdings heraus, dass die meisten Lautsprecher dieser Herausforderung nicht gerecht werden. (Atkinson, 1997, S. 6–7)

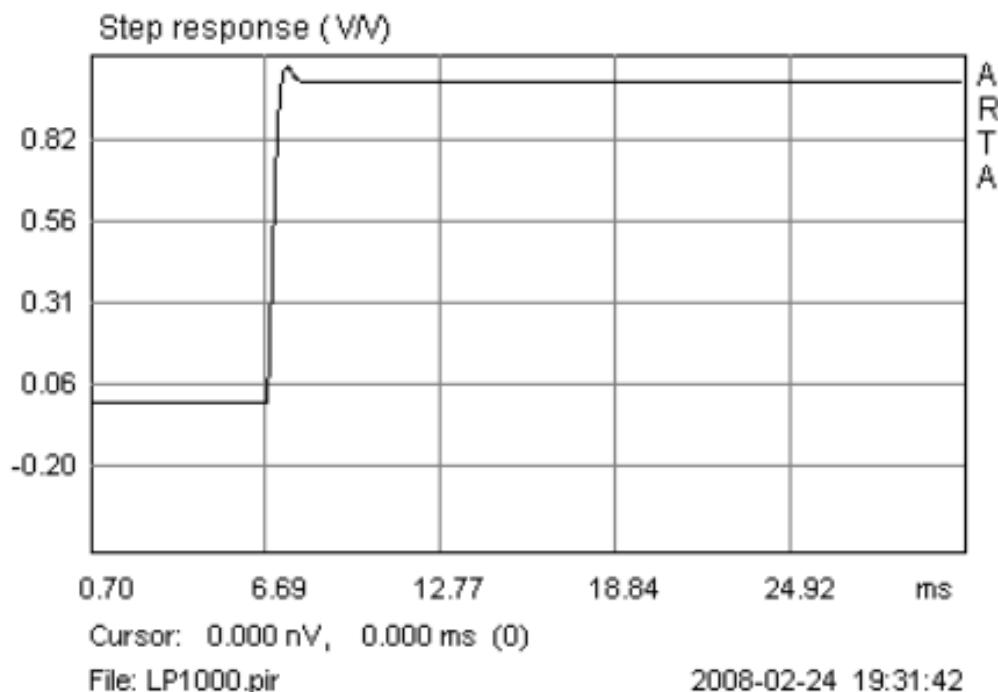


Abbildung 26. Sprungantwort berechnet aus der Impulsantwort in Abbildung 4  
(Weber & Mateljan, 2013, S. 66)

### 6.3.5 Phasenfrequenzgang

Der Phasenfrequenzgang stellt den Phasenwinkel zwischen Druck- und Geschwindigkeitsanteilen gegen die Frequenz gezeichnet dar. Praktische Tests haben nur wenige Hinweise darauf geliefert, dass Unterschiede in diesem Parameter von Hörern wahrgenommen werden können. Deshalb wird kontroversiell diskutiert, ob dieser Aspekt des Lautsprecherverhaltens für die Qualität eines Lautsprechers relevant ist. (Atkinson, 1997, S. 7)

Atkinson schreibt, dass Greenfield und Hawksford 1990 in einem Versuch die hörbaren Effekte des Phasenfehlers eines Lautsprechers von dessen Amplitudenfrequenzgangfehlern zu trennen versuchten. Die Autoren kamen vorläufig zum Schluss, dass der übermäßige Phasenfehler eines Lautsprechers die Wahrnehmung des Hörers in Bezug auf das Panorama der Soundstage beeinflussen kann. (Atkinson, 1997, S. 8)

Als übermäßiger Phasenfehler, auch Excess-Phase genannt, wird die Differenz der Charakteristiken der Minimalphase und der Phase bezeichnet. Die Minimalphase

## 6 Messen von Lautsprechern

kann mathematisch mittels der Hilbert Transformation aus der Magnitude der Frequenzantwort berechnet werden. In der ARTA - Messsoftware wird für die Berechnung der Hilbert Transformation die Diskrete Fourier Transformation verwendet. (Mateljan, 2019a, S. 93)

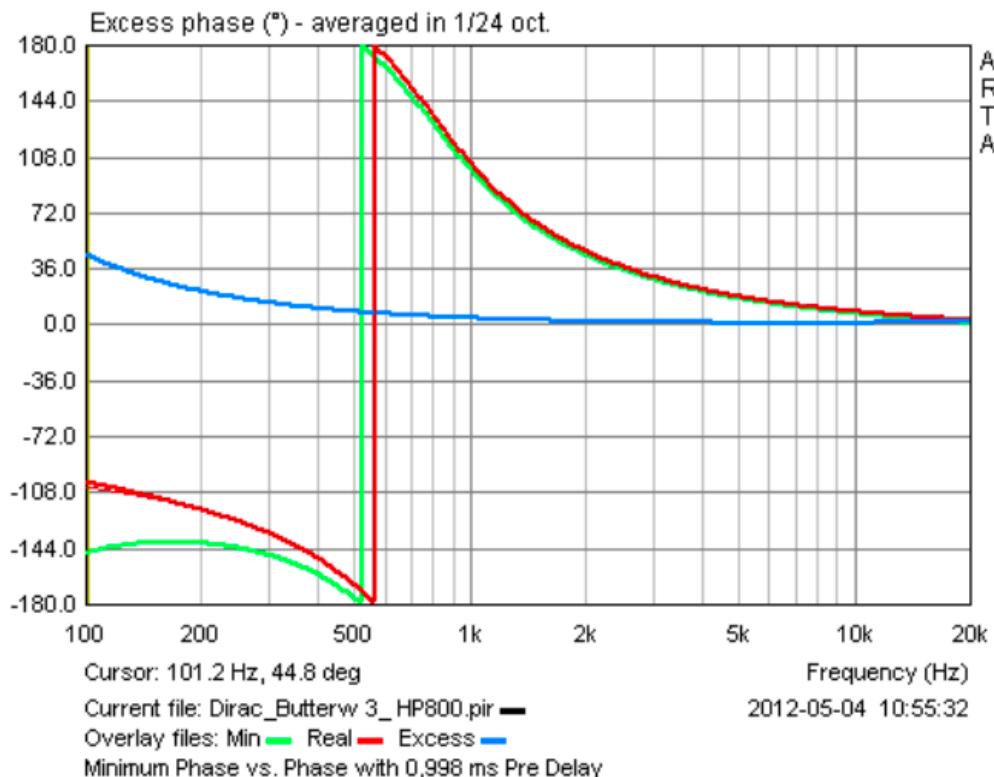


Abbildung 27. Beziehung von Excess Phase (blau), Minimalphase (grün) und realer Phase (rot) (Weber & Mateljan, 2013, S. 71)

### 6.3.6 Amplitudenfrequenzgang auf der Achse

Die einzige Methode der Amplitudenfrequenzgang eines Lautsprechers mit kompletter Sicherheit zu bestimmen ist per Anregung mittels einer langsam geschwungenen Sinuswelle in einer großen und sehr teuren echofreien Kammer. Wenn solch eine Kammer nicht zur Verfügung steht, kann mittels einer Technik, die Windowing (Fenstern) genannt wird, die Impulsantwort eines Raumes von Raumeinstreuungen bereinigt werden um anschließend mittels einer schnellen Fourier Transformation die Daten in die Frequenzdomäne zu bringen. (Atkinson, 1997, S. 8)

Die Daten der Zeitdomäne mittels Windowing zu beschneiden reduziert die Auflösung des Frequenzgraphen und schränkt die Gültigkeit der Daten im Tiefbassbereich ein. Ein 5 Millisekunden langes Fenster erzeugt erst valide Daten von 200 Hertz aufwärts. Daraus folgt: Je länger das zeitliche Fenster, also je länger die Zeit, bis die ersten Reflexionen das zum Messen verwendete Mikrofon erreichen, desto genauer und akkurater wird die Messung. (Atkinson, 1997, S. 9)

## 6 Messen von Lautsprechern

Der Einfluss eines flachen Amplitudenfrequenzgangs auf die Qualität der Wiedergabe des Lautsprechers ist ein umstrittenes Thema. Atkinson hat in seinen Untersuchungen allerdings eine klare Korrelation zwischen flachen Amplitudenfrequenzgängen, welche mittels Windowing Technik in nicht echofreien Räumen durchgeführt wurden und der Tendenz des Lautsprechers einen positiven Testbericht im Magazin Stereophile zu erhalten, festgestellt. (Atkinson, 1997, S. 10)

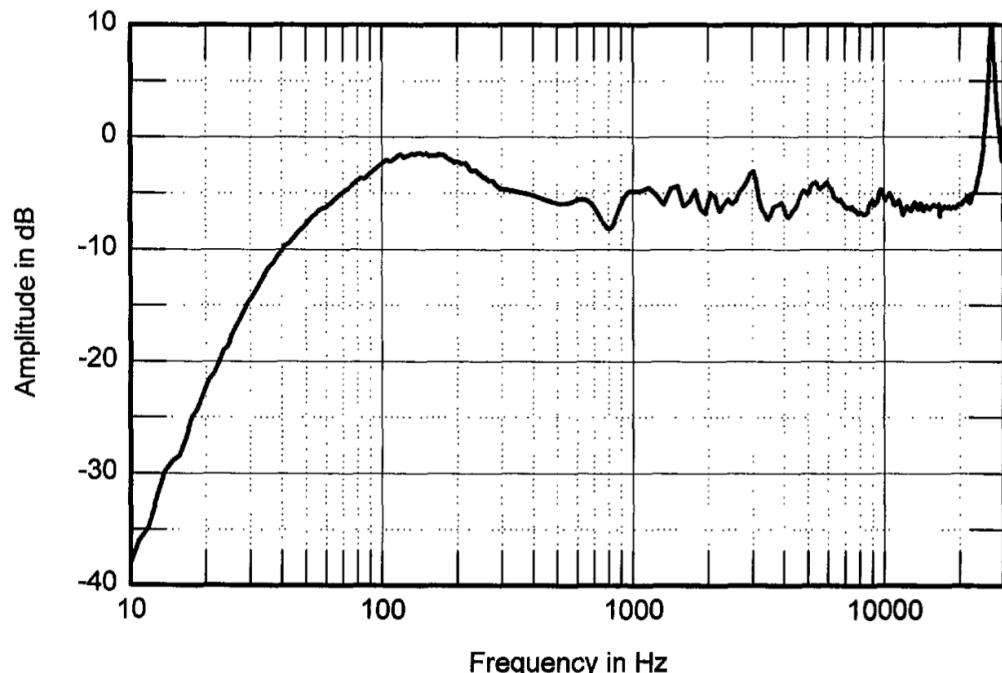


Abbildung 28. Amplitudenfrequenzgang eines Lautsprechers (Atkinson, 1997, S. 35)

### 6.3.7 Amplitudenfrequenzgang im Nahfeld

Wird der Amplitudenfrequenzgang mit der Technik des Windowing bestimmt, dann sind die entsprechenden Ergebnisse für die Charakterisierung von Lautsprechern im Tieftonbereich unbrauchbar. (Atkinson, 1997, S. 12)

Die Definition des Nahfeld lautet wie folgt: Der Messabstand muss kleiner als die abgestrahlte Wellenlänge sein. Im Gegenschluss zur gefensterten Messung im Fernfeld, welche ihre Genauigkeit im Tieftonbereich verliert, verliert die Nahfeldmessung ihre Genauigkeit ab einer Frequenz von circa 300 Hertz aufwärts. Dies ist abhängig von der Größe der Schallquelle. (Weber & Mateljan, 2013, S. 82–84)

Für veröffentlichte Graphen werden die Amplitudenfrequenzgänge im Nahfeld von Lautsprechern im Bereich von 300 Hertz mit den jeweiligen Amplitudenfrequenzgängen im Fernfeld übereinandergelegt. (Atkinson, 1997, S. 12)

## 6 Messen von Lautsprechern

Die genaue Definition von Nah- und Fern-, Frei- und Hallfeld sind der folgenden Abbildung zu entnehmen.

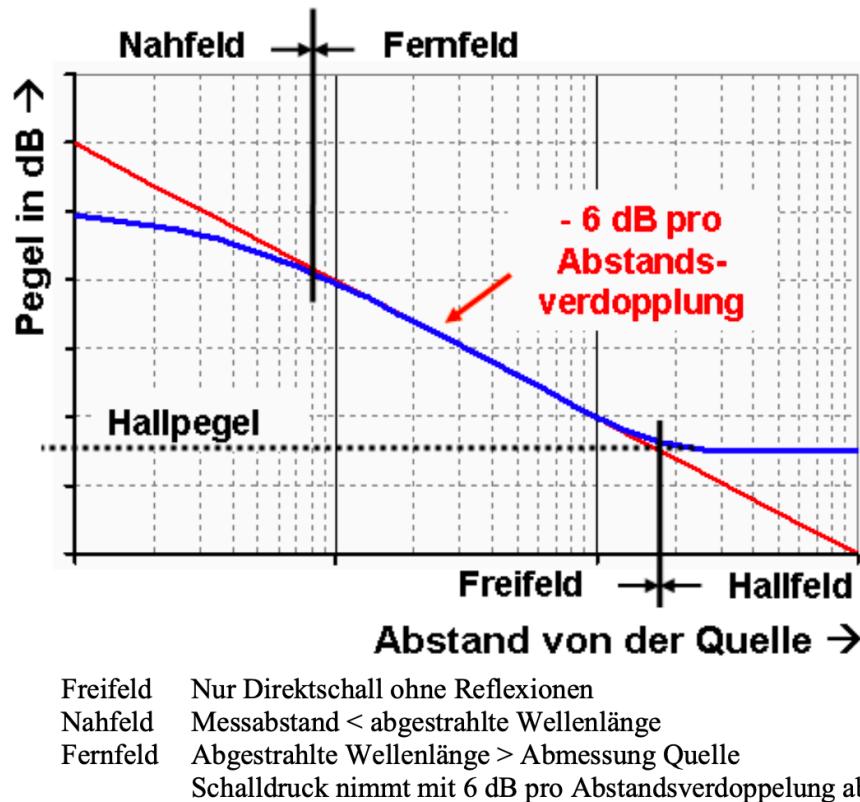


Abbildung 29. Definition der Schallfelder (Weber & Mateljan, 2013, S. 82)

Das Verhältnis zwischen der Größe der Schallquelle und der oberen Frequenzgrenze für die Gültigkeit von Amplitudenfrequenzgängen im Nahfeld wird in folgender Abbildung veranschaulicht.

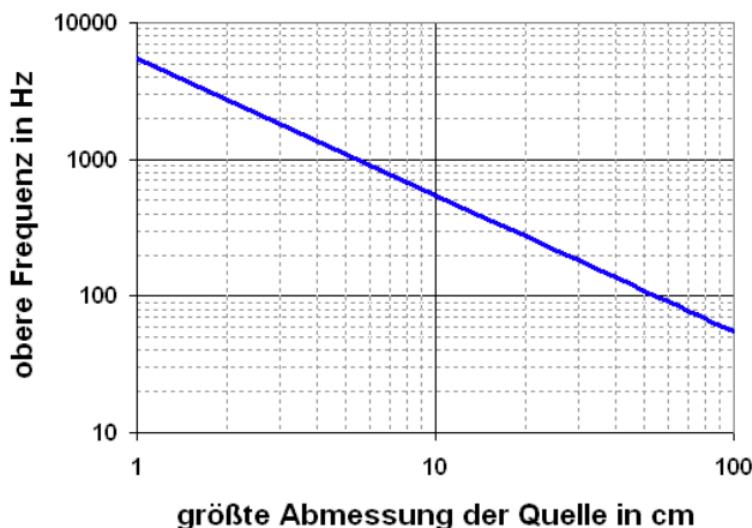


Abbildung 30. Definition der Schallfelder (Weber & Mateljan, 2013, S. 84)

## 6 Messen von Lautsprechern

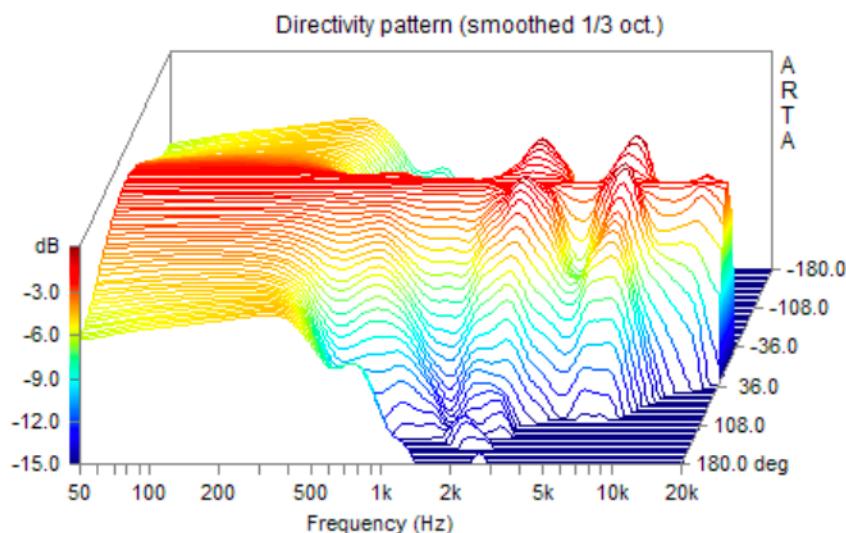
Bei der Durchführung einer Nahfeldmessung muss aufgrund des geringen Messabstandes darauf geachtet werden, dass das Messmikrofon nicht übersteuert wird. Außerdem wird im Prozess der Zusammenfügung der Amplitudenfrequenzgänge im Nah- und Fernfeld zu einem im Nahfeld korrigierten Amplitudenfrequengang der Pegel des Amplitudenfrequenzgangs im Nahfeld durch einen Wert, der mittels der Formel  $Korrektur = 20 * \log\left(\frac{a}{2d}\right)$  errechnet wird, korrigiert. Wobei  $a$  für den Membranradius und  $d$  für den Messabstand der Fernfeldmessung steht. (Weber & Mateljan, 2013, S. 84,113)

### 6.3.8 Polares Verhalten – Abstrahlung in vertikalen und horizontalen Ebenen

Alle bisherigen Messungen haben den Lautsprecher an einem Punkt betrachtet, aber es darf nicht vergessen werden, dass Lautsprecher Schallwellen anhand einer Richtcharakteristik in Sphären abstrahlen. Für die Messung dieses Parameters wird der Lautsprecher auf einem Positionierer platziert. Dieser Positionierer lässt sich sehr genau und exakt automatisch drehen. Dabei kann sich folgendes Problem ergeben: das akustische Zentrum, auf dessen Achse die Drehung für die Messung durchgeführt werden muss, stimmt oft nicht mit dem Massezentrum des Lautsprechers überein. Dadurch ist es oft schwierig, den Lautsprecher in der richtigen Position auf dem Positionierer zu fixieren. (Atkinson, 1997, S. 13)

In der ARTA-Messsoftware können verschiedene Graphen erstellt werden, die diese Richtcharakteristik darstellen, indem eine Serie von Frequenzantworten gemessen aus konstanter Entfernung aber mit sich änderndem Winkel zur Messachse durchgeführt werden und diese gemeinsam verarbeitet werden. Hierfür wird ein sich automatisch drehender Positionierer benötigt, welcher über ARTA gesteuert wird und der die Winkelveränderungen vornimmt. (Mateljan, 2019a, S. 146)

Ein Beispiel dafür ist die Erstellung eines Wasserfalldiagramms, wie es in folgender Abbildung zu sehen ist.



## 6 Messen von Lautsprechern

---

*Abbildung 31. Wasserfall-Richtwirkungsdiagramm (Mateljan, 2019a, S. 147)*

Die Messung dieses Parameters erfordert einen entsprechenden Positionierer. Im Rahmen dieser Arbeit wurde auf die Messung dieses Parameters verzichtet, weil das Line Array der Firma JBL im Stadttheater Bruck an der Leitha fix verbaut ist und die Demontage und Wiederinstallation nicht möglich war.

### 6.3.9 Amplitudenfrequenzgang im Raum

Alle bisher gemessenen Parameter betrachten den Lautsprecher in Isolation. In der Praxis werden Lautsprecher hauptsächlich in herkömmlichen Räumen und nicht in echofreien Kammern verwendet. Die Interaktion zwischen Lautsprecher und Raum ist von vielen unterschiedlichen Faktoren wie Raumgröße, Form, verwendete Materialien usw. abhängig. Der Sound, der von HörerInnen wahrgenommen wird, besteht aus einer Mischung zwischen dem direkt abstrahlenden Sound des Lautsprechers und der Reflexionen des Raumes. Hierfür werden an mehreren Positionen im Raum Impulsantworten gemessen und dann gemittelt. (Atkinson, 1997, S. 14)

### 6.3.10 Nicht lineare Verzerrungen verschiedener Arten

Die Definition für nicht lineare Verzerrungen findet sich am Ende von Punkt 3.

#### 6.3.10.1 Lautsprecher bedingt

Jeder Lautsprecher hat nichtlineare harmonische Verzerrungen. Atkinson schreibt, dass er beim Testen von Lautsprechern für das Magazin Stereophile in den letzten 8 Jahren nur wenige Modelle getestet hat, in denen merkbare harmonische Verzerrungen das Ergebnis der Tests negativ beeinflusst hätten. (Atkinson, 1997, S. 14–15) Deshalb wird diese Messung im Rahmen dieser Arbeit nicht durchgeführt werden.

#### 6.3.10.2 Gehäuse bedingt

Es ist schwer, den Einfluss des Vibrationsverhaltens des Lautsprechergehäuses auf die wahrgenommene Soundqualität festzustellen. Ein Panel könnte als sehr lebhaft bezeichnet werden, also stark vibrieren. Wenn dieses Panel aber vom Hörer abgewandt ist, könnte der Effekt minimal sein. Atkinson befand es für nicht sinnvoll, quantitative Daten über das Vibrationsverhalten von Lautsprechergehäusen aufzustellen. Trotzdem bietet er eine Methode an, wie diese Daten erhoben werden können. Dazu werden piezoelektrische Sensoren in Film Format benutzt, welche an verschiedenen Stellen im Lautsprechergehäuse angebracht werden. Anschließend wird der Lautsprecher mit einem Testsignal mit der Bandbreite von 2 Kilohertz angeregt und Impulsantworten werden aus den Daten der Sensoren berechnet, welche anschließend zu einem Wasserfalldiagramm zusammengeführt werden. (Atkinson, 1997, S. 16)

Wie oben erwähnt hält es Atkinson nicht für sinnvoll, Daten über diesen Parameter zu sammeln. Deshalb wurde auf die Messung des Vibrationsverhaltens des Lautsprechergehäuses im Experiment zu dieser Arbeit verzichtet.

### 6.3.11 Wasserfalldiagramm

Resonanzprobleme im akustischen Output eines Lautsprechers können mittels sogenannter „Cumulative-Spectral-Decay-plots“ (CSD), auch Wasserfalldiagramm genannt, dargestellt werden. (Atkinson, 1997, S. 15)

Sie werden hergestellt, indem nacheinander wiederholt Fourier Transformationen und entsprechende rechteckige Fenster auf sich überlappende Signalblöcke einer Impulsantwort angewandt werden. (Mateljan, 2019a, S. 103)

Es muss bedacht werden: Je kürzer die betrachtete Zeit ist, desto höher liegt die Frequenz, ab der akkurate Daten erzeugt werden können. Die Genauigkeit des Ergebnisses hängt also im Tieffrequenzbereich davon ab, wie groß das reflexionsfreie Zeitfenster der zu bearbeitenden Impulsantwort ist. (Atkinson, 1997, S. 15)

Folgende Abbildung zeigt ein Wasserfalldiagramm eines kleinen 2-Wege Lautsprechers. Bei 27 Kilohertz lässt sich klar die Resonanz, welche durch den Tweeter des Lautsprechers erzeugt wird, erkennen und eine zweite Resonanz, die nicht so stark ausgeprägt ist, ist bei 3 Kilohertz sichtbar. (Atkinson, 1997, S. 15)

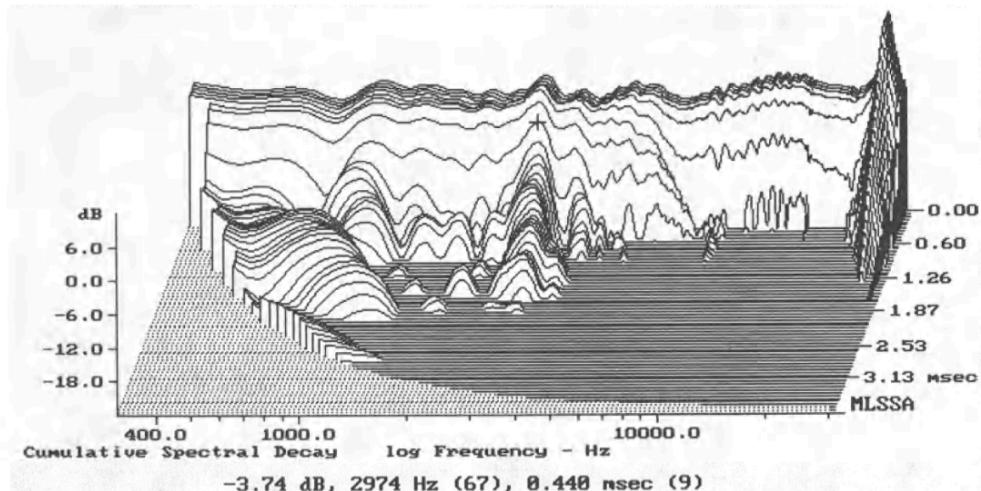


Abbildung 32. Wasserfalldiagramm eines kleinen 2-Wege Lautsprechers  
(Atkinson, 1997, S. 45)

## 7 Subjektive Feststellung der Qualität eines Lautsprechers durch HörerInnen

Die subjektiv wahrgenommene Performance eines Lautsprechers durch HörerInnen ist ein mehrdimensionales Phänomen. Wie bereits erwähnt, erfordert selbst das objektive Messen von Lautsprechern einige subjektive Entscheidungen. (Atkinson, 1997, S. 2) Die Notwendigkeit solcher subjektiver Entscheidungen trifft umso mehr auf die Erstellung eines Testdesigns für die subjektiv wahrgenommene Performance eines Lautsprechers durch HörerInnen zu.

Atkinson analysiert das Vokabular, welches von Audiophilen für die Beschreibung von Lautsprechern in Magazinen benutzt wird und kommt zum Schluss, dass es folgende Bereiche abdeckt:

- Musikalische und technische Genauigkeit
- Frequenzbereich
- Frequenz Balance
- Koloration (Färbung)
- Klarheit und Transparenz
- Körnigkeit, Härte und Verzerrung
- Präzision des Stereoimages
- Tiefe und Weite der Soundstage
- Makro und Mikrodynamik
- Pace'n'rythm (Tempo und Rhythmus)

(Atkinson, 1997, S. 1–2)

Für das Experiment im Rahmen dieser Arbeit wurde ein Fragebogen entwickelt. Basis dafür sind die von Atkinson aus dem Vokabular von Audiophilen entwickelten Bereiche (siehe voriger Absatz). Um den Fragebogen auch für nicht audiophile ProbandInnen verständlich zu machen, wurden zwei Vereinfachungen vorgenommen. Die Parameter Frequenzbereich und Frequenzbalance werden im Fragebogen unter dem gemeinsamen Namen Frequenzgang geführt. Ebenso verhält es sich mit den Parametern Präzision des Stereoimages und Tiefe und Weite der Soundstage. Diese werden im Fragebogen gemeinsam unter dem Namen Stereobild geführt.

## 7 Subjektive Feststellung der Qualität eines Lautsprechers durch HörerInnen

Zusätzlich zu den von Atkinson beschriebenen Parametern wurden folgende Parameter definiert und abgefragt.

- Allgemeine Präferenz bezüglich der getesteten Lautsprechersysteme
- Hörgewohnheiten der ProbandInnen
  - Häufigkeit des Musikkonsums
  - Audiophilie der ProbandInnen

Diese Parameter wurden einerseits zur Feststellung der Relevanz der Versuchsgruppe und andererseits zur Festigung des Ergebnisses definiert und in den Fragebogen aufgenommen.

Der Fragebogen wurde mittels Ratio Skalen erstellt und ausgewertet. (Hollenberg, 2016, S. 20) Für die Beschreibung der Bereiche, die Atkinson anführt, wurde das Vokabular verwendet, das Case et al in dem Buch „Designing with Sound“ vorgelegt haben. (Case, Day, & O'Reilly for Higher Education (Firm), 2018)

Der Fragebogen zum Vergleich von Lautsprechersystemen ist im Anhang (Anhang E, S. 128) beigelegt.

# 8 Experiment

Im Rahmen dieser Arbeit wird ein praktisches Experiment durchgeführt. Dabei werden zwei Lautsprechersysteme miteinander verglichen, die stellvertretend für unterschiedliche technische Zugänge stehen: Ein Line-Array System und ein konventionelles Lautsprechersystem.

In der Location, die für den Test ausgewählt wurde - im Stadttheater Bruck an der Leitha - ist ein Fixed-Curved-Line-Array System der Firma JBL als Fix-installation verbaut. Dieses wird mit einem horngeladenen Lautsprechersystem der Firma Lambda Labs verglichen.

Der Vergleich der beiden Systeme erfolgt in zwei Bereichen.

- 1) Messungen an Hand der vorab beschriebenen technischen Paramter,
- 2) ein subjektiver Hörtest, der durch einen Fragebogen unterstützt wird.

Bei der Vorbereitung und Durchführung des Experiments werden auch die Unterschiede in der Handhabung der beiden Lautsprechersysteme dokumentiert und bewertet.

## 8.1 Location

Das Stadttheater Bruck an der Leitha wurde 1904 als Theater erbaut. 1925 wurde es auf Grund des veränderten kulturellen Interesses der Brucker Bevölkerung als Kino adaptiert. 1935 wurde es zum Museum umgestaltet und verblieb in dieser Funktion bis 1948. Ab diesem Jahr wurde es als „Arbeiterheim-Kino“ geführt. Nach einer grundlegenden Renovierung wurde es 1988 wieder seinem ursprünglichen Zweck als Theater und Konzertlocation zugeführt und mit dem Stück „Anatevka“ wiedereröffnet. (Weiß, 2013, S. 161)

Laut einer Anfrage, welche beim Bürgerservice der Stadt Bruck an der Leitha vorgelegt wurde, ist das Stadttheater baubehördlich für 390 Stehplätze beziehungsweise 200 Sitzplätze zugelassen. Der Aufführungsraum misst ohne Bühne in etwa 13x13 Meter.

Die im Stadttheater fix installierte PA Anlage ist ein Line-Array System der Firma JBL, welches aus 6 Elementen des Typs VRX 932LA-1 besteht. Jeweils 3 der Elemente hängen gemeinsam an einer dafür vorgesehenen Konstruktion an den Außenkanten der Vorbühne. Die Vorbühne ist einen Meter hoch und die Unterkante der Line-Array Elemente befindet sich auf einer Höhe von 2,4 Metern über der Vorbühne. Seitlich zu den Wänden, die den Publikumssaal begrenzen ist ein Freiraum von 1,1 Metern neben den Elementen und den angrenzenden Seitenwänden. Der Abstand zwischen dem untersten Line-Array Element und der Vorbühnenrückwand beträgt 50cm. Die Vorbühne ist 11,9 Meter breit. Zwischen

## **8 Experiment**

---

den Line Array Elementen der linken und rechten Seite besteht ein Abstand von 9.7 Metern.

In der Basswiedergabe wird das Line Array System von 4 Alps Audio Epos unterstützt von denen jeweils 2 Stück auf der linken und rechten Vorderbühnenkante bei Bedarf zusätzlich angeschlossen werden können.

## **8.2 Vorbereitungen**

Der Veranstaltungssaal des Stadttheaters ist mit transportablen Sesseln ausgestattet. Diese Bestuhlung wird bei Veranstaltungen an die Bedürfnisse des jeweiligen Veranstalters angepasst. Für Rockkonzerte wird sie meist komplett entfernt. Für das vorliegende Experiment wurde ein nahezu leerer Saal bevorzugt, um die Veränderung der Saalakustik durch die Bestuhlung möglichst gering zu halten. Deshalb wurden nur so viele Stühle im Saal belassen, wie für die Bequemlichkeit der ProbandInnen während des Hörtests nötig waren.

### **8.2.1 Vorbereitung des Lautsprechersystem des Stadttheaters**

Das Stadttheater Bruck an der Leitha ist mit einem JBL VRX 900 System ausgestattet. Bei der ersten Besichtigung des installierten Systems wurde jedoch festgestellt, dass dieses nicht den Empfehlungen der Firma JBL entspricht, da im Stadttheater nicht die von JBL empfohlenen digitalen Verstärker verwendet werden. Außerdem werden im Stadttheater nicht die Subbasselemente aus der VRX 900 Serie, sondern solche einer Drittfirmare bereitgestellt.

Um einen fairen und konsistenten Vergleich zu gewährleisten, wurde deshalb das System des Stadttheaters durch Verwendung der empfohlenen Verstärker (2 Stück Crown I-Tech 5000) und des zugehörigen Subbasssystems (4 Stück JBL VRX 918s) aufgewertet. Das dafür notwendige Equipment wurde von der Firma P.A. Rental zur Verfügung gestellt und betreut.

Das für das Experiment verwendete System besteht pro Bühnenseite aus 3 Stück JBL VRX 932-LA-1, welche jeweils an den äußersten Enden der Vorbühne über dieser hängen. Diese Line-Array Elemente werden durch 4 Subbasselemente des Typs VRX918s ergänzt, die vor der Vorbühne am Boden des Publikumssaals platziert sind, wie in folgender Abbildung ersichtlich ist.

## 8 Experiment



*Abbildung 33. Positionierung des JBL VRX Systems, inklusive der dazu empfohlenen Subbässe im Stadttheater Bruck an der Leitha.*

Das Processing dieses Systems erfolgt über die von JBL für die Crown I-Tech Endstufen erstellten Presets. Aus den Gegebenheiten des Stadttheaters ergibt sich die Nutzung des Short-Throw Presets, welches für kleinere Veranstaltungsräume konzipiert wurde. Die Trennfrequenz zwischen Subbass und Line-Array Elementen wird in diesem Preset bei 100 Herz festgelegt.

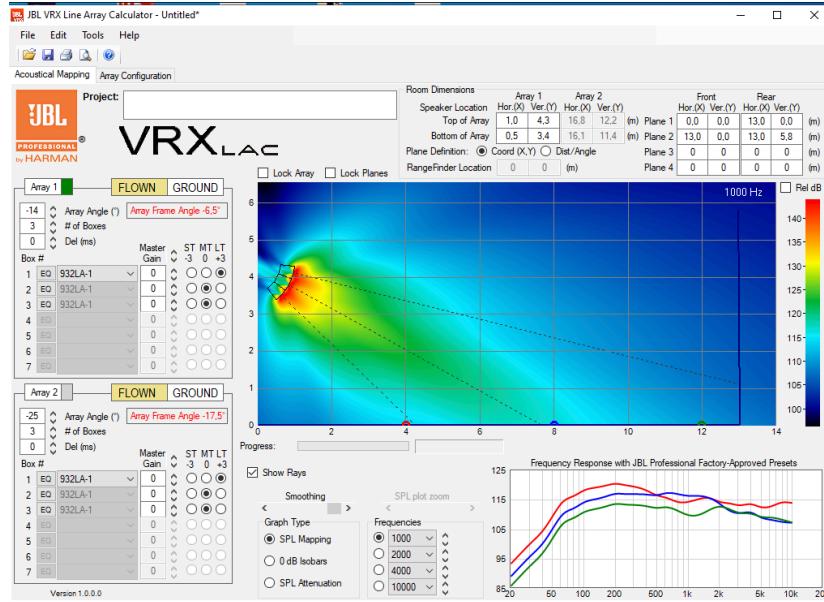
### 8.2.2 Simulation des VRX Systems im Stadttheater

Das im Stadttheater Bruck an der Leitha vorhandene JBL VRX System, welches wie vorab beschrieben, so aufgewertet wurde, dass es den Empfehlungen der Firma JBL entspricht, wurde mit Hilfe des dafür vorgesehenen Simulationsprogrammes nachgestellt, um einen Vergleichswert für die praktisch durchgeführten Messungen zu erzeugen. Hierbei ergaben sich einige Schwierigkeiten, die im Folgenden besprochen werden.

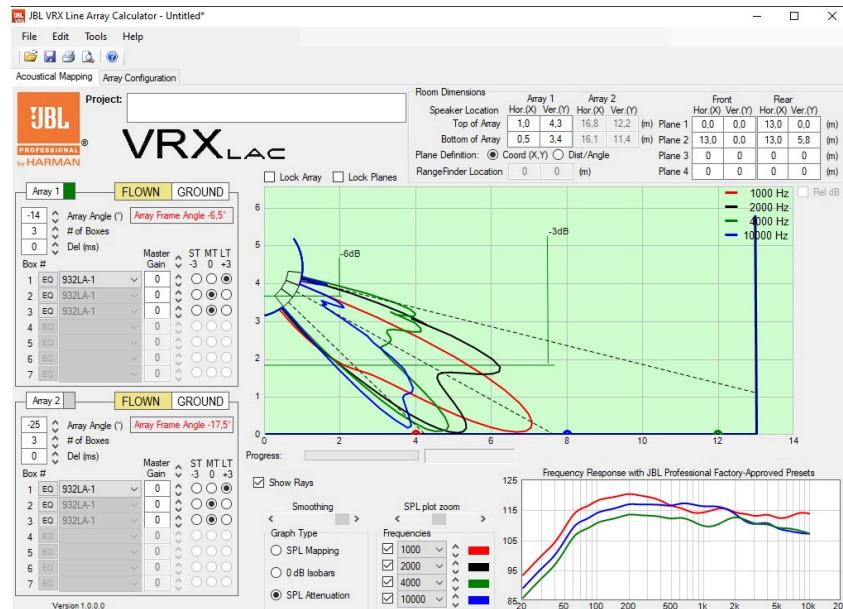
Das größte Problem bei der Nachstellung der Gegebenheiten im Stadttheater Bruck an der Leitha lag darin, dass im JBL Array Calculator nur definiert werden kann, über welchen Bereich sich die Zuschauerfläche ausdeht und wo im Raum sich diese befindet. Hierfür können 4 verschiedene Zuschauerflächen definiert werden, um beispielsweise Tribünen oder Balkone nachzustellen. Dabei wird allerdings komplett ignoriert, ob und in welchem Ausmaß diese Flächen Schall reflektieren können. Darüber hinaus bietet der JBL Array Calculator keine Möglichkeit, die übrigen akustischen Gegebenheiten eines Raumes zu definieren.

## 8 Experiment

Somit können Begrenzungen eines Raumes wie Boden, Decke und Wände, welche den Schall in diesem Raum wesentlich beeinflussen, in der Simulation nicht berücksichtigt werden. Deshalb lassen sich mit Hilfe dieses Simulationsprogramms keine genauen Aussagen darüber treffen, wie sich der Schall in einem konkreten Raum verhalten wird.



*Abbildung 34. Simulation des Stadttheaters im JBL VRX Line Array Calculator. 3 verschiedene Frequenzgänge an verschiedenen Positionen im Raum bei einer Frequenz von 1000 Herz werden angezeigt. Im Hauptfenster wird die Abstrahlcharakteristik dargestellt.*



*Abbildung 35. Simulation des Stadttheaters im JBL VRX Line Array Calculator. 3 verschiedene Frequenzgänge an verschiedenen Positionen im Raum bei einer Frequenz von 1000 Herz werden angezeigt. Im Hauptfenster wird der Pegelabfall über die Entfernung dargestellt.*

## 8 Experiment

---

Der Versuch wurde dennoch unternommen und es wird sich herausstellen, ob die tatsächlich gemessenen Frequenzgänge mit den simulierten übereinstimmen oder Ähnlichkeiten aufweisen, obwohl - wie bereits erwähnt - die Eigenschaften des Raumes nicht in die Simulation miteinfließen können.

### 8.2.3 Aufbau und Einmessung des Vergleichssystems

Das Vergleichssystem besteht aus 2 Stück Lambda Labs TX-3A, welche jeweils vom Sweetspot des Raumes aus gesehen auf der gleichen Achse zum Zuhörer wie die JBL 932LA-1 Elemente positioniert sind. Dazu gehörig sind 4 Subbasselemente des Typs DH18, welche im D-Mode betrieben werden. Die Positionierung beider Systeme ist in folgender Abbildung ersichtlich.



*Abbildung 36. Positionierung Lambda Labs Systems (Mitte) und des VRX Systems (außen) im Stadttheater Bruck an der Leitha.*

Das Lambda Labs System arbeitet nicht mit Presets. Das Processing für dieses System wird individuell für jede Veranstaltung und deren Bedürfnisse neu konfiguriert. Dies wird auf einer Frequenzweiche der Firma Xilica durchgeführt. Das bringt den Vorteil, dass man das System sehr gut an gegebene Bedürfnisse anpassen kann. Allerdings ist der Zeitaufwand im Vergleich zum Processing des VRX Systems sehr hoch. (Zum konkreten Zeitaufwand siehe 8.2.1 und 8.2.2)

Die Konfiguration des Lambda Labs Systems wurde von der Firma Leihwand durchgeführt, welche dieses System auch zur Verfügung gestellt hat. Hierfür wurde das Messprogramm Smaart verwendet, in welchem die Phasengänge der DH18 mit denen der TX-3A im Übergangsbereich angeglichen wurden. Außerdem wurde mittels Equalizing der Frequenzgang des Systems so verändert, dass er sich bei den Gegebenheiten dieses Raumes möglichst linear verhält. Die

## 8 Experiment

---

Trennfrequenz zwischen Subbasselementen und Topteilen liegt bei diesem System bei 80 Herz.

### 8.3 Unterschiede in der Handhabung

Wie bereits vorab erwähnt, wurde während der Vorbereitung und Durchführung des Experiments ein besonderes Augenmerk auf die Unterschiede in der Handhabung der beiden Systeme gelegt, um die Unterschiede in der Handhabung zwischen einem Line-Array System und einem konventionellen, horngeladenem System aufzuzeigen.

Aus den Interviews, die zu dieser Arbeit geführt wurden, ergibt sich, dass Line-Array Systeme einen hohen Planungs- und Simulationsaufwand im Vorfeld erfordern, um diese sinnvoll einsetzen zu können. (Andreas Plodek, 2019, Anhang B; Michael Pohl, 2019, Anhang C, S. 116)

#### 8.3.1 Handhabung JBL VRX System

Das JBL System, das im Stadttheater Bruck an der Leitha installiert ist, wurde im Vorfeld zu diesem Experiment im entsprechenden Simulationsprogramm simuliert. (Siehe Punkt 8.1.2) Der Zeitaufwand dafür betrug in etwa 2 Stunden.

Nach Ankunft am Veranstaltungsort müssen im Normalfall die Line-Array Elemente zunächst geflogen und in Position gebracht werden. Dieser Arbeitsschritt entfällt im Fall des vorliegenden Experiments, da das Line-Array System im Stadttheater Bruck an der Leitha fix montiert ist. Danach werden die Subbasselemente positioniert und alles wird an die davor notwendigen Verstärker angeschlossen. Dies ist aufgrund der gut beschrifteten Kabel und Rackblenden an den Verstärkern selbsterklärend. Zum Abschluss werden in den beiden Verstärkern die für kleine Räume vorgesehenen Presets geladen. Damit ist das Lautsprechersystem einsatzbereit. Insgesamt benötigte die Vorbereitung dieses Lautsprechersystems in etwa eine Stunde Arbeit einer Person, wobei wie bereits erwähnt die Line-Array Elemente bereits vorhanden und aufgebaut waren.

#### 8.3.2 Handhabung Lambda Labs System

Beim Lambda Labs System ist vorab keine Simulation notwendig. Nach Ankunft am Veranstaltungsort werden zunächst die Subbasselemente positioniert. Im Anschluss werden die TX-3A auf Stativen auf ihre Position gebracht. Das Verstärkerrack, welches auch die bereits vorab erwähnte Frequenzweiche sowie einen Router zum Aufbau eines WLAN Netzes enthält, wird positioniert und die Elemente entsprechend verkabelt. Auch bei diesem System ist dies aufgrund der guten Beschriftung der Elemente selbsterklärend. Das WLAN Netz wird benutzt um die Frequenzweiche vom FOH (Front of House) aus fernzusteuern. Am FOH befindet sich ein Laptop für die Fernsteuerung der Frequenzweiche, an welchem ein Audiointerface inklusive Messmikrofon angeschlossen ist. Anschließend wird das Lautsprechersystem eingemessen, was einige Zeit in Anspruch nehmen kann.

## 8 Experiment

Dafür wird das Messmikrofon an verschiedenen Punkten im Raum aufgestellt. Es werden mehrere Messergebnisse gemittelt. Anschließend wird der Frequenzgang des Lautsprechersystems mittels einer Equalizerfunktion der Frequenzweiche an den Raum angepasst und bereinigt. Insgesamt benötigte die Vorbereitung dieses Lautsprechersystems in etwa drei Stunden Arbeit von zwei Personen. Die Vorbereitung dieses Systems war also wesentlich aufwendiger als die des JBL Systems, wobei hier nochmals erwähnt werden soll, dass beim JBL System das Fliegen und Positionieren der Line-Array Elemente wegfiel.

### 8.4 Messungen

Für die Messungen wurden ein Macbook Pro, auf welchem via Bootcamp die Messsoftware ARTA ausgeführt wurde, ein RME Babyface Pro Interface und das Beyerdynamic MM-1 Messmikrofon verwendet.

Das RME Babyface Pro wurde zunächst mittels ARTA getestet, um festzustellen, ob dieses sich für die Messung von Lautsprechern eignet.

In ARTA wird hierfür der Spektrum-Analyzer-Mode verwendet. Die Eingänge werden mit den Ausgängen der Soundkarte verbunden. Dies stellt eine sogenannte Loopbackconnection dar. Mittels des Sinusgenerators in ARTA wird nun ein Sinus mit gegebener Frequenz (Standard: 1000 Hz) erstellt, durch das Interface gesendet und wieder aufgezeichnet. Als Ergebnis erhält man ein Spektrum aus welchem der RMS-Pegel in dBFS sowie verschiedenen Verzerrungen in % ausgelesen werden können. (Weber & Mateljan, 2013, S. 20–24)

Im ARTA Handbuch werden die Grenzen für verwendbare Soundkarten beschrieben: “Wenn THD+N kleiner als 0.1% ist, dann haben Sie eine verwendbare Soundkarte. Wenn THD+N kleiner als 0.01% ist, dann haben sie eine gute Soundkarte.“ (Weber & Mateljan, 2013, S. 24)

Der Test des RME Babyface ergab, dass dieses sich mit einem THD+N von nur 0.0018% sehr gut für das Messen mit ARTA eignet, wie in folgender Abbildung ersichtlich ist.

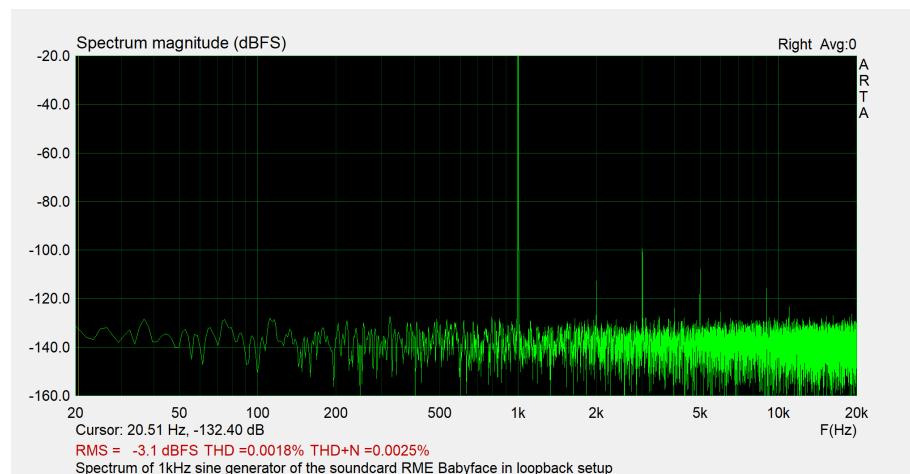
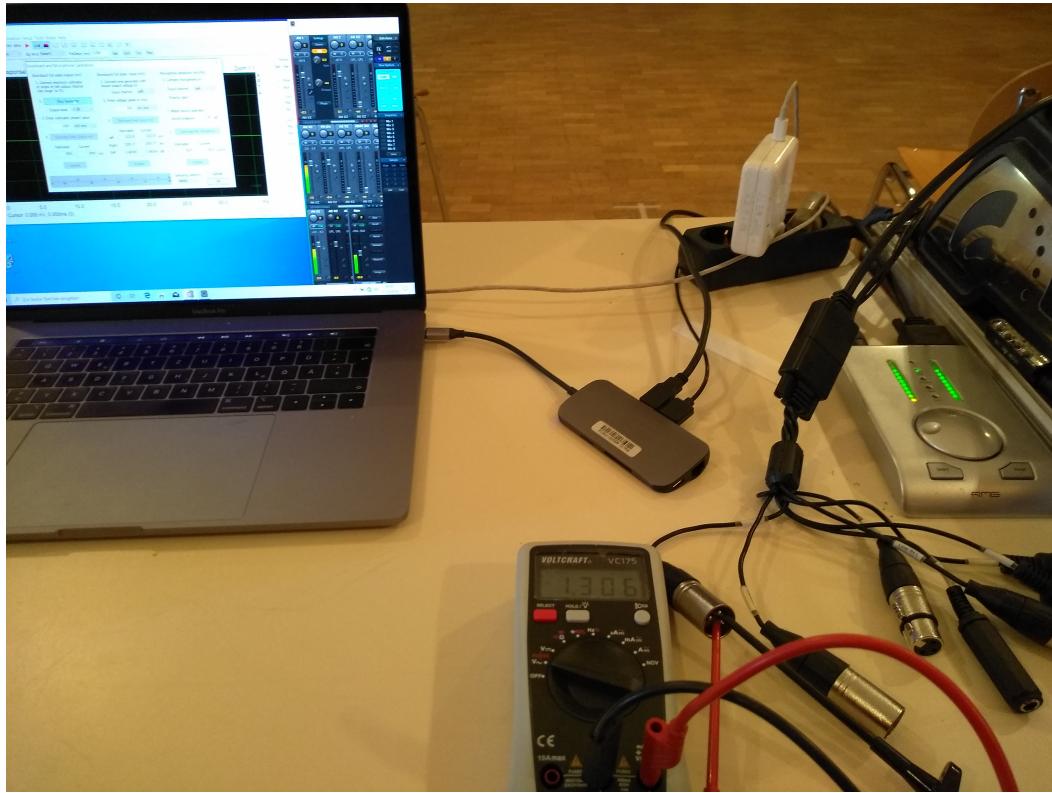


Abbildung 37. Messung des RME Babyface im Loopbacksetup.

## 8 Experiment

Anschließend wurde das Messsetup anhand des bereits vorab beschriebenen Prozesses kalibriert (Siehe Punkt 6.2.1). Die Kalibrierung der Ausgangskanäle des Audiointerfaces mittels eines Voltmeters ist in folgender Abbildung ersichtlich.



*Abbildung 38. Kalibrierung der Ausgangskanäle des RME Babyface. Die Ausgangsspannung beträgt exakt 1.306 V.*

Den Abschluss des Kalibrierungsprozesses bildet die Einbindung des Kalibrierungsfiles des MM1 Messmikrofons in die ARTA Messsoftware.

### 8.4.1 Voltage Sensitivity

Für die Messung der Spannungsempfindlichkeit bei gegebener Voltzahl wird nicht das System als Ganzes, sondern seine einzelnen Elemente gemessen.

Zunächst muss festgestellt werden, dass jedes zu messende Element mit einer Spannung von 2.83 V versorgt wird. Anschließend werden ein Subbasselement und ein Topteil des jeweiligen Systems gemessen.

#### 8.4.1.1 JBL VRX 900 System

Für die Feststellung der Voltage Sensitivity der VRX932-LA-1 wurde das mittlere Element der Anordnung solo angespielt und das Messmikrofon wie in folgender Abbildung ersichtlich ist, 1 Meter vor dem Lautsprecher auf Achse positioniert.

## 8 Experiment



Abbildung 39. Positionierung des Messmikrofons für die Messung der Voltage Sensitivity eines JBL VRX 932LA-1 Elements.

Das Messung ergab eine Voltage Sensitivity von 90.48 dB/2.83V/1m wie in folgender Abbildung ersichtlich ist.

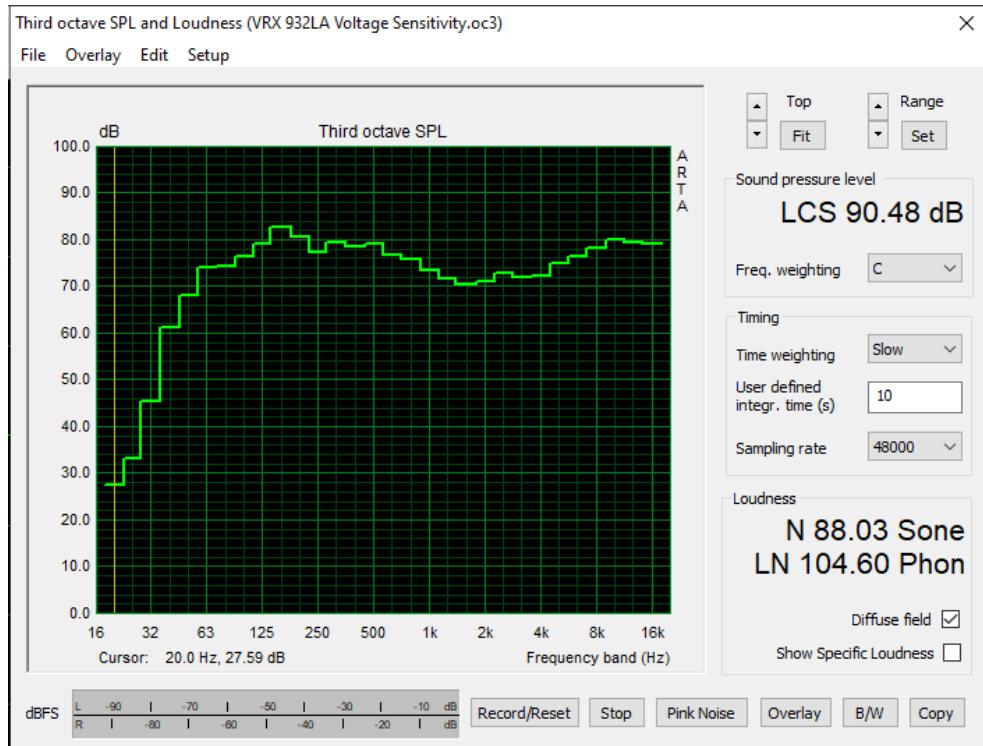


Abbildung 40. Voltage Sensitivity JBL VRX932LA-1.

## 8 Experiment

Dieselbe Prozedur wurde für eines der JBL VRX918s Elemente durchgeführt und ergab eine Voltage Sensitivity von 94.85 dB/2.83V/m. Dies ist in folgender Abbildung ersichtlich.

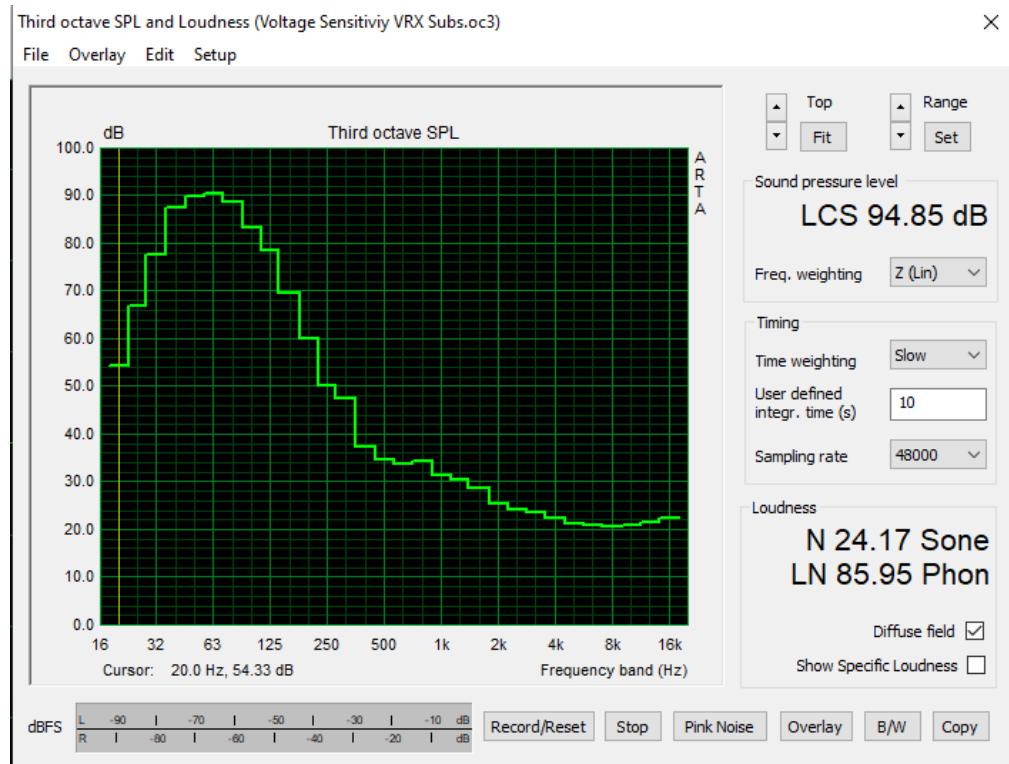


Abbildung 41. Voltage Sensitivity JBL VRX918s.

### 8.4.1.2 Lambda Labs System

Die Messung der Voltage Sensitivity der TX-3A Elemente stellte sich als problematisch heraus, da diese aktiv gebaut sind und somit das Messen mittels Voltmeter zwischen Verstärker und Lautsprecher nicht möglich war. Deshalb wurde eine Schätzung des Einstellwerts der Verstärkung vorgenommen. Diese Schätzung orientiert sich an den Pegelreduktionen, die an den Verstärkern der anderen gemessenen Elementen notwendig waren, um einen Messwert von 2.83V am Voltmeter zu erhalten.

Die Messung ergab 98.62dB/geschätzte 2.83V/1m wie in folgender Abbildung ersichtlich ist.

## 8 Experiment

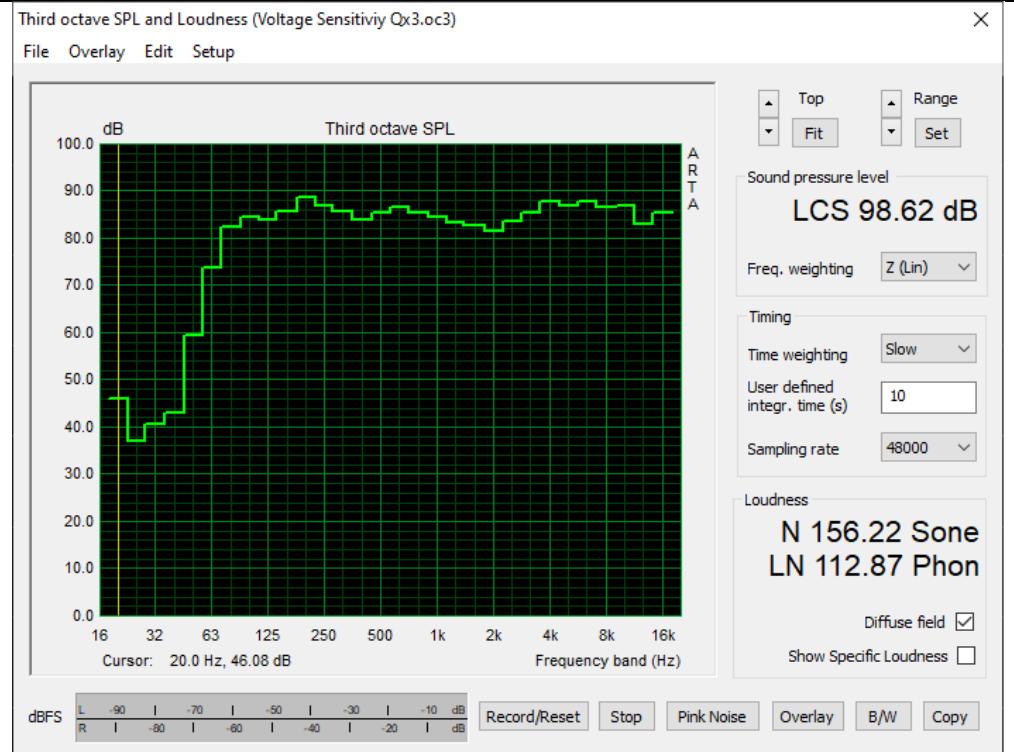


Abbildung 42. geschätzte Voltage Sensitivity Lambda Labs TX-3A.

DH18 ist ein passives System, somit musste bei dieser Messung keine Schätzung vorgenommen werden. Die Messung ergab 101.22db/2.83V/1m wie in folgender Abbildung ersichtlich ist.

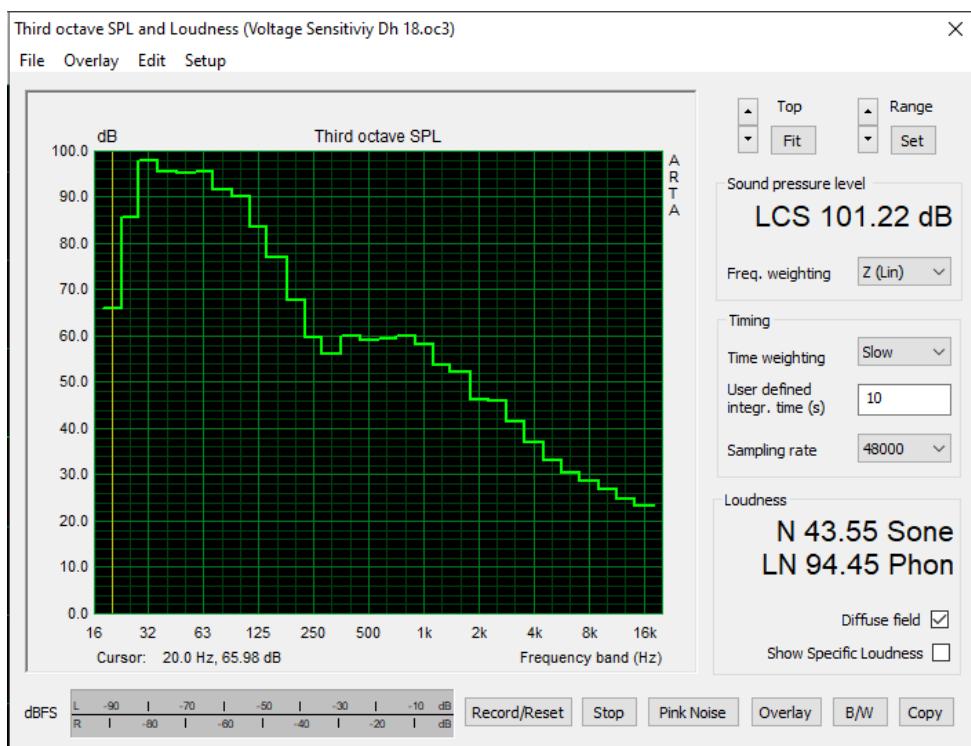


Abbildung 43. Voltage Sensitivity Lambda Labs DH18.

## 8 Experiment

### 8.4.1.3 Ergebnisse Voltage Sensitivity Messung

Bei der Messung der Voltage Sensitivity zeigt sich, dass das Lambda Labs System gegenüber dem JBL System effizienter ist. Bei einer gegebenen Eingangsspannung von 2.83V erzeugen die Elemente des Lambda Labs Systems um die 6dB mehr Ausgangsleistung, wobei hier nochmals erwähnt werden soll, dass die Eingangsspannung des TX-3A Elements nur geschätzt wurde.

Von dieser Schätzung unabhängig fällt beim Betrachten der Graphen auf, dass das Lambda Labs System einen lineareren Lautstärkeverlauf aufweist. Dies ist in folgender Abbildung deutlich erkennbar.

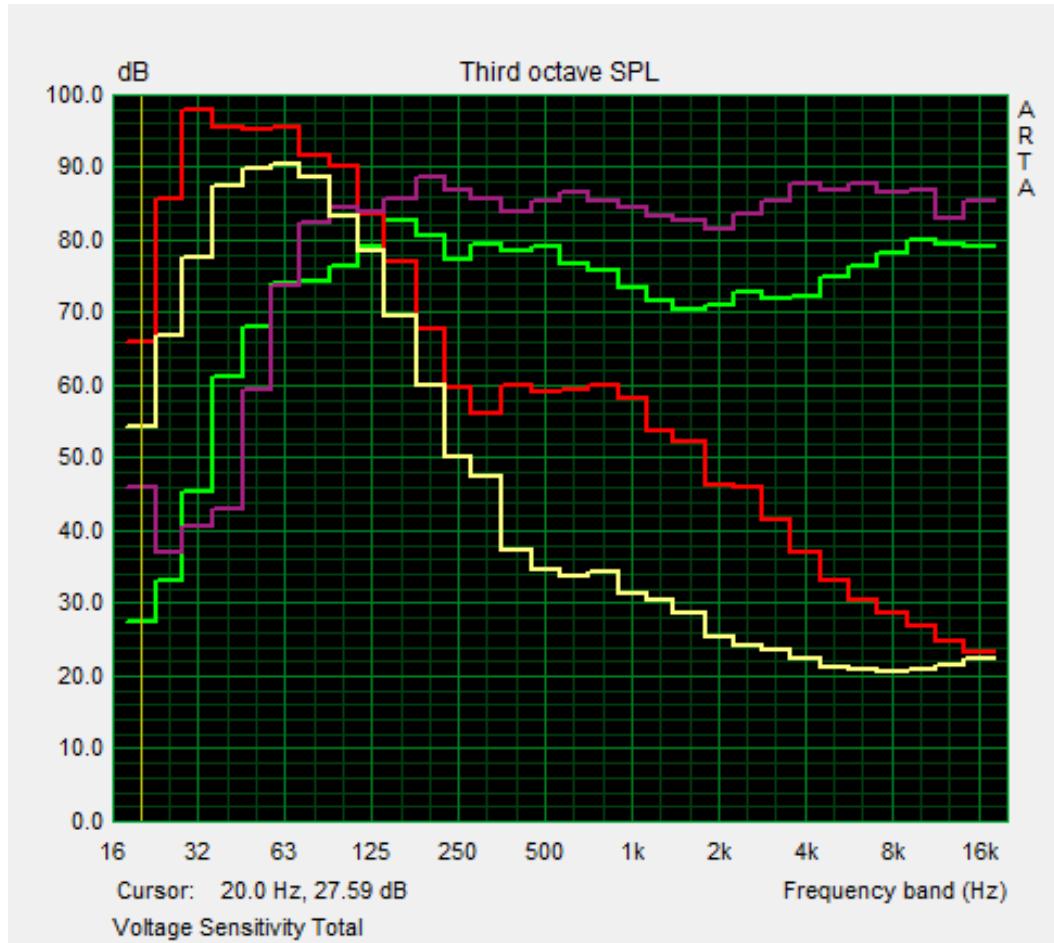


Abbildung 44. Voltage Sensitivity aller gemessenen Elemente im direkten Vergleich.

Vergleicht man die Werte aus der Messung des Lambda Labs Systems, mit dB/w/m Angaben, welche seitens der Firma Lambda Labs veröffentlicht wurden, so weicht die Messung des DH18 nur um 1 dB von der Herstellerangabe ab. Beim TX-3A beträgt die Abweichung 2 dB, allerdings beruht der Messwert des TX-3A wie bereits erwähnt auf einer Schätzung.

Die Angaben der Firma JBL lassen sich leider nicht mit der Messung vergleichen, da die Firma JBL wie bereits vorab erwähnt einen maximal Schalldruck (Peak) angibt und keine Effizienz in dB/w/m.

## 8 Experiment

### 8.4.2 Impedanz Messung

Ebenso wie bei der Messung der Spannungsempfindlichkeit wurde die Impedanz der Elemente der jeweiligen Systeme einzeln betrachtet.

Hierfür wurde - wie bereits vorab beschrieben - die Software LIMP verwendet. Der dafür nötige Messaufbau, der vorab bereits beschrieben wurde, wurde mit 3 parallel geschalteten 92 Ohm Widerständen realisiert und ist in folgender Abbildung ersichtlich.

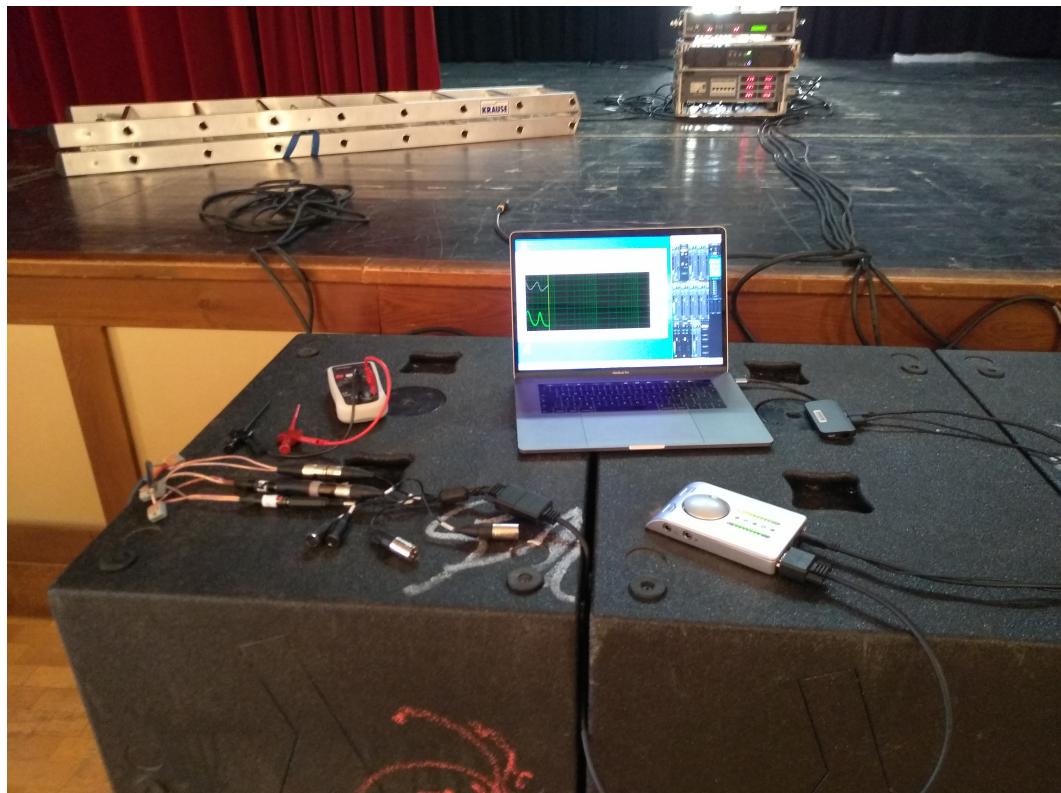


Abbildung 45. Messung der Impedanz eines DH18 am Kopfhörerausgang des RME Babyface.

## 8 Experiment

### 8.4.2.1 JBL VRX 900 System

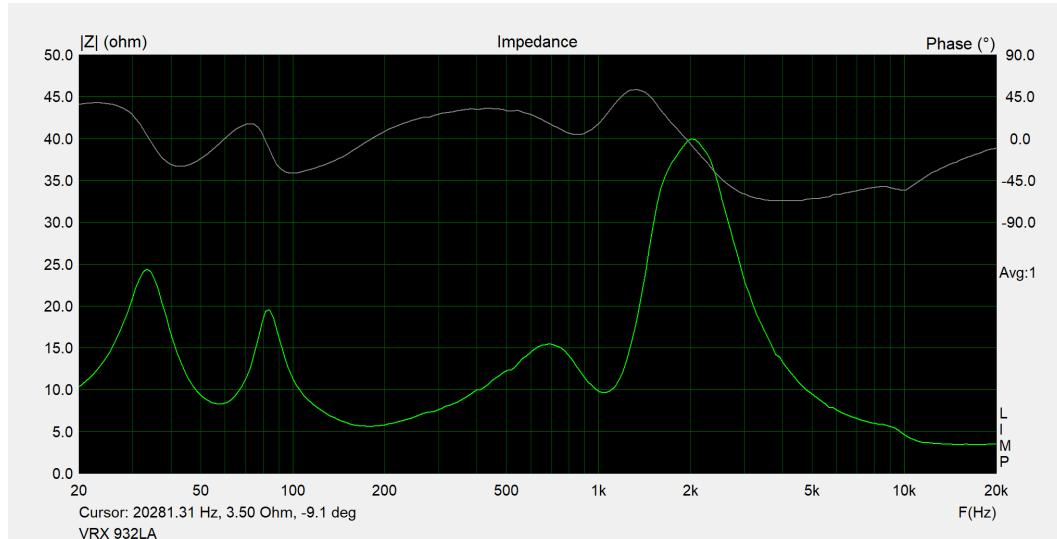


Abbildung 46. Ergebnis Impedanz Messung JBL VRX 932LA-1.

Deutlich erkennbar sind hier 4 Anstiege in der Impedanz, besonders stark ist der Anstieg bei 2 kHz.

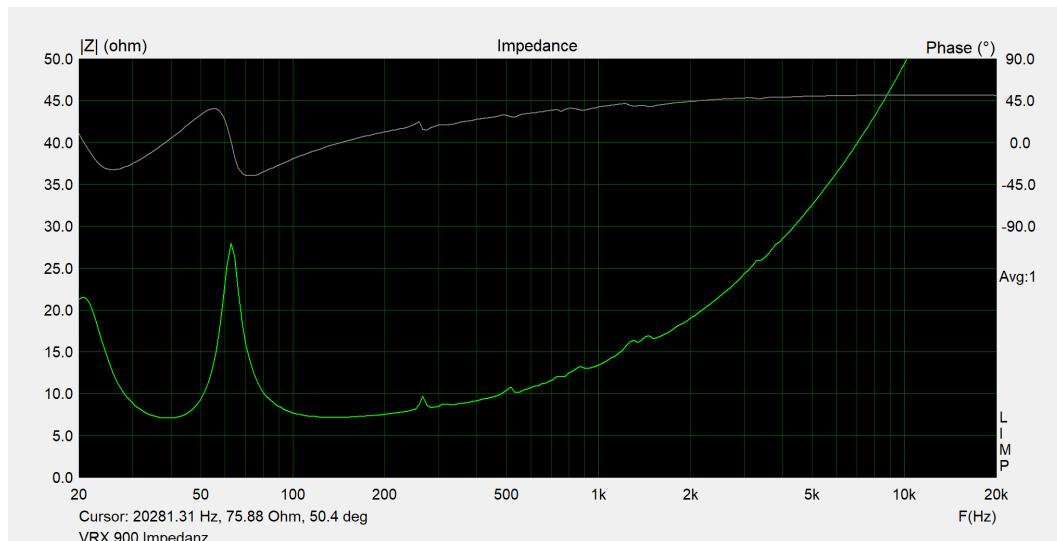


Abbildung 47. Ergebnis Impedanz Messung JBL VRX 918s.

Auffallend hier ist der Peak der Impedanz im Bassbereich, genau in dem Frequenzbereich, in dem der Lautsprecher die höchste Leistung abgeben muss.

### 8.4.2.2 Lambda Labs System

Ebenso wie bei der Voltage Sensitivity stellt die Messung der Impedanz des TX-3A Elements der Firma Lambda Labs vor Probleme aufgrund dessen aktiver Bauweise. Die Möglichkeit das Element zu öffnen und auseinander zu nehmen, um das aktive Verstärkerelement umgehen zu können, war leider nicht gegeben und deswegen konnte diese Messung am TX-3A nicht durchgeführt werden.

## 8 Experiment

---

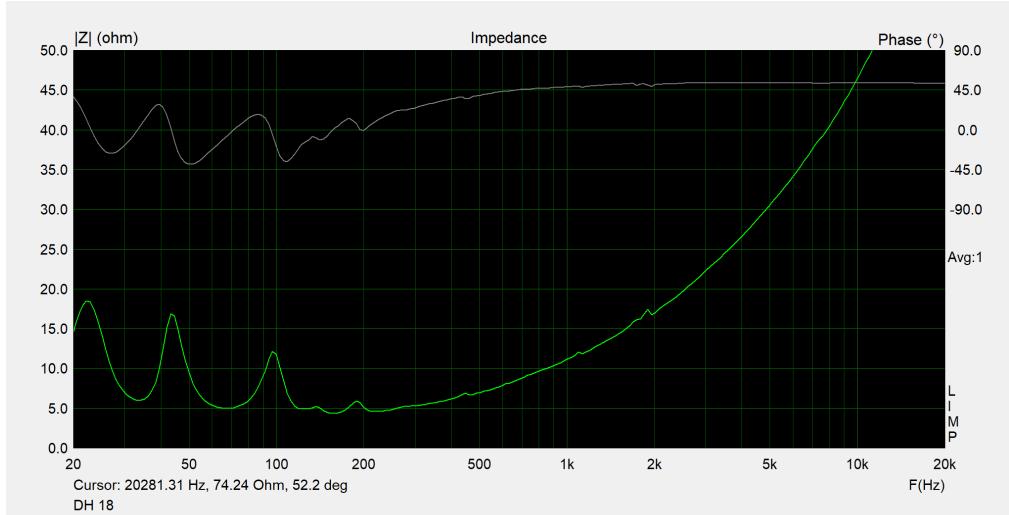


Abbildung 48. Ergebnis Impedanz Messung Lambda Labs DH18.

Betrachtet man die Impedanz Messung des DH18 so stellt man fest, dass diese 3 Peaks aufweist. Allerdings befindet sich nur einer dieser Peaks im Frequenzbereich, der auch genutzt wird. Dieser erstreckt sich beim DH18 von 25-80Hz. Der erste Peak in der Messung befindet sich also unterhalb und der dritte Peak oberhalb des genutzten Frequenzbereichs.

### 8.4.2.3 Ergebnisse der Impedanz Messung

Ein Vergleich der Impedanz zwischen TX-3A und VRX 932LA-1 ist leider nicht möglich, da wie bereits erwähnt die Impedanz Messung am TX-3A nicht durchführbar war.

Bei den Subbasselementen der jeweiligen Systeme lässt sich dieser Vergleich jedoch durchführen. Dieser wird in folgender Abbildung gezeigt.

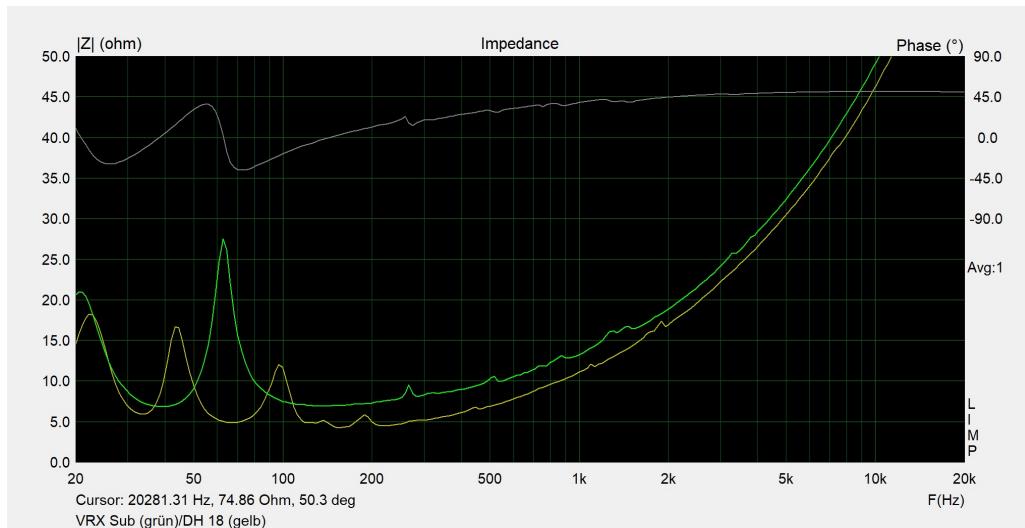


Abbildung 49. Impedanz Messung DH18 (gelb) VRX918s (grün)

## **8 Experiment**

---

Im direkten Vergleich ist deutlich erkennbar, dass der Impedanz Verlauf beim VRX 918s im Übertragungsbereich einen sehr starken Peak aufweist, der über 25 Ohm hinausgeht. Wohingegen das DH18 im Übertragungsbereich wesentlich stabiler ist.

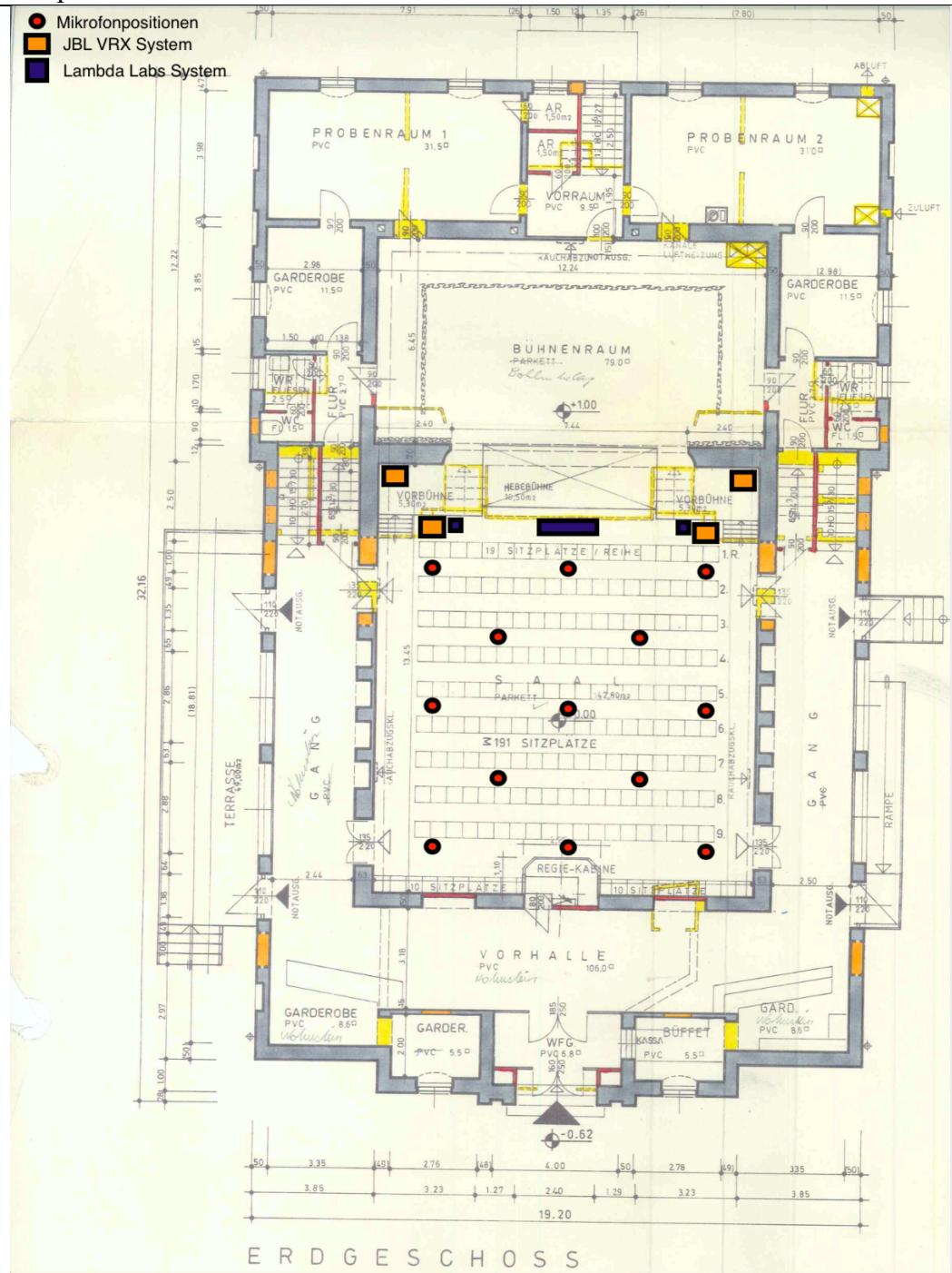
### **8.4.3 Impulsantworten**

Die Impulsantwort dient für die weitere Analyse eines Lautsprechersystems oder auch seines Verhaltens im Raum, sie ist jedoch nur für genau einen Punkt im Raum gültig, weswegen mehrere Impulsantworten im Raum gemessen und gemittelt wurden. Für die Betrachtung ohne Raum wurde die bereits beschriebene Windowingtechnik genutzt.

Im Raum wurden 13 Mikrofonpositionen definiert, an denen jeweils 10 Impulsantworten gemessen wurden. Diese wurden anschließend gemittelt. Die so erhaltene Impulsantwort ist repräsentativ für das jeweilige System im Raum. Die gewählten Mikrofonpositionen sind in folgender Abbildung ersichtlich.

8 Experiment

- Mikrofonpositionen
  - JBL VRX System
  - Lambda Labs System



*Abbildung 50. Mikrofonpositionen zur Messung der Impulsantwort.*

Die beiden so erstellten Impulsantworten werden in den folgenden zwei Abbildungen gezeigt.

## 8 Experiment

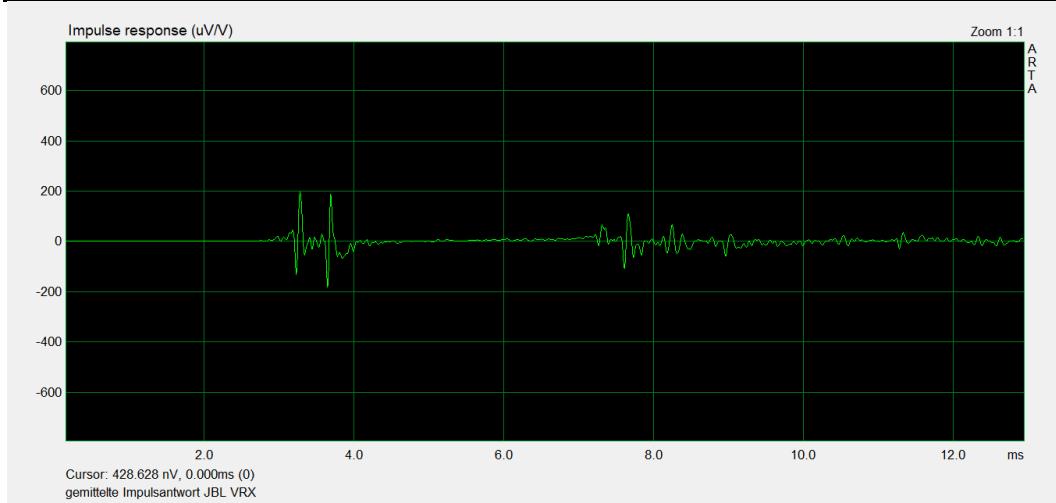


Abbildung 51. Gemittelte Impulsantwort JBL VRX 900 Systems.

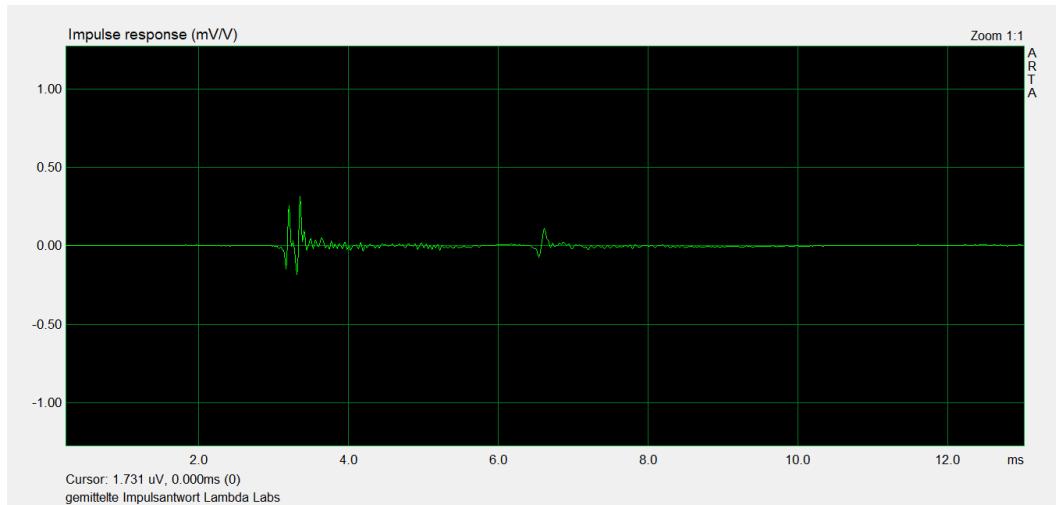


Abbildung 52. Gemittelte Impulsantwort des Lambda Labs Systems.

Vergleicht man die Impulsantworten beider Systeme, so fallen direkt zwei Punkte auf.

- 1) Der erste Peak in der Impulsantwort des VRX 900 Systems ist zeitlich viel weiter vom Zweiten entfernt als dies beim Lambda Labs System der Fall ist. Dies zeugt von einer Verwischung der zeitlichen Komponente des Signals beim VRX 900 System
- 2) Die Nachhallfahne des VRX 900 Systems ist deutlich klarer zu erkennen und somit wesentlich stärker ausgeprägt als dies beim Lambda Labs System der Fall ist.

### 8.4.4 Sprungantworten

Für die Berechnung der Sprungantworten der Lautsprechersysteme in ARTA wurde die bereits vorab erstellte gemittelte Impulsantwort verwendet. Diese

## 8 Experiment

musste für die Berechnung der Sprungantwort mittels Windowingtechnik bearbeitet werden, um die Raumreflexionen aus der Berechnung auszuschließen.

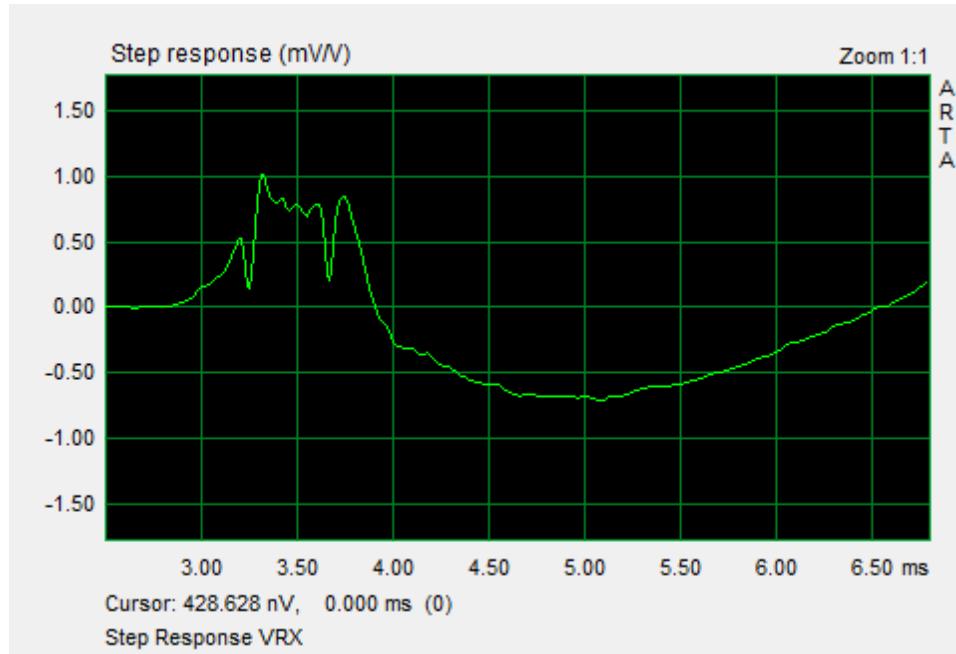


Abbildung 53. Step Response JBL VRX 900 System.

Die Sprungantwort des VRX 900 Systems liefert ein weiteres Zeichen dafür, dass die zeitliche Kompetenz des Signals durch dieses System verwischt wird. Der erste Peak zeigt die Hochtöner an, welche noch keinen zeitlichen Versatz aufweisen, der ins Gewicht fallen würde. Der nächste Abschnitt zeichnet sich durch 4 kleine Peaks in einem Bereich aus. Diese kleinen Peaks entstehen durch den Laufzeitversatz der Mitteltöner. Der Peak im letzten Abschnitt entsteht durch die Subbasselemente und zeichnet sich dadurch aus, dass er sehr langsam ausschwingt.

## 8 Experiment

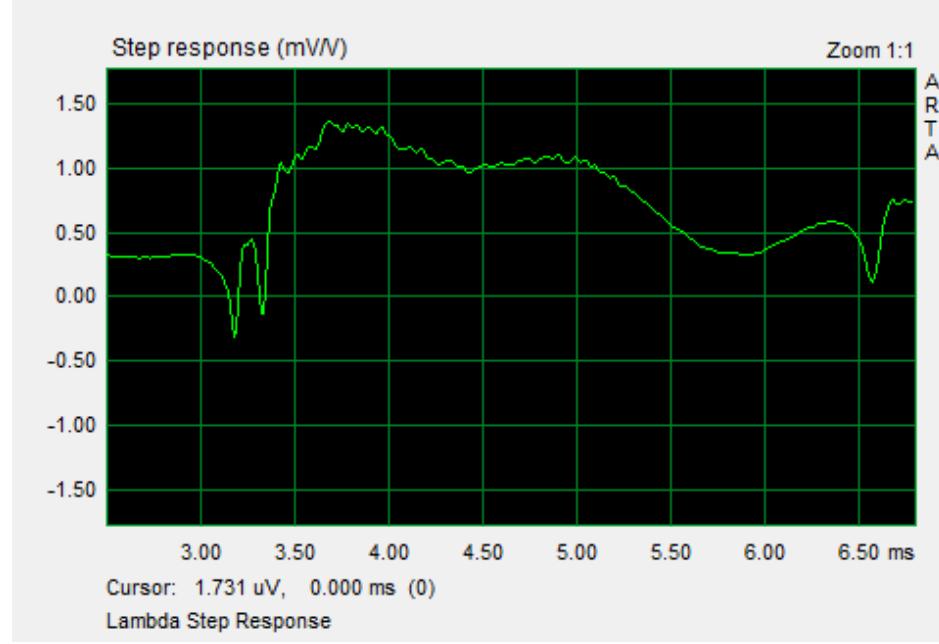


Abbildung 54. Step Response Lambda Labs System.

Die Sprungantwort des Lambda Labs Systems ist insofern auffällig, als dass die ersten beiden Peaks, welche für Hoch und Mitteltöner stehen, negativ ausgerichtet sind. Auf sie folgt ein sehr langsam ausschwingendem positiven Peak, der für die Subbasselemente steht.

### 8.4.5 Phasenfrequenzgang

Für die Berechnung des Phasenfrequenzgangs wurde, die bereits vorab erstellte gemittelte Impulsantwort des jeweiligen Systems verwendet.

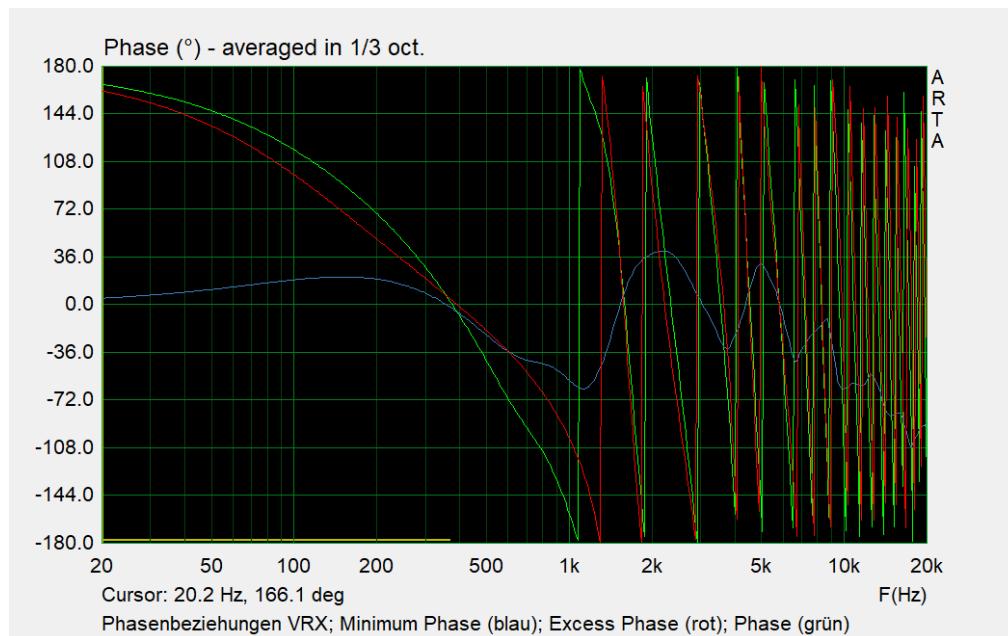


Abbildung 55. Phasenfrequenzgang JBL VRX 900 System.

## 8 Experiment

---

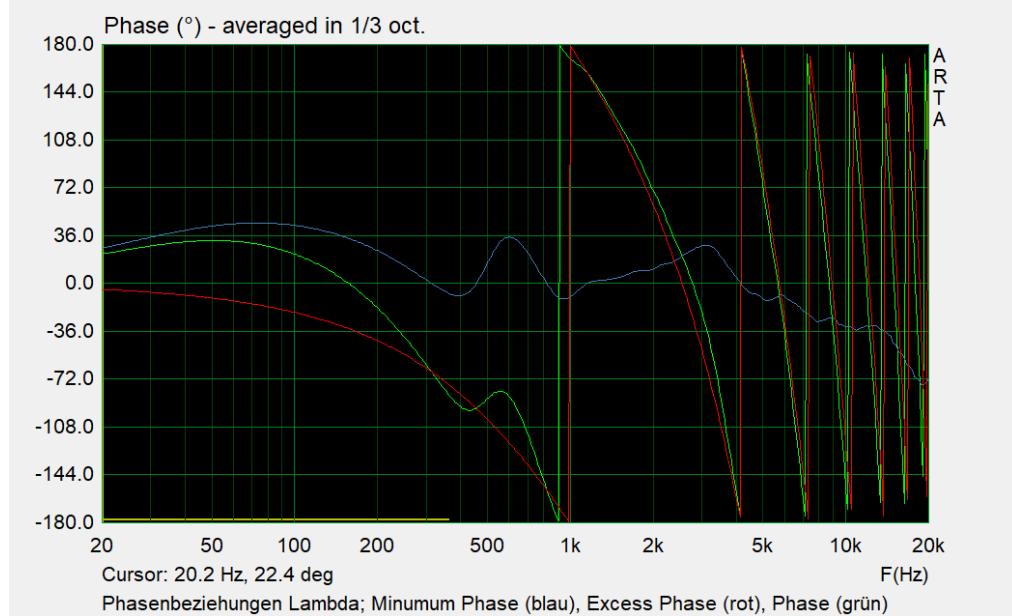


Abbildung 56. Phasenfrequenzgang Lambda Labs System.

Betrachtet man den Phasenfrequenzgang beider Systeme im Vergleich so fällt auf, dass die Unterschiede zwischen Excess Phase und Phase beim JBL System wesentlich größer sind als beim Lambda Labs System. Außerdem fällt auf, dass beim JBL System bei höheren Frequenzen wesentlich mehr Nulldurchgänge als beim Lambda Labs System auftreten.

### 8.4.6 Amplitudenfrequenzgang auf der Achse

Für die Erstellung des Amplitudenfrequenzgangs auf der Achse der jeweiligen Systeme wurden ebenfalls die bereits vorab erstellten gemittelten Impulsantworten verwendet und gefenstert, um die Einflüsse des Raumes auszublenden.

## 8 Experiment

---

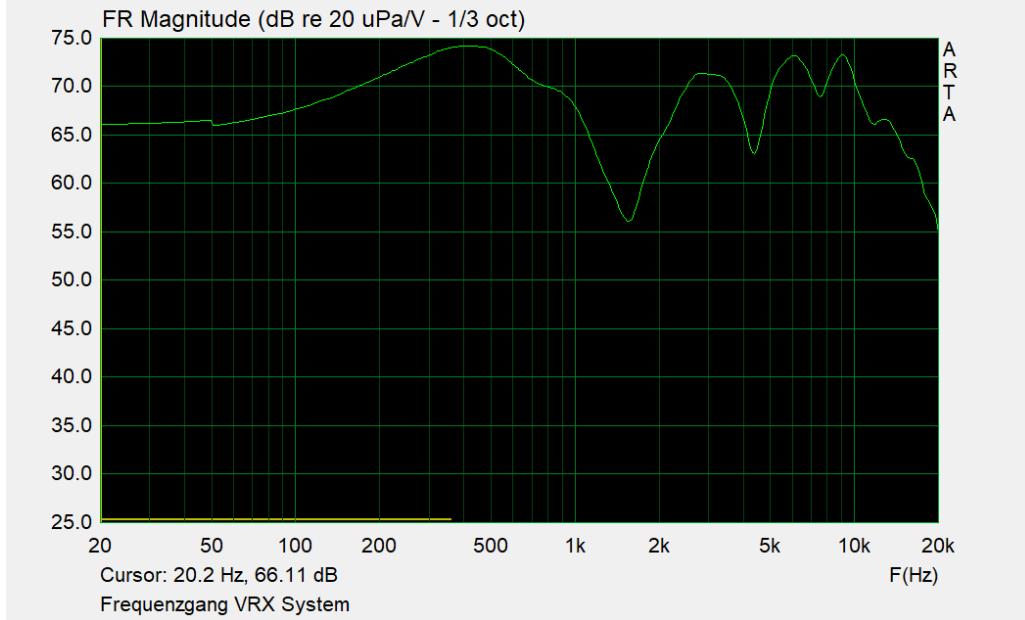


Abbildung 57. Amplitudenfrequenzgang des JBL VRX 900 Systems erstellt aus der gefensterten, gemittelten Impulsantwort.

Bei der Betrachtung des gemessenen Amplitudenfrequenzgangs des VRX 900 Systems fällt direkt ins Auge, dass dieser fernab eines linearen Verlaufs ist. Es sind mehrere starke Einbrüche zu erkennen. Der signifikanteste liegt knapp unter 2000 Herz. Vergleicht man diese Kurve, mit der in der Simulation errechneten (Abbildung 33) so ist klar erkennbar, dass die Simulation die falsche Vorhersage getroffen hat.

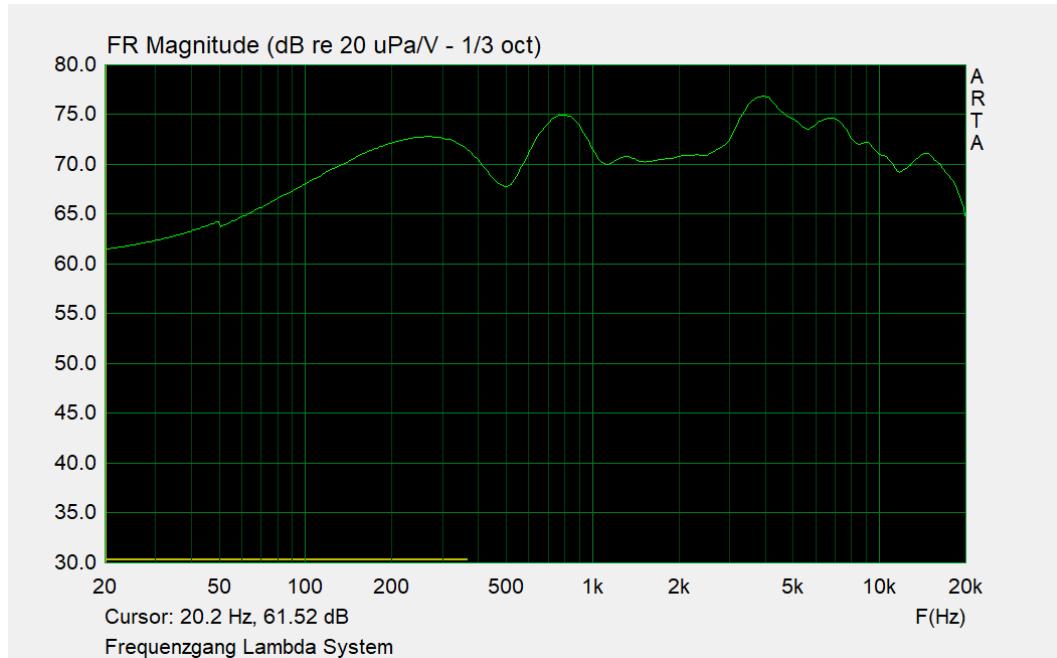


Abbildung 58. Amplitudenfrequenzgang des Lambda Labs Systems erstellt aus der gefensterten, gemittelten Impulsantwort.

## 8 Experiment

Der Verlauf des Amplitudenfrequenzgangs des Lambda Labs Systems ist ebenfalls nicht linear, jedoch weist er wesentlich weniger starke Einbrüche auf wie der des VRX 900 Systems. Der signifikanteste Einbruch liegt hier zwischen 1 kHz und 3 kHz und ist damit sehr breit. Über 3 kHz bis zum oberen Ende des Übertragungsbereiches ist der Verlauf wieder relativ linear.

### 8.4.7 Amplitudenfrequenzgang im Nahfeld

Für die Erstellung eines im Nahfeld korrigierten Amplitudenfrequenzgangs beider Systeme wurden Amplitudenfrequenzgänge im Nahfeld der einzelnen Elemente der Systeme aufgenommen, welche mit den bereits vorab erstellten gefensterten und gemittelten Impulsantworten der Systeme zusammengefügt wurden, um für jedes System einen Amplitudenfrequenzgang zu erzeugen, welcher in allen Frequenzbereichen aussagekräftig ist.

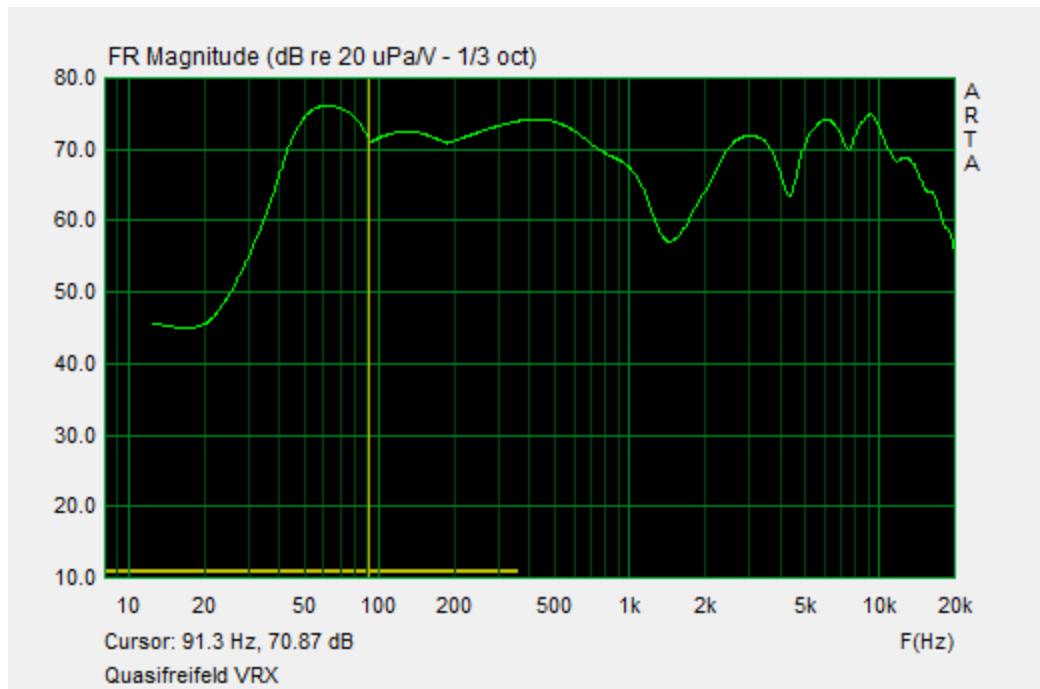


Abbildung 59. Im Nahfeld korrigierter Amplitudenfrequenzgang des JBL VRX 900 Systems.

## 8 Experiment

---

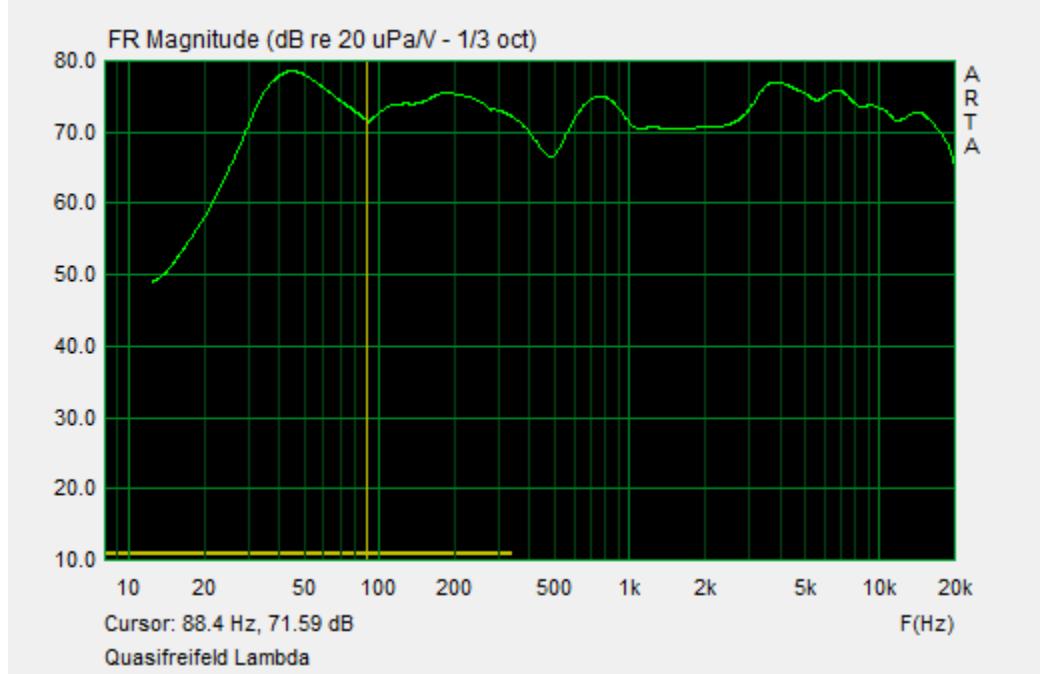


Abbildung 60. Im Nahfeld korrigierter Amplitudenzgang des Lambda Labs Systems.

Die Unterschiede der Amplitudenzgänge der beiden Systeme im oberen Frequenzbereich wurden bereits vorab beleuchtet. Im Tieffrequenzbereich fällt auf, dass beide Systeme bei etwa 90 Herz einen kleinen Einbruch aufweisen. Das Lambda Labs System arbeitet bereits bei tieferen Frequenzen wie das JBL System. So weist das Lambda Labs System bei einer Frequenz von 30 Herz bereits eine Amplitude von 70 dB auf. Dass JBL System erreicht bei einer Frequenz von 30 Herz nur 55 dB.

### 8.4.8 Amplitudenzgang im Raum

Die Berechnung des Amplitudenzgangs im Raum basiert wieder auf den bereits vorab gemittelten Impulsantworten für die jeweiligen Systeme. Allerdings wird diesmal kein Windowing angewandt, um die Einflüsse des Raumes sichtbar zu machen.

## 8 Experiment



Abbildung 61. Amplitudenzgang im Raum des JBL VRX 900 Systems.

Die Einbrüche, die bereits in dem vom Raum bereinigten Amplitudenzgang des JBL VRX 900 Systems (Abbildung 56) zu erkennen waren, werden durch den Einfluss des Raumes noch wesentlich stärker ausgeprägt, außerdem kommen noch weitere im Hochfrequenzbereich über 10 kHz hinzu.

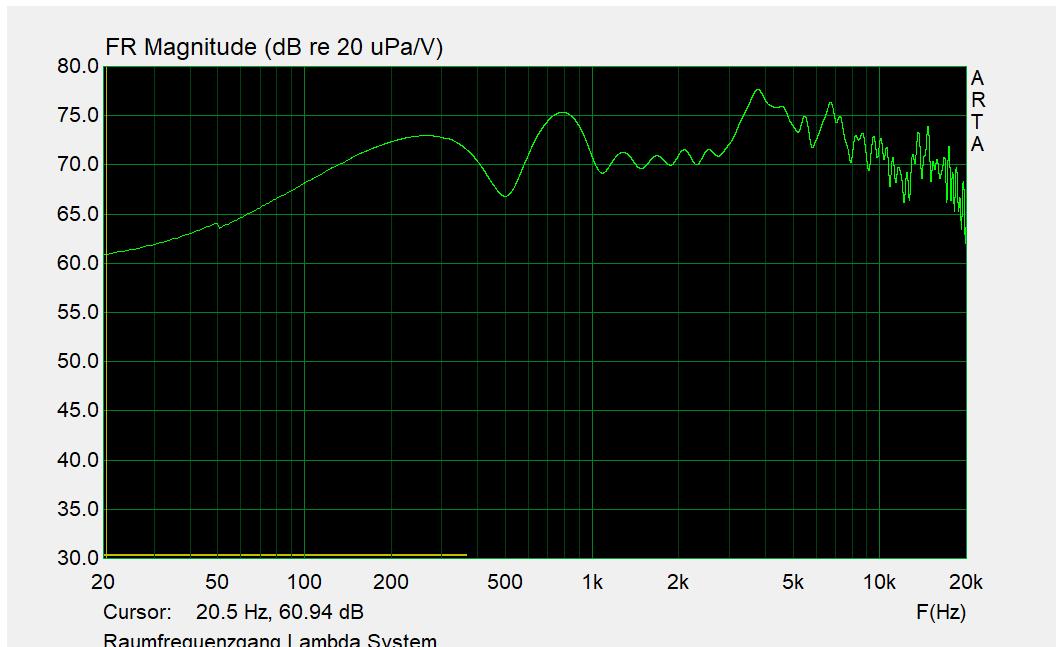


Abbildung 62. Amplitudenzgang im Raum des Lambda Labs System.

## 8 Experiment

Der Einfluss des Raumes auf das Lambda Labs System ist vor allem im Hochtonbereich deutlich erkennbar. Ab einer Frequenz von 1000 Herz aufwärts sind immer mehr Reflexionen im Frequenzgang sichtbar.

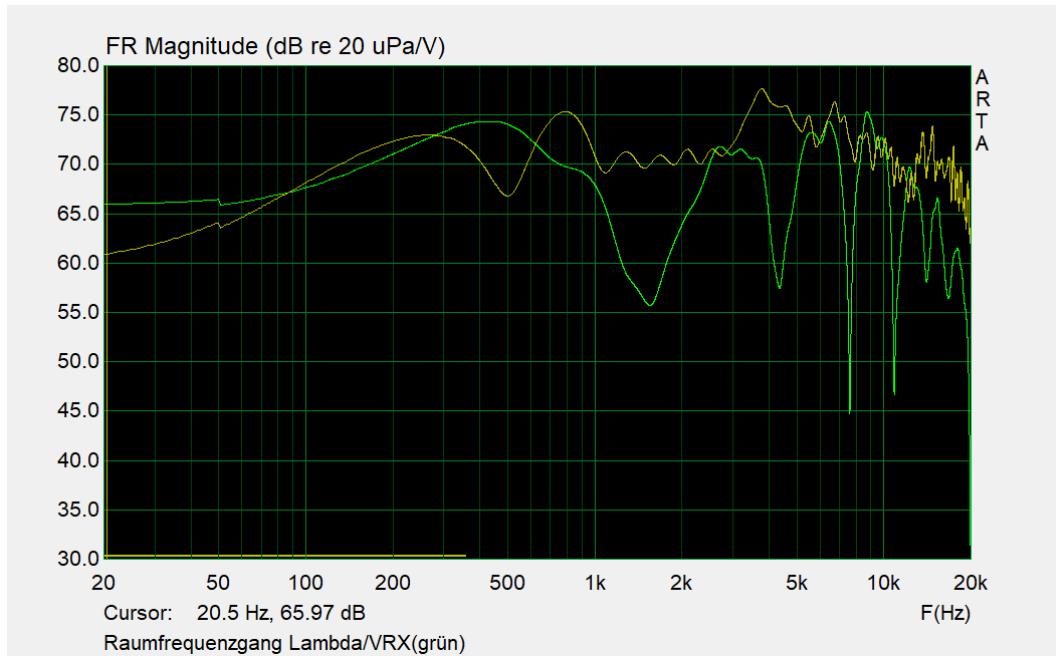


Abbildung 63. Vergleich der Amplitudenfrequenzgänge des Lambda Labs Systems (gelb) und des JBL VRX 900 Systems (grün).

Im direkten Vergleich der beiden Amplitudenfrequenzgänge im Raum lässt sich feststellen, dass das Lambda Labs System deutlich weniger vom Raum beeinflusst wird, also deutlich weniger Reflexionen in diesem erzeugt. Dies passiert aufgrund einer gerichteteren Abstrahlung im Vergleich zum JBL VRX 900 System.

### 8.4.9 Wasserfalldiagramme

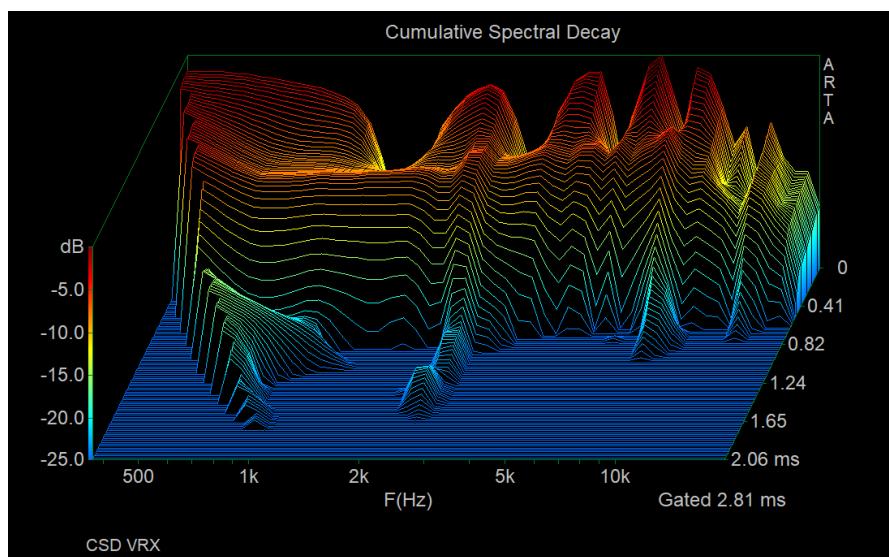


Abbildung 64. Wasserfalldiagramm des JBL VRX Systems.

## 8 Experiment

Das Wasserfalldiagramm des JBL VRX 900 Systems weist 2 stärkere und 2 schwächere Resonanzen auf. Die Stärkeren liegen bei 1 und 3 kHz die Schwächeren bei ca. 8 und 13 kHz. Auffallend ist, dass auch im Wasserfalldiagramm die Einbrüche, welche im Amplitudenfrequenzgang zu sehen sind, deutlich erkennbar sind.

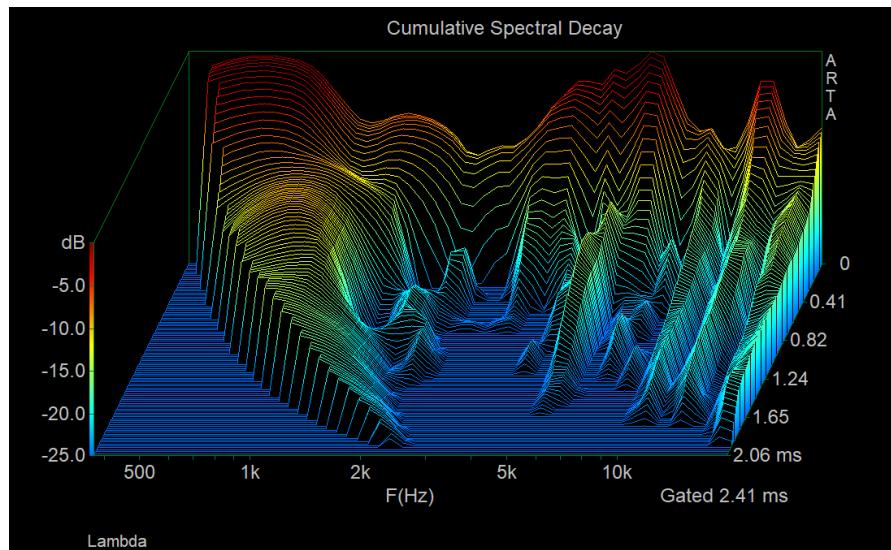


Abbildung 65. Wasserfalldiagramm des Lambda Labs Systems.

Das Lambda Labs System weist deutlich mehr und stärkere Resonanzen auf als das JBL System. Besonders im Hochtonbereich zeigen sich einige sehr lange andauernde schmalbandige Resonanzen.

## 8.5 Ergebnisse der Messungen

An dieser Stelle sollen die Ergebnisse aus dem Vergleich der technischen Messungen beider Lautsprechersysteme noch einmal zusammengefasst werden.

Bei Betrachtung der Spannungsempfindlichkeit auf der gewählten Achse beider Lautsprechersysteme konnte festgestellt werden, dass das System der Firma Lambda Labs effizienter arbeitet als das System der Firma JBL. Ein Vergleich mit den Daten, die der Hersteller angibt, war nur beim System der Firma Lambda Labs möglich, da die Firma JBL anstatt einer Effizienz in db/w/m einen maximalen Schalldruckpegel (Peak) angibt. Beim Vergleich des Messergebnisses mit der Herstellerangabe der Firma Lambda Labs wurden nur geringe Abweichungen von 1-3 dB festgestellt, wobei hier nochmals erwähnt werden muss, dass die Messung für das TX-3A Element der Firma Lambda Labs auf einer Schätzung beruht.

Bei der Messung der Impedanz der beiden Lautsprechersysteme erwies sich das TX-3A Element der Firma Lambda Labs wie bereits vorab festgestellt auf Grund seiner aktiven Bauweise als problematisch und musste deswegen aus diesem Test

## 8 Experiment

---

ausgeschlossen werden. Es blieb der Vergleich zwischen den Subbasselementen beider Lautsprechersysteme, bei dem festgestellt werden konnte, dass sich die Impedanz des Subbasselements der Firma Lambda Labs im genutzten Übertragungsbereich stabiler verhält, als jenes der Firma JBL.

Bei der Betrachtung der gemittelten Impulsantworten beider Systeme wurde festgestellt, dass das JBL System eine deutlich stärker erkennbare Nachhallfahne sowie eine leichte Verwischung der zeitlichen Komponente des Signals aufweist.

Die Sprungantwort des JBL Systems bestätigte die vorab erwähnte leichte Verwischung der zeitlichen Komponente des Signals. Die Sprungantwort des Systems der Firma Lambda Labs zeigte sich insofern auffällig, als dass die Peaks der Hoch und Mitteltöner negativ ausgerichtet sind. Im Gegensatz dazu ist der Peak des Subbasselements positiv ausgerichtet.

Bei der Betrachtung des Phasenfrequenzgangs beider Systeme konnte festgestellt werden, dass das Lambda Labs System geringere Phasenschwankungen aufweist als das JBL System.

Der Amplituduenfrequenzgang auf Achse des Systems der Firma Lambda Labs weist einen wesentlich flacheren Verlauf auf als jene des Systems der Firma JBL.

Bei Betrachtung der Amplitudenfrequenzgänge im Nahfeld und der im Nahfeld korrigierten Amplitudenfrequenzgänge der beiden Lautsprechersysteme wurde festgestellt, dass das System der Firma Lambda Labs bereits ab 30 Herz, entsprechend der Angabe des Herstellers, einen nennenswerten Pegel im Tieftonbereich erzeugt, wohingegen dies beim JBL System erst ab 40 Herz (Herstellerangabe 34 Herz) der Fall ist.

Nimmt man den Einfluss des Raumes hinzu, so zeigt sich in den Amplitudenfrequenzgängen im Raum der Systeme im Vergleich, dass das JBL System wesentlich mehr und stärkere Raumreflexionen hervorruft. Dies kann mit der wesentlich breiteren horizontalen Abstrahlung von  $100^\circ$  im Vergleich zu  $50^\circ$  beim System der Firma Lambda Labs erklärt werden.

Betrachtet man die Wasserfalldiagramme der beiden Lautsprechersysteme, so ist festzustellen, dass das System der Firma JBL wesentlich resonanzärmer als das System der Firma Lambda Labs ist. Resonanzen sind grundsätzlich unerwünscht. Die Frage ob diese sich negativ auf den Klang des Lautsprechersystems auswirken, kann erst im Laufe des Hörtest beantwortet werden.

## 8.6 Hörtest

Für den Hörtest wurden den ProbandInnen an zwei Tagen jeweils 4 Termine angeboten. Jeder Testdurchlauf hatte eine Dauer von 40 Minuten. Am Hörtest nahmen 64 Personen teil. 48 davon waren männlich, 16 weiblich. Der Altersdurchschnitt der ProbandInnen lag bei 35.6 Jahren. Der/die jüngste Teilnehmer/in war 22 Jahre alte, der/die älteste 66. Abbildung 66 zeigt das Testsetup in einem der am stärksten besuchten Durchgänge.

## 8 Experiment



Abbildung 66. Durchführung des Hörtests im Stadttheater Bruck an der Leitha.

### 8.6.1 Testmusik

Bei der Auswahl der Musikausschnitte, welche für die Durchführung des Hörtests und somit für die Beantwortung des Fragebogens verwendet wurden, wurde besonders darauf acht gelegt ausschließlich Musik in einem verlustfreien Dateiformat zu verwenden.

Hierfür wurde der Musik Streamingdienst Tidal benutzt, welcher über ein Zusatzabo die Möglichkeit bietet, verlustfreies Audio in höchster Qualität zu streamen. (Aspiro AB, 2019) Der Streamingdienst wurde gewählt, um den ProbandInnen die Möglichkeit anbieten zu können, zusätzlich zu den für den Test ausgewählten Stücken auch noch Musik ihrer Wahl auf den beiden Systemen probehören zu können.

Für die Auswahl der Musikstücke waren folgende Kriterien maßgebend:

- Die Musikstücke sollten ein möglichst breites Spektrum an musikalischen Genres abdecken.
- In den Stücken sollten natürliche Instrumente, mit denen HörerInnen eine klare Klangvorstellung verbinden, deutlich hörbar sein.
- Aufgrund derselben Überlegung sollte zumindest ein Vokalstück im Test vorkommen.
- Bei den Stücken sollten solche dabei sein, die möglichst vielen ProbandInnen bekannt sind, also Stücke, mit denen die ProbandInnen wieder eine klare Klangvorstellung verbinden.
- Die Stücke sollten das ganze Spektrum von pianissimo bis fortissimo abdecken.

## 8 Experiment

---

Die Reihenfolge der Stücke wurde so gewählt, dass ein Bogen von leisen zu lauteren Stücken gespannt wird und eine rhythmische Abfolge von unterschiedlichen Genres gewährleistet bleibt, um die TesthörerInnen nicht zu ermüden.

Von folgenden Musikstücken wurden im Rahmen des Tests jeweils 90 bis 120 Sekunden gespielt. Die Musikstücke werden hier in der Reihenfolge angeführt, in der sie im Test gespielt wurden.

- 1) These Bones – The Fairfied Four – Album: Couldn't Hear Nobody Pray (The Fairfied Four, 1997)
- 2) Comptine d'un autre été, l'après-midi – Yann Tiersen – Album: Die fabelhafte Welt der Amelie (Das Original-Hörbuch zum Film) (Yann Tiersen, 2001)
- 3) Exits – Foals – Album: Exits (Foals, 2019)
- 4) Stravinsky: The Firebird (L'oiseau de feu)–Suite (1919)–Infernal Dance of King Kaschei – Radio Symphonie Orchester Berlin, Lorin Maatz – Album: Stravinsky: The Firebird Suite/Falla: El Amor Brujo; El Sombrero De Tres Picos (Radio-Symphonie-Orchester Berlin, Lorin Maazel, 2011)
- 5) The Race – Yello – Album: Sound Check-the Professional Audio Test Disc (Alan Parsons Project, 1995)
- 6) If I could – Camo & Krooked – Album: Mosaik (Camo & Krooked, 2017)
- 7) So What – Miles Davis – Album: Kind of Blues (Legacy Edition) (Miles Davis, 2016)
- 8) Brandenburg Concerto No.3 in G major – Nikolaus Harnoncourt – Album: Harnoncourt conducts JS Bach - (Nikolaus Harnoncourt, 2009)
- 9) Rosanna – Toto – Album: Toto IV (Toto, 1982)
- 10) Anvoyé – Chinese Man – Album: Shikantaza (Chinese Man, 2017)

Folgende Überlegungen waren für die Auswahl der konkreten Musikstücke maßgeblich.

- 1) These Bones – The Fairfied Four – Album: Couldn't Hear Nobody Pray (The Fairfied Four, 1997)

Dieses Stück bietet einen Chor aus Gesangsstimmen, welcher sich über alle Tonlagen erstreckt und die sich immer wieder überlagern. Besonders präsent und für den Hörtest interessant ist der Bass, der bei einem eindrucksvollen C einsetzt und die klanglichen Möglichkeiten der Tieftöner deutlich aufzeigt. Die Sänger werden nur durch leises Klatschen im Hintergrund begleitet.

- 2) Comptine d'un autre été, l'après-midi – Yann Tiersen – Album: Die fabelhafte Welt der Amelie (Das Original-Hörbuch zum Film) (Yann Tiersen, 2001)

Comptine d'un autre été, l'après-midi ist ein Stück für Klavier solo, bekannt aus dem Film „Die Fabelhafte Welt der Amelie“. Das Klavier spielt – in einer qualitativ guten Aufnahme – eine einfache Melodie, die das Instrument natürlich zum Klingen bringt. Diese Stück wurde gewählt, weil sowohl die Melodie als auch der zu erwartende Klang als bekannt vorausgesetzt werden können.

## 8 Experiment

---

### 3) Exits – Foals – Album: Exits (Foals, 2019)

Das Stück Exits, der Band Foals wurde als Beispiel für eine akutelle Produktion aus dem Popbereich ausgewählt. Gesang, Synthesizer, E-Gitarren, Schlagzeug und andere perkusive Elemente sind in einem transparenten Mix klar und deutlich dargestellt.

### 4) Stravinsky: The Firebird (L'oiseau de feu)–Suite (1919)–Infernal Dance of King Kaschei – Radio Symphonie Orchester Berlin, Lorin Maatz – Album: Stravinsky: The Firebird Suite/Falla: El Amor Brujo; El Sombrero De Tres Picos (Radio-Symphonie-Orchester Berlin, Lorin Maazel, 2011)

Dieses Stück wurde einer Tidal Playlist entnommen, welche von der Firma Bowers & Wilkins unter dem Namen „Ultimate System Testers“ veröffentlicht wurde. Es ist E-Musik für großes Orchester, bei der viele unterschiedliche Instrumente hörbar sind und unterscheidbar bleiben sollen. Vor allem die Blechbläser treten aus dem Orchester deutlich hervor. Das Stück und diese spezifische Aufnahme zeichnen sich durch starke Sprünge in der Dynamik und einen hohen Dynamikumfang aus.

### 5) The Race – Yello – Album: Sound Check-the Professional Audio Test Disc (Alan Parsons Project, 1995)

Dieser Titel wurde der Soundcheck CD von Alan Parsons entnommen und eignet sich aufgrund des am Anfang des Stücks vorbeifahrenden Motorrads sehr gut für die Einschätzung des Stereoimages.

### 6) If I could – Camo & Krooked – Album: Mosaik (Camo & Krooked, 2017)

Dieses Stück wurde gewählt, da es ein elektronisches Musikstück ist, welches auf sehr hohem Level produziert wurde. Alle Frequenzbereiche werden abgedeckt und es hat ein sehr ausgewogenes Stereoimage.

### 7) So What – Miles Davis – Album: Kind of Blues (Legacy Edition) (Miles Davis, 2016)

Dieses Stück ist ein Referenzstück aus dem Jazzgenre. Eine legendäre Aufnahme, in der Trompete, Tenorsaxophon, Klavier, Bass und Schlagzeug solistisch und im Satz mit Posaunen hörbar sind. Die ebenso legendär schlechte Aufnahmqualität stellt – u.a. durch starkes Rauschen – eine spezielle Herausforderung für ein Lautsprechersystem dar.

### 8) Brandenburg Concerto No.3 in G major – Nikolaus Harnoncourt – Album: Harnoncourt conducts JS Bach - (Nikolaus Harnoncourt, 2009)

Das Brandenburg Concerto No.3 ist ein Beispiel für Barockmusik. In der Aufnahme mit Michael Harnoncourt und dem Concentus Musicus auf historischen Instrumenten wird sehr klar und durchsichtig musiziert. In der kleinen Besetzung für Streicher und Continuo sind die einzelnen Instrumente deutlich hörbar, der Dialog zwischen den einzelnen Instrumentengruppen ergibt schöne räumliche Effekte, deren Hörbarkeit eine Herausforderung für die Lautsprechersysteme darstellt.

## 8 Experiment

### 9) Rosanna – Toto – Album: Toto IV (Toto, 1982)

Rosanna von Toto ist ein den meisten HörerInnen bekanntes Musikstück. Markant und für den Hörtest interessant ist der berühmte Schlagzeuggroove von Jeff Porcaro. Die Herausforderung für ein Lautsprechersystem ist es, diesen sehr leisen und differenzierten Groove mit allen Instrumenten des Schlagzeugs auch hörbar zu machen, wenn der Rest der Band nach den ersten Takten einsetzt.

### 10) Anvoyé – Chinese Man – Album: Shikantaza (Chinese Man, 2017)

In diesem Stück werden Fieldrecordings und Klänge realer Instrumente mit digitalen Samples zu neuen Klängen vermischt. Um die feinen Details dieses Stücks wahrnehmen zu können ist eine sehr hohe Auflösung notwendig. Außerdem eignet sich dieses Musikstück auch um festzustellen, ob die zu testenden Lautsprechersysteme bei hoher Wiedergabelautstärke verzerrt klingen.

#### 8.6.2 Vorbereitungen

Vor der Durchführung des ersten Tests wurden beide Lautsprechersysteme mittels einer C gewichteten Loudnessmessung in ARTA auf ungefähr gleichen Wiedergabepegel gebracht, um möglichst faire Voraussetzungen für den Test zu schaffen. Diese Messung wurde von einem zentralen Punkt im Raum aus durchgeführt. Das VRX 900 System war bei der Messung um 1.2 dB lauter als das Lambda Labs System, da sich der Pegel an den Verstärkern nicht zu 100% angleichen lässt. Die Messungen sind in den folgenden zwei Abbildungen ersichtlich.

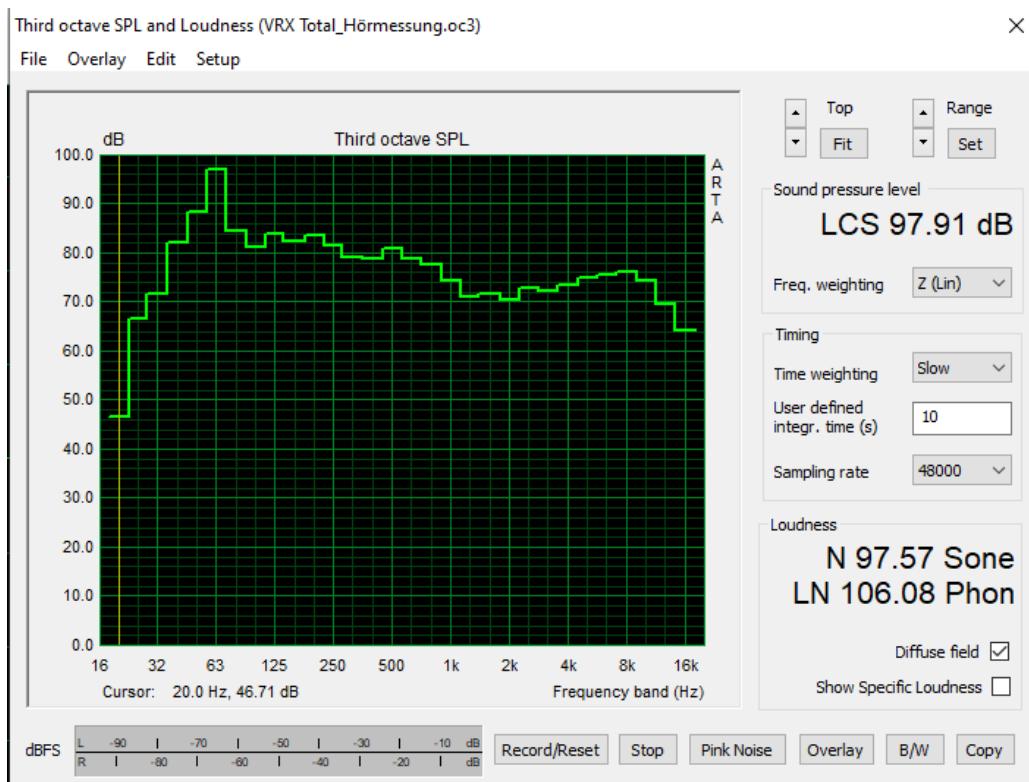


Abbildung 67. C gewichtete Loudnessmessung des JBL VRX 900 Systems.

## 8 Experiment

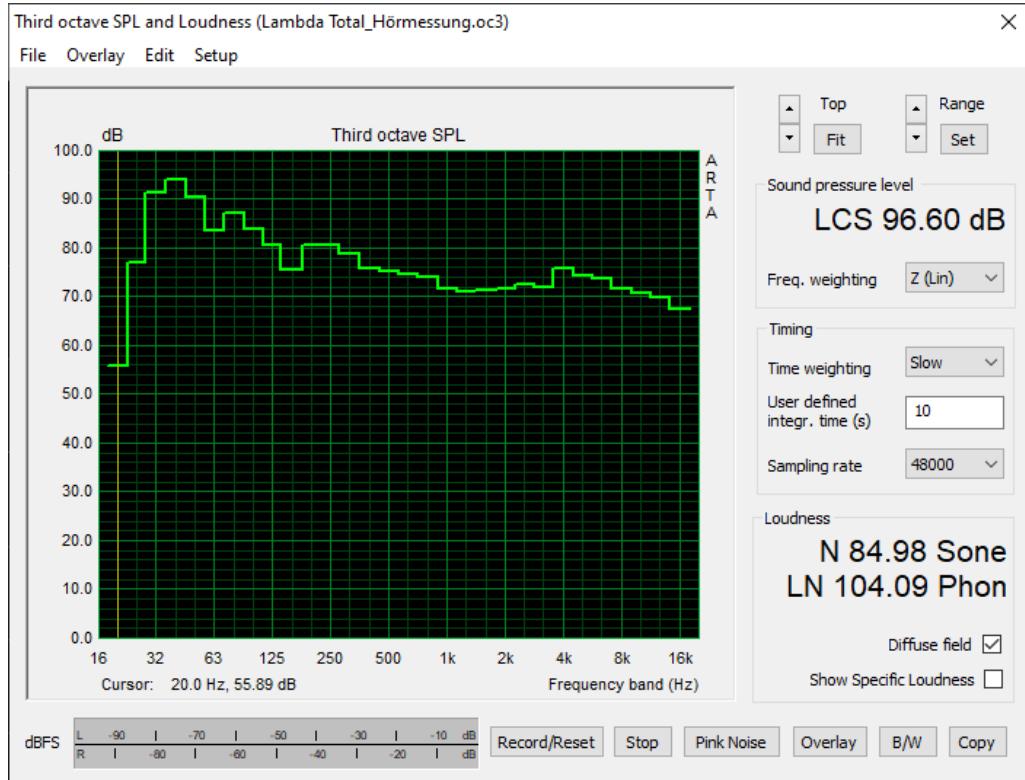


Abbildung 68. C gewichtete Loudnessmessung des Lambda Labs Systems.

### 8.6.3 Ablauf

Die ProbandInnen wurden in den Testsaal geführt, wo sie den Fragebogen erhielten, welcher eine kurze Erklärung des Ablaufs enthält. Der Fragebogen ist in drei Abschnitte unterteilt, wobei die ersten zwei ident sind. Diese dienen jeweils zur Beschreibung eines der beiden Lautsprechersysteme. Der dritte Abschnitt dient dem direkten A/B Vergleich der beiden Lautsprechersysteme und frägt einige demografische Daten ab.

Nachdem sich die ProbandInnen mit dem Fragebogen vertraut gemacht hatten, hörten sie 10 Musikausschnitte mit einer Gesamtlänge von in etwa 15 Minuten über das erste der beiden zu testenden Lautsprechersysteme. Während dieser Zeit wurde der entsprechende Abschnitt des Fragebogens ausgefüllt.

Dieser Vorgang wurde für das zweite Lautsprechersystem respektive den zweiten Abschnitt des Fragebogens wiederholt.

Im Anschluss wurden 2 Musikausschnitte im direktem A/B Vergleich auf den beiden Lautsprechersystemen gehört und der letzte Abschnitt des Fragebogens beantwortet.

Nach Abgabe der Fragebögen hatten die ProbandInnen die Möglichkeit sich Musik ihrer Wahl über die beiden Systeme anzuhören.

## 8 Experiment

Im Fragebogen sowie in der Auswertung wird das Lautsprechersystem der Firma JBL als System A und dementsprechend das Lautsprechersystem der Firma Lambda Labs als System B bezeichnet.

### 8.6.4 Auswertung

Die Fragebögen wurden gesammelt, ausgewertet und die Ergebnisse für beide Systeme wurden gegenübergestellt. Hierfür wurden mithilfe von Excel Diagramme erstellt, um den Vergleich der Ergebnisse zu verdeutlichen. Außerdem wurden die Ergebnisse der ProbandInnen, welche sich selbst als audiophil beziehungsweise als nicht audiophil bezeichnen, gemittelt, um heraus zu finden, ob es zwischen den Ergebnissen dieser Personengruppen starke Abweichungen gibt oder nicht.

### 8.6.5 Vergleich der Lautsprechersysteme

Wie bereits vorab erwähnt wurden im Fragebogen zum Vergleich von Lautsprechersystemen die von Atkinson beschriebenen Bereiche abgedeckt, Vergleich wird auch nach diesen Bereichen aufgeschlüsselt. Der Fragebogen ist im Anhang (Anhang E, S. 128) beigelegt.

#### 8.6.5.1 Technische Genauigkeit

Um die technische Genauigkeit im Fragebogen darzustellen wurden die ProbandInnen gefragt, wie akkurat das jeweilige Lautsprechersystem in seiner Wiedergabe sei.

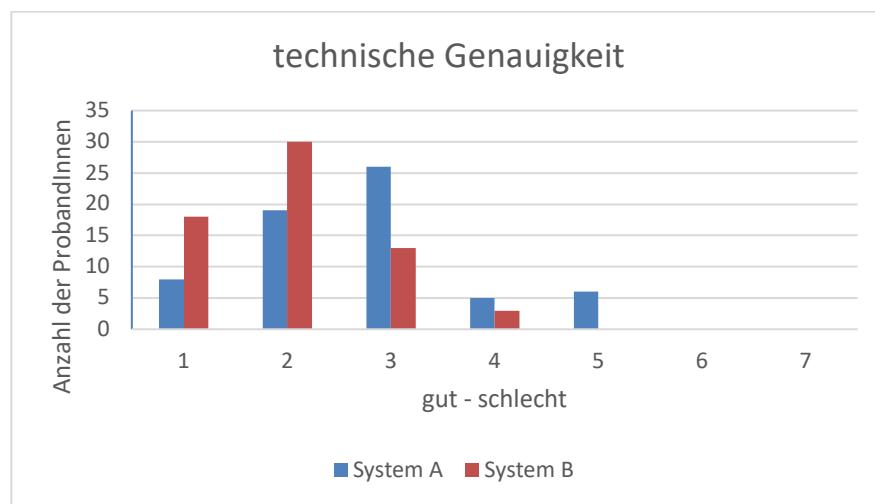


Abbildung 69. Auswertung des Testparameters technische Genauigkeit.

Beide Systeme schnitten bei der Auswertung dieses Parameters gut ab, wobei das Lambda Labs System (System B) die Auswertung deutlich anführt. 7% der ProbandInnen tendierten beim JBL System (System A) zu einer eher nicht akkurate Wiedergabe, wohingegen 28% der befragten Personen dem Lambda Labs System die Bestnote gaben. Im Schnitt bewerteten audiophile ProbandInnen System A mit 3 und System B mit 2.1. Nicht audiophile ProbandInnen bewerteten

## 8 Experiment

System A mit 2.5 und System B mit 1.9. Nicht audiophile tendierten bei diesem Parameter also dazu, den Systemen bessere Bewertungen zu geben als audiophile. Der Unterschied in der durchschnittlichen Bewertung der beiden Systeme ist bei nicht audiophilen ProbandInnen geringer als bei audiophilen.

(Als audiophile Persona werden in der Testauswertung die ProbandInnen gewertet, die sich im Test bei der entsprechenden Frage mit 1 oder 2 bewertet haben. Personen die sich mit 5, 6 oder 7 bewertet haben werden als nicht audiophil bewertet.)

Insgesamt wurde System A im Schnitt mit 2.7 und System B mit 2.0 bewertet, was bestätigt, dass das Lambda Labs System die Auswertung dieses Parameters anführt.

### 8.6.5.2 *Musikalische Genauigkeit*

Die musikalische Genauigkeit wurde mit der Frage: „Wie nahe ist Lautsprechersystem daran einen Klang zu produzieren, der Sie überzeugt, live zuzuhören?“ abgefragt.

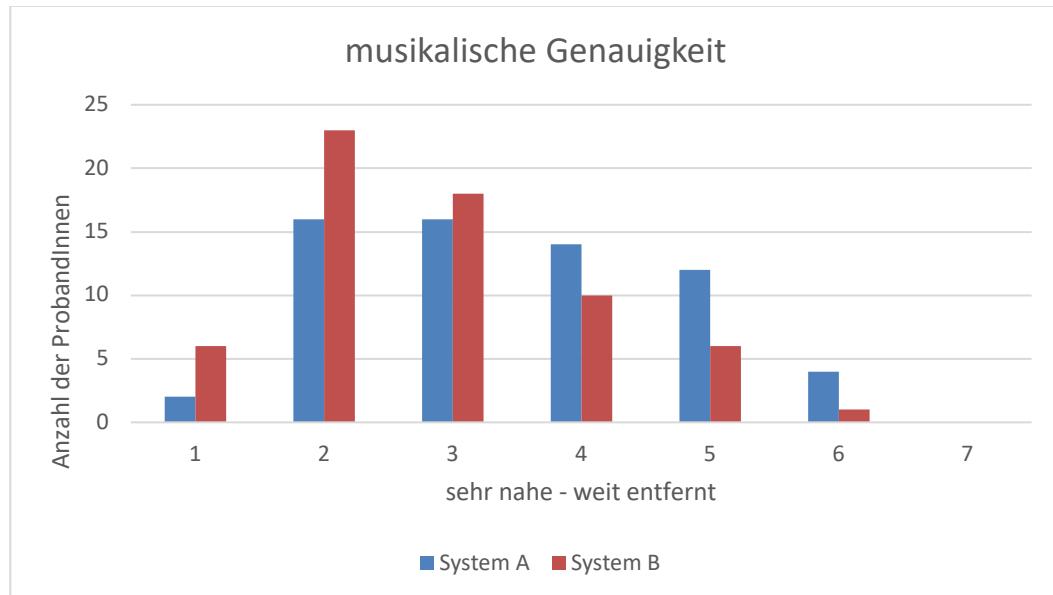


Abbildung 70. Auswertung des Parameters *musikalische Genauigkeit*.

Bei diesem Parameter sind die Ergebnisse für beide Systeme deutlich breiter verteilt. Allgemein lässt sich feststellen, dass auch bei diesem Parameter das Lambda Labs System (System B) besser abgeschnitten hat als das JBL System (System A). Nur 3% der TeilnehmerInnen gaben System A die Bestnote und nur 9% System B, wohingegen 21% System A und 15% System B eine neutrale Bewertung gaben. Bei System A verteilen sich die Angaben der Probanden stark über das Mittelfeld, im Schnitt wurde es mit 3.5 bewertet. Im Gegensatz dazu tendierten bei System B ein Großteil der ProbandInnen zu einer eher guten Bewertung. Im Schnitt liegt diese bei 2.8 für das System B. Betrachtet man den Unterschied der Auswertungen von audiophilen und nicht audiophilen ProbandInnen zu diesem Parameter so stellt man fest, dass auch hier die nicht

## 8 Experiment

audiophilen beide Lautsprechersysteme besser bewerten als audiophile. Es lässt sich ein Trend dazu feststellen, dass audiophile ProbandInnen eine kritischere Bewertung als nicht audiophile abgeben.

Betrachtet man die Ergebnisse beider Auswertungen zu diesen Parametern, so kann festgestellt werden, dass das System der Firma Lambda Labs (System B) in diesem Bereich besser abgeschnitten hat als das System der Firma JBL (System A).

### 8.6.5.3 Frequenzgang

Um die subjektive Wahrnehmung des Frequenzgangs der beiden Lautsprechersysteme festzustellen wurden die ProbandInnen gefragt, ob die Behauptung, dass der Klang der Lautsprechersysteme an allen Frequenzextremen voll ausgeschöpft wird und dass der Klang in allen Frequenzbereichen vollkommen reproduziert wird, zutrifft. Hierfür wurde der Frequenzgang in drei Bereiche unterteilt (Höhen, Mitten und Tiefen). Die Ergebnisse für diese Bereiche sind für beide Systeme in folgender Grafik dargestellt.

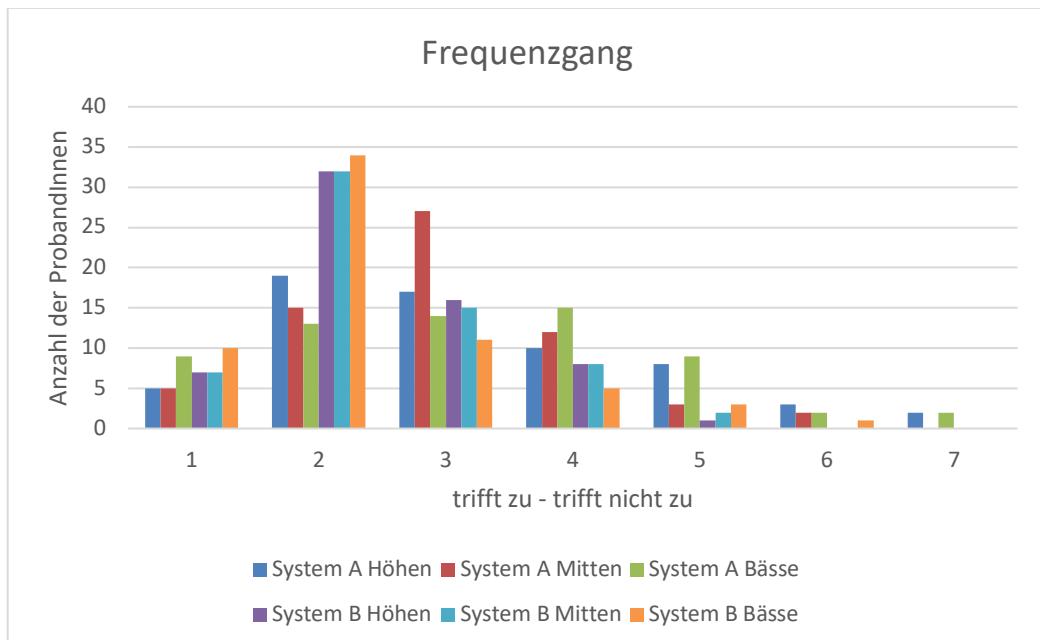


Abbildung 71. Auswertung des Parameters Frequenzgang

Betrachtet man alle drei Frequenzbereiche gemeinsam, so erhielt das JBL System (System A) im Schnitt eine Bewertung von 3.1. Im Vergleich dazu wurde das Lambda Labs System bei Betrachtung aller drei Frequenzbereiche gemeinsam mit 2.4 bewertet. Das Lambda Labs System schnitt also bei der Auswertung dieses Parameters besser ab als das System der Firma JBL. Auch bei diesem Parameter setzt sich der bereits beschriebene Trend fort, dass audiophile ProbandInnen kritischer urteilen als nicht audiophile.

## 8 Experiment

### 8.6.5.4 Koloration (Färbung)

Dieser Parameter wurde ermittelt, indem die ProbandInnen gefragt wurden, ob die Instrumente in den verschiedenen Musikstücken, welche sie im Laufe des Tests hörten, verfärbt oder natürlich klingen.

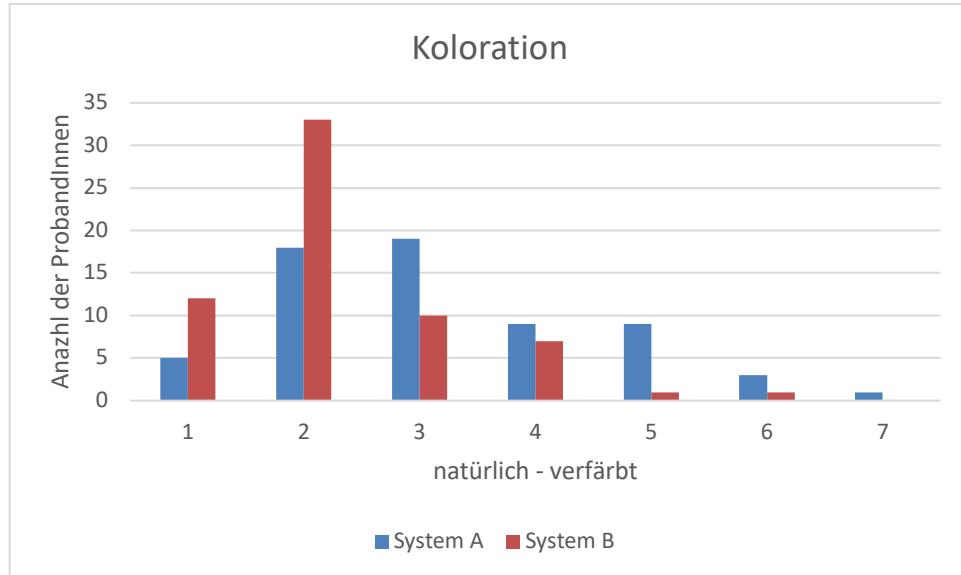


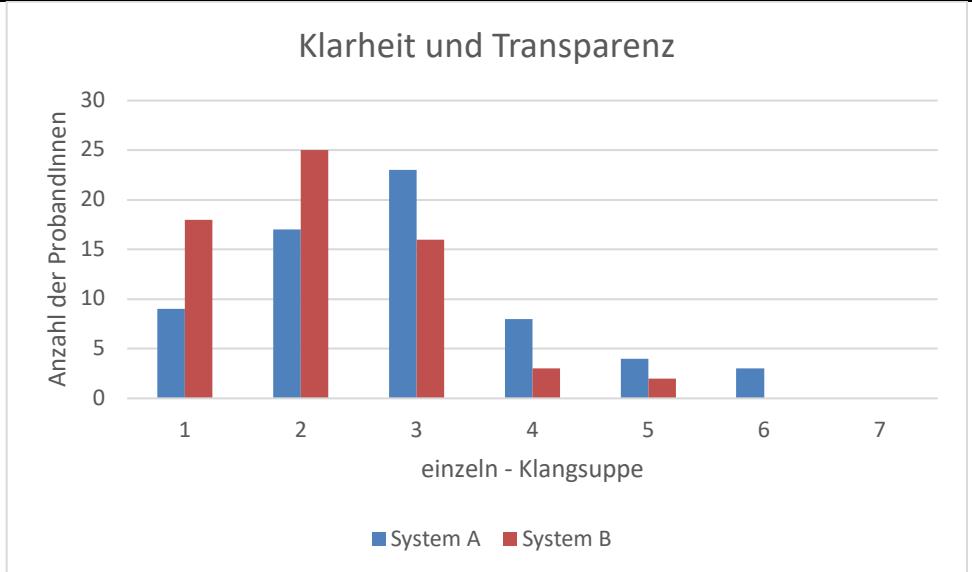
Abbildung 72. Auswertung des Parameters Koloration.

Im Schnitt wurde das JBL System (System A) mit 3.2 bewertet. Das System der Firma Lambda Labs mit 2.3, dieses schnitt demnach bei diesem Parameter besser ab. Der bereits erwähnte Trend bezüglich der kritischeren Bewertung audiophiler Hörer setzt sich auch bei diesem Parameter weiter fort.

Im Allgemeinen lässt sich die Aussage treffen, dass keines der beiden Systeme eine 100% natürliche Klangwiedergabe aufweist, System B dennoch überzeugender in Bezug auf diesen Parameter war.

### 8.6.5.5 Klarheit und Transparenz

Um den Parameter Klarheit und Transparenz der Lautsprechersysteme auszuwerten wurden die ProbandInnen gefragt, wieviel Detail in der Klangwiedergabe der Lautsprechersysteme hörbar sei. Dabei sollten sie besonders darauf achten, ob Instrumente eher einzeln oder gemeinsam in einem Klangteppich erklingen.



*Abbildung 73. Auswertung des Parameters Klarheit und Transparenz.*

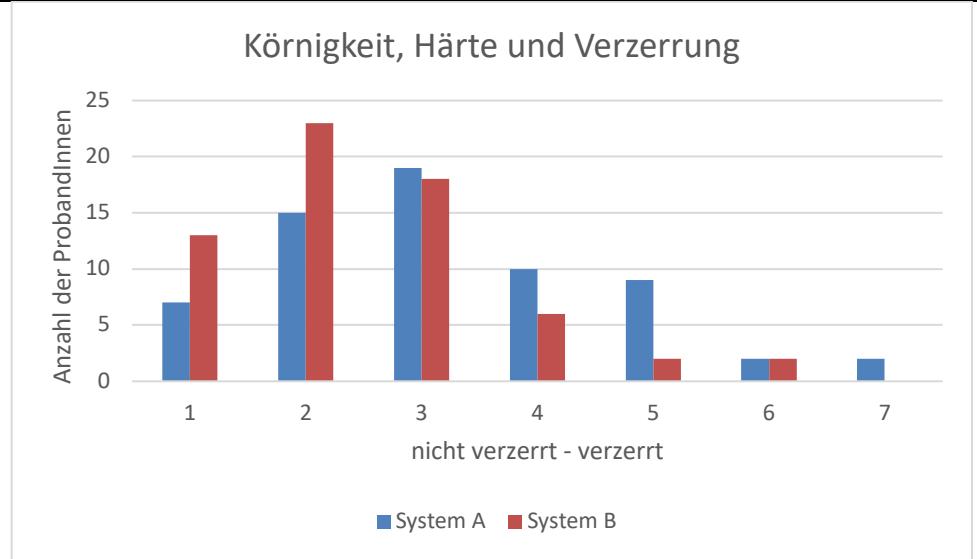
Bei diesem Parameter schnitten beide Lautsprechersysteme durchwegs gut ab, wobei es beim JBL System (System A) zu einigen Ausbrüchen kam. Im Schnitt erhielt das JBL System eine Bewertung von 2.8. Das Lambda Labs System erhielt im Schnitt eine Bewertung von 2.2, wurde also auch bei diesem Parameter besser bewertet als das JBL System. Neben dem bereits beschriebenen Trend bezüglich audiophiler Hörer kann nunmehr auch ein zweiter Trend, der das bessere Abschneiden des Lambda Labs Systems bezüglich des subjektiven Klangeindrucks betrifft, formuliert werden.

#### 8.6.5.6 Körnigkeit, Härte und Verzerrung

Um diese Frage zu beantworten, wurde die Wiedergabelautstärke des jeweiligen Lautsprechersystems Inputseitig um 10 dB angehoben. Diese Lautstärkeerhöhung fand im jeweiligen Durchlauf bei dem Musikausschnitt „Anvoyé“ von Chinese Man aus dem Album Shikantaza (Chinese Man, 2017) statt, da sich dieses Musikstück aufgrund seiner Beschaffenheit (Mischung natürlicher Instrumente und elektronischer Klänge) gut eignet um festzustellen, ob das Lautsprecher-system bei hoher Wiedergabelautstärke verzerrt klingt.

Während des Tests wurde das Stück mit der gleichen Wiedergabelautstärke wie auch die anderen Musikstücke abgespielt. Im Laufe des Stücks wurde der Pegel um die bereits besagten 10 dB angehoben. Nach circa einer Minute wurde der Wiedergabepegel wieder auf den Ausgangspunkt reduziert, damit die ProbandInnen die Möglichkeit hatten den Klang bei hohem Wiedergabepegel mit dem bei moderatem Wiedergabepegel zu vergleichen.

## 8 Experiment



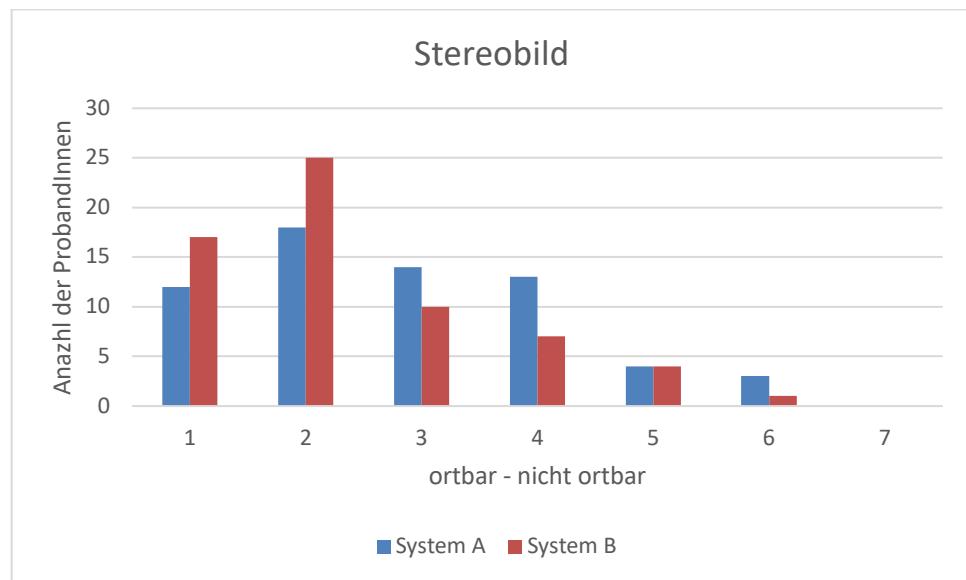
*Abbildung 74. Auswertung des Parameters Körnigkeit, Härte und Verzerrung.*

Der Trend bezüglich audiophiler ProbandInnen setzt sich in der Auswertung dieses Parameters nicht mehr fort, da audiophile dem JBL System (System A) bei diesem Bereich eine bessere Bewertung gegeben haben als nicht audiophile.

Der Trend, dass das Lambda Labs System (System B) in der subjektiven Bewertung besser abschneidet setzt sich allerdings fort. System B wurde im Schnitt mit 2.5 und System A mit 3.2 bewertet.

### 8.6.5.7 Stereo Bild

Um die Stereoperfomance des Systems zu überprüfen wurden die ProbandInnen gefragt, ob es für sie möglich sei die einzelnen Instrumente, welche in den Musikstücken vorkommen, zu orten, also festzustellen, wo diese im Raum klingen.



*Abbildung 75. Auswertung des Parameters Stereobild.*

## 8 Experiment

Bezüglich dieses Parameters waren sich audiophile und nicht audiophile ProbandInnen einig und vergaben dieselbe Bewertung für beide Systeme. Das JBL System (System A) wurde im Schnitt mit 2.8, das Lambda Labs System mit 2.4 bewertet. Der Trend, dass das Lambda Labs System in der subjektiven Bewertung besser abschneidet, setzt sich also – wenn auch mit geringerem Abstand – weiter fort.

Allgemeinen kann gesagt werden, dass beide Systeme bei diesem Parameter eine gute Performance abgelegt haben. 46% der ProbandInnen vergaben ihre Wertung für das JBL System (System A) auf den obersten Rängen. Beim Lambda Labs System waren dies 65% der ProbandInnen.

### 8.6.5.8 Macrodynamik

Um die Macrodynamik im Fragebogen darzustellen wurden die ProbandInnen gefragt, ob laute Passagen in den Musikausschnitten deutlich lauter sind als leise Passagen.

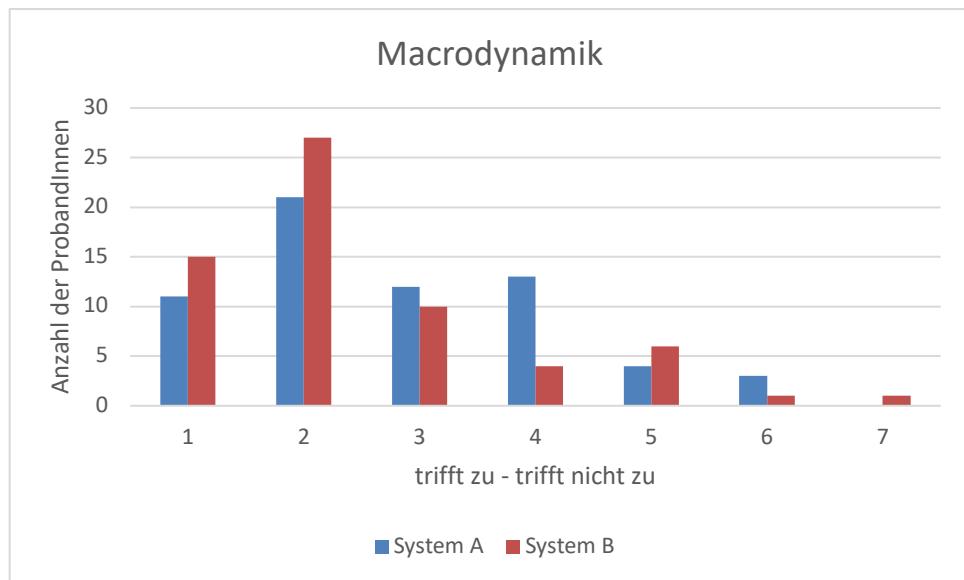


Abbildung 76. Auswertung des Parameters Makrodynamik.

Beide Systeme erhielten eine gute Bewertung bezüglich dieses Parameters. Das JBL System (System A) wurde im Schnitt mit 2.8 und das Lambda Labs System mit 2.5 bewertet. Audiophile ProbandInnen bewerteten diesen Parameter dem vorab beschrieben Trend entsprechend, wieder wesentlich kritischer als nicht audiophile. So erhielt das JBL System (System A) von audiophilen eine Bewertung von 3.3 im Vergleich zu 2.8 bei nicht audiophilen. Beim Lambda Labs System (System B) fiel dieser Unterschied sogar noch stärker aus. Audiophile bewerteten dieses mit 2.6 und nicht audiophile mit 1.7. Dies entspricht der bisher höchsten Abweichung in der Bewertung, die von diesen zwei Gruppen abgegeben wurde.

## 8 Experiment

### 8.6.5.9 Microdynamik

Die microdynamischen Eigenschaften des Systems wurden mit der Frage: „Können subtile Änderungen in der Musik wahrgenommen werden, wenn gleichzeitig etwas sehr Lautes passiert?“, durch die ProbandInnen beschrieben.

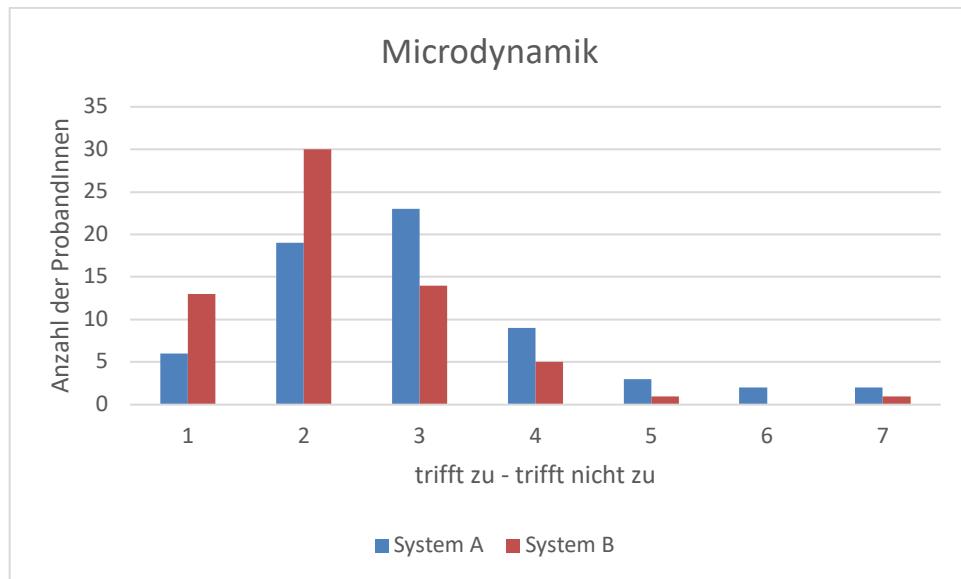


Abbildung 77. Auswertung des Parameters Microdynamik.

Das Lambda Labs System (System B) führt diese Auswertung an. Im Schnitt erhielt es eine Bewertung von 2.3. Das JBL System (System A) wurde im Schnitt mit 3.0 bewertet. Der Trend, dass das Lambda Labs System besser abschneidet setzt sich weiter fort.

### 8.6.5.10 Optisches Bild

Die ProbandInnen wurden gefragt, wie sehr ihnen das optische Bild des jeweiligen Lautsprechersystems zusagen würde, da dies oft auch ein wichtiger Designfaktor für Lautsprechersysteme ist.

## 8 Experiment

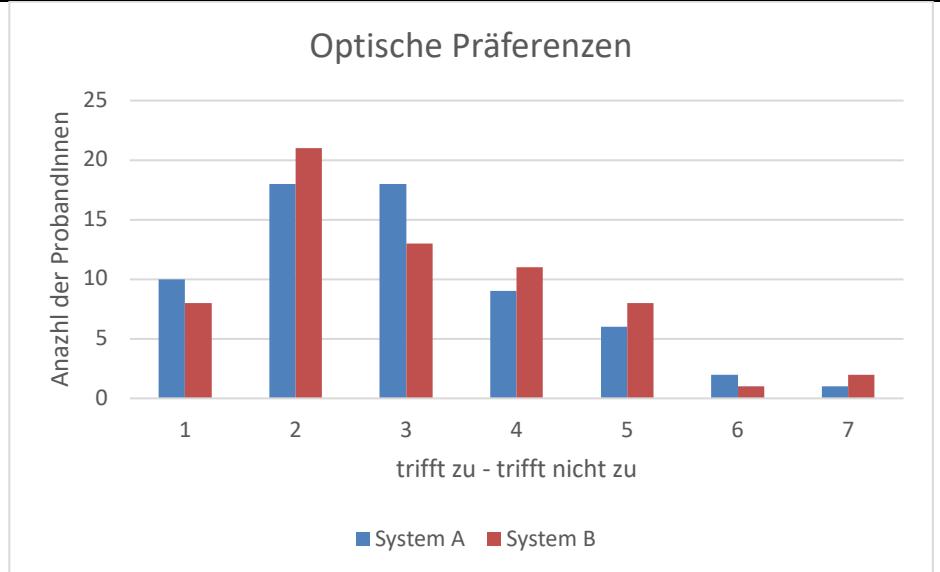


Abbildung 78. Auswertung des Parameters Optische Präferenzen.

Bei der Auswertung dieses Parameters schnitt das JBL System (System A), erstmals besser ab als das Lambda Labs System (System B), wobei der Unterschied der Wertungen im Schnitt so gering ist, dass dieser auch vernachlässigt werden kann. Das JBL System (System A) erhielt im Schnitt einer Wertung von 2.9 im Vergleich zu der Wertung von 3.0, welche das Lambda Labs System (System B) erhielt. Betrachtet man die Auswertung bezüglich audiophiler und nicht audiophiler ProbandInnen so ist festzustellen, dass nicht audiophile ProbandInnen das JBL System dem Lambda Labs System optisch bevorzugen. Bei audiophilen ProbandInnen verhält sich dies umgekehrt.

### 8.6.5.11 Pace 'n' rythm (Tempo und Rhythmus)

Atkinson definiert diesen Parameter nach Colloms wie folgt.

Some loudspeakers clearly make the music sound like it's going slowly, while others make it sound like it's going faster, even though the recording's playing time and the music's tempo obviously cannot be affected by anything that a loudspeaker does.

Colloms zitiert nach (Atkinson, 1997, S. 2)

Um diesen Parameter im Fragebogen darzustellen, wurden die ProbandInnen gefragt, ob es zutreffen würde, dass das jeweilige Lautsprechersystem das Tempo des Musikstücks schneller wirken ließe.

Hierfür wurde der Musikausschnitt aus The Race von Yello entnommen dem Album Sound Check-the Professional Audio Test Disc (Alan Parsons Project, 1995) im direkten A/B Vergleich auf beiden Lautsprechersystemen abgespielt. Dieser Musikausschnitt eignet sich aufgrund seines markanten Grooves besonders gut für die Beantwortung dieses Parameters.

Es wurden zwei Durchläufe des Musikstücks durchgeführt, um den ProbandInnen genügend Zeit zu geben sich eine Meinung zu diesem Parameter zu bilden. Die

## 8 Experiment

Wiedergabe wurde auf System A (JBL System) begonnen und ca. alle 30 Sekunden wurde das Lautsprechersystem gewechselt. Diese Wechsel wurden angesagt, um sicherzustellen, dass die ProbandInnen wussten, welches der beiden Lautsprechersysteme im Moment verwendet wurde.

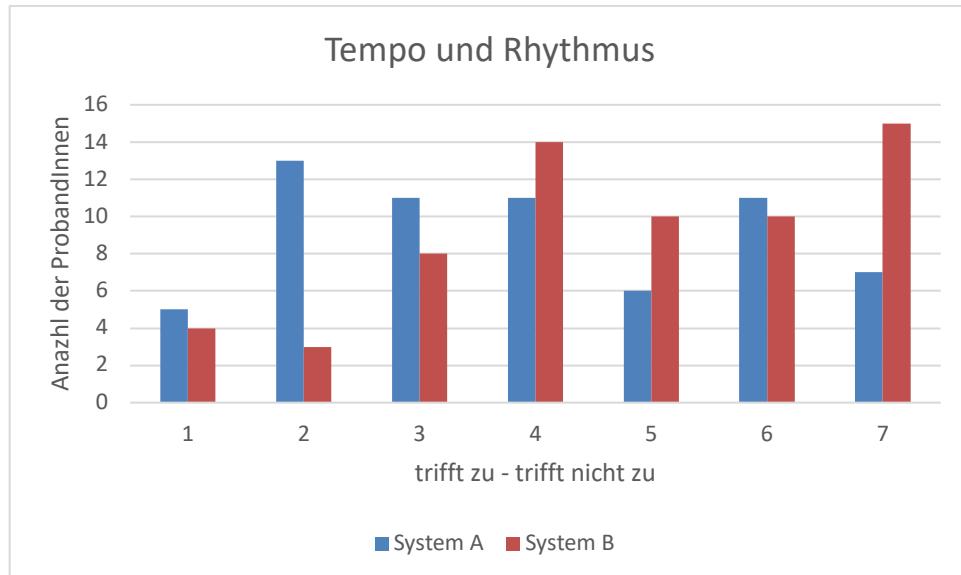


Abbildung 79. Auswertung des Parameters *Tempo und Rhythmus*.

Die Auswertung dieses Parameters fiel für beide Systeme sehr breit aus, wie in der Grafik dazu ersichtlich ist. Deshalb ist es schwer eine klare Aussage bezüglich dieses Parameters zu treffen. Im Schnitt tendierten die ProbandInnen dazu das JBL System (System A) mit 4.0 und das Lambda Labs System (System B) mit 4.8 zu bewerten was darauf hinweist, dass sich die ProbandInnen im insgesamten eher unsicher waren was diesen Parameter betrifft. Im Schnitt hatten 39% der ProbandInnen nicht das Gefühl, dass das Lambda Labs System (System B) das Tempo des Musikstücks beeinflussen würde. Beim JBL System (System A) war dies für 28% der ProbandInnen der Fall.

### 8.6.5.12 Allgemeine Präferenz der ProbandInnen

Nach dem Ende des Hörtests wurden die ProbandInnen gefragt, welches der beiden Lautsprechersysteme ihnen insgesamt mehr zu sagen würde, um festzustellen ob dies mit den Ergebnissen der einzelnen Parameter korrellierbar sei.

## 8 Experiment

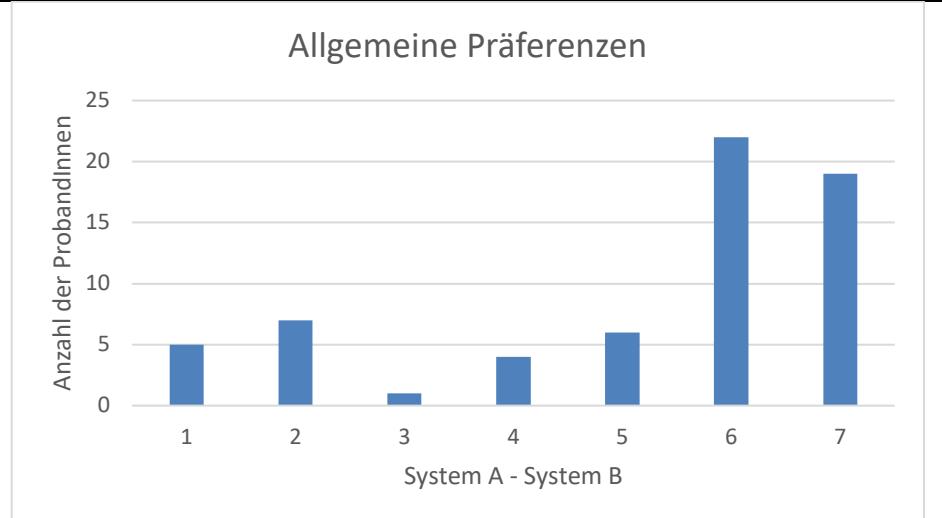


Abbildung 80. Auswertung der Präferenzen der ProbandInnen bezüglich der beiden Lautsprechersysteme.

Wie in der Grafik deutlich ersichtlich ist, tendierte ein Großteil der ProbandInnen zum Lambda Labs System (System B). Dies bestätigt auch den Trend, dass das Lambda Labs System im Allgemeinen besser abschneidet als das JBL System. Die Bewertung audiophiler und nicht audiophiler ProbandInnen dieses Parameters unterscheidet sich nur marginal und kann daher vernachlässigt werden.

### 8.6.5.13 Persönliche Hörgewohnheiten der ProbandInnen

Wie bereits vorab erwähnt wurden folgende zwei Parameter in den Fragebogen aufgenommen, um die Relevanz der Gruppe an ProbandInnen festzustellen.

#### 8.6.5.13.1 Häufigkeit des Musikkonsums

Die Häufigkeit des Musikkonsums der ProbandInnen zeigt, dass ein Großteil der ProbandInnen, die am Versuch teilgenommen haben, der Meinung sind sehr oft Musik zu konsumieren. Dies ist in folgender Grafik ersichtlich.

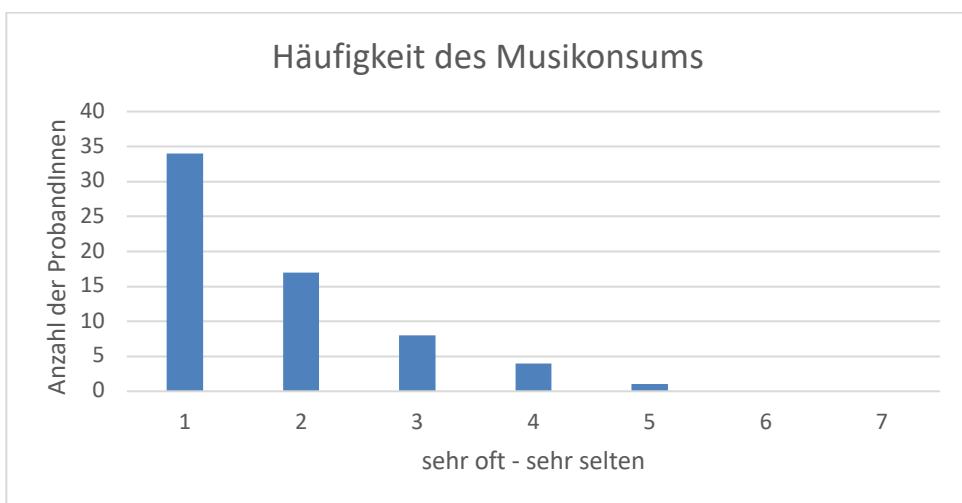


Abbildung 81. Häufigkeit des Musikkonsums der ProbandInnen.

## 8 Experiment

### 8.6.5.13.2 Audiophilie der ProbandInnen

Die ProbandInnen wurden darum gebeten selbst einzuschätzen ob sie sich selbst als audiophile HörerInnen bezeichnen würden.

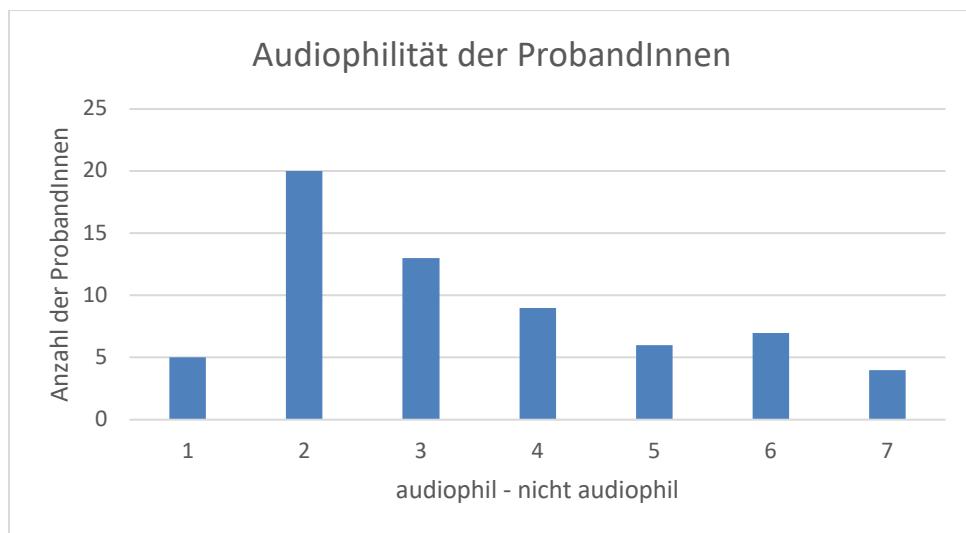


Abbildung 82. Selbsteinschätzung bezüglich Audiophilie der ProbandInnen.

Die Auswertung ergab, dass 39% der ProbandInnen dazu tendieren sich selbst als audiophile HörerInnen zu bezeichnen. Vorab wurden bereits die Ergebnisse audiophiler und nicht audiophiler ProbandInnen bezüglich einzelner Parameter verglichen und es wurde festgestellt, dass audiophile HörerInnen dazu neigen die Lautsprechersysteme kritischer zu bewerten als nicht audiophile.

### 8.6.6 Ergebnis der Auswertung des Fragebogens zum Vergleich von Lautsprechersystemen

Im Allgemeinen kann gesagt werden, dass beide Systeme in der subjektiven Auswertung relativ gut abgeschnitten haben, jedoch konnte keines der beiden Systeme in keinem der Parameter die ProbandInnen vollkommen von sich überzeugen.

Betrachtet man die Auswertung aller subjektiven Testparameter gemeinsam, so stellt man fest, dass das Lambda Labs System bei jedem Parameter, außer dem der optischen Präferenzen, besser abgeschnitten hat als das JBL System. Bei der optischen Wertung liegen die beiden Lautsprechersysteme gleich auf.

Es konnte, wie bereits vorab erwähnt, festgestellt werden, dass audiophile HörerInnen kritischer in der Vergabe ihrer Wertungen sind als nicht audiophile. Die Vermutung liegt nahe, dass HörerInnen, die sich selbst als audiophil bezeichnen, in ihrem privaten Musikkonsum höherwertiges Equipment verwenden und deshalb höhere Ansprüche an Lautsprechersysteme stellen.

Es konnte kein Zusammenhang zwischen den im Wasserfalldiagramm ersichtlichen Resonanzen des Lautsprechersystems der Firma Lambda Labs und dessen Performance im Hörtest gefunden werden. Zumindestens führen die im Test sichtbaren Resonanzen nicht dazu, dass das System schlechter bewertet wird

## **8 Experiment**

---

als das JBL-System, bei dem Resonanzen im Wasserfalldiagramm nicht in dem Maß sichtbar sind.

Atkinson schreibt, dass es offensichtlich ist, dass es keine direkte Korrelation zwischen subjektiven Höreindrücken und den Ergebnissen technischer Messungen gibt. Dennoch ist der subjektive Höreindruck von hoher Wichtigkeit, da mittels technischens Messungen ein Lautsprechersystem nicht vollkommen beschrieben werden kann. (Atkinson, 1997, S. 2–3)

## 9 Fazit

In dieser Arbeit wurden zunächst die physikalischen Gesetzmäßigkeiten der Schallausbreitung betrachtet, welche die Grundlage für die erfolgte theoretische Beschreibung von Hornlautsprechersystemen und Line-Array Systemen bildet.

Es wurden Interviews mit Experten im Bereich Lautsprechersysteme geführt, um Aufschluss über neue Strategien in der Weiterentwicklung von horngeladenen Lautsprechersystemen zu erhalten. Gemeinsam mit der theoretischen Betrachtung der Systeme ließen sich so Kompromisse aufzeigen, die bei der Entwicklung von Lautsprechersystemen eingegangen werden müssen.

Es wurden neue Strategien für die Entwicklung von Hornlautsprechersystemen vorgestellt, wobei erwähnt werden muss, dass Hersteller nur sehr zurückhaltend in der Offenlegung dieser neuen Strategien sind.

In dieser Arbeit wurde ein Vergleich eines modernen Hornlautsprechersystems und eines Line-Array Systems durchgeführt, um Unterschiede in der Handhabung der beiden Systemarten aufzuzeigen. Dieser Vergleich wurde in Form eines Experiments auf zwei Ebenen durchgeführt. Erstens: auf objektiver Ebene durch technische Messungen nach Atkinson (Atkinson, 1997). Es wurden Methoden der Durchführung dieser Messungen mittels der Messsoftwarefamilie ARTA präsentiert. (Mateljan, 2019c) Zweitens: auf subjektiver Ebene durch einen Hörtest, welcher durch einen Fragebogen unterstützt wurde. Dieser Fragebogen basiert auf den von Atkinson aufgestellten Parametern zur subjektiven Beurteilung von Lautsprechersystemen (Atkinson, 1997). Mittels dieses Fragebogens wird überprüft, ob HörerInnen Unterschiede in der Klangqualität der beiden zu vergleichenden Lautsprechersysteme feststellen können.

Die beiden im Testverfahren zu vergleichenden Lautsprechersysteme werden im folgendem System A (JBL VRX900 Serie), und System B (Lambda Labs System) genannt.

Diese beiden Systeme wurden technisch beschrieben. Bei der Betrachtung der Ergebnisse der technischen Messungen (Punkt 8.5) konnte festgestellt werden, dass das System B besser abschnitt als System A.

Bei Betrachtung der Ergebnisse der Auswertung des Fragebogens zum Vergleich von Lautsprechersystemen (Punkt 8.6.6) konnte festgestellt werden, dass beide Systeme eine gute Performance abgeliefert haben, jedoch keines der Systeme die ProbandInnen vollkommen überzeugen konnte. Das System B schnitt auch bei der Auswertung des subjektiven Teils des Testverfahrens besser ab als das System A.

Wie bereits vorab erwähnt schreibt Atkinson, dass es offensichtlich ist, dass es keine direkte Korrelation zwischen subjektiven Höreindrücken und den Ergebnissen technischer Messungen gibt. (Atkinson, 1997, S. 2–3) In der Auswertung des Experiments zu dieser Arbeit konnte jedoch festgestellt werden,

## **9 Fazit**

---

dass die Gesamtergebnisse der subjektiven und der objektiven Auswertung die gleichen Tendenzen aufweisen.

Das mittels ARTA aufgestellte Messverfahren bildet gemeinsam mit dem Fragebogen zum Hörtest ein Instrument zum subjektiven und objektiven Vergleich von Lautsprechersystemen.

Die beim Aufbau der beiden Lautsprechersysteme festgestellten Unterschiede in der Handhabung bestätigen die von Michael Pohl im Interview zu dieser Arbeit aufgestellte Hypothese, dass mit konventionellen Lautsprechersystemen die gleichen Ergebnisse wie mit Line Arrays erzielt werden können. Dies bedarf allerdings einer Menge an Zeit, Erfahrung und intensiver Planung. Allerdings Wenn man Erfahrung der Operatoren und Planung ignoriert, wird einem das beste Lautsprechersystem nichts nutzen. Außerdem sollte man nie das KISS Prinzip aus den Augen verlieren: Keep it simple stupid! - Je mehr Lautsprecher man verwendet, desto mehr Probleme wird man haben. (Michael Pohl, 2019, Anhang C, S. 116)

Das ideale Lautsprechersystem existiert meiner Meinung nach nicht. Die Anforderungen an die Systeme sind je nach Anwendung sehr unterschiedlich. Deswegen sind spezialisierte Lösungen notwendig, welche dann zwar in einem Bereich nahezu perfekt funktionieren können, aber genau dadurch für einen anderen Bereich nicht anwendbar sind (Vergleich Studiomonitor, PA-Anlage).

# Literaturverzeichnis

- Alan Parsons Project. (1995). *Sound Check—the Professional Audio Test Disc* [Album].
- Andreas Plodek. (2019, November 28). *persönliches Interview mit Andreas Plodek—Gründer und Inhaber der Firma Realhorns*.
- Aspiro AB. (2019). Masters. Abgerufen 3. Dezember 2019, von TIDAL - High Fidelity Music Streaming website: <https://tidal.com/masters>
- Atkinson, J. (1997, September 1). *Loudspeakers: What Measurements Can Tell Us—and What They Can't Tell Us!* Gehalten auf der Audio Engineering Society Convention 103. Abgerufen von <http://www.aes.org/e-lib/online/browse.cfm?elib=7171>
- Bright, A. (2003, März 1). *Analysis of the Folded Horn*. Gehalten auf der Audio Engineering Society Convention 114. Abgerufen von <http://www.aes.org/e-lib/browse.cfm?elib=12609>
- Camo & Krooked. (2017). *Mosaik* [Album].
- Case, A., Day, A., & O'Reilly for Higher Education (Firm). (2018). *Designing with Sound*. Abgerufen von <https://www.safaribooksonline.com/library/view/-/9781491961094/?ar>
- Chinese Man. (2017). *Shikantaza* [Album].
- Davis, D., Patronis, E., Brown, P., & Ballou, G. (2013). *Sound system engineering* (Fourth edition). Burlington, MA: Focal Press.
- d&b audiotechnik GmbH & Co. KG. (2019a). Augmented arrays | d&b audiotechnik. Abgerufen 29. November 2019, von <https://www.dbaudio.com/global/de/produkte/produkttypen/augmented-arrays/>
- d&b audiotechnik GmbH & Co. KG. (2019b). GSL8 Lautsprecher—SL-Series | d&b audiotechnik. Abgerufen 18. November 2019, von <https://www.dbaudio.com/global/de/produkte/serien/sl-serie/gsl8/>
- Dipl. Ing. Holtmeyer, V. (2003, März 5). *Mysterium Line-Array—Mode oder Trend?* 8. Abgerufen von <http://www.volkerholtmeyer.de/publikationen/CAVIS-2003-VH-Line-Array.pdf>
- Dipl. Ing. Holtmeyer, V. (2006, April). *Line Arrays—The Hype Goes On.* 6. Abgerufen von <http://www.volkerholtmeyer.de/publikationen/CAVIS-2003-VH-Line-Array.pdf>
- Eargle, J. (2003). *Loudspeaker Handbook* (2. Aufl.). Abgerufen von <https://www.springer.com/de/book/9781402075841>
- Foals. (2019). *Exits* [Album].
- Geddes, E. R. (1989). Acoustic Waveguide Theory. *Journal of the Audio Engineering Society*, 37(7/8), 554–569.
- Harman. (2018a). JBL VRX918S - Passiver PA-Lautsprecher, 3.200 Watt · Audio Pro. Abgerufen 20. Dezember 2019, von <https://www.audio-pro.de/de/2823.html>

- Harman. (2018b). JBL VRX932LA - Passives Line-Array Element, 3.200 Watt · Audio Pro. Abgerufen 20. Dezember 2019, von <https://www.audiopro.de/de/2672.html>
- Harman. (2018c). VRX900 Series Products | JBL Professional. Abgerufen 18. November 2019, von JBLPro.com website: <https://www.jblpro.com/www/products/tour-sound/vrx900-series>
- Hollenberg, S. (2016). *Fragebögen: Fundierte Konstruktion, sachgerechte Anwendung und aussagekräftige Auswertung*. Springer-Verlag.
- Howe, D., & Ws, T. A. E. (2007). Head On—Line Array Vs Point Source. Night Magazine MAY 2007. *Night Magazine*, 2.
- IATE European Union terminology. (2003). IATE - Entry ID 1371614. Abgerufen 28. Dezember 2019, von <https://iate.europa.eu/entry/result/1371614/all>
- Krampera, G. (2016, Mai 18). Teil III: Punktschallquelle vs. Line Array und Einführung des VHD5.0. Abgerufen 8. Januar 2019, von KV2 Audio Techtalk website: <https://www.kv2audio.com/de/tech-talk/teil-iii-punktschallquelle-vs-line-array-und-einfuehrung-des-vhd50.html>
- Lambda Labs. (2019a). DH-18 Digitalhorn | Lambda Labs. Abgerufen 23. Oktober 2019, von <https://lambda-labs.com/de/produkte/dh-18>
- Lambda Labs. (2019b). TX-3A | Lambda Labs. Abgerufen 20. Dezember 2019, von <https://lambda-labs.com/de/produkte/tx-3a>
- Mateljan, I. (2019a, April). *ARTA - user manual*. Abgerufen von <http://www.artalabs.hr/download/ARTA-user-manual.pdf>
- Mateljan, I. (2019b, April). *LIMP - user manual*. Abgerufen von <http://www.artalabs.hr/download/LIMP-user-manual.pdf>
- Mateljan, I. (2019c, April 17). ARTA Software. Abgerufen 4. November 2019, von <http://www.artalabs.hr/>
- Meyer Sound Laboratories Incorporated. (2019a). Bluehorn System. Abgerufen 11. November 2019, von <https://meyersound.com/product/bluehorn-system/>
- Meyer Sound Laboratories Incorporated. (2019b). LYON. Abgerufen 18. November 2019, von <https://meyersound.com/product/lyon/>
- Michael Pohl. (2019, Dezember 6). *persönliches Interview mit Michael Pohl—International technical Support und Education, Meyersound*.
- Miles Davis. (2016). *Kind of Blues (Legacy Edition)* [Album].
- Nikolaus Harnoncourt. (2009). *Harnoncourt conducts JS Bach* [Album].
- NTi Audio. (2019). Was Sie schon immer über Verzerrungen wissen wollten. Abgerufen 28. Dezember 2019, von <https://www.nti-audio.com/de/service/wissen/was-sie-schon-immer-ueber-verzerrungen-wissen-wollten>
- Radio-Symphonie-Orchester Berlin, Lorin Maazel. (2011). *Stravinsky: The Firebird Suite/Falla: El Amor Brujo; El Sombrero De Tres Picos* [Album].
- Raffaseder, H. (2010). *Audiodesign: [Akustische Kommunikation, akustische Signale und Systeme, psychoakustische Grundlagen, Klangsysteme, Audioediting und Effektbearbeitung, Sounddesign, Bild-Ton-Beziehungen]* (2., aktualisierte und erw. Aufl). München: Hanser.
- Reinhard Nell. (2019, Dezember 18). *Interview mit Reinhard Nell—Gründer und*

*Entwickler der Firma Lambda Labs* [Email].

Scott Gledhill. (2019, November 24). *persönliches Interview mit Scott Gledhill (International Sales—Meyer Sound)*.

The Fairflied Four. (1997). *I Couldn't Hear Nobody Pray* [Album].

Toto. (1982). *Toto IV* [Album].

Ureda, M. S. (2001, Mai 1). *Line Arrays: Theory and Applications*. Gehalten auf der Audio Engineering Society Convention 110. Abgerufen von <http://www.aes.org/e-lib/browse.cfm?elib=9974>

Void acoustics. (2019). Hyperfold: Incubus: Compact folded horn-loaded—Upper bass loudspeaker. Abgerufen 11. November 2019, von <http://voidacoustics.com/docs/products/Hyperfold.shtml>

Webb, B., & Baird, J. (2003, April 1). *Advances in Line Array Technology for Live Sound*. Gehalten auf der Audio Engineering Society Conference: UK 18th Conference: Live Sound. Abgerufen von <http://www.aes.org/e-lib/browse.cfm?elib=12258>

Weber, H., & Mateljan, I. (2013, Dezember). *ARTA Handbuch—Deutsche Übersetzung und Ergänzungen*. Abgerufen von <http://www.artalabs.hr/AppNotes/ARTA-HB-D2.4-Rv0.1.pdf>

Weiβ, P. (2013). *Bruck an der Leitha. Eine Stadt auf dem Weg ins neue Jahrtausend 1971-2010*. Bruck an der Leitha.

Yann Tiersen. (2001). *Die fabelhafte Welt der Amelie (Das Original-Hörspiel zum Film)* [Album].

Zollner, M., & Zwicker, E. (2003). *Elektroakustik: Mit 13 Tabellen sowie 62 durchgerechneten Beispielen* (3., verb.erw. Aufl., 2. korrigierter Nachdr). Berlin: Springer.

# Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1. Kugelwelle (Zollner & Zwicker, 2003, S. 62) .....	3
Abbildung 2. Ausbreitungscharakteristik einer Kugelwelle (Dipl. Ing. Holtmeyer, 2003, S. 2).....	4
Abbildung 3. Modell einer Linienquelle (Dipl. Ing. Holtmeyer, 2003, S. 1) .....	4
Abbildung 4. Ausbreitungscharakteristik einer Linienquelle (Dipl. Ing. Holtmeyer, 2003, S. 1).....	5
Abbildung 5. Annäherung einer kleinen Linienschallquelle über mehrere Punktschallquellen. (Zollner & Zwicker, 2003, S. 78).....	5
Abbildung 6. Vertikaler Öffnungswinkel beim geraden Liniенstrahler. (Dipl. Ing. Holtmeyer, 2006, S. 4).....	7
Abbildung 7. Ausbreitung einer sphärischen Welle in einem Konustrichter. (Davis et al., 2013, S. 369).....	10
Abbildung 8. Konustrichter mit Maßen und Bezeichnungen. (Zollner & Zwicker, 2003, S. 104).....	10
Abbildung 9. Längsschnitt eines Exponentialtrichters. (Zollner & Zwicker, 2003) .....	12
Abbildung 10. Mehrzellenhörner der Firma Altec. (Eargle, 2003, S. 186) .....	14
Abbildung 11. Aufsicht und Seitenansicht eines radialen Horns (Eargle, 2003, S. 186) .....	14
Abbildung 12. Längsschnitt durch einen gefalteten Hornlautsprecher. (Zollner & Zwicker, 2003, S. 115) .....	16
Abbildung 13. Längsschnitt durch einen simpel gefalteten Hornlautsprecher. (Bright, 2003, S. 4) .....	16
Abbildung 14. Konventionelle Clusterbildung im Hochtonbereich mit Überlappungsbereichen der Abstrahlung. (Dipl. Ing. Holtmeyer, 2003, S. 3) .....	18
Abbildung 15. Richtwirkungsdiagramme von Linienquellen für verschiedene Wellenlängen. (Davis et al., 2013, S. 403) .....	22
Abbildung 16. Fullrange Lautsprechermodul bestehend aus 2 15 Zoll Woofern für die Basswiedergabe, einem Mitteltonhorn bestehend aus mehreren Lautsprechern und einem Coaxial montierten Hochtonelement.(Davis et al., 2013, S. 408).....	23
Abbildung 17.Screenshot der JBL Simulationssoftware für das VRX Line Array System.....	24
Abbildung 18. Laufzeitunterschiede der Lautsprecher eines Line Arrays zum Zuhörer. (Krampera, 2016, S. 1).....	26
Abbildung 19. Abstrahlverhalten mehrerer Line-Array Elemente bei 630 Herz. (Erstellt in der MAPP XT Software der Firma Meyersound).....	27
Abbildung 20. Abstrahlverhalten mehrerer Line Array Elemente bei 16 Kilohertz. (Erstellt in der MAPP XT Software der Firma Meyersound).....	28
Abbildung 21. Grundsätzlicher Aufbau des Messsetups (Mateljan, 2019a, S. 10) .....	34

Abbildung 22. Messaufbau für die Messung der Frequenzantwort eines zu testenden Sensors (D.U.T. = device under test) (Mateljan, 2019a, S. 9).....	35
Abbildung 23. Messaufbau für die Messung der Impedanz eines Lautsprechers am Kopfhörerausgang einer Soundkarte (Mateljan, 2019b, S. 9) .....	38
Abbildung 24. Impedanz Messung eines Lautsprechers (Mateljan, 2019b, S. 25)	38
Abbildung 25. Impulsantwort eines 12 dB Tiefpasses mit Eckfrequenz von 1000 Hertz (Weber & Mateljan, 2013, S. 66).....	39
Abbildung 26. Sprungantwort berechnet aus der Impulsantwort in Abbildung 4 (Weber & Mateljan, 2013, S. 66) .....	40
Abbildung 27. Beziehung von Excess Phase (blau), Minimalphase (grün) und realer Phase (rot) (Weber & Mateljan, 2013, S. 71).....	41
Abbildung 28. Amplitudenfrequenzgang eines Lautsprechers (Atkinson, 1997, S. 35).....	42
Abbildung 29. Definition der Schallfelder (Weber & Mateljan, 2013, S. 82).....	43
<i>Abbildung 30. Definition der Schallfelder (Weber &amp; Mateljan, 2013, S. 84) .....</i>	43
Abbildung 31. Wasserfall-Richtwirkungsdiagramm (Mateljan, 2019a, S. 147) ..	45
Abbildung 32. Wasserfalldiagramm eines kleinen 2-Wege Lautsprechers (Atkinson, 1997, S. 45).....	46
Abbildung 33. Positionierung des JBL VRX Systems, inklusive der dazu empfohlenen Subbässe im Stadttheater Bruck an der Leitha. ....	51
Abbildung 34. Simulation des Stadttheaters im JBL VRX Line Array Calculator. 3 verschiedene Frequenzgänge an verschiedenen Positionen im Raum bei einer Frequenz von 1000 Herz werden angezeigt. Im Hauptfenster wird die Abstrahlcharakteristik dargestellt. ....	52
Abbildung 35. Simulation des Stadttheaters im JBL VRX Line Array Calculator. 3 verschiedene Frequenzgänge an verschiedenen Positionen im Raum bei einer Frequenz von 1000 Herz werden angezeigt. Im Hauptfenster wird der Pegelabfall über die Entfernung dargestellt.....	52
Abbildung 36. Positionierung Lambda Labs Systems (Mitte) und des VRX Systems (aussen) im Stadttheater Bruck an der Leitha. ....	53
Abbildung 37. Messung des RME Babyface im Loopbacksetup. ....	55
Abbildung 38. Kalibrierung der Ausgangskanäle des RME Babyface. Die Ausgangsspannung beträgt exakt 1.306 V.....	56
Abbildung 39. Positionierung des Messmikrofons für die Messung der Voltage Sensitivity eines JBL VRX 932LA-1 Elements. ....	57
Abbildung 40. Voltage Sensitivity JBL VRX932LA-1. ....	57
Abbildung 41. Voltage Sensitivity JBL VRX918s. ....	58
Abbildung 42. geschätzte Voltage Sensitivity Lambda Labs TX-3A.....	59
Abbildung 43. Voltage Sensitivity Lambda Labs DH18. ....	59
Abbildung 44. Voltage Sensitivity aller gemessenen Elemente im direkten Vergleich.....	60
Abbildung 45. Messung der Impedanz eines DH18 am Kopfhörerausgang des RME Babyface.....	61
Abbildung 46. Ergebnis Impedanz Messung JBL VRX 932LA-1. ....	62
<i>Abbildung 47. Ergebnis Impedanz Messung JBL VRX 918s. ....</i>	62
<i>Abbildung 48. Ergebnis Impedanz Messung Lambda Labs DH18. ....</i>	63
<i>Abbildung 49. Impedanz Messung DH18 (gelb) VRX918s (grün) .....</i>	63
<i>Abbildung 50. Mikrofonpositionen zur Messung der Impulsantwort. ....</i>	65
<i>Abbildung 51. Gemittelte Impulsantwort JBL VRX 900 Systems. ....</i>	66

<i>Abbildung 52. Gemittelte Impulsantwort des Lambda Labs Systems.</i> .....	66
<i>Abbildung 53. Step Response JBL VRX 900 System.</i> .....	67
<i>Abbildung 54. Step Response Lambda Labs System.</i> .....	68
<i>Abbildung 55. Phasenfrequenzgang JBL VRX 900 System.</i> .....	68
<i>Abbildung 56. Phasenfrequenzgang Lambda Labs System.</i> .....	69
<i>Abbildung 57. Amplitudenfrequenzgang des JBL VRX 900 Systems erstellt aus der gefensterten, gemittelten Impulsantwort.</i> .....	70
<i>Abbildung 58. Amplitudenfrequenzgang des Lambda Labs Systems erstellt aus der gefensterten, gemittelten Impulsantwort.</i> .....	70
<i>Abbildung 59. Im Nahfeld korrigierter Amplitudenfrequenzgang des JBL VRX 900 Systems.</i> .....	71
<i>Abbildung 60. Im Nahfeld korrigierter Amplitudenfrequenzgang des Lambda Labs Systems.</i> .....	72
<i>Abbildung 61. Amplitudenfrequenzgang im Raum des JBL VRX 900 Systems.</i> ....	73
<i>Abbildung 62. Amplitudenfrequenzgang im Raum des Lambda Labs System.</i> ....	73
<i>Abbildung 63. Vergleich der Amplitudenfrequenzgänge des Lambda Labs Systems (gelb) und des JBL VRX 900 Systems (grün).</i> .....	74
<i>Abbildung 64. Wasserfalldiagramm des JBL VRX Systems.</i> .....	74
<i>Abbildung 65. Wasserfalldiagramm des Lambda Labs Systems.</i> .....	75
<i>Abbildung 66. Durchführung des Hörtests im Stadttheater Bruck an der Leitha.</i>	77
<i>Abbildung 67. C gewichtete Loudnessmessung des JBL VRX 900 Systems.</i> .....	80
<i>Abbildung 68. C gewichtete Loudnessmessung des Lambda Labs Systems.</i> .....	81
<i>Abbildung 69. Auswertung des Testparameters technische Genauigkeit.</i> .....	82
<i>Abbildung 70. Auswertung des Parameters musikalische Genauigkeit.</i> .....	83
<i>Abbildung 71. Auswertung des Parameters Frequenzgang</i> .....	84
<i>Abbildung 72. Auswertung des Parameters Koloration.</i> .....	85
<i>Abbildung 73. Auswertung des Parameters Klarheit und Transparenz.</i> .....	86
<i>Abbildung 74. Auswertung des Parameters Körnigkeit, Härte und Verzerrung.</i> ..	87
<i>Abbildung 75. Auswertung des Parameters Stereobild.</i> .....	87
<i>Abbildung 76. Auswertung des Parameters Makrodynamik.</i> .....	88
<i>Abbildung 77. Auswertung des Parameters Microdynamik.</i> .....	89
<i>Abbildung 78. Auswertung des Parameters Optische Präferenzen.</i> .....	90
<i>Abbildung 79. Auswertung des Parameters Tempo und Rhythmus.</i> .....	91
<i>Abbildung 80. Auswertung der Präferenzen der ProbandInnen bezüglich der beiden Lautsprechersysteme.</i> .....	92
<i>Abbildung 81. Häufigkeit des Musikkonsums der ProbandInnen.</i> .....	92
<i>Abbildung 82. Selbsteinschätzung bezüglich Audiophilie der ProbandInnen.</i> ...	93



# Anhang

## A. Interview mit Scott Gledhill - Meyersound

Interviewer: For the Bluehorn Soundsystem. Why Meyersound decided to focus on a horn for that mastering loudspeaker? Because with horns you always have a lot of problems, you get a lot of interferences, you know what I mean.

Gledhill: Yes. We didn't go in that direction. We didn't say what is the end goal and then how do we achieve the end goal. In terms of mastering market or studio monitor rather we approach it from a how can we make the system more accurate, more linear, more correct and you are correcter I sure you know very well the differences between a compression driver matched to a horn and the nonlinearities and the distortions that are created in the mechanism and Meyersound has a long history of studying the phenomenon and understanding why compression drivers create nonlinearities. Compression drivers have an advantage, they create more sound pressure for the given amount of electrical current power input so that the gain and efficiency is created via a driver horn combination has disadvantages of the non-linearities. So, John Meyer, more than 50 years ago, studying horns and studying horn driver interaction and figuring out very quickly that a horn is a transformer from an area of high acoustic impedance to low acoustic impedance. So, we are matching impedances and matching the loads and you wanna do it across all the frequencies and do it evenly....

Interviewer: and do it linear and without phase distortions, like you want to do a nearly impossible job in the end. [...]

Gledhill: Exactly. Johns first System was an all horn loaded, on an exponential flare and so was mathematically correct. It was a 3-way system. [...] Mid driver was a 15 inch in a 4-foot horn and the subwoofer was a 21 inch on an 8-foot horn. Huge horns to be able to match the impedance of air to the driver to get some loading and some resistance to the excursion to create higher sound pressures. So that was 50 years ago. 55 Years ago.

Interviewer: [...]

Gledhill: John has several patents, several different processes and improvements of driver horn then optimizing them using electronic circuits and feedback and frequency optimization and compression limiting to be able to anticipate how the horn will behave and send it with negative feedback type things so that the 2 together, and this was in the 70ies, in the 80s John was doing that so then Meyersound started manufacturing own transducers in the 90ies and then really understanding what is happening in there. Then Johns Sohn Paren got his masters-degree, I think his masters-thesis [...] studying the propagation of soundwaves

through the throat of a horn. So, 1 inch by 1 inch by 1-inch area which he modeled on a supercomputer where each datapoint was a molecule. So, at super high resolution of air molecules and seeing how the soundwaves propagated just in that very small space, in the throat and so then using that thesis Meyersound realized that throat is super important. And so how you get the compression driver and if there is an extension piece on the compression driver, does it start expanding or not, then when it does expand, how it expands and then the horn. So, we use a lens essentially in-between the driver and the horn and so we are studying that to tremendous detail to try and understand it and minimize nonlinearities and distortions and be able to create high sound pressure levels while maintaining even frequency response and behavior. [...] Bluehorn is a derivative of our Acheron-Design midfield cinema postproduction product [...] The Horn is great because Meyersounds anechoic chamber built in 1995 and we have a positioner on it. [...] So, we can measure horns in high resolution and see little abnormalities and every horn gets better. [...] In theory in math, what the amplitude response of a horn with this throat, with this flare, with this spacing, with this size mathematically it should be this and then we do iteration, 3d printing, backend stereo phonography and we do an iteration of the horn and we measure it and verify, does the mathematical model match with the physical model and then why not? Or if it does. And then this: Oh, see that little ripple, the little 1/12 octave or 1/24 octave thing that's down 2 Db? That's not good enough. Find why! Why is it happening at 8300 Hz? You know? And ok so we go back and find it, eliminate it. So, the Leopard Horn is perfect. It's a perfect horn and the bluehorn is a derivate of leopard in many ways. So, we just keep getting it better and better. [...] So that is how we got to bluehorn physically. The physical box, the horn combination, the size of the horn, the dispersion, the coverage of the horn, the behavior of the horn. Then what's going on inside the cabinet is a whole other thing that we don't talk much about because its proprietary and patented. [...] So, the electronics matched with the transducers and the horn and the enclosure and then looking in very high resolution, just optimizing, optimizing, optimizing and then level. At low level and high-level amplifier and the processing inside the amplifier, everything matters and therefore bluehorn has a system. [...] Everything matters, not one thing more than the other but if you wanna do something that good every single aspect. [...] So that's bluehorn, everything is perfect, everything has been optimized using 50 plus years of expertise and knowledge.

Interviewer: [...] What comes after the bluehorn if it is that perfect already?

Gledhill: I am not on that side of the company to make any kind of predictions or statements of what technology is coming. [...]

Then you get into X40, and there we want the sound quality of bluehorn in a PA product. John will set the standard. John just says bluehorn is done, use, we want flat phase, we want flat amplitude, we want high power, we want mid-high, the presence of the vocal, the 3-dimensionality. We know it's achievable. Bring it to the market and figure out ways to manufacture and assemble it so it's not, you know super expensive. [...] The history of the company is: design a studio monitor use that opportunity and task project to make a loudspeaker as good as it can be and then once we developed the technology to make a perfect studio

monitor put that into sound reinforcement products which we sell 1000 and 1000 and 1000 of and that's why Meyer products are different. [...]

So that covers the horn part. Then you get into Line Arrays vs Point Source Systems and the only difference is the horn, essentially, for the high frequencies the horn is different and the low frequencies are generally front loaded, not horn loaded, so they are relatively omnidirectional, depending on the wavelength relative to the size of the enclosure of the transducer. But horns, way back then, I think it was EV or Altec Lansing came out with constant directivity and constant directivity is in one axis, all the frequencies have roughly the same coverage pattern, but that's only in one axis and not in the other axis so Meyersound when we developed the CQ, the CQ is constant Que and constant que is, it has the same directivity in both axis. [...] A line Array, you want it to be horizontally the same coverage at all frequencies and vertically its proportional Que and so it gets narrower and narrower and narrower the higher the frequency goes. Because you don't have overlap so it's the high frequency of your shooting at 5°, the box below it does not impact it. It doesn't have an impact in the high frequencies. High frequencies don't sum. You have to be really careful that you know the time. If you have 4 boxes and there is .5, .5, .5 and you are here the time difference between these arrivals is negligible. It is insignificant in all frequencies. The time difference, you know you are off axis of this one, so this one at 16 khz should be arriving late but it's not reaching you. It doesn't, it's not aiming at you, because it gets narrower and narrower and narrower. So, therefore you don't have two arrivals at 16 khz. [...] The audio industry is gullible and there have been some manufacturers that have used smoking mirrors, or myths, or untruths, or inaccurate ways to describe what a line array does. Line Arrays do not create cylindrical waves. One manufacturer started the myth and several manufacturers who don't understand physics and don't understand how audio and sound propagates through air, through pressure ways just don't realize they are making inaccurate statements and they repeat this marketing claim about cylindrical waves. [...] It's attenuation over distance and the number of sources you have and it's nearfield vs far-field phenomenon and basically if you take one Leopard and you measure one Leopard at one meter and you are here and you add two Leopards you get 6 dB more, you do 4 Leopards you might not get another 6 dB because you are too close to it and you keep adding Leopards and you are here with this microphone, it won't add SPL because you are close, you are in the nearfield of the linearray of the transducers. You are too close to the transducers to receive the acoustic gain from the other transducers, as you move further away, the attenuation you receive from Leopard number 1 is minus 6 dB at doubling of distance. It's a point source, it's a loudspeaker, its physics applied, but as you move further away you come in the coverage pattern of more elements. So, the SPL does not decrease at 6 dB doubling per distance because you are being covered by more elements. That's it, you have more elements. And so a line array, a train, its infinite, it has to be infinite, and so if a train is making noise, the wheels on the track are grinding along and all of those wheels are making the same frequencies, the same notes, the same scramble together, that train, let's say in the United states it could be a kilometer long, so the directionality of that thing that you can get, that soundwave that continues propagating because you are here and suddenly, let's say its pointing right at you, you've got 5000 train wheels all making the same sound and they are all arriving at you at the same time. So, they

sum together, they don't cancel. But over here, let's say the train is going this way, you know, then you are off axis and you get nothing and so it has nothing to do with the waveform. Every single one of these is creating a spherical pattern depending on the physics and how small it is in comparison to the wavelength and you know it's not a horn, a loudspeaker we are trying to amplify and get coverage. But any sound, sound of the guys are making in the bar, bottles clinking together you know it's radiating in 360° and we just try and get that at the audience. On stage it's going everywhere, so that's why, bring the level down on stage, because it's hard to control all these you know, drums. Put a glass cage around the drummer. [...] So that's all it is. Super simple. So, if you talk to Michael again, he has the LMBC, the low mid beam control model from our seminar and low mid beam control it is this. It's basically explaining why Meyersound uses LMBC and therefore anybody seeing the presentation go oh, the other brands that are steering Line Arrays, Martin Audio, EAW, it's like that can't work. How are they making those claims when you can't steer a horn? You have 2 horns, they are proportional que, it's a Line Array, they are getting more directional in higher frequencies and therefore if you time delay one horn relative to the other it doesn't make any difference because you are off axis to the audience, so they don't combine anywhere in space. [...] If you put the PA ground stacked, like this, and make it really high, like the Greatfull Dead's Wall of Sound, the Wall of Sound had intelligibility at one mile, you know, because, and the audience was out at ??? out in the street, not in the park and everybody is on a flat listening area and it travelled and travelled and travelled. And if anybody concert promoter did that today and ground stacked 16 Line Array elements with 0° angle that things gonna go! You can't do that with the neighbor you want so what is the solution? Raise it, fly it and aim it down! Point it into the audience. [...] The higher it goes the wider you need to get so you are just splaying your Line Array elements further at some frequencies it might be that the horn, the proportional que of the horn, at 16 khz might be narrower, then the physical angle of the rigging and then you get gaps. [...] It looks like a comb-filter, but it is actual gaps. So, for a manufacturer to say oh we can't do this, and we steer the sound, what are they doing in their computer, they are turning down the high driver. I know that is what the computer does, and you know you send the thing and the guy in front of the house is like cool, hey the top high drivers got attenuated, does he notice? No, everything cool. The people up there, will they have a good show? Like [mumpfende Geräusche]. [...] So, our LMBC Model keynote presentation, part of our message is. There are manufacturers today, making claims like they are doing these magical things and that they understand, but there is Harry Olsen, acoustical engineering, written in 1957, where he talks about interaction of transducers and the spacing between the transducers relative to the wavelength and then you get summation and then you get lobes and in 1957 he published the book where he predicted the lobes, which is comb filtering because you have multiple elements combining together, summing together at some angles relative to the wavelength and cancelling at other relatives. [...] So, Harry Olsen, 1957, everything what we are doing with Line Arrays today, he wrote about it in the book. [...] The thing with implementing it, and implementing it why, the reason why Meyersound says Curvelinear, so we don't call them Line Arrays, it is a Line Array for marketing, but our documentation says Curvelinear. And its Curvelinear because we are keeping in fact that our horns are proportional que. So, The Greatfull Dead's Wall

of Sound was a Line Array in the traditional sense, they had no splay in the system, they stacked it as high as they could. And then it goes as far as it can go, but today we are splaying it and that splay depends on the horn and so while 1 khz is 60° and 2 khz is, 4 khz, 8 khz, 16 khz, it gets narrower and narrower and narrower and that's the modern implementation that is required to make a Line Array a functional sound reinforcement application and thus the end result is, audience member that is close, FOH guy, audience member that is far away the SPL difference from front to back is more even. The variance is less. +- 3 dB, +- 6 dB from front to back and that's why the height where you put it, and that's why we are doing MAPP and that's all it is. And that's when you put 6 microphones out and you look at the 6 microphones, it's the same number of boxes, you can't change it, it's a rental production, you have a truck, the roof can only support so much weight, but what is the decision we have to make? Trim height and angles and that's it and the goal. [...] We deal with so many variables in the world of live that the tools have to be flexible. [...] And then there is native mode, it's a marketing term [...] one box was flat, one UPA, you plug in one UPA and the amplitude response is relatively flat through its operating range. You put 2 boxes together, the low mids start adding together and the highs depending on where you aim them, but you know, you can manage it, so with point source, UPA's and MSL 4's and CQ's, you know, nobody is putting 16 UPA's together, because the lows will sum but the highs won't. Because the distance of the horns is too far, but putting 16 Line Arrays together, when you put 16 Line Arrays together, the lows and the low mids, add together very well, because they are all front loaded, have the same size drivers and there are two drivers to do that below a 1000 hz, so the acoustic summation from all of those front loaded drivers is huge, where the high frequencies, unless, if you are not doing 0°, if you are doing anything like this, the high frequencies only go where you put them. So that balance, that spectral difference, is with MILO you had to attenuate the low mids, because one MILO was flat, and the more MILO's you put together, you get low mid summation. And so, the [...] processors would pull them down. What we do on Leopard and LINA is, the high frequencies are boosted to compensate. So, we expect, that a Leopard user, somebody who owns a Leopard is going to use at least 4 per each side, maybe 8, maybe 12, if you are using 12 per side you are having a little 6 dB bump in the low mids, that's manageable. Hey power full, headroom! That sounds cool, maybe make a little bit of EQ adjustment but not attenuate the whole thing. So that's the simplicity aspect of putting a basic curve, the starting point, the starting point curve inside the cabinet, so that it is plug and play. So, from the console output, plug it in to Leopards or Mina's and you are done. Make it fast and simple. [...] And if a non-experienced user is doing a show, the guy that drives the truck, or the guy that loads the truck in the warehouse and is like, hey you know it's your turn, you gotta push the faders. Bring it up there and oh, that sounds good. It's never why it is boomy or why it's is [mumpfende Geräusche] no it sounds good. That's the Meyer sound overview!

[...]

## B. Interview mit Andreas Plodek – Realhorns, 28.11.2019

Interviewer: Du bist ja Gründer der Firma Realhorns. Wie bist du dazu gekommen und wie du zu der Idee gekommen bist Lautsprecher zu bauen und diese riesen Hörner zu bauen?

Andreas Plodek: Also als ich halt in die Pubertät kam, als ich 15, 16, 17 war, da war halt jeder, da war Woodstock, da war quasi, oder ist die elektrische Musik, die verstärkte Musik ganz neu gewesen. Jeder war Musiker, also jeder, viele Jugendliche warn halt Musiker, ich war auch Musiker, hab Gitarre gespielt und man hat sich halt begeistert für dieses neue Thema und ich hab halt auch, mein Vater ist im bayrischen Rundfunk, oder war im bayrischen Rundfunk in der Messtechnik, als Messingenieur und da hab ich halt das ein oder andere, oder mehr relativ viel auch mitgekriegt über diese technischen Zusammenhänge die die anderen Jungs halt nicht hatten, weil für die waren das halt schwarze Kisten, meistens sind es ja schwarze Kisten und da steht dann irgendein Name darauf und dieser Name ist dann so ähnlich wie ein anbetungswürdiger Name. So wussten sie nicht was halt wichtig ist und was nicht. Ich hab doch schon relativ, ein bisschen ein intensiveres Vorwissen, technisches Vorwissen, ich hab halt das Ohm'sche Gesetz und so verschiedene Sachen hab ich halt von meinem Vater von seinen Kollegen da mitgekriegt. Dann hat ein Freund von mir 1982, 1982 hat ein Freund von mir ein Haus geerbt, in, ist ja wurscht, in Dingolfing, des Haus wurde dann verkauft für, was weiß ich, 150.000 Mark damals und man hat für, was weiß ich, 120.000 Mark hat man Lautsprecherteile dann gekauft. PA-Teile gekauft und das hat man dann zusammengebaut und man hat für die damalige Zeit 1982, das ist ja schon, das kann man ja schon gar nicht mehr ausrechnen, da braucht man ja schon einen Computer [...] Da hat halt eine Endstufe, wenn die 2x 400 Watt hatte, das war wow! Und dann gab's irgendwelche Taub Endstufen, die hatten 2x 600 Watt und das war dann, das war der Wahnsinn. [...] Heute hat man so und so viele KW, auch wenn diese Angaben dann halt eine tausendtel Sekunde. Es wird ja gerne dann die 1/1000te Sekunde, das 1 kHz eine Schwingung ist dann eine 1/1000tel Sekunde und wird dann als Leistung angegeben, was natürlich ein Schmarrn ist. Naja also, das war diese Zeit man hat dann, also selber eine PA zusammengebaut aus hochwertigen oder höchstwertigen Komponenten. Damals warn halt Equalizer, waren da in. Heute stehe ich zwar nicht mehr auf Equalizer, aber da hat man dann Klark Technik Equalizer und andere Equalizer gehabt. Man hat das dann versucht da gerade einzustellen. Letztendlich ein ziemlicher Blödsinn. Teuer, es war auch wirklich teuer dieses Equipment. Man hat dann, ich weiß jetzt nicht wie viel, es hat glaub ich so 2 Equalizer und einen Analyzer hat 10000 Mark gekostet 1982, das sind heutzutage wahrscheinlich 30000 Euro oder 50000 Euro, ich weiß es nicht. Auf alle Fälle hat man halt so eine Anlage dann gebaut. Ich hab dann auch. Ich war natürlich nicht alleine sondern es hat noch mehr so begeisterte geben und es gab natürlich auch Bands die man beschallen konnte und dann hab ich eine ganze Zeit lang für einen Menschen gearbeitet der diese, Saragossa Band hat die damals geheißen, wird dir sicher nichts mehr sagen, gibt's schon seit ewiger Zeit, genau Saragossa Band und dann für Opus, Live ist Live, die kennst du wahrscheinlich noch. [...] Mir gefällt das halt einfach diese

Lautsprecher und Beschallungsgeschichte letztendlich wirklich warum man auch immer das dann macht. Das ist halt, so bin ich halt dazu gekommen über das, damals über die Zeit halt, über den Lauf der Zeit und auch über die technische Vorbildung oder halt über die technische Unterstützung von meinem Vater und dann hab ich halt irgendwann einmal, dann hab ich halt mit diesem Menschen, mit dem ich diese Anlage, dem dieses alte Haus gehört hat und somit natürlich auch die Anlage gehört hat. Hab ich mich da, ja da gab's Probleme, hat man sich getrennt und ich hab dann angefangen selber so eine Anlage aufzubauen, zuerst nur für zuhause. [...] Da bin ich auf den Speicher gegangen und ich wohne ja in einem alten Bauernhaus, der ist 20x10 Meter groß der Speicher und hab ich mir gedacht, wie kann man das beschallen? Also Hörner halt, weil mit direkt abstrahlenden Lautsprechern 20 Meter ist halt schon ganz schön weit sozusagen für so einen Direktabstrahler und dann hab ich noch wieder einen anderen Kollegen, Freund gehabt, der also so schreinertechnisch super gut drauf war. Der hat dann so gesagt lass uns nicht viereckige Hörner bauen, lass uns sechseckige Hörner bauen. Ich hab das damals dann berechnet mit AJ-Horn, mit dem ich auch heute noch rum, wenn ich eine Box berechne mach ich das mit dem AJ-Horn, das hat bis jetzt immer hingehauen und hab dann halt angefangen mal so Mitteltonhörner, also meine 15 Zoll Mitteltonhörner, das waren 2002, hab ich diese Mitteltonhörner gebaut. Der Kollege von mir hat zuerst ein einfaches Basshorn gebaut, das zwar von den Dimensionen her, das schon so groß war wie das, das ich jetzt auch habe. Wie gesagt ich habe das ja simuliert und habe halt die Hörner so groß gemacht wie es nur irgendwie sinnvoll ist und nicht so klein wie es irgendwie möglich ist. Heutzutage wird das ja gern so klein gemacht oder auch ganz weggelassen, meist lässt man die Hörner ja weg und tut es bloß noch im Hochtonbereich, weil man halt, bleibt einem nichts anderes übrig, sonst haut das einfach nicht hin. Irgendwelche kleinen, irgendwelche 2 cm Membranen sind halt dann einfach dann doch zu leise. Aber die Hörner sind an und für sich nicht mehr in sag ich einmal. Das ist ja, hauptsächlich ist es ja Line Arrays und aber die Hörner haben halt einfach physikalische Eigenschaften die auch heute schon ein bisschen so in Vergessenheit geraten sind. Ich hab ja mehrere Kurse auch gemacht auch über Akustik, einmal beim Mark Szener, das ist ein Schweizer, Akustikguru sag ich mal der Kurse anbietet [...] Und war dann auch bei einem Merlin van Ween, über den hab ich Line Array Theorie gelernt und hab auch gemerkt wie schwierig es die Line Arrays haben, also dass die Line Arrays keinesfalls die physikalische Königslösung sind, sondern halt, mei das sind halt aufgehängte direkt abstrahlende Lautsprecher. Auch wenn sie aufgehängt sind sind sie immer noch direkt abstrahlende Lautsprecher. [...] Man hat die große Schwierigkeit den Bass, die Bassabstrahlung ist ja kugelförmig, man kann sie zwar nach hinten auslöschen, in dem man irgendwelche kardiod Sachen macht, deswegen, das addiert sich halt schon nach vorne. Dann hast du halt eine Halbkugelabstrahlung oder eine Viertelkugelförmige Abstrahlung. Du kriegst halt, wenn du nicht ein Basslinearray aufbaust, der Schalldruck fällt einfach mit 6 dB und nicht mit 3 dB so wie das Line Array. Und dann haben wir in diesem Kurs also gelernt wie man das Line Array einstellen muss, dass es auch mit 6 dB nach hinten abfällt was natürlich völlig widersinnig ist. [...] Ich bin gelernter Landwirt. Ich bin ja irgendwann mal auf die Idee gekommen die Menschen brauchen was zu essen. Habe ich Landwirt gelernt als Jugendlicher. A einzelner Mensch quasi unter der Brücke raus so, ich wohn zwar nicht unter der Brücke, aber ein einzelner Mensch

ohne Studium, ohne Millionen, ohne irgendwas und dann komm ich daher und baue so eine Anlage. So was fällt denn dir ein? Ich hab ja bei diesem PA of the day, in Facebook diese Seite und der Betreiber von dieser Seite hat mich dann eingeladen ich soll da so einen mehrseitigen Bericht über mein Basshorn und ich wurde dann angemacht was das für ein Scheiß ist und was mir überhaupt einfällt und das das sowieso alles Marketing ist und dann hat da einer geschrieben das ist ja alles Marketing das ist ja alles Blödsinn. Was hast du denn für ein Problem? Hat er gesagt, ich hab den größten schalltoten Raum in Nordamerika. Ich kann in einer Messung die komplette Abstrahlung nach allen Seiten nach allen Richtungen von einem System feststellen. Ich habe Bassboxen designed, für so und so viele Millionen haben wir die verkauft für so und so viele Millionen Umsatz haben wir mit denen gemacht und jetzt kommst du daher mit deinem scheiß Basshorn, spinnst denn du ein bisschen? Noch dazu mit Carbon Membranen? Was fällt denn dir ein, wir haben zwar auch Carbon Membranen aber da haben wir hin entwickelt. Das war schwierig. [...] Da kommt einer wie gesagt aus der Brücke raus und mit so einem reden wir nicht. Der kann bauen was man will und wir müssen jetzt mit unserem Line Array Stoff weiter machen. [...]

Interviewer: Welche Anforderungen grundsätzlich stellst du an ein Lautsprechersystem? Jetzt abgesehen von dem was du gebaut hast. Wenn du dir das ideale Lautsprechersystem vorstellst. Welche Anforderung stellst du an dieses?

Andreas Plodek: Das es mich einerseits einmal berührt, dass ich einen Attack spüre, dass ich diesen Impuls spüre, dieser aber nicht weh tut. Es gibt ja auch die Aussage, ja wir haben die Anlage so eingestellt und das tut ein bisschen, das tut schon ein bisschen weh, aber das muss so sein, weil dann weiß man ja man ist am Limit. Am Gehörlimit. Es soll nicht weh tun, es soll einem gefallen, man soll begeistert sein, man soll eigentlich seine eigenen Grenzen, also dass du als einzelne Person, du wenn du diesen Sound hörst zusammen mit dem Publikum verlierst du ja gewissermaßen deine persönlichen, dass das so aufhört nach dem Kopf und so. So eine Art Bewusstseinserweiterung, oder wie man auch immer das nennen will. Also dass man halt einfach abgeht, dass man begeistert ist, dass ma. Und dazu gehört Attack, es gehört sauberer Hochtton, kein Krach im Hochtton, also dass das, Krach entsteht ja ganz durch vielfältige Quellen sozusagen. Einerseits natürlich einmal die Lautstärke, wenn du das Ding aufreibst bis es halt einfach zum Scheppern anfängt, dann ist auch das Takte des digitalen Signals, die Samplerate oder wie heißt es? Das Clocking! Man hat ja normal oder man hat ja eine Masterclock oft, also wenn man ein Studio hat oder eine bisschen bessere Anlage hat man eine Masterclock und man möchte es ja nicht glauben Masterclock spielt ja einfach eine Rolle also eine relativ große Rolle wie sauber das System klingt und das ist auch das. Ich hab halt festgestellt, ich habe da sehr hohen Aufwand betrieben und habe Masterclocks, erstens einmal habe ich eine Masterclock und dann habe ich Reclocking im digitalen Stream und habe aber auch noch eine übergeordnete 10Mhz Clock, die also einen hochgenauen 10 Mhz Basis Ton, Schwingung liefert die dann wieder die ganzen anderen Clocks, die untergeordneten Clocks die halt mit 44 oder 96 kHz die wieder takten, damit der

Abstand von einem Sample zum nächsten der muss halt so gleich wie möglich sein. Und man glaubt nicht welche geringen, welche absolut geringsten Unterschiede also Einfluss hat auf den Klang, auf die Räumlichkeit. Auf das saubere, auf den sauberen Klang. Der saubere Klang ist auch dass es zwischen den Tönen dann leise ist, dass es wirklich ruhig ist. Dass da kein Signal mehr da ist. [...] A geiler Sound der einen anmacht, der besteht aus Attack, brauchst eine gewisse Lautstärke, es muss schon laut sein auch aber nicht weh tun und ich verwende auch so einen Lautstärkeregler, der ist eigentlich von den Rundfunkanstalten ist der, für die Rundfunksender gemacht von der Firma Jünger, der Jünger ist so ein Rundfunkausstatter und der regelt die Lautstärke nach der wahrgenommenen Lautstärke, damit halt die Radiosendung, damit der Hardrock und die Werbung, damit das gleich laut aus dem Radio rauskommt. [...] Das berührt werden, das mitschwingen auch. Dieses hören ist nur das eine, bei den großen Anlagen ist ja das fühlen des, des was das unterscheidet vom Küchenradio. Beim Küchenradio fühlst nichts. Bei den großen Systemen ist das fühlen mit dabei und man muss das fühlen, aber nicht nur an einem Punkt quasi, der Funktion One so quasi, der hat. Also es wird ja mit Resonanzen gearbeitet, also die Hersteller oder diese DJ oder Clubsoundsystem Hersteller oder Elektrosoundhersteller arbeiten ja viel mit Resonanzen, weil du natürlich da einen Haufen Lautstärke rauskriegst Der Effekt ist aber, wenn du schmalbandige Resonanzen, bisschen im höheren Bassbereich vor allem hast. Bei 60, 80 Hz, wo du das schon relativ gut mitkriegst. Bei 30 Hz da wummert das, da ist das nur so Luft, da kriegst du das schlecht mit, da ist die Auflösung schlecht vom Gehör und auch der Inhalt [...] Das ist einfach eine gigantische Resonanz, die diese Bassboxen wiedergeben, die ist schon mächtig und die drückt dir halt immer auf die Brust. Die drückt dir immer auf denselben Körperteil. [...] Das ist halt, wenn du so hoch resonante, räsonierende Boxen baust, die können, also vom Messschreiber her, die geben schon andere Frequenzen auch ab, die geben nicht nur die Resonanzfrequenz ab, aber klingen, die Hauptfrequenz, also der Klang sag ich mal ist immer derselbe. Der kann nichts anderes, wenn du so a hochresonierendes System hast, das kann nichts anderes, als diese Resonanz da halt rausdrücken. Jetzt ist halt bei einer Bassdrum von einem Schlagzeug, das ist ja auch sag ich mal nur ein Ton, also der kann auch bloß einen Ton machen. An und für sich langt das schon so irgendwie, aber es ist halt ein bisschen langweilig, wenn da immer bloß derselbe Körperteil. Also wir sind halt davon ausgegangen, dass der ganze Körper mitschwingen soll, das man das fühlen soll das Ganze, dazu darf die ganze Anlage aber nicht gestimmt sein auf eine schmalbandige, also je schmalbandiger die Resonanz desto intensiver ist sie ja, desto länger bleibt sie stehen, desto intensiver fällt des System in diesen Ton dann halt rein. Dieser Ton entsteht auch wenn du eine andere Frequenz da rein schickst, hörst du trotzdem. Der regt halt die Kiste an [...] Ich bin einer der diese Resonanzen kompensiert und nicht einer der die dann da so einbaut, weil er halt dann Material spart. [...] Das Spüren ist wichtig, fürs Spüren gibt's überhaupt keine Messmethode. [...] Wenn das Ding nur eine Resonanz hat dann resoniert halt auch immer derselbe Körperteil und das ist halt auch relativ langweilig und darum bin ich froh, dass ich da nicht so. Vielleicht wenn ich gewusst hätte das man da am meisten Leistung macht hätte ich das vielleicht auch so gemacht. Jetzt hab ich ja auch Bandpässe, die haben ja zwei Resonanzen, die großen Bandpässe, die ich habe. Jetzt, ich lasse die ja parallel laufen, ich habe ja nicht Bandpässe von 30-60 und dann 60-80 oder

100 Hz irgendwelche Hörner, sondern ich schneide meine Bässe bei 80 Hz oben ab, mit 24 dB oder mit 12 dB weil ich hab noch einen Subharmonicsynthesizer und der hat eh schon ein 12 dB Lowcut drin und der kann noch einmal die Subharmonischen dazu generieren. Ist ein supergeiles Teil, das gefällt mir total gut. Weil dann wackelt die, und es ist ja oft sind auch diese tiefen Frequenzen gar nicht auf dem Signal drauf. Manchmal bei manchen, bei Dubstep oder irgendwelchen Sounds sind die schon drauf, aber nicht immer sind die da drauf diese Frequenzen. Na gut, also ich lass die Boxen alle bis 80 Hz laufen und die Hörner gehen halt, also de gefalteten Hörner gehen sagen wir mal bis 50 Hz runter, dass große Basshorn würde eigentlich bis unter 30 Hz gehen, das schneide ich aber ab bei 40-45, weil es ist ja jede, auch ein Horn ist an seiner unteren Grenzfrequenz ein Kugelstrahler und wenn man da so ein bisschen was wegschneidet unten wird es zu einem Richtungsstrahler und mit dem dadurch das es so groß ist das Basshorn komm ich halt auf riesige Entferungen, zwar nicht mit 30 Hz weil ich die halt wegschneide aber mit 50 Hz oder 40-45 Hz und die Bandpässe gehen das 35 oder 30 oder 28 oder 25 Hz runter, laufen parallel, sind phasenangeglichen, dass die Phase zusammen passt und dadurch. Ich hab also kein System das völlig dominiert. Vorallem hört man ja die oberen Bässe, die über 60, die hörst du viel besser, also da, wenn Resonanzen drinnen sind, der bei 60-80 ist diese Brustresonanz und da und die Funktion One und die Burschen bauen halt da ihre Resonanzen rein und dann bleibt dir die Luft weg und alle sind begeistert sozusagen und bei mir halt nicht. Mein Ding kann halt dieses ganze Spektrum obwohl ich auch Resonatoren verwende, aber halt nicht bloß, hab ich halt nicht diesen Resonator Sound im Bass sag ich einmal. Mein System kann schon auch mehrere Töne als bloß einen machen so.

Interviewer: Ja und dann kannst du mir ein bisschen was über die Abmessungen von deinem System erzählen? Wir haben jetzt schon viel über deine Basshörner, deine Mittenbasshörner geredet, aber die sind ja eigentlich riesig groß.

Andreas Plodek: Die Basshörner, also das Basshorn, sechseckig ist das, also erstmal hat es 10 Meter Umfang und es ist ja so dass dieser Umfang von dem Horn oder auch von dem Lautsprecher, wenn der Lautsprecher allein ist, ist ja in etwa so wenigstens seine untere Grenzfrequenz und das Basshorn, also 10 Meter waren ja quasi also ca. 34 Hz [...] die parallelen Flächen sind 3 Meter auseinander und die Spitzen von dem Horn sind 3.6 und die Länge von dem eigentlichem Horn, dass ist glaub ich auch 3.6, mit der Basskammer sind es dann bisschen etwas über 4.3 oder 4.4 oder irgendsowas. Und im Basshorn sind ja 6 15 Zöller drinnen. [...] Meine Bandpässe haben 280 Kilo, die gefalteten Hörner haben 330 Kilo, das Basshorn hat 800 Kilo, also ich hab völlig massive Trümmer sozusagen. [...] Insgesamt ist die Anlage ja 20 Meter, oder über 20 Meter ist sie und besteht aus einem Basslinearray mit abwechselnd Bandpässen und gefalteten Hörnern. Viele machen das ja so, also sogenannte Hybridboxen. [...] Es ist halt ein Hybrid. Hybrid heißt ja nicht unbedingt, dass es besser geht, also dass es halt schlechter geht aber dafür halt mehr kann so ungefähr. Ist halt das Horn zu kurz und zu klein. [...] Bei den Hörnern im Vergleich zum Line Array. Also man hat ja dann auch ein Line Array aufgebaut bei diesem Merlin, hat da die Phasendreher

rausgeholt über Allpassfilter, hat das gecurved, war also super, messtechnisch, der ganze Raum war super schön beschallt. Überall war das gleiche, praktisch war der Phasengang, alles war super, aber du hast gehört da oben ist die Musik, da oben hängt die Box. Ich habe dann nicht gefragt warum hört man jetzt eigentlich warum die Box jetzt da oben ist, trotz perfekter Einmessung? Bei meinen Hörnern oder allgemein bei Hörnern, da hast du nicht, da hörst du nicht aja da vorne ist das Horn, sondern der Sound ist bei dir. Warum, das kann ich nicht, warum das physikalisch so ist, weiß ich nicht so recht, aber es ist so. Ist eine Tatsache. So direkt abstrahlende Boxen, da hörst du immer ah da vorne ist die Bühne, da gehen wir mal vor zur Bühne, weil da ist der Sound dann besser. [...] Meine Hörner, die gehen, die müssen halt groß genug sein, jetzt haben natürlich die ganzen großen Hersteller, haben keine groß genug Hörner die haben alle zu kleine Hörner, da durch mag das vielleicht auch sein das die nicht so weit tragen aber ich habe festgestellt, das Horn muss einfach so groß sein, dass dieser Druckwechsel den der Lautsprecher erzeugt. Der geht ja nach vor, neutral und wieder zurück, also macht quasi Überdruck und Unterdruck. Und das muss abgeschlossen sein, dieser Vorgang bevor der Ton, dieser Druckwechsel, das Horn verlassen hat. Wenn er das Horn, wenn das praktisch. Wenn das so schiebt, also nach vorne geht und das Horn ist schon quasi aus, dann geht der Druck einfach auf die Seite. Unter der Grenzfrequenz macht er das so, weil da ist das Horn einfach zu klein, das ist dann nicht mehr groß genug. Man sollte ja Hörner auch eine Oktave oder mindestens eine halbe Oktave ober ihrer unteren Grenzfrequenz betreiben, weil sie dann halt keine Kugelstrahler mehr sind, weil sie dann halt Richtungsstrahler sind und das halt auch anders klingt letztendlich und diese Tonerzeugung, diese Druckwechselerzeugung muss abgeschlossen sein bevor dieser Druckwechsel das Horn verlassen hat und dann hast du natürlich die meiste Energie oder den meisten Überdruck und Unterdruck auf diese Luft da aufgeprägt. Weil wenn die, der Lautsprecher ist ja viel zu klein. Wenn du da draufdrückst, der Lautsprecher alleine, da 30 Hz oder 50 Hz, die ganze Luft weicht ja aus, die sagt „wöbö“, die lässt sich nicht zusammendrücken, oder bloß ein bisschen halt. Und wenn die in dem Trichter drin ist, dann kannst du richtig zack, presst sie zusammen, ziehst sie wieder auseinander und dieser Druckwechsel, fliegt sozusagen. Es bewegt sich ja der Druckwechsel. Pflanzt sich fort in der Luft oder im Medium [...] Und das geht dann über Entfernung, wo du dir denkst gibt's denn das? Kann sowas denn überhaupt sein? [...] Ich brauche mich nicht zu vergleichen mit dem Handling. Ich brauche so quasi mindestens 10-mal so lange wie anderen, wenn das genügt, oder 20-mal. Auf alle Fälle wesentlich länger und wenn es einmal eine gewisse Größe überschreitet, bräuchte ich ja mehrere Hörner, die sich ja dann gegenseitig auslöschen. Für Großveranstaltungen ist das Line Array schon das was man da halt so hernehmen kann. Aber groß genug und lang genug. Für diese kleineren, für diese Meter oder 2 Meter Line Arrays, die da herumhängen, sind einfach wirklich Direktstrahler die einfach aufgehängt sind. Die sich auch so verhalten wie Direktstrahler und sonst gar nix [...] Die Mitteltonhörner sind also diese, da links und rechts mit einem 15 Zöllner und die sind halt eigentlich von dem AJ Horn berechnet, dass sie 80 Hz noch wiedergeben können und dann nach die 80 Hz abfallen. Die sind ja auch, ich glaub 1,7 oder so sind sie lang und ich weiß, den Durchmesser weiß ich jetzt nicht aber auf den Bildern sieht man ja, die sind ganz schön groß, das ist ein ganz schön großer Trichter. Man kann die vorderen Teile auch abnehmen von dem Horn damit sie überhaupt transportabel sind

beziehungsweise durch eine Tür durchgehen und trennen tu ich sie bei 110 Hz ungefähr. Die machen auch, also wenn man denen Signal gibt. Da kommen relativ viele Bässe raus wo ich immer wieder erstaunt bin, selbst wenn ich sie bei 110 Hz mit 24 dB trenne und alleine höre und irgendwie denke na ja aber gut, es kommen irgendwie noch einen Haufen Bässe raus aus den Kisten. [...] Weil von den, 100 – 300 Hz machen dass die 15ner wunderbar und dann hab ich halt von den 300 – 1.2 kHz verwende ich diese 8 Zoll Membran auf 4 Zoll Throat, 3 Stück, hab ich in dieses Basshorn, eh in dieses Lowmid Horn eingebaut, mit einem Phaseplug auch innen drinnen, der dann den 15ner ein wenig so verdeckt und die halt so schräg. Die laufen halt so schräg nach vorne. [...] Da hab ich ja auch 3 Stück so übereinander von diesen Hörnern. Im oberen Horn sind dann zusätzlich diese 3 8ter drinnen. Dann geht's halt weiter mit einem Multizellenhorn, das ich aus Bambus gebaut habe. Da sind zwei Stück Feldspulentreiber drauf. [...] Das ist Pappe, die halt bis 6000 Hz rauf geht. [...] Beim PA hab ich halt noch drittes System, ein drittes Hochtonsystem drin, dazwischen und beim PA ist es ein Multizellenhorn auch. Ein altes originales Multizellenhorn von Altec von 1940 ungefähr, dass teergefüllt ist. [...] Den kann man wahrscheinlich von 1500 Hz rum einsetzen. [...] Ich setz den halt ab 5000 Hz ein in diesem Multizellenhorn und darüber, über diesem Multizellenhorn in der PA hab ich noch einmal selber dann mit TAD Tweeter [...] der geht halt bis 35 kHz oder so und da hab ich dann halt 2 Treiber hergenommen und hab die dann in so ein Multizellenhorn aus Blech und hab das dann auch mit Teer gefüllt. [...] Das Altec Horn ist so laut mit diesem JBL, das ist bloß ein ganz ein kleiner Treiber, das ist so ein Neodym Membran, das ist ein ganz ein kleines Trum sozusagen. Der ist so krass und der bläst, dass, mit diesem Bronze in dieses Multizell. Das ist ein Treiber und mit dem kann ich tausende Leute beschallen. Die anderen haben da ja hunderte letztendlich Treiber drin. [...] Ich hab ja einen Cranesongwandler, also als Analog-Digitalwandler und der hat ja der kann geradzahlige und ungeradzahlige Obertöne generieren und kann Bandsättigung generieren und das ist einfach was Fantastisches. Weil wenn du mehr Biss brauchst auf der Anlage, drehst einfach diese ungeraden ein bisschen auf, ein bisschen mehr auf und dann fangt das an zum beißen so, dann brauchst du nicht irgendwelche 10 kHz anheben oder irgendwelche Höhen anheben sondern ich tu bloß ein bisschen die ungeraden Verzerrungen anheben, aber das ist halt, das kann man nicht vergleich mit die Anlage zerst. [...] Auch dieser Bandsättigungseffekt, da wird das einfach satter, es komprimiert das [...] Ich bin auch nicht einer der behauptet, also die Anlage darf nichts dazu machen und wenn sie, je weniger sie dazu macht desto besser klingt die. Diesen Schluss halte ich für nicht logisch. Du kannst maximal theoretisch, also jede Anlage macht was dazu, die Wandler, die Verstärker, immer macht sie was dazu. Derjenige der das gemischt hat, hat auch noch nie den Originalsound gehört, weil, der hat ja auch Anlage, der hat mit einer bestimmten Lautstärke abgehört, hat einen Raum gehabt, hat Monitore gehabt, der hat so viele Variablen damit reingemischt. Der hat noch nie gehört was er da aufgenommen hat. [...] Die passenden Verzerrungen dazu, oder ich tu auch manchmal einen Hall dazu, so einen Spatialhall, da wird das ein bisschen lebendiger, wenn die so völlig trockenen Sound daher klopfen damit ein bisschen eine Räumlichkeit da ist. [...] Ich hab einen Subharmonicsynthesizer, ich hab einen Transientdesigner für die Bässe. Von SPL gibt's ja da so einen Transientdesigner der die Attack und die Release regelt. [...] Ich tu den Attack von den Bässen verändern, tu einen

Subharmonischen dazu, tu die Pegel von den Bässen verändern, ich tu einen Hall dazu ich tu Verzerrungen dazu drehen. Ich hab auch noch so einen Eventide H8000, der hat einen Micropitch heißt das, dass ist so quasi so ein Tonhöhendoppler mit einem Vibrato drin. Der tut quasi eine 12 seitige Gitarre, die Schwebungen, so eine Schwebung mit rein. Also ich tu alle möglichen verbotenen Veränderungen des Originalklangs, was natürlich bei DJ Sound. Das sind ja irgendwelche Töne, ja manchmal ist es Krach manchmal klingt es auch gut. [...] Wenn das eine direkte Aufnahme von einem Orchester in einem Konzertsaal und da ist kein Mischpult dazwischen und die haben die supergeilen Mikrofone dann kann ich mir das vielleicht noch eher sagen also ja die Anlage sollte vielleicht dann auch wirklich nichts dazu machen und keine Bassanhebung oder sonst irgendwas haben und keinen Chorus dabei oder keinen Hall. Aber sobald du da am Mischpult rumdrehst, sobald da einer da ist der am Mischpult rumdreht, der verändert das ja sowieso völlig sozusagen. Der dreht da ja völlig am Mischpult, der verändert den Klang ja völlig und warum soll ich nicht den Klang nicht auch verändern damits halt einfach gut klingt und damits mir halt gefällt sozusagen. [...]

Interviewer: Welche Kompromisse müssen beim Entwickeln von Lautsprechersystemen eingegangen werden? Nur dein Ansatz ist ja mehr den kompromisslosen zu wählen sag ich jetzt einmal.

Andreas Plodek: Sowohl von den Ausmaßen als auch vom Geld her, also mir gefällts eher besser, wenn es teurer ist vom Gefühl her. [...] Kompromisse muss man sicher dann ein gehen, wenn man wirklich kommerziellen Erfolg haben möchte mit seinem Konstrukt, weil dann kannst du einfach nicht mehr die teuersten Endstufen oder was weiß ich Perylliumtreiber und das noch und das noch und mein System ist ja auch noch wassergekühlt das Ganze. [...] Dadurch komm ich auf einen Aufwand, auf annähernd 50 aktive Kanäle insgesamt jetzt. [...]

## C. Interview mit Micheal Pohl – Meyersound, 06.12.2019

Interviewer: [...]

Michael Pohl: Mein Name ist Michael Pohl, ich bin technical Support oder international technical Support für Meyersound, amerikanischer Lautsprecherhersteller aus Barkley California. Uns gibt's seit 40 Jahren. Mich gibt's bei der Firma seit fast 16 Jahren [...] und ich kümmere mich bei Meyersound um alles was technischen Support, Designservices betrifft. Einmessungen. Kalibrationen. Kundenberatung. Kundenbetreuung im technischen Sinn, aber auch viele Trainings und Seminare für unsere Kunden, Distributoren,

Reseller und so weiter und so fort. So dass mal im Groben. Ich bin gelernter Tonmeister, hab Physik studiert, ohne dass ich das jetzt abgeschlossen habe, aber mir fehlten halt bei der Tonmeisterei so ein paar Grundlagen. Deswegen habe ich da noch so ein bisschen Physik nebenher studiert, das gleiche mit Akustik und technische Akustik. Das alles in Berlin. [...]

Interviewer: Was sind deiner Meinung nach allgemein die Vor- und Nachteile von Line Array Systemen, oder von einem punktstrahlenden System? [...]

Michael Pohl: Fangen wir mal mit der Pointsource an, oder konventionelle Systeme. Pointsource ist ja auch nicht ganz korrekt, weil eine Punktquelle wäre ja ein System was wirklich aus einem Punkt das ganze schafft und es gibt ganz wenige Lautsprecher, die das können. [...] Jetzt gibt's natürlich viele Leute, die da nach Coax Systemen schreien und sagen, dass wäre immer noch eine Punktschallquelle. Wenn man sich da aber anguckt wie groß so eine Membran wird, also wie groß ist dann oder wo ist dann der Punkt? Das heißt aber auch, dass diese Membran dafür sorgt, dass diese Punktschallquelle, die per Definition eine omnidirektionale Quelle eigentlich ist, eine Richtwirkung bekommt und damit tu ich mit dieser Punktschallquelle ein wenig schwer, aber nur für die Begrifflichkeit reden wir von konventionellen Systemen, die meistens ja Hybride sind. Wo man einen doch eher breit abstrahlenden Tieftontreiber verwendet, das sind in 99% der Fälle Konuslautsprechertreiber und im Hochtonbereich dann einen Kompressionstreiber mit einem davor geschaltenem Horn, wobei das Horn einerseits natürlich eine Richtwirkung dem ganzen geben soll, andererseits aber auch ein sogenannter elektroakustischer Impedanzwandler ist. Also sprich der eine relativ kleine Membranfläche auf eine relativ große Umgebungsfläche, sprich die Umgebungsluft anpasst. Die Systeme zeigen halt relativ unterschiedliche Abstrahlverhalten, wenn man im Tieftonbereich und im Hochtonbereich guckt. Das heißt im Tieftonbereich aufgrund der Größe dieser Systeme und die Systeme sind heutzutage doch relativ kompakt geworden. Also das größte was man so als konventionelle Systeme baut ist eigentlich mit 15 Zöllern drin. Vereinzelt findet man hier noch ein 18 Zoll System oder sonst noch irgendwas. Aber das ist immer im Vergleich zu den großen Schränken, die man in den 80iger Jahren oder 70iger Jahren verwendet hat, ist das relativ klein und kompakt alles. Das bedingt aber auch, dass der Tieftonbereich eher omnidirektional ist. Also sprich, dass man dort sehr breit abstrahlt. Omnidirektional wäre auch nicht ganz korrekt, weil bei so einem 15 Zoller fängt das bei 2-3-400 Hertz schon an, dass man dann eine gewisse Richtwirkung aufgrund der Membrangröße bekommt. Weil hier haben wir ja auch ein paar physikalische Gesetzmäßigkeiten, die, wenn die Schallfläche größer wird als die Wellenlänge, gibt's eine Richtlinie, also keine Richtlinie aber eine Richtwirkung und nach den Studien von Dr. Harry F. Olsen wissen wir auch, dass wenn die Wellenlänge in diese, er bezeichnet es als in dieses vibrating Surface, also in diese vibrierende oder elongierende Oberfläche reinkommt, dann haben wir dort, oder sehen wir dort ein Abstrahlverhalten von 72°. Wenn das Verhältnis sich dann entsprechend verändert, 2 Lambda, 3 Lambda, 4 Lambda, 5 Lambda, dann reduziert sich das [...] Diese abstrahlende Fläche ist halt der Grund für diese Richtwirkung und damit sind konventionelle Systeme in ihrem

Abstrahlverhalten extrem unterschiedlich, wenn es zu unterschiedlichen Treibergrößen kommt. [...] Dementsprechend muss man aber im Hochtontbereich die Hörner an anderen Trennfrequenzen anpassen, weil die Richtwirkung, die passiert wie gesagt, wenn eine Wellenlänge dort reinpasst, in die Ausdehnung des Konus Treibers, dann haben wir eben  $72^\circ$  Abstrahlverhalten, das ist noch nicht super eng, aber das wird langsam eng. Wenn ich dann 2 Lambda in diese Fläche reinbekomme, dann sind das nur noch  $36^\circ$  und dass wird dann schon extrem eng und bei 4 Lambda wären das entsprechen auch nur noch  $18^\circ$  im Abstrahlverhalten und so weiter. Und damit ist das ganze irgendwann unnutzbar, weil ich irgendwann nur noch mit einem Laserscharfen Ultra kleinen Beam auf eine Stelle bei ganz hohen Frequenzen pointe und deswegen versucht man eben diese Tieftontreiber, diese Konustreiber nur bis dahin zu verwenden wo sie noch ein sehr breites und dadurch auch kontrollierbares Abstrahlverhalten haben. Also kontrollierbar ist vielleicht das falsche Wort, sagen wir mal eher vorhersehbares Abstrahlverhalten. Sobald ich nämlich diese Richtwirkung habe, weil der Treiber zu groß wird habe ich ein riesen Problem. Dass ist bei vielen Herstellern der Grund warum die dann Dreiecksysteme bauen, weil bei einem 15 Zöller wären es tatsächlich 500 Hz 600 Hz wo man den koppeln oder entkoppeln muss dann und dann von 600 Hz direkt in den Hochtöner reinzugehen, da gibt's nicht so viele Systeme die das ohne weiteres können. [...] Weil aber, je mehr Wege ich in so einem System habe, je mehr Crossover brauche, damit wieder mehr Phasenprobleme bekomme, das ganze System komplexer und dadurch komplizierter wird und nicht einfacher im Handling, haben wir uns bei Meyersound entschlossen gar keine solchen 3 Weg Systeme zu entwickeln. [...] Das heißt wenn man solche konventionellen Systeme vergleicht muss man sehr stark unterscheiden: was ist die Größenordnung [...] Aufgrund dieser kompletten Geschichte, aufgrund dessen, dass wir bei diesen Systemen meist doch recht breit abstrahlende Systeme, zu mindestens im Tieftontbereich haben, haben wir aber auch mit einer weiteren Gesetzmäßigkeit zu tun und das ist die Inverse-Square-Law, diese Inverse Square Law ist eine ganz markante Grundlage, dass ich quasi pro Entfernungsverdoppelung die Hälfte an Energie verliere und das liegt ganz einfach daran, dass wenn ich mir eine Sphäre angucke, sprich einen Kreis oder einen Kugelausschnitt und diesen Kugelausschnitt mir in einer Entfernung halt veranschauliche, wird der immer größer und bei Entfernungsverdoppelung wird die Fläche tatsächlich doppelt so groß. Das ist bei einigen sehr eng abstrahlenden Hornsystemen, es gibt so einige die machen nur  $30^\circ$  auf  $20^\circ$  oder so, da ist das ein Mühlchen anders, aber da reden wir vielleicht nicht vom kompletten Verlust der Hälfte der Energie aber es ist schon signifikant mehr als diese berühmt berüchtigten 3 dB die man da hat und da muss ich jetzt auch noch mal kurz eihaken, weil das ist leider Gottes in unserer Branche und leider auch bei sehr vielen Leuten die das sehr häufig oder fast täglich anwenden immer noch so ein Missverständnis dabei. Wenn wir von solchen Größen wie Schalldruck, Spannung oder Strom reden im Audiobereich, dann reden wir bei Verdoppelung oder Halbierung tatsächlich von 6 dB. Das sind Größen, die sich dann durch Pegelrechnung, dass ist die Formel mit 20facher Logarithmus bla bla bla berechnen und das ergibt 6 dB. Der einzige Unterschied ist, das einzige wo das anders rum ist, ist das tatsächlich so, das sind dann sogenannte Leistungsgrößen und das ist dann tatsächlich wirklich nur die elektrische Leistung und bei der werden dann die doppelte Leistung tatsächlich nur mit 3 dB. Das Ganze bedeutet

aber trotzdem, dass wenn ich meine Lautstärke verdoppeln will, dass ich die Leistung vervierfachen muss und nicht verdoppeln, um dann akustisch die doppelte Energie zu haben. So wenn man sich das ganze sphärisch betrachtet würde das bedeuten, dass ich, wenn ich einen Lautsprecher in 10 Meter anhöre, der da vielleicht noch 100 dB macht, hab ich in 20 Metern nur noch 94 dB und in 40 Metern nur noch 88 dB und das sind signifikante Unterschiede weil 88 dB im Vergleich zu 100 ist nur noch ein Viertel der empfundenen Lautstärke. Dass ist ein Problem bei man bei großen Shows und in größeren Venues oder Veranstaltungsorten, aber auch Open Air zu kämpfen hat. Und bei einigen Musikrichtungen oder einigen Programmmaterialien ist das dann tatsächlich auch ein Sicherheitstechnisches Problem, weil wenn die Leute 40 Meter von der Bühne wegstehen und denken es ist nicht laut genug, fangen die auch ganz gerne mal an nach vorne zu drücken, weil die denken dass es vor der Bühne deutlich lauter ist und da mehr Spaß macht und dann kann das auch ganz schön schnell dazu kommen, dass dort Leute nach vorne drücken und dass das zu einem Sicherheitsrisiko wird. [...] Da kann man natürlich was dagegen tun und dass ist dass man guckt das man die Energie gleichmäßiger verteilt und das ist der Ansatz wie man ihn in modernen Line Arrays hält macht. Nun will ich mal kurz auf Line Arrays eingehen und dann will ich die beiden mal gegenüberstellen. Bei einem Line Array ist es hält einfach so dass das nichts neues ist, sondern das wurde von Dr. Harry F. Olsen tatsächlich aber schon in den 40iger Jahren 50iger Jahren untersucht und erforscht und auch tatsächlich zu Papier gebracht. Ich glaube die erste Erwähnung ist 1947 und 52 von sogenannten straight Line Sources und diese straight Line Sources, bei denen beschreibt Harry Olsen einfach, dass wenn man Schallquellen in einer Linie anordnet und dabei beachtet, dass die Treiber möglichst, oder die einzelnen Schallquellen möglichst klein sind. Ein möglichst omnidirektionales Abstrahlverhalten haben. Die gleiche Energie, die gleiche Phase die gleiche Zeit, also Delayzeit, die gleiche Polarität und den gleichen Content auch ganz wichtig haben, dass diese dann anfangen eine Richtwirkung und zwar in der Ebene wo dieses Array sich ausdehnt zu produzieren. Und dessen bedient man sich bei Line Arrays tatsächlich. So Line Arrays ist der große Vorteil, dass ich auch im Tiefotonbereich, wenn meine Linie lang genug ist, dass ich dadurch im Tiefotonbereich auch wirklich eine Richtwirkung erzielen kann. [...] Weil die Konuslautsprechertreiber, die man für den Tiefotonbereich in Line Arrays einsetzt, zeigen tatsächlich dieses Abstrahlverhalten wo sie bei tiefen Frequenzen sehr omnidirektional sind, also genau da wo sie eingesetzt werden. Aber ähnlich wie bei den konventionellen Systemen ergibt sich irgendwann aufgrund der Richtwirkung das Problem, dass das immer enger wird. So da muss man tatsächlich auch diese Systeme trennen und sagen so da hören wir mit diesen Teilen auf, weil Interaktion zwischen zwei Schallquellen und das ist eine der wichtigsten Botschaften die ich habe und die ich auch über die letzten 25 Jahre Berufserfahrung gelernt habe ist: Interaktion zwischen zwei Lautsprechern kann es nur dann geben wenn die ein breites Abstrahlverhalten und wenn sie in ihrem Abstrahlverhalten auch überlappen. Ja, wenn die überhaupt nicht miteinander interagieren können dann gibt's da auch kein Coupling, Funktionen oder konstruktive Interferenzen aber eben auch keine destruktiven Interferenzen und das muss man sich einfach mal im Kopf behalten. Wenn man das ganze mal bisschen weiterspinnt oder weiterdenkt und sich ein bisschen einen Kopf drum macht, dann kommt man relativ schnell zu dem Punkt. Was macht man denn im

Hochtonbereich? Im Hochtonbereich ist es tatsächlich so, dass ich da irgendwann nicht mehr mit Konus Treibern arbeiten kann, weil die A) einfach nicht effizient genug sind und B) viel zu groß sind, um für so hohe Frequenzen ein breites oder eben noch überlappungsfähiges Abstrahlverhalten darzustellen. Und damit hab ich das große Problem, dass ich da im Hochtonbereich etwas machen muss. [...] Damit krieg ich diese Hochtonquellen nicht dicht genug zusammen. Da gibt es einen Abstand und dieser Abstand macht uns ein großes Problem. Weil, auch da wieder, Harry Olsen in seinen Forschungen und auch in seinen entsprechenden Reports oder Dokumentationen dazu festgestellt hat: Wenn das Spacing, wenn die beiden Schallquellen einen Abstand zueinander haben der Wellenlängenbezogen, größer ist als 2/3 der Wellenlänge, in Phase wären das  $240^\circ$ , dann bekommen wir tatsächlich dort nicht das gewünschte Ergebnis, dass wir eine Addition auf der Nutzachse und Cancellations zu den anderen, also darüber und darunter. So und darüber muss man sich jetzt einen Kopf drum machen und da gibt's verschiedene Ansätze wie man das macht. [...] Hohes Gewicht ist tatsächlich ein großes Problem, grade bei Line Arrays, weil da hänge ich ja nicht nur einen Lautsprecher auf, sondern 10,12,18,20,24 und wenn die Systeme dann 150-200 kg pro Stück wiegen dann wird das schwierig in Stadien oder irgendwelchen Venues, also Hallen und so weiter, aufzuhängen, weil leider Gottes viele dieser multifunktionalen Sportarenen oder wo auch immer diese Shows auch stattfinden, nicht dafür ausgelegt sind, dass man da mal eben 20 Tonnen Lautsprecher ins Dach hängt und außerdem bei einer Show ist das ja längst noch nicht alles. Da muss ja noch viel Licht und viel Szenerie und dann will man natürlich auch noch die Bühne so ein bisschen abkoffern, dass man da so Vorhänge hinhängt und sogenannte Backdrops und heutzutage ganz viele LED-Wände und das wiegt und irgendwann ist man dann schnell bei einem gesamten Gewicht von 100 Tonnen die man versucht da in so ein Dach reinzuhängen und das können die wenigsten Hallen. So, also muss man die Lösung für die Line Arrays ein bisschen anders suchen und sich fragen: Wie kriegt man denn das Abstrahlverhalten dieser Hochtöner linienförmig und konstant. Das macht man dadurch, dass man diese Treiber dann tatsächlich aufsplittet in verschiedene Wege, die dann tatsächlich an der Vorderseite des Lautsprechers, zeitsynchron, phasenstarr und mit dem gleichen Pegel entsprechend rauskommen. Und wenn man sich das Prinzip anguckt dann ist es das, was die meisten Hersteller wirklich finden. Das heißt ich hab diese Membran von meinem Kompressionstreiber und dann fächere ich das Ganze in mehrere Kanäle auf und dann über Umwege tatsächlich aber wieder gleich sind. [...] Das ist bei 90% der Hersteller so, es gibt dann auch noch ein anderes Prinzip, wo man dann über Flächen oder über einen kegelähnlichen Körper, ein sogenannte Phaseplug, führt um dann da wieder auch ein gleichmäßiges Austrittsverhalten dort entsprechend zu kriegen. [...] Lange Rede kurzer Sinn, man schafft dadurch in der horizontalen, entschuldige in der vertikalen ein extrem enges Abstrahlverhalten, was auch mit zunehmender Frequenz enger wird, damit man eben aus dieser Misere, dieses Spacings von mehr als 2/3 der Wellenlänge bei hohen Frequenzen rauskommt und damit einfach die Hochtöner isoliert. Und das funktioniert auch richtig gut, das kann man auch ruhig machen, das funktioniert aber erst dann, wenn man in diesem Hochtonbereich drin ist. So und wenn ich mir dann jetzt angucke wie solche Line Arrays gehangen werden, dann ist die Richtwirkung im Tiefotonbereich eine Funktion oder ein physikalisches Ergebnis oder ein physikalisches Resultat aus

der Anordnung dieser Konustreiber in einer Linie und dadurch der Linienlänge und im Hochtonbereich halt einfach dieses engen Abstrahlverhaltens, was bis zu 5° nur aufmacht bei den großen Systemen und dann entsprechend der Ausrichtung des Ganzen. Das bedeutet aber auch tatsächlich, dass ich beim Aufhängen oder Ausrichten sehr genau dahin gucken muss, wo schieße ich jetzt eben mit jedem einzelnen Lautsprecher hin? Weil bei hohen Entfernungen gilt trotzdem das sogenannte Inverse-Square-Law und auch wenn das nur 5° in der Vertikalen aufmacht in der Horizontalen sind diese Line Array Systeme alle sehr breit abstrahlend, mit sehr breit meine ich wenn wir mehr als 70 oder 80° haben und damit hab ich trotzdem eine sphärische Ausbreitung und damit hab auch über die Entfernungsverdoppelung auch tatsächlich die Hälfte an Energie, die ich verliere. Da kann man das jetzt versuchen über irgendwelche tollen mystischen Worte und Bezeichnungen wie Zylinderwelle oder cylindrical waves oder wie auch immer ausdrücken, das dabei heißt die Maus keinen Faden ab, das ist ein physikalisches Gesetz und das gilt Gott sei Dank für uns alle gleich. Das heißt bei einem Line Array mache ich mir eine große Geschichte zunutze, nämlich in dem ich Lautsprechersysteme oder einzelne Elemente im gesamten Line Array, also sprich einzelne Boxen miteinander im Fernfeld überlappen lasse und dadurch natürlich meinen Pegel wieder erhöhe. Wenn ich von einer Quelle auf zwei Quellen gehe verdopple ich die Energie und damit kann ich in der gleichen Entfernung 6 dB mehr Pegel herausholen. [...] Das heißt aber auch, dadurch, dass diese Treiber nicht an der gleichen Position sein können, also physikalisch, das geht ja nicht das ist das erste mechanische Gesetz in der Physik, wo ein Körper ist, kann kein zweiter sein. [...] Dass je nach Hörposition diese Line Array Elemente auch wenn sie extrem dicht beieinander sind, nicht an der gleichen Stelle sind und damit bekomme ich Laufzeitunterschiede. Laufzeitunterschiede sind in hohen Entfernungen recht marginal, das ist eine geometrische Funktion. Aber je dichter ich an das System rangehe, um so signifikanter werden diese Unterschiede werden. Und ich hab ja nicht nur 2 Line Array Elemente, ich hab da ja 10 oder 12. Das heißt das, oberste hängt auf 8 Meter Höhe und das unterste auf 6 Meter Höhe oder eben noch weniger, 3 Meter, 4 Meter, wie auch immer und wenn ich dann ganz dicht vor so einem Array stehe. [...] Dann ist der unterste Punkt des Arrays dicht an meiner Hörposition dran und der oberste Punkt ist sehr weit weg. Und das sorgt dafür, dass Line Arrays im Nahfeld oft sehr diffus und nicht besonders klar und deutlich klingen, weil leider kann ich diesem Hochtontreiber auch nicht sagen: Pass mal auf lieber Freund, das was du dort oben machst, davon will ich hier unten gar nichts mitbekommen! Interaktion gibt es zwar am meisten, wenn die Quellen oder die Audioschallquellen, sagen wir es mal so, energetisch auf einem ähnlich großen oder am gleichen Potential sind, aber es gibt trotzdem immer noch Beeinflussungen, wenn die eine Quelle leiser ist und so weiter und so fort. Gerade bei so einem Line Array habe ich halt sehr viele verschiedene Kombinationen von Laufzeitunterschieden und unterschiedlichen Pegeln. Man darf aber immer nicht vergessen das so Pegelverhältnisse auch eine massive Rolle spielen bei der ganzen Sache. Und wenn ich ein Verhältnis von 20:1 habe. [...] Dann gibt es da immer noch eine Addition von +1 dB. [...] Das ist aber auch gleich der größte Nachteil von solchen Line Arrays, nämlich das sie im Diffusfeld, Fernfeld sehr gut und sehr sauber arbeiten und ich tatsächlich nur durch die Kombination: Wie viele Elemente lasse ich jetzt im Fernfeld überlappen? Mir halt dann da die Pegel wieder gleich ziehe. Die Theorie dahinter

ist, wenn ich für die Entfernung 10 Meter 2 Elemente verwende, ich muss aber 20 Meter weit schießen, das heißt ich brauche in 20 Meter, weil ich über die doppelte Entfernung 6 dB verliere, einfach nur doppelt so viel Schallquellen. Das heißt, auf 20 Meter richte ich 4 Elemente, auf 10 Meter richte ich 2 Elemente und dann habe ich eigentlich in der Theorie den gleichen Pegel. Das ist auch bei einem Großteil der Frequenzen der Fall. Man kann das jetzt natürlich auch sehr fließend sehen, weil ich zwischen 10 und 20 Metern mindestens noch 10 Sitzreihen reinkriege und da hat man natürlich jede Menge Publikum auch dazwischen sitzen, deswegen gibt es da einen fließenden Übergang. Aber das ist der einzige Trick bei den Line Arrays, wie man diese Pegelverteilung besser macht, indem man das Verhältnis der Anzahl der Elemente und der Entfernung so auswählt, dass ich relativ gleichmäßige Pegel habe. In der realen Welt würde ich aber nicht empfehlen es in 100 Meter gleich laut zu machen wie in 50 Metern oder 10, weil das extrem unnatürlich wirkt. Also wir Menschen leben mit akustischen Einflüssen schon im Mutterleib tatsächlich. [...] Und für uns ist ganz letztlich eins, für uns ist klipp und klar der Fakt, dass, wenn man weit weg ist, dann ist das A) nicht besonders laut und B) ist es nicht besonders hochtonlastig, weil zusätzlich noch diese atmospheric air attenuation. Also sprich eine Atmosphärische Luftdämpfung. Aber das heißt, dass bei unterschiedlichen Temperaturen im Hochtonbereich, und wir reden da jetzt im hohen Bereich also sprich 6-8 kHz aufwärts, unterschiedlich stark bedämpft wird und meistens aber mit dem Verhältnis je höher die Frequenzen werden, also je kürzer die Wellenlängen umso höher die Beeinflussung dieser Dämpfung, die ich da bekomme. To make a long story short: da kann man viel ausgleichen, aber wenn man 6 dB verliert über 50 Meter, was dann schon sehr sehr ideale Bedingungen sind im Hochtonbereich, wenn ich das kompensieren will muss ich dann halt auch wieder die 4-Fache Leistung da reinschieben. [...] Und damit hab ich halt einfach das Problemchen, das Entfernung tatsächlich ein großes Problem für die Beschallung ist und tatsächlich auch eine extrem hohe Energieverschwendug. [...] Das ganze kann ich jetzt natürlich mit einem konventionellen System nicht ohne weiteres machen. Weil bei einem konventionellen System krieg ich diese Richtwirkung im Tiefotonbereich nicht hin, weil wenn ich so ein konventionelles System auch in so einer Linie aufbamsle dann hab ich das große Problem, dass diese Schallquellen gar nicht dafür ausgelegt sind und dass die Abstände so groß werden, dass ich da nur noch Kammfiltereien habe und das eigentlich im Hochtonbereich gar nicht nutzen kann. [...] Das sind jetzt mal die groben Unterschiede. Wenn man jetzt aber tatsächlich diese konventionellen Systeme mit einem ähnlichen Hintergedanken designed. Nämlich für die doppelte Entfernung nehme ich ein doppelt so lautes System oder mehr als ein System, nämlich zwei, dann kann man das beim Pegel genauso gut korrigieren wie bei einem Line Array. Es ist nur vom mechanischen Aufwand der Kalibration, des Einmessens, des Handlings und überhaupt der Planung deutlich aufwendiger, aber man kann tatsächlich, wenn man sich Mühe gibt die gleichen Ergebnisse erzielen. [...] Da haben wir halt einen Tag linke PA aufgebaut und einen Tag rechte PA aufgebaut und heute da brauchen wir halt eine Stunde links und eine Stunde rechts, wenn es gut vorbereitet ist. [...] Bei Line Arrays gibt es noch so ein kleines anderes Problem, wenn man nämlich damit dieser Richtwirkung da mal so weiterdenkt. Dann ergibt sich nämlich tatsächlich das Problem der zu starken Richtwirkung im Lowmidbereich, so ab 100-200 Hz sieht man das häufig. Das ist dann aufgrund

dieser Linienlängen dieser Beam extrem eng wird, so dass der Hochtonbereich kaum folgen kann. Woraufhin man seit ein paar Jahren dann mit solchen „beamsteering“ Mechanismen oder eigentlich Algorithmen arbeitet. Das heißt dann bei dem einen Adaptive Beam Control bei dem nächsten heißt es Arrayprocessing, bei uns heißt es Lowmidbeamcontrol, weil wir das tatsächlich auch nur im Lowmidbereich machen. Liegt aber, daran dass wir tatsächlich, ab 500 Hz bei unseren größeren Systemen [...] in dem Bereich liegen die Crossover. Das heißt wir müssen uns tatsächlich nur um den Bereich zwischen 125 und 500 Hz kümmern um da diesen Lowmidbeam wieder ein bisschen aufzufächern und das macht man dann tatsächlich über Manipulation des Phasengangs der einzelnen Elemente zueinander und dann kriegt man das auch extrem cool hin und auch so das es dem Hochtonbereich folgt, aber wie immer im Leben ist das Ganze nicht kostenlos. [...] Dieser Preis in dem Fall ist halt, dass die Phasengänge nicht mehr identisch sind und das der Phasengang halt mittendrin im Frequenzgang irgendwo manipuliert werden muss. Das bedeutet, dass die Linearität des Systems nicht mehr 100%ig ist, aber man muss halt da leider Gottes diese Kompromisse eingehen und sich überlegen, will ich eine gleichmäßige Distribution haben oder will ich eine möglichst hohe Linearität haben, beides gleichzeitig ist im Moment ziemlich schwierig zu erreichen. [...]

Interviewer: die Kompromisse, was beim Entwickeln von Lautsprechersystemen eingegangen werden müssen, die was ja offensichtlich sehr viele sind und je nach Anwendungsbereich unterschiedlich sind. [...]

Michael Pohl: Die Frage kannst du stellen, die kann ich dir in gewissen Sachen, ich sag mal relativ generell auch sehr gut beantworten aber ich kann dir natürlich jetzt keine Entwicklungsgeheimnisse und Details erzählen, was wir jetzt in unserer nächsten Lautsprechergeneration machen werden. [...] Die Kompromisse, die man so bei dem Design von so einem Lautsprecher machen muss oder sollte, die sollte, das sollte man als Gewissensfrage sich selber stellen. In der heutigen Zeit, gerade wenn man sich so im Mitteleuropäischen Raum bewegt, dann gibt es eine Flut, eine Unmenge an Lautsprecherherstellern, also ich alleine in Deutschland sind das über 20 die im professionellen, die sich selber als professionelle Lautsprecherdesigner und Hersteller bezeichnen, wie professionell das jetzt alles wirklich ist, ist ein anderes Thema. Aber sagen wir mal so, dass sie vom Lowbudgetbereich bis über das Prämiumsegment versuchen alles abzudecken. Das zu tun und das bringt mich gleich auf den ersten Punkt auch. Wenn man sich die führenden Hersteller im professionellen Beschallungsbereich anschaut ist das eine Hand voll und bei dieser Hand voll gibt es eine Range von Lautsprechern. Eben dieses Prämiumsegment, das sind halt diese Prämiumlautsprechersysteme und da gibt's dann nicht die Semiprofessionelle Serie und die Billigserie. Weil ein professioneller Hersteller der halt wirklich versucht, die bestmöglichen Lautsprecher zu bauen und das Bestmögliche an Qualität rauszuholen, der macht eben weniger Kompromisse und schon gar keine Kompromisse im Bereich Budget, weil wenn etwas tatsächlich nur 10% besser werden soll, dann hat man in unserer Branche leider oftmals das Problem, das es gleich doppelt so teuer wird. [...] Es hängt aber auch immer vom persönlichen

Anspruch des Kunden ab und das muss man ganz ehrlich so sagen. [...] Das ist mal eher der Grund, warum man in diesem Prämiumsegment gar nicht so viele Kompromisse machen will aber auch nicht braucht. Weil bestimmte Kompromissachen kann man halt dadurch vermeiden, indem man nicht versucht, die eierlegende Wollmilchsau zu basteln, sondern indem man spezialisierte Produkte baut. [...] Das heißt aber auch, dass die Kunden oder die Nutzer dieser Systeme entsprechend dieses, des Venues, der Show, der Planung was sie da gemacht haben, auch dem Kundenbudget dessen, der die Produktion da beauftragt wie auch immer, die entsprechende Schublade aufmachen können und sich das passende Tool dafür rausholen können. [...] Diese Multitools versucht man tatsächlich in dem Semiprofessionellen Bereich zu bauen, aber eben nicht in dem hohen, deswegen muss man da gar nicht so viele Kompromisse eingehen wie man jetzt erstmal denkt. [...] So ein bisschen was hier und so ein bisschen was da und ein bisschen was da, das ist sicherlich wirtschaftlich eine coole Sache, weil man mit einem Ding ganz viel erschlagen kann, aber man kann halt vieles gut aber nichts richtig gut tun und deswegen spezialisiert man die Systeme heutzutage auch wirklich so. [...] Beim Design von so einem Lautsprecher muss man halt einfach gucken auch, dass man versucht die Komponenten, die man verwendet, möglichst gut abzustimmen. [...] Die nehmen dann einen Lautsprechertreiber von der Stange, oder sagen 10 Zöller haben wir, dann nehmen wir die halt her und was da so mit dem Gehäuse, was da so an kleinen Missabstimmungen und sowas gibt, das kann man ja immer noch easy elektronisch mit so ein bisschen Controller und Processing und so ein bisschen DSP und FPGA und was auch immer Gefussel dann gerade ziehen. Das kann man, das klingt dann aber auch entsprechend so. Meiner Meinung nach. Weil grundsätzlich alles, was du an elektronsicher Schrauberei machst, verändert die Phasengänge und wenn es die Phasengänge nicht verändert, weil sogenannte FIR Filter, finite Impulse Response Filter sind, dann verändern sie die Latenz des ganzen Systems und lineares System bedeutet jetzt nicht, nur dass der Frequenzgang linear also flat ist sondern auch, dass die Phasengänge möglichst flat sind, weil wenn man das mal auf Kindergartendeutsch übersetzt. Phase ist ja nichts anderes als eine frequenzabhängige Laufzeit. Also wenn man das jetzt runterbricht, Phase ist keine Zeit, das kann man jetzt nicht so eins zu eins umrechnen, aber man kann den Unterschied von einer Phase in Millisekunden schon auch zum Ausdruck bringen. Heißt aber effektiv, wenn mein Phasengang nicht linear ist, dann bedeutet das, dass nicht alle Frequenzen von einer Schallquelle von einer Schallquelle gleichzeitig wiedergegeben werden, sondern ein paar einfach später und damit ist das eine Abweichung vom Originalsignal und eine Manipulation des Originalsignals und wenn das passiert, dann ist mein System nicht mehr linear. Idealerweise gibt mein Lautsprecher das wieder was ich ihm hinten mit einem XLR reinschicke nur lauter und mit einem definierten Abstrahlverhalten, dass beinhaltet aber wie gesagt Phasengänge, Frequenzgänge, das beinhaltet Zeiten, also auch Latenzen sind da ein ganz großes Thema [...] und was natürlich auch noch ein ganz wichtiger Unterschied ist, ist, dass das System über die Nutzdynamik, also sprich über die doch verschiedenen Lautstärkebereiche doch möglichst unverfärbt und unverfälscht das ganze wiedergibt. Und das Ganze mit einem extrem geringen Klirrfaktor, also sprich mit extrem wenig harmonischen Verzerrungen und auch nicht harmonischen Verzerrungen und Noises und was es da nicht alles gibt. Das sind dann die sogenannten THD's+N, +K und so weiter. So wenn man das eben wirklich

machen will, dann sollte man tatsächlich nicht schon bei den ersten kleinen Dingen Kompromisse machen. Weil, das addiert sich nicht auf, das multipliziert sich nämlich leider auf. [...] Wenn ich eine Sache noch über Lautsprecher sagen kann, wenn du mehr Lautsprecher hast, dann hast du auch mit mehr Problemen zu tun. Wenn es eines noch zu beachten gibt dann ist dass das sogenannte KISS Prinzip: Keep it simple, stupid! [...] Je mehr ich mich in irgendwelche komplexen Dinge verrenne und verhaddle, umso mehr Schwierigkeiten habe ich mit Dingen und verliere oftmals das Große wesentliche aus dem Fokus. [...] Es gibt bei vielen Herstellen over Easy Funktionen und klick klick klick ist alles fertig und alles ist ja schon mal auf 80%/90% und ist ja alles schon mal ganz super und ganz toll. Und Berechnungssysteme die dir sagen wie musst du den Lautsprecher winkeln und bla und soweit und überhaupt und ja so klingt das Ganze dann auch. Lieblos, leblos und weil das fängt nämlich damit an wie hoch ich mein System hänge und das kann so ein System nicht selbst entscheiden, das gebe ich dem vor. Und wenn ich da schon mal eine falsche Entscheidung treffe, kann das das System nur noch verschlimmbessern und nicht lösen das Problem. Und die Angabe muss ich ihm halt machen, weil die Angabe kommt irgendwo vom Set Designer oder vom Rigger oder von der Bühne. Da hab ich halt viel Spielraum und manchmal auch eben nicht. [...] Das braucht Erfahrung, das braucht gute Systemingenieure und das braucht gute Planung und wenn man das berücksichtigt dann kann man aus vielen Sachen extrem viel rausholen. Wenn man das negiert oder nicht wahrhaben will oder ignoriert, dann nutzt einem das beste System nichts. [...]

# D. Interview mit Reinhart Nell – Lambda Labs, 18.12.2019

Hallo Jakob,

es ist leider etwas viel los. Nun bekommst du endlich die Antworten:

## 1. Welche Kompromisse müssen beim Entwickeln von Lautsprechersystemen eingegangen werden?

Ich beziehe mich nur auf akustische, denn natürlich spielen in der Praxis sämtliche Einflüsse wie Wirtschaftlichkeit, Gewicht, Handling, Rigging, Größe und Oberflächenbeschaffenheiten samt Optik eine wichtige Rolle.

Einer der wichtigsten Aspekte ist die Abstrahl eigenschaft eines Lautsprechers. Diese soll den Publikumsbereich im Idealfall gerade überdecken, aber auch nicht mehr. Einerseits um den Directivity Index hoch zu halten und damit die Empfindlichkeit des Lautsprechersystems zu maximieren, andererseits um die umliegende Raumakustik/Nachbarschaft nicht kontraproduktiv mit Energie zu versorgen.

Eine hohe Richtwirkung erreicht man üblicherweise mit einer großen abstrahlenden Fläche im Vergleich zur abgestrahlten Wellenlänge. Andere Konzepte wie z.B. eine cardiode Charakteristik sind neben technischem Aufwand mit anderen Kompromissen behaftet. Hier finden sich etwa Nachteile in der Klangtreue oder in der begrenzten Bandbreite. Auch komplex gesteuerte DSP Lösungen die variable Abstrahleigenschaften per Software zulassen, unterliegen Einschränkungen und ungewünschten Artefakten (Nebenkeulen, Latenz durch Filterung, Bandbegrenzung). Bei konventionellen Lautsprechern bei welchen die Abstrahlcharakteristik durch Hornladung erfolgt ist diese fest vorgegeben und elektronisch nicht veränderbar.

Mittels Signalbearbeitung lässt sich zwar jeder x-beliebige Frequenzgang in Frequenz- und Phasengang linearisieren. Doch sind starke Schwankungen in der Empfindlichkeit ein großes Problem, da Musik aus allen möglichen Signalen besteht. Im Grenzlastbereich ist dies ein großes Problem, wenn gewisse Frequenzen deutlich lauter wiedergegeben werden als andere, die bereits Schutzmechanismen (Limiter) auslösen.

Bei Mehrwegesystemen gibt es oft Kompromisse bei denen ein leicht mangelhafter Frequenzgang eines Weges in Kauf genommen wird, bzw. werden muss um die Abstrahlcharakteristik des Gesamtsystems gleichmäßig verlaufen zu lassen. Andernfalls kommt es z.B. bei off Axis Frequenzgängen zu Einbrüchen an der Trennfrequenz.

Ein weiteres sehr anschauliches Beispiel sind Bassreflex Ports. Sind diese zu klein, so verlieren sie Ihre Funktion bei großen Pegeln. Zusätzlich entstehen unangenehme Strömungsgeräusche. Baut man sie hingegen mit mehr Querschnitt und um die Abstimmung zu erhalten entsprechend länger, so treten Portresonanzen stärker auf.

## 2. Was deiner Meinung nach die Vor- und Nachteile eines Line Array Systems im Vergleich zum HORIZONTALEN Lautsprechercluster ist?

Ein vertikales Array, im Folgenden kurz Line Array genannt ist bei großen Beschallungen eine enorm wichtige Werkzeug. Ist die Line entsprechend lang kann in gewissen physikalischen Grenzen der Pegelabfall zwischen nah- und fern stehendem Publikum geringer gehalten als nach dem Inverse-Square-Law Gesetz. Große Beschallungsdistanzen sind damit hervorragend realisierbar. Seitenwind und die atmosphärische Dämpfung setzen jedoch auch hier Limits die bei hoher Qualitätsanforderung nicht über 100m hinaus gehen. Als nachteilig ist eine genaue Planung zu nennen die Software zur Berechnung der gleichmäßigen Pegelverteilung fast unumgänglich macht. Trotz sorgfältiger Planung treten oft Schwankungen im Frequenzgang auf und Nebenkeulen in der Abstrahlung auf. Dies ist physikalisch bedingt mit den üblichen Anforderung an Pegelabfall über die Distanz nicht zu lösen. Ein perfektes Waveguide für den Superhochtonbereich kann für EINE definierte Krümmung der Wellenfront entworfen werden. Wird z.B. eine mechanische Winkelung von 0-10° zwischen den einzelnen Elementen angeboten unterliegt die akustische Qualität entsprechenden Kompromissen.

Ein horizontales Lautsprechercluster hat in der Regel einen festen horizontalen Abstrahlwinkel. Über die Anzahl der Elemente kann die Abstrahlbreite variiert werden. Der Betrieb kann ohne, bzw. mit rudimentärer Simulation einfach erfolgen und gerade Indoor kann der Abstrahlwinkel an den Raum angepasst werden. (Bei einem Line Array wäre dazu ein anderer Typ mit anderer Abstrahlung notwendig)

So ist es möglich mit einem horizontalen Array eine 360° Beschallung perfekt auszuführen. Ein üblich gekrümmtes Line Array mit 90° bietet dazu keine Möglichkeit. Auch nicht, wenn man diese mit 4 Linien aufbaut da es zwischen den einzelnen Linien aufgrund der mechanischen Aufbaudistanz zu Phasingeffekten kommt und die Wiedergabequalität äußerst moderat ausfallen würde.

Hat das horizontale Array keine vertikale Richtwirkung so gilt das Inverse-Square-Law uneinschränkt im Publikumsbereich. Ein konventionelle horizontales Cluster ist für deutlich kleine Anwendungsbereich als Line Arrays sinnvoll.

Wird das Lautsprechersystem entsprechend groß ausgeführt und hat breitbandige Richtwirkung, sodass nahe Hörer einen gleichmäßigen Frequenzgang erhalten, jedoch weniger Pegel durch einen sauber entwickelten off-axis Frequenzgang so lässt sich der Pegel für nahe und fern stehendes Publikum ebenfalls in gewissem technischen Rahmen einigermaßen gleichmäßig halten. Mit einer geballten Ladung an akustischen Features kann beim QX System eine Distanz mit hochwertigster Beschallungsqualität von 70m erreicht werden. (In Relation mit Line Array ca. 100m).

## 3. QX mit den Features die ich schonmal englisch niedergeschrieben habe. Du bekommst noch ein paar Bilder, die gesamte Präsentation hat etwas zu viele interne Informationen, die kann ich dir nach genauer Durchsicht nicht weiterreichen.

#### EXPLANATION of QX features in short with some technical facts

3.1. Asymmetric vertical dispersion: This is to bring energy where we need it, into the audience. More sensitivity is the result next to less room reflexions indoor. Furthermore this large HF/MF Horn with about 65x40cm takes care of wideband level reduction working perfectly together with the 12" and 15" sections. This means when you rig the system there is some kind of level compensation between near and far listeners just by directivity of the horns and that with a very high linearity in frequency response.

3.2. High frequency compensation: There is an extra directivity because of slot height to compensate air losses due to air particle absorption over distance for about 9db at very high frequencies

3.3. Horizontal arrayability: It's here about precured wavefront from waveguides with exactly 7.5° each. This is a major and very clearly audible improvement to any "single point source speakers" tried to be arrayed to totally overcome "phasing" they suffer always from. A precured waveguide is even better in summation than any line array waveguide, because usually there is one kind of acoustical opening angle, but different mechanical array angles.

3.4. Amplitude shading: A full 360° circle with QX-3/QX-3B is very close to a perfect point source. Because of truncation in space from that full circle to e.g. 60° or 90° of coverage we suffer from two effects (midrange beaming and a passband ripple in the coverage area). Luckily both of them could be solved with the same technique, called amplitude and phase weighting. For the 0,75" and 2" drivers this is simply a gain reduction. For the 12" section it is a bit more tricky with DSP controlled amplifier channels. In the end we have a -10db down points at the mechanical coverage, but totally smooth inside the coverage and with minor sidelobes outside the coverage.

Ich hoffe das ist der technische Input so wie du ihn dir vorgestellt hast. Allgemeine Aussagen sind nicht immer ganz einfach, da es wirklich auf das jeweilige Detail eines Lautsprechersystems ankommt und manche Übergänge auch fließend sind.

Viele Grüße,  
Reinhard

Mit freundlichen Grüßen / Best regards

Reinhard Nell

## E. Fragebogen zum Vergleich von Lautsprechersystemen

St. Pölten University of Applied Sciences

4



---

### Fragebogen zum Vergleich von Lautsprechersystemen

Digitale Medientechnologien - Audiodesign

Jakob Maurer  
21. Dezember 2019

Fachhochschule St. Pölten GmbH, Matthias Corvinus-Straße 15, 3100 St. Pölten, T: +43 (2742) 313 228, F: +43 (2742) 313 228-339, E: cse@fhstp.ac.at, I: www.fhstp.ac.at

Zunächst herzlichen Dank, dass Sie sich die Zeit für diesen Vergleichstest genommen haben.

Es werden zwei verschiedene Lautsprechersysteme miteinander verglichen.

Lesen Sie sich bitte zunächst genau den Fragebogen durch. Dieser ist in 3 Abschnitte geteilt. Die ersten zwei Abschnitte sind ident, und dienen jeweils zur Beschreibung eines der beiden Lautsprechersysteme. Der dritte Abschnitt dient dem direkten A/B Vergleich der beiden Systeme und fragt außerdem einige demografische Daten ab.

Im Anschluss hören Sie eine Auswahl an Musikausschnitten über das erste Lautsprechersystem. (In etwa 10 Ausschnitte mit einer Gesamtlänge von circa 15 Minuten.) Während dieser Zeit bearbeiten Sie bitte den Abschnitt zum ersten System. Die gleiche Prozedur wiederholt sich im Anschluss für das zweite Lautsprechersystem. Zum Schluss hören Sie noch für die Beantwortung der letzten zwei Fragen einen Musikausschnitt im direkten A/B Vergleich zwischen den Lautsprechersystemen.

## SYSTEM A

### Musikalische und technische Genauigkeit

Wie akkurat ist das Lautsprechersystem in der Wiedergabe?  
(Wie gut reproduziert das Lautsprechersystem den Klang?)

Gut	1	2	3	4	5	6	7	schlecht

Wie nahe ist das Lautsprechersystem daran einen Klang zu produzieren, der Sie überzeugt, live zuzuhören?

(Haben Sie das Gefühl einer Live-Band/einem Live-Orchester zuzuhören?)

Sehr nahe	1	2	3	4	5	6	7	Weit entfernt

### Frequenzgang/Färbung

Trifft die Behauptung zu, dass der Klang an den Frequenzextremen voll ausgeschöpft wird?  
(Wird der Klang in allen Klangbereichen (Höhen, Mitten und Tiefen) vollkommen reproduziert?)

Trifft zu	1	2	3	4	5	6	7	Trifft nicht zu
Höhen								
Mitten								
Tiefen								

Klingen die Instrumente natürlich oder verfärbt?

natürlich	1	2	3	4	5	6	7	verfärbt

### Klarheit und Transparenz

Wieviel Detail ist hörbar?  
(Sind die Klänge der einzelnen Instrumente trennbar oder erklingen sie eher in einer Klangwolke?)

einzelnen	1	2	3	4	5	6	7	Klang suppe

### Körnigkeit, Härte und Verzerrung

Klingt das Lautsprechersystem bei hoher Wiedergabelautstärke verzerrt?

Nicht verzerrt	1	2	3	4	5	6	7	verzerrt

### Stereo Bild

Hören Sie wo im Raum die einzelnen Instrumente klingen? (Lassen sich diese orten?)

ortbar	1	2	3	4	5	6	7	Nicht ortbar

### Dynamik

Sind laute Passagen in der Musik deutlich lauter als leise?

Trifft zu	1	2	3	4	5	6	7	Trifft nicht zu

Können subtile Änderungen in der Musik wahrgenommen werden, wenn gleichzeitig etwas sehr Lautes passiert?

Trifft zu	1	2	3	4	5	6	7	Trifft nicht zu

### Optisches Bild

Spricht Sie das Lautsprechersystem rein optisch an?

Trifft zu	1	2	3	4	5	6	7	Trifft nicht zu

## SYSTEM B

### Musikalische und technische Genauigkeit

Wie akkurat ist das Lautsprechersystem in der Wiedergabe?  
(Wie gut reproduziert das Lautsprechersystem den Klang?)

Gut	1	2	3	4	5	6	7	schlecht

Wie nahe ist das Lautsprechersystem daran einen Klang zu produzieren, der Sie überzeugt, live zuzuhören?

(Haben Sie das Gefühl einer Live-Band/einem Live-Orchester zuzuhören?)

Sehr nahe	1	2	3	4	5	6	7	Weit entfernt

### Frequenzgang/Färbung

Trifft die Behauptung zu, dass der Klang an den Frequenzextremen voll ausgeschöpft wird?  
(Wird der Klang in allen Klangbereichen (Höhen, Mitten und Tiefen) vollkommen reproduziert?)

Trifft zu	1	2	3	4	5	6	7	Trifft nicht zu
Höhen								
Mitten								
Tiefen								

Klingen die Instrumente natürlich oder verfärbt?

natürlich	1	2	3	4	5	6	7	verfärbt

### Klarheit und Transparenz

Wieviel Detail ist hörbar?  
(Sind die Klänge der einzelnen Instrumente trennbar oder erklingen sie eher in einer Klangwolke?)

einzelnen	1	2	3	4	5	6	7	Klang suppe

### Körnigkeit, Härte und Verzerrung

Klingt das Lautsprechersystem bei hoher Wiedergabelautstärke verzerrt?

Nicht verzerrt	1	2	3	4	5	6	7	verzerrt

### Stereo Bild

Hören Sie wo im Raum die einzelnen Instrumente klingen? (Lassen sich diese orten?)

ortbar	1	2	3	4	5	6	7	Nicht ortbar

### Dynamik

Sind laute Passagen in der Musik deutlich lauter als leise?

Trifft zu	1	2	3	4	5	6	7	Trifft nicht zu

Können subtile Änderungen in der Musik wahrgenommen werden, wenn gleichzeitig etwas sehr Lautes passiert?

Trifft zu	1	2	3	4	5	6	7	Trifft nicht zu

### Optisches Bild

Spricht Sie das Lautsprechersystem rein optisch an?

Trifft zu	1	2	3	4	5	6	7	Trifft nicht zu

### Im direkten A/B Vergleich beider Lautsprechersysteme

#### Tempo und Rhythmus

Lässt das Lautsprechersystem das Tempo des Musikstücks schneller wirken?

Trifft zu								Trifft nicht zu
System A								
System B								

#### Allgemeine Präferenz

Welches Lautsprechersystem sagt Ihnen klangtechnisch mehr zu?

System A	1	2	3	4	5	6	7	System B

#### Demografische Daten

Alter: \_\_\_\_\_

Geschlecht: \_\_\_\_\_

#### Häufigkeit des Musikkonsums

Sehr oft	1	2	3	4	5	6	7	Sehr selten

Würden Sie sich selbst als audiophile/n HörerIn bezeichnen?

Trifft zu	1	2	3	4	5	6	7	Trifft nicht zu