#### TECHNISCHE UNIVERSITÄT BERLIN

Fakultät I - Geistes- und Bildungswissenschaften Institut für Sprache und Kommunikation

#### MASTER THESIS

# Entwicklung von DSP-Entzerrungen für einen Masteringlautsprecher mit Optimierung auf verschiedene Anwendungen

Author: 1. Gutachter:

Alexander Wirth Prof. Dr. Stefan Weinzierl

Betreuer: 2. Gutachter:

Andreas Guhde Prof. Dr.-Ing. Anselm Goertz

Masterarbeit zur Erlangung des akademischen Grades

M. Sc.

im Studiengang

Audiokommunikation und -technologie

04. November 2016

# Eidesstattliche Erklärung

Hiermit erkläre ich, dass ich die vorliegende Arbeit selbständig sowie ohne unerlaubte fremde Hilfe und ausschließlich unter Verwendung der aufgeführten Quellen und Hilfsmittel angefertigt habe.

Alexander Wirth Berlin, 04. November 2016

# Danksagung

Zuerst gebührt mein Dank an die Firma *ADAM Audio*, die mir ermöglicht hat an dem Projekt "MP1 MK2" mitzuwirken und vor allem an Andreas Guhde, der mir bei der Entstehung dieser Arbeit immer mit Rat und Tat zur Seite gestanden ist.

Kein geringerer Dank geht an die beiden Professoren Anselm Goertz und Stefan Weinzierl, die diese Masterarbeit betreut und begutachtet haben.

Ebenfalls möchte ich mich bei meiner Familie und meinen Freunden bedanken, die mich während dieser Zeit fachlich als auch emotional unterstützt haben.

Ein besonderer Dank geht an die Testteilnehmer des Hörversuchs, ohne die diese Arbeiten nicht hätte entstehen können.

# Inhaltsverzeichnis

Ei	desst	attliche	Erklärung	1
Da	anksa	gung		2
1	Einl	eitung		10
2			r angewandten Technologien	12
	2.1		ie zu Lautsprechertechnik	12
		2.1.1	AMT-Lautsprecher	12
		2.1.2	Lautsprecherimpedanzmodell	13
		2.1.3	Gehäusekonstruktion	14
		2.1.4		15
			2.1.4.1 Vorteile und Nachteile gegenüber ventilierten Ge-	17
	2.2	Magata	häusebauarten	17 17
	2.2		echnik	18
	2.3	2.3.1	l Frequenzweiche und Lautsprecherentzerrung Digitale Filter	18
		2.5.1	2.3.1.1 FIR-Filter	19
			2.3.1.2 IIR-Filter	20
			2.0.1.2	20
3	Auf	bau des	s Lautsprechers	22
	3.1		us des Lautsprechers "MP1 MK2"	22
	3.2		orechergehäuse	22
	3.3	Lautsp	orechertreiber	
		3.3.1	Hochtontreiber "X-Art" von ADAM-Audio	23
			Mitteltontreiber mit Keramikmembran	24
		3.3.3	Tief- und Tiefmitteltontreiber	25
	3.4		rker	26
	3.5	DSP .		26
4	Aku	stische	Messungen im reflexionsarmen Halbraum	29
			chsbedingungen	29
		4.1.1	Reflexionsarmer Halbraum	29
		4.1.2	Messsystem - Monkey Forest	30
		4.1.3	Mikrofon	30
	4.2	Lautsp	prechermessungen	31
		4.2.1	Positionierung des Lautsprechers	31
		4.2.2	Impedanzmessung	31
		4.2.3	Frequenzgangmessung	34

			4.2.3.1 X-Art Hochtöner	
			4.2.3.2 Mitteltöner	
			4.2.3.3 Tiefmittel- und Tieftöner	
		4.2.4	1 0 0	
			4.2.4.1 Winkelmessungen und Ballonmessungen	
		4.2.5	Messung der Verzerrungen	
			4.2.5.1 THD Messung	
			4.2.5.2 Verzerrungsmessung mit Multisinussignal	43
5			ng der digitalen Frequenzweiche	45
	5.1	Filtere	erstellung	45
		5.1.1	Grundlagen der FIR-Filtererstellung mittels "Monkey	
			Forest"	46
		5.1.2	FIR-Filtererstellung mit der Crossover-Funktion von	
			"Monkey Forest"	47
		5.1.3	IIR-Filter-Erstellung	49
	5.2	Vergle	eich der Filterentzerrungen	50
6	Hör	versucl	n .	52
	6.1	Vorbe	trachtung	53
		6.1.1	Stand der Technik	
	6.2	Allger	meines Vorgehen	
		6.2.1	Klangliche Unterschiede zwischen IIR- und FIR-Filtern	
		6.2.2	Erstellung der Impulsantwort mit IIR-Phase	
		6.2.3		
		6.2.4		
		6.2.5	Versuchssoftware	
	6.3		Test	
			Zu untersuchendes Messobjekt	
		6.3.2	Versuchsbeschreibung	58
		6.3.3	Stimulus	
			Ergebnisse	
		0.0.	6.3.4.1 Statistische Auswertung	
	6.4	Qualit	tativer Hörversuch (AB-Versuch)	60
	0.1	6.4.1	Zu untersuchendes Messobjekt	
		6.4.2	Versuchsbeschreibung und -stimuli	
		6.4.3	Ergebnisse	62
		0.1.0	6.4.3.1 AB-Versuch	62
			6.4.3.2 AB-Versuch "Absolute Bewertung"	64
	6.5	Fragel	bogen Auswertung	66
	6.6		ssion der Hörversuchsauswertung	
7	Fazi	t		75
Δ	Anh	ano		77

# Abbildungsverzeichnis

<ul><li>2.1</li><li>2.2</li><li>2.3</li><li>2.4</li><li>2.5</li></ul>	"X-ART"-HochtönerImpedanzmodell eines LautsprechersTechnische Charakteristiken von $Q_tc$ Blockschaltbild FIR-FilterBlockschaltbild IIR-Filter	14
3.1 3.2	CAD-Modell des "MP1 MK2"	24 27
4.1 4.2 4.3 4.4 4.5 4.6 4.7	Reflexionsarmer Halbraum "MP1 MK2" im reflexionsarmen Halbraum Lautsprecher im reflexionsarmen Halbraum gekippt Impedanzverlauf zweier Tieftöner Impedanzverlauf der Tiefmitteltöner Impedanzverlauf des Mitteltöners Impedanzverlauf des X-Art Hochtöners Betragsfrequenzgangmessung des AMT-Hochtöners	30 31 32 33 33 34 35
4.9	Betragsfrequenzgangmessung zwei parallelgeschalteter Mittel-	•
4.11 4.12 4.13 4.14 4.15 4.16 4.17 4.18	töner Tiefmitteltöner: Nah- und Fernfeld Kombination Nah- und Fernfeld der Tieftöner Gesamtfrequenzgang mit FIR-Filter Phasengangmessung mit FIR-Filterung Winkelmessung mit FIR-Filter Balloonmessungen Total Harmonic Distrotion (f) der einzelnen Wege Total Harmonic Distrotion (f) des Lautsprechers Intermodulation Distortion (IMD) - Anregungssignal Intermodulation Distortion (IMD) Messung	36 37 38 38 39 40 42 43 44 44
5.1 5.2 5.3 5.4 5.5	FIR-Koeffizientengenerierung (Quelle: Müller (1999)) FIR-Filter-Koeffizientengenerierung	
6.1 6.2	Impulsantwort der IIR-Phase	

6.3	Ort des Hörversuchs	57
6.4	Versuchssoftware	57
6.5	AB Hörversuch - Klangunterschiede zwischen FIR und IIR (ver-	
	deckt)	68
6.6	AB Hörversuch - Klangunterschiede zwischen FIR und IIR (ver-	
	deckt)	69
6.7	AB Hörversuch - Klangunterschiede zwischen FIR und IIR (ver-	
	deckt)	70
6.8	Deskriptive graphische Darstellung des Hypothesentests	71
6.9	Histogramme der absoluten Bewertung	72
6.10	Graphische Darstellung Hypothesentests absolute Bewertung	73
6.11	Erfahrungsparameter der Probanden	74
A.1	Hörversuchsbeschreibung	77
	Max Patch - AB-X Test	
A.3	Max Patch - AB Hörversuch	78

# **Tabellenverzeichnis**

3.1	Belastbarkeit des "X-Art"-Magnetostat	24
3.2	Lautsprecherparameter des Mitteltöners	
3.3	Belastbarkeit des Mitteltöners	25
3.4	Lautsprecherparameter des Tieftöners	25
3.5	Belastbarkeit des Tieftöners	26
5.1	Parameter der FIR-Filter	47
5.2	Parameter Prototypenbandpässe der FIR-Generierung	49
6.1	Ergebnisse des ABX-Tests	60
6.2	AB-Versuch Bewertungsskala	62
6.3	Deskriptive Statistik Klangeingschaften	63
6.4	Hypothesentest	64
6.5	Deskriptive Statistik der absoluten Bewertung	65
6.6	Hypothesentest absolute Bewertung	65
A.1	Genaue Beschreibung der Klangeigenschaften des qualitativen	
	Hörversuchs	80

# Abkürzungsverzeichnis

AD Analog Digital

ADC Analog Digital Converter

AES/EBU Audio Engineering Society / European Broadcasting Union:

Standard zum Austausch von digitalen Audiosignalen

AMT Air Motion Transformer CAD Computer Aided Design

DA Digital Analog

DSP Digital Signal Processing

**EQ** Equalization

FEM Finite Elemente Methode
FFT Fast Fourier Transfomation
FIR Finite Impulse Response
IIR Infinite Impulse Response

HT Hochtöner

IMD Intermodulation DistortionMP1 MK2 Mastering Piece Mark 2

MT Mitteltöner

RAHR Reflexionsarmer Halbraum
RAR Reflexionsarmer Raum
SNR Signal to Noise Ratio
THD Total Harmonic Distortion

TMT Tiefmitteltöner

TT Tieftöner

X-ART eXtended Accelerating Ribbon Technology

# Symbolverzeichnis

$B \times l$	Motorstärke (Kraftfaktor)	[N/A]
$C_{ms}$	Nachgiebigkeit der Aufhängung des Lautsprechers	[mm/N]
$C_s$	Mechanischer Parameter der Nachgiebigkeit	[mm/N]
$d_{Membran}$	Membrandurchmesser	[cm]
$f_s$	Resonanzfrequenz des Lautsprechers	[Hz]
$f_c$	Resonanzfrequenz des Gehäuses	$[\mathrm{Hz}]$
$L_p$	Schalldruckpegel	[dBSPL]
$L_{p,1\ W}$	Schalldruck bei 1 m Entfernung	[dB/2.83  V/1  m]
$L_{evc}$	Induktivität der Spule des Lautsprechers	[H]
$m_{ms}$	Bewegte Masse des Lautsprechers	[g]
p	Druck	$[N/m^3]$
$p_{eff}$	Effektiver Druck	$[N/m^2]$
P	akustische Leistung	[W(J/s)]
$P_0$	akustische Bezugsleistung	[W(J/s)]
Q	Güte	[-]
$Q_{es}$	Elektrische Lautsprechergüte	[-]
$Q_{ms}$	Mechanische Lautsprechergüte	[-]
$Q_{tc}$	Gehäusegüte	[-]
$Q_{ts}$	Gesamtgüte	[-]
r	Abstand	[m]
$R_e$	Gleichstromwiderstand der Schwingspule	$[\Omega]$
$R_{evc}$	Frequenzabhängige Widerstand des Lautsprechers	$[\Omega]$
$R_{ms}$	Mechanischer Verlustwiderstand des Lautsprechers	[kg/s]
$V_b$	Innenvolumen des Gehäuses (netto)	[1]
$V_{as}$	Äquivalentvolumen des Lautsprechers	[1]
$X_{max}$	Maximale lineare Membranauslenkung	[mm]
Z	Strahlungsimpedanz der Membran	[Ns/m]
$Z_b$	Strahlungsimpedanz der Membranrückseite	[Ns/m]
$Z_f$	Strahlungsimpedanz der Membranvorderseite	[Ns/m]
$\alpha$	Verhältnis der Nachgiebigkeiten	[-]

# Kapitel 1

# **Einleitung**

In den letzten drei Jahrzehnten hat sich die Mikroprozessortechnik und die damit einhergehende Signalverarbeitung rassant weiterentwickelt. Die Audioanwendungen in diesen Bereichen gerieten deswegen in eine Art Sättigungszustand im Verhältnis von technischer und menschlich wahrnehmbarer Verbesserung. In den Neunzigerjahren entstanden die ersten Lautsprechersysteme mit linearisiertem Phasengang mittels FIR-Filterung. Dies ermöglichte erstmals die Audiowiedergabe über die gesamte Frequenzbandbreite mit konstanter Gruppenlaufzeit. Neben der FIR-Filtertechnik gibt es die IIR-Filterung mit nichtlinearem Phasengang, kürzeren Signallaufzeiten und geringerem Rechenaufwand. Ein weiterer Vorteil gegenüber der FIR-Technik ist die einfache Konfiguration der Filterparameter durch den Anwender. Dieses Verfahren etablierte sich deshalb auch zur herkömmlich angewandten Technik für digitale Lautsprecherentzerrung. Der Nachteil dieser Filterform ist jedoch der frequenzabhängige Wiedergabezeitpunkt des Signals.

Auch in der Lautsprechertechnik fand seit der Erfindung elektromechanischer Schallwandler Anfang des zwanzigsten Jahrhunderts ein Modernisierung statt. So können Membranschwingungen mittels Laserscanner abgetastet oder ganze Lautsprecher mittels rechnerischen Annäherungsverfahren (z.B. FEM) modelliert werden. Allerdings ist der elektrodynamische Schallwandler von weitaus mehr technischen Parametern abhängig als die digitale Signalentzerrung. Dieser schwierig beherschbare Prozess und dessen kompromissbehaftete Optimierung bestimmen auch noch heute den Schallwandler als schwächstes Glied eines jedem Lautsprechersystems, von dem die Qualität (wie guter Klang- und genaue Detailwiedergabe)des Lautsprechers abhängt.

Ziel dieser Arbeit ist es einen Lautsprecher – bestehend aus einem  $3\frac{1}{2}$ Wegesystem mit hochwertigen und technisch optimierten Lautsprechertreibern in geschlossener Gehäusebauform und einer digitalen Entzerrung – zu entwickeln. Das Lautsprechersystem soll zum einen für geringe Signallaufzeiten und

zum anderen für den optimalen Klang entzerrt sein. Die Frequenzweiche wurde für kurze Signalzeiten mit einer nichtlinearen IIR-Filterung und den optimalen Klang mit einer linearphasigen FIR-Filterung realisiert. Außerdem kam ein Kompromiss der beiden Eigenschaften mittels hyprider Filterung zum Einsatz.

Diese Arbeit beschreibt einen Teil der Entwicklung des Masteringlautsprechers "MP 1 MK2"¹(Mastering Piece) der Firma *ADAM Audio*, der für den Profibereich konzipiert ist und durch den neusten Stand der Technik (Lautsprechertreiber, digitale Frequenzweiche und Messtechnik) eine absolute Referenz für spätere Lautsprecher darstellt.

Dazu führt das Kapitel 2 kurz in die Theorie des gefalteten Magnetostat (Abschnitt 2.1.1), des Lautsprecherimpedanzmodells (2.1.2), der Lautsprechergehäusekonstruktion (2.1.3) und der digitalen Filtertechnik (2.3) ein. Anschließend nimmt das Kaptiel 3 den Aufbau und die verwendete Technik des Lautsprechers auf. Hinzu wird der Ablauf sowie die Ergebnisse der akustischen Messung (Kaptiel 4) für die Entwicklung der digitalen Frequenzweichen (beschrieben in Kapitel 5) beschrieben. Ein Hörversuch (Kaptiel 6) beantwortet die Frage, ob die messbaren Unterschiede und Klangunterschiede von linearer FIRund nichtlinearer IIR-Phase hörbar sind und in wie weit die Testpersonen die akustisch gemessenen Differenzen bestätigen. Des Weiteren soll der Hörversuch untersuchen, ob sich die Linearisierung der Phase durch die FIR-Filterung mit der Inkaufnahme der hohen Latenzzeiten rentiert.

<sup>&</sup>lt;sup>1</sup>Der Lautsprecher "MP1 MK' soll der Nachfolger des MP1 (Mastering Piece) werden, der als Bindeglied zwischen Musikproduktion bzw. Abmischung und Mastering fungiert.

# Kapitel 2

# Theorie der angewandten Technologien

Dieses Kapitel 2 führt die wichtigsten theoretischen Grundlagen, die für die Erstellung dieser Arbeit notwendig waren, in den Abschnitten Lautsprechertechnik 2.1 und digitalen Frequenzweichen 2.3 auf. Außerdem sind in dem Abschnitt Messtechnik 2.2 Quellen zu den Themen Audio- und Lautsprechermesstechnik angegeben.

#### 2.1 Theorie zu Lautsprechertechnik

#### 2.1.1 AMT-Lautsprecher

Dr. Oscar Heil erfand in den frühen 70er Jahren den gefalteten Magnetostatlautsprecher mit dem Namen "Air Motion Transformer (AMT)". Ende der neunziger Jahre nahm der Gründer von *ADAM Audio* Klaus Heinz diese Technologie auf, um diese optimiert und in einer kompakten Bauform unter dem Namen "ART" (später "X-ART" (eXtendet) Accelerating Ribbon Technology (siehe Abbildung 2.1) in seine Lautsprecher zu verbauen.

Der gefaltete Magnetostatlautsprecher funktioniert wie alle elektrodynamischen Lautsprecher nach dem physikalischen Gesetz der LORENZ'schen Kraft. Allerdings gibt es zwei grundsätzliche Unterschiede zu herkömmlichen elektrodynamischen Lautsprechern. Dies ist einerseits, dass sie anstelle einer flachen eine gefaltete Membran haben. Andererseits ist der Leiter nicht wie herkömmlich als Spule an der Membran befestigt, sondern als Aluminiumbahn in die Membran eingebettet. Diese gefaltete Membran mit Leiter zur Speisung durch ein elektrisches Audiosignal kann zwischen einem starken Magnetsystem dieses Signal in akustischen Schall umwandeln. Dabei öffnen und schließen sich die Lamellen der Membran auf Grund der LORENZ'schen Kräfte,

die zwischen dem stromdurchflossenen Leiter und dem Magnetfeld wirken. Abbildung 2.1 zeigt die prinzipielle Funktionsweise eines AMT-Lautsprechers. citeheinz1999air, (Heil, 1972)

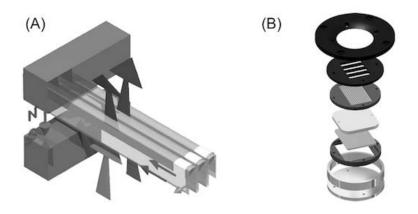


ABBILDUNG 2.1: (A) Aufbau des "X-ART"-Hochtöners von ADAM-Audio (B) Funktionsweise des Magnetostatlautsprechers "X-ART" von *ADAM-Audio* (Quelle: ADAM-Audio (2016))

Durch das Flächenverhältnis der bewegten Membranfläche zur Fläche der Austrittsöffnung haben die Luftmoleküle, die aus den Falten gepresst werden, eine viermal so hohe Geschwindigkeit wie die Bewegung bzw. das Zusammendrücken der Taschen. Hinzu kommt eine ungefähr 2,5-fach größere Membranfläche, wodurch der AMT-Hochtöner sehr effizient ist und sehr hohe Schallpegel spielen kann. Ein weiterer Vorteil des AMT-Hochtöners ist, dass es bei diesem nicht zu Partialschwingungen auf der Membran kommen kann, die wiederum Verzerrungen erzeugen würden. (ADAM-Audio, 2016), (Audio, 2016), (Heinz, 1999), (Heil, 1972)

#### 2.1.2 Lautsprecherimpedanzmodell

Mechanische (bestimmt durch Sicke, Zentrierspinne und Membran) sowie elektromagnetische Eigenschaften (bestimmt durch Spule, Ringmagnet, Polkern und Polplatte) prägen den Impedanzverlauf eines Lautsprechers. Gekoppelt sind diese zwei Systeme über die Schwingspule, die durch Sicke und Zentrierspinne beweglich ist. Die Motorstärke  $B \times l$  ist der Übertragungsfaktor der Energietransformation. Die folgenden Parameter beschreiben dies Eigenschaften und das Impedanzmodell und die Abbildung 2.2 fasst dies in einem Stromlaufplan zusammen:

- $B \times l$  Motorstärke (Übertragungsfaktor)
- ullet  $R_e$  Gleichstromwiderstand der Schwingspule des Lautsprechers
- ullet  $R_{evc}$  Frequenzabhängiger elektrischer Widerstand
- $L_{evc}$  Frequenzabhängige induktive Komponente der Impedanzerhöhung (imaginärer Anteil der Spuleninduktivität)
- $m_{ms}$  Bewegten Masse
- $C_{ms}$  Nachgiebigkeit der Aufhängung
- $R_{ms}$  Mechanischer Verlustwiderstand
- $Z_b$  Strahlungsimpedanz der Membranrückseite
- $Z_f$  Strahlungsimpedanz der Membranvorderseite

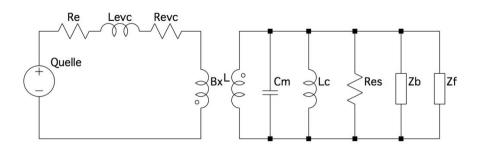


ABBILDUNG 2.2: Impedanzmodell eines Lautsprechers

Aus dem Impedanzmodell 2.2 wird so ersichtlich, dass ein Lautsprecher gleichstromartige, kapazitive und induktive Widerstände besitzt, die den Amplituden- sowie den Phasenfrequenzgang des Lautsprechers charakterisieren.

#### 2.1.3 Gehäusekonstruktion

Für die Tieftonwiedergabe gibt es verschiedenen Arten von Lautsprechergehäusen, die alle ihre Vor- und Nachteile haben. Am gängigsten ist das Bassreflexgehäuse, da dieses hohe Schallpegel im Tieftonbereich mit verhältnismäßig geringer Verstärkerleistung und kompakten Maßen erreicht. Geschlossene Lautsprechergehäuse finden kaum Verwendung, bieten aber klangliche Vorteile gegenüber einer offenen Lautsprecherbauform. Der Lautsprecher "MP1 MK2" nutzt diese Vorteile der geschlossenen Bauform. Das Unterkapitel 2.1.4

beschreibt die technischen Details und anschließend sind die Vorteile gegenüber dem Bassrelex-Gehäuse (2.1.4.1) aufgeführt. (Dickason, 1996), (Weinzierl, 2008)

# 2.1.4 Geschlossene Gehäusebauform und deren Vor- und Nachteile

Der Lautsprecher "MP1 MK2" nutzt für die Tieftonwiedergabe die geschlossene Bauform, die ein Hochpassverhalten 2. Ordnung ( $12\ dB/Octave$ ) hat. Es gibt vier Abstimmarten, die die Güte des Hochpasses verändern und somit die Tieftonwiedergabe wie den Phasengang verändern, was wiederum Auswirkungen auf die Dynamik hat. Man unterscheidet zwischen folgenden Abstimmarten:

- $Q_{tc} = 0, 5$ : Kritisch gedämpfte Abstimmung dynamisch perfekt
- $Q_{tc} = \frac{1}{\sqrt{3}} = 0,577$ : Bessel-Abstimmung ( $D_2$ ) maximal flache Zeitverzögerung
- $Q_{tc} = \frac{1}{\sqrt{2}} = 0,707$ : Butterworth-Abstimmung ( $B_2$ ) maximal flacher Amplitudenverlauf mit minimaler unterer Grenzfrequenz
- $Q_{tc} \geq \frac{1}{\sqrt{2}}$ : Chebychev-Abstimmung (elliptische- $C_2$ ) mit symmetrischer Welligkeit maximale Belastbarkeit und maximaler Wirkungsgrad, etwas verschlechtertes Dynamikverhalten (Quelle: (Dickason, 1996), S. 29)

Je höher die Güte  $Q_{tc}$  der Abstimmung des Lautsprechers desto weniger Spannung bzw. Leistung wird benötigt, um diesen an der Resonanzfrequenz  $f_{tc}$  zu treiben. Damit folgen aber höhere Gruppenlaufzeit an der Resonanzfrequenz  $f_{tc}$ . Außerdem steigt die Resonanzfrequenz  $f_s$  des Chassis in einem geschlossenem Gehäuse. Diese Veränderungen sind in den folgenden Grafiken der Abbildung 2.3 aus "Lautsprecher Bau" von Vance Dickason (Dickason, 1996) illustriert.

Durch folgende Formeln 2.1, 2.2 und 2.3 und den Chassisparametern ( $Q_{tc}$ ,  $f_s$  und  $V_{as}$ ) lässt sich die nötige Volumengröße ( $V_b$ ) sowie die Resonanzfrequenz  $f_c$  einer geschlossenen Bauform mit Chassis für eine Abstimmung mit der Güte  $Q_{tc}$  bestimmen. (Dickason, 1996)

$$\alpha = \left(\frac{Q_{tc}}{Q_{ts}}\right)^2 - 1\tag{2.1}$$

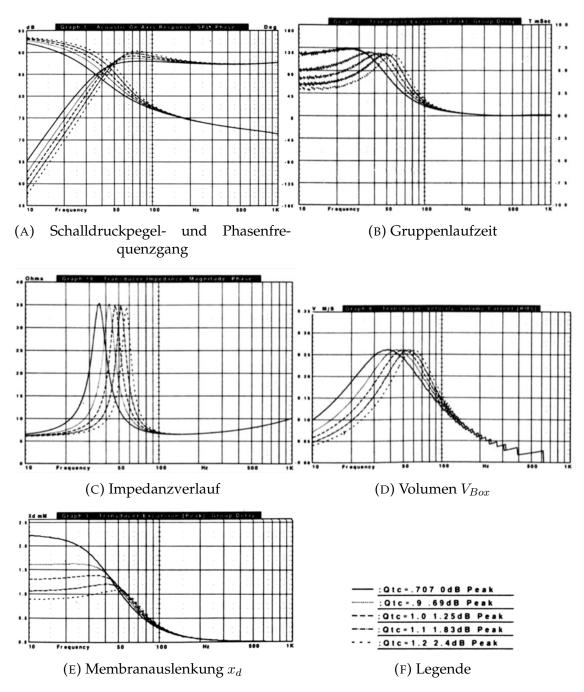


Abbildung 2.3: Technische Charakteristiken bei unterschiedlichen  $Q_tc$  einer geschlossenen Lautsprecherbox

$$f_c = \frac{Q_{tc} \cdot f_s}{Q_{ts}} \tag{2.2}$$

$$V_b = \frac{V_{Vas}}{\alpha} \tag{2.3}$$

Klanglich bedeuten niedrigere Gütewerte eine höher detailtreue, durch das bessere Dynamikverhalten. Mit einhergeht allerdings auch, dass diese Abstimmungen dann meist nicht so "fett" bzw. "dünn" klingt. (Dickason, 1996)

#### 2.1.4.1 Vorteile und Nachteile gegenüber ventilierten Gehäusebauarten

Durch die geschlossene Bauform wirkt die sich dort befindende Luft wie eine Rückstellfeder mit hoher Federsteifigkeit. Im Gegensatz zu offenen Gehäusen schützt dieses dadurch das Lautsprecherchassis vor zu großen Membranauslenkungen. Des Weiteren hat das geschlossene Gehäuse, wie vorher in Kapitel 2.1.4 erwähnt, ein Hochpassverhalten 2. Ordnung (12 dB/Octave), dass im Gegensatz zum offenen Gehäuse mit einem Hochpassverhalten 4. Ordnung (24 dB/Octave) der Betragsfrequenzgang flacher abfällt und weniger Phasendrehung haben. Daher ist das Dynamikverhalten im Tieftonbereich von geschlossen Gehäusen besser, jedoch muss der Treiber höhere Membranauslenkung und somit mehr elektrische Leistung als Treiber in offenen Gehäusen ausführen, um gleiche Schalldruckpegel im Tieftonbereich zu erreichen. Ein weiterer Nachteil des geschlossenen Gehäuses ist, dass es durch die hohe Federsteifigkeit der Luft, die nicht entweichen kann, zu Modulationen der Lautsprechermembran im hörbaren Tieftonbereich kommen kann. Diese kommen durch die leichte Einspannung im offenen Gehäuse nicht zustande und dieses verzerrt daher weniger.

#### 2.2 Messtechnik

Auf die Grundlagen der verwendeten (akustischen) Messtechnik wird in dieser Arbeit nicht näher eingegangen, da diese voraus zusetzten sind. Wer jedoch genaue Informationen zu Sweeps mit FFT-Faltung, Klirrfaktor (THD), Fensterung von Impulsantworten, Kombinieren von Nah- und Fernfeldmessungen usw. haben möchte, findet diese z.B. im Handbuch der Audiotechnik von S. Weinzierl (Weinzierl, 2008) im Kapitel Messtechnik oder im Internet in der Bedienungsanleitung des akustischen Messsystems "Monkey Forest" von *Four Audio*.

 $<sup>^1</sup>Monkey$  Forest Anleitung von Four Audio: http://www.four-audio.com/data/MF/mfa-v3ld.pdf

### 2.3 Digital Frequenzweiche und Lautsprecherentzerrung

Durch sehr leistungsfähige Mikroprozessoren und gute AD- und DA-Konverter ist es seit etwa Anfang der neunziger Jahre möglich, Audiosignale, (fast) in Echtzeit zu verarbeiten. So ermöglichet die digitale Signalverarbeitung (DSP, Digital Signal Processing) Lautsprecherweichen und -entzerrungen, die durch ihre Flexibilität und nachträgliche Änderung bzw. Erweiterung der Filter viele Vorteile mit sich bringen. Einer der größten Innovationen der digitalen Signalverarbeitung ist die FIR-Filterung, mit der im Gegensatz zur digitalen IIR- und analogen Filterung der Phasengang getrennt vom Amplitudengang erstellt werden kann und somit ein Filter mit konstanten Gruppenlaufzeiten möglich ist. D.h. dass die Wiedergabe aller Frequenzen zeitgleich erfolgt. Im folgenden werden die beiden Filterarten FIR (2.3.1.1) und IIR (2.3.1.2) genauer beschrieben.

Auf die Grundlagen wie Signalabtastung, Signalreduktion oder grundlegende Rechenoperationen wird nicht näher eingegangen. Dies kann aber im Handbuch der Audiotechnik (Weinzierl, 2008) nachgelesen werden.

#### 2.3.1 Digitale Filter

Digitale Filter sind LTI-Systeme, die gezielt bestimmte Frequenzen im Frequenzbereich (von 0 bis fs/2) des Eingangssignals durchlassen, dämpfen oder verstärken, D.h. der Betragsfrequenzgang |H(f)| wird manipuliert (z.B. Hochpass, Tiefpass, Bandpass usw.). Es kann aber auch gezielt der Phasengang  $\phi(f)$  verändert werden. Dies ist möglich mittels eines Allpass (Betragsfrequenzgang bleibt unverändert) bzw. eines FIR-Filters.

Auch in diesen Unterkapiteln 2.3.1.1 und 2.3.1.2 wird nicht auf die Grundlagen im Detail eingegangen, sondern es werden nur deren wichtigsten Unterschiede und Funktionsweisen genauer beleuchtet. Detaillierte Beschreibungen zu FIR und IIR-Filtern, zur Optimierung von FIR-Filtern und deren Umsetzung in DSP-Plattformen können in der Dissertationsarbeit von Swen Müller (Müller, 1999) sowie online auf der Homepage<sup>2</sup> von *Four Audio* nachgelesen werden.

<sup>&</sup>lt;sup>2</sup>Homepage Four Audio "Inside HD2" http://www.fouraudio.com/de/hintergrund/inside-the-hd2.html

#### 2.3.1.1 FIR-Filter

Das Finite Impulse Response Filter (FIR) hat, wie der Name schon verrät, eine endlich lange Impulsantwort h(n) = b(n) der Länge N. Die diskrete Faltungssumme in Gleichung 2.4 und im Blockschaltbild 2.4 beschreibt diesen Zusammenhang. (Weinzierl, 2008)

$$y(n) = \sum_{k=0}^{N-1} b(k)x(n-k)$$
 (2.4)

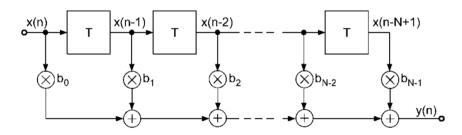


ABBILDUNG 2.4: Blockschaltbild FIR-Filter mit der Länge N (Quelle: Weinzierl (2008), S. 827)

Dadurch, dass das FIR-Filter nur Eingangswerte verarbeitet und somit eine endliche Impulsantwort hat, ist ein FIR-Filter unbedingt stabil. Ein großer Vorteil des FIR-Filters (gegenüber dem IIR-Filter und anlogen Filtern) ist, dass durch verschiedene Entwurfsverfahren ein Filter unabhängig vom Betragsfrequenzgang |H(f)| mit linearen Phasengang erstellt werden kann. Grundlage dafür ist eine Impulsantwort mit einer Länge von ungefähr ein bis zwei Perioden der untersten nennenswert zu beeinflussenden Frequenz. D.h. bei  $50\ Hz$ wäre ein Filter mit mindestens 20 ms notwendig. Dadurch wird eine große Anzahl an Filterkoeffizienten gebraucht, was selbst mit modernen DSP-Plattformen einen sehr hohen Rechenaufwand mit sich bringt. Daher gibt es die Möglichkeit bei mehreren Filterwegen den Rechenaufwand im unteren Frequenzbereich durch Downsampling zu optimieren. Dies führt allerdings zu weiteren Latenzen der Signalverarbeitung durch die Tiefpassfilter zur Unterdrückung der Aliasing-Fehler. Außerdem müssen die durch das Downsampling neu entstandenen Spiegelfrequenzen von der genutzten Filterstruktur stark gedämpft werden, damit diese nicht im Hörbereich wahrgenommen werden können. Ein weiteres Problem ist das Sinken des Signalrauschabstands (SNR) um  $3,01 dB \cdot ld(N)$  (N: Faktor des Downsamplings), das durch Requantisierung, Interpolation und Quantisierungsfehler des FIR-Filters entsteht. Des Weiteren

steigt die Komplexität der DSP-Softwarestruktur genauso wie die der Filterkoeffizientenerstellung. (Müller, 1999)

#### 2.3.1.2 IIR-Filter

Auch das IIR-Filter (Infinite Impulse Response) trägt seinen Namen auf Grund dessen Impulsantwort. Da sich bei diesem Filtertyp das Ausgangssignal nicht nur aus Eingangssignalen, sondern auch aus Ausgangssignalen, was einer Rückkopplung entspricht, berechnet, klingt die Impulsantwort dieses Filters nie aus. Das Filter setzt sich daher aus einem vorwärts- und einem rückwärts gerichteten FIR-Filter zusammen und folgende Gleichung 2.5 und folgendes Blockschaltbild in Abbildung 2.5 beschreibt dieses. (Weinzierl, 2008)

$$y(n) = \sum_{k=0}^{\inf} h(k)x(n-k) \sum_{k=0}^{N-1} b(k)x(n-k) \sum_{k=0}^{M} a(k)y(n-k)$$
 (2.5)

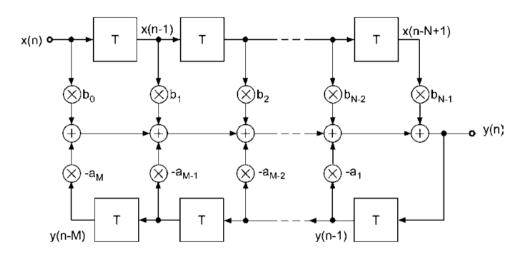


ABBILDUNG 2.5: Blockschaltbild IIR-Filter der Ordnung M>N-1 (Quelle: Weinzierl (2008), S. 827)

Anders als beim FIR-Filter sind mit dem IIR-Filter keine linearen Phasengänge unabhängig vom Betragsfrequenzgang erstellbar. Durch die Filterstruktur aus Rückkopplungen kommt es beim IIR-Filter zu starken Phasendrehungen, die bei der halben Abtastfrequenz  $f_s/2$  nur noch Werte von  $0^o$  und  $180^o$  annehmen können. Ein Vorteil ist allerdings, dass durch die Rückkopplung sehr rechensparsame Filterstrukturen mit einer geringen Koeffizientenanzahl möglich sind, deren Verarbeitung der DSP schnell bewältigt. Außerdem ist die

Erstellung von Filtern größerer Ordnungen durch Kaskadierung von mehreren Biquad-Filtern (digitaler IIR-Filter 2. Ordnung) sehr einfach. Solche Filter 2. Ordnung lassen sich meist mit zwei Verzögerungsgliedern und fünf Koeffizienten bilden, d.h. umso mehr die Ordnung der verwendeten Filter steigt, desto stärker sind auch die Phasenverschiebungen in deren angewendeten Frequenzbereich. (Müller, 1999), (Four-Audio, 2016b)

## Kapitel 3

## Aufbau des Lautsprechers

Dieses Kapitel beschäftigt sich mit den technischen Eigenschaften sowie den einzelnen Elementen des Lautsprechers. Hierzu gehören die Gehäusebauart, die einzelnen verbauten Lautsprecherchassis, die genutzte digitale Frequenzweiche und die vorgesehene Verstärkerspezifikation.

#### 3.1 Aufbaus des Lautsprechers "MP1 MK2"

Die einzelnen Lautsprechertreiber des Masteringlautsprechers sind in der "D'Appolito-Anordnung" aufgebaut, d.h. es sind jeweils zwei Mittel- sowie zwei Tiefmitteltöner symmetrisch über und unter dem Hochtöner platziert. Zu dieser in einem Centergehäuse verbauten Anordnung gehören noch vier Tieftonboxen, die modular unter und über dem Centerlautsprecher angeordnet werden können (siehe Abbildung 3.1 und Unterkapitel 3.2). (D'Appolito, 1983)

Der Lautsprecher verfügt über 3,5 Wege, d.h. es kommen vier langhubige Tief- sowie zwei Tiefmitteltöner (selbe Bauart wie Tieftöner) zum Einsatz, die genauso im Tieftonbereich arbeiten, jedoch auch noch bis 300~Hz bis zum Übernahmebereich der Mitteltöner wiedergeben. Im Mitteltonbereich sind pro Lautsprecher zwei Treiber mit einem kräftigen Antriebssystem, langer Schwingspule und Keramikmembran verbaut, die ab einer Frequenz von etwa 2,5~kHz das Audiosignal an den gefalteten Magnetostatlautsprecher X-ART von ADAM-Audio übergeben. Die Tief-, Tiefmittelton- und Mitteltonlautsprecher haben je eine Nominalimpedanz von  $8~\Omega$  und arbeiten jeweils als Pärchen parallel.

### 3.2 Lautsprechergehäuse

Das Gehäuse des Lautsprechers "MP1 MK2" ist modular aufgebaut. Das Herzstück dieses modularen Systems ist das Centergehäuse (Centerlautsprecher) in

dem ein Hoch-, zwei Mittel- und zwei Tiefmitteltöner verbaut sind (siehe Abbildung 3.1-(1)). Die Tiefmitteltöner arbeiten voneinander getrennt in geschlossenen Gehäusen. Zusätzlich gehören zu jedem Lautsprecher noch jeweils vier Tieftoneinheiten (Subs) in geschlossener Gehäusebauform. Diese Subs ermöglichen in größeren Räumen den nötigen Tieftonschalldruckpegel ( $35-80\ Hz$ ) und entlasten zusätzlich die Tiefmitteltöner. Diese Einheiten lassen sich paarweise beliebig erweitern. Durch die Impedanzmessungen im Abschnitt 4.2.2 lässt sich außerdem mit der Formel 2.2 die Gesamtgüte  $Q_{tc}$  der Tieftoneinheiten berechnen. Mit einer Güte  $Q_{tc}$  von 0, 632 (siehe Gleichung 3.1) ist dies ein Kompromiss aus der Bessel-Abstimmung mit einer maximal flachen Zeitverzögerung und einer minimalen unteren Grenzfrequenz  $f_g$  (siehe Abschnitt 2.1.4). Auch das Dynamikverhalten ist mit dieser Abstimmung noch gut, da die Gruppenlaufzeit ab  $50\ Hz$  flacher verläuft, wie bei höheren Abstimmungswerten  $Q_{tc}$  (siehe Diagramm 2.3 (B)).

$$Q_{tc} = \frac{Q_{ts} \cdot f_c}{f_s} = \frac{0,49 \cdot 37,2 \, Hz}{48 \, Hz} = 0,632 \tag{3.1}$$

Durch die modulare Bauweise ist es möglich, die Höhe der Hörerposition zu variieren. Genauso können die Tieftoneinheiten optimiert auf die Raumakustik unabhängig im Raum platziert werden. Der Lautsprecher hat mit vier Tieftoneinheiten etwa eine Höhe von 185 cm und die einzelnen Strahler liegen auf einer schmalen Fläche sehr dicht zu einander, um Interferenzen durch Laufwegunterschiede im Frequenzübergang von zwei Wegen gering zu halten, auch wenn dies die Inkaufnahme von Reflexionen an der Membran und Sicke des anderen Weges zur Folge hat. Dieser Aufbau verzerrt jedoch "nur" den Betragsfrequenzgang und nicht das Abstrahlverhalten.

#### 3.3 Lautsprechertreiber

#### 3.3.1 Hochtontreiber "X-Art" von ADAM-Audio

Als Hochtöner kommt der "X-Art"-Magnetostatlautsprecher von ADAM-Audio zum Einsatz. Dieser Hochtöner hat einen hohen Dynamikbereich und arbeitet mit einer effizienten Energietransformation bis zu Frequenzen außerhalb des hörbaren Frequenzbereichs sehr linear (bis circa  $40\ kHz$ ). Mit einer ungefähren Maximalbelastbarkeit von  $20\ W$  und einem für diesen Hochtöner entwickelten Waveguide kann dieser Hochtöner sehr hohe Pegel abspielen.

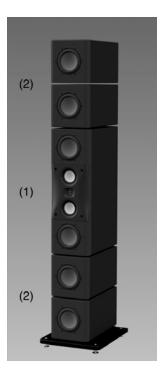


ABBILDUNG 3.1: CAD-Modell des Lautsprechers "MP1 MK2": (1) Centerlautsprecher bestehend aus Hoch-, Mittel- und Tiefmitteltöner, (2) Vier Tieftonlautsprecher (Subs)

Thermische Belastbarkeit $P_{thermo}$	5 W	für die Zeitdauer $t_{thermo}$	3s
Maximal- Peakleistung $P_{max}$	20 W		

TABELLE 3.1: Belastbarkeit des "X-Art"-Magnetostat (Thermische Belastbarkeit  $P_{thermo}$  für die Zeit  $t_{thermo}$  und Maximal- bzw. Peakleistung  $P_{max}$ )

#### 3.3.2 Mitteltontreiber mit Keramikmembran

Der Mitteltöner arbeitet mit einem großen Magnetsystem mit Neodymmagnetring und hat eine Resonanzfrequenz  $f_s$  von 123~Hz. Am Polkern ist er mit einem Kupferring ausgestattet, um Wirbelströme zu minimieren. Die Leinensicke hält die Keramikmembran mit einem Durchmesser d von 12~cm, die durch ihr leichtes Gewicht, ihre sehr hohe Härte und ausreichende Dämpfung gute akustische Eigenschaften aufweist.

Im folgender Tabelle 3.2 sind Thiele-Small-Parameter und in Tabelle 3.3 die Belastbarkeit des Mitteltöners aufgelistet:

Parameter	Einheit	Parameter	Einheit
$R_e$	$7,2 \Omega$	$L_{p,1\ W}$	$86 \ dB/2, 83V/1m$
$R_{ms}$	0,40~kg/s	Z	? Ω
$Q_{ms}$	5,57	$\int f_s$	123~Hz
$Q_{es}$	1,13	$d_{Membran}$	12 cm
$Q_{ts}$	1,13	$m_{ms}$	2,9 g
$C_{ms}$	$0,57 \ mm/N$		
$V_{as}$	2,4 l		

TABELLE 3.2: Lautsprecherparameter des Mitteltöners

Thermische Belastbarkeit $P_{thermo}$	100 W	für die Zeitdauer $t_{thermo}$	10 s
Maximal- Peakleistung $P_{max}$	400~W		

TABELLE 3.3: Belastbarkeit des Mitteltöners

#### 3.3.3 Tief- und Tiefmitteltontreiber

Im Tiefmittel- ( $35\ Hz$  bis  $300\ Hz$ ) und im Tieftonbereich ( $35\ Hz$  bis  $80\ Hz$ ) kommen vier bzw. zwei 7" Kolbenlautsprecher mit einer sehr steifen Aluminiummembran und einem starken Motorsystem (1,5"), das eine optimierte Klangwiedergabe und geringe Verzerrungen aufweist, zum Einsatz. Das Antriebssystem ist gleichmäßig aufgebaut, um einen symmetrischen Antrieb in beide Richtungen zu gewährleisten und um harmonische Verzerrungen zu reduzieren. Ein eingebauter Feldstabilisierungsring im Magnetsystem aus Aluminium unterdrückt Verzerrungen. Außerdem sorgt er für eine gute Entlüftung bei niedrige Luftströmungsgeschwindigkeiten. Die geringe bewegte Masse  $m_{ms}$  von  $35, 2\ g$  des Woofers ermöglicht eine hohe Wiedergabedynamik im Tieftonbereich. (Dickason, 1996)

Parameter	Einheit	Parameter	Einheit
$R_e$	8 Ω	$L_{p,1\ W}$	81, 5 dB/2, 83 V/1m
$R_{ms}$	$0,66 \ kg/s$	$R_{e,min}$	$6,4 \Omega$
$Q_{ms}$	12,6	$f_s$	37, 2 Hz
$Q_{es}$	0,51	$d_{Membran}$	17,7~cm
$Q_{ts}$	0,49	$m_{ms}$	35, 2 g
$C_{ms}$	$0,52 \ mm/N$	$X_{max}$	$\pm 7 \ mm$
$V_{as}$	2,4 l	$B \times l$	10, 2 N/A

TABELLE 3.4: Lautsprecherparameter des Tieftöners

Thermische Belastbarkeit $P_{thermo}$	250 W	für die Zeitdauer $t_{thermo}$	30 s
Maximal- bzw. Peakleistung $P_{max}$	1000 W		

TABELLE 3.5: Belastbarkeit des Tieftöners

#### 3.4 Verstärker

Welche Verstärker die elektrische Leistung für den Lautsprecher zur Verfügung stellen, ist individuell wählbar. So empfiehlt es sich für einen Lautsprecherverstärker mit einer Maximalleistung von  $50\ W$  für den Hochtöner,  $300\ W$  für die Mitteltöner und pro Tieftönerpaar mindestens  $700\ W$  zu verwenden. Während der Messungen im reflexionsarmen Raum (Kapitel 4) waren die Peak-Limiter der DSP und  $600\ W$  Endstufen für den Tiefmitteltönerweg bei hohen Schalldruckpegeln beim Abspielen eines Musiksignals als erstes am Limit. Daher sollte die Wahl bei den Tief- und Tiefmitteltönerendstufen nicht zu schwach ausfallen. Auch unter der Betrachtung, dass die Tieftöner Leistungen bis zu  $1000\ W$  kurzzeitig verarbeiten können.

#### 3.5 **DSP**

Der Lautsprecher-DSP "HD 2" von *Four Audio* entzerrt digital die einzelnen Wege des Lautsprechers "MP1 MK2". Diese digitale Filterung vereinfacht nicht nur die Filtererstellung und Flexibilität, sondern es bringt noch einige andere Vorteile mit sich, wie die Laufzeitanpassung durch FIR-Filterung, das einfache Variieren von Peak- und RMS-Limitern, sowie eine optimale Dynamikanpassung des Eingangssignals durch Dual-Rang-AD-Umwandlung. Diese technischen Features sind alle in der Lautsprecher-DSP "HD 2" verbaut. Die Signalverarbeitung übernehmen zwei *Motorola* 56321 DSPs, die jeweils vier Ausgangskanäle übernehmen. Abbildung 3.2 zeigt den systematischen Ablauf der Signalverarbeitungskette bestehend aus Filterbänken (FIR und IIR), Verzögerungsgliedern für Laufzeitanpassung, Limitern, Downsamplern und Verstärkungsgliedern. Im folgenden sind noch einmal stichpunktartig alle technischen Eigenschaften des Lautsprechercontrollers aufgelistet. Die angewendeten Filtertypen und deren Erstellung werden im Kapitel 5 "Entwicklung der digitalen Frequenzweiche" beschrieben. (Four-Audio, 2016c)

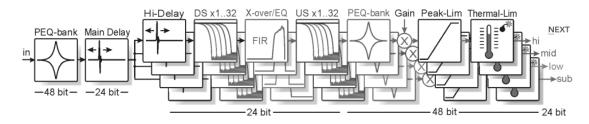


ABBILDUNG 3.2: Signalverarbeitung der "HD 2" Lautsprecher-DSP von Four Audio, (Quelle: Four-Audio (2016a))

#### Allgemeine Eigenschaften des "HD 2"

- 96 kHz / 48 bit Verarbeitung
- ADC Eingänge umschaltbar zwischen 4 normalen oder 2 Zweibereichswandlern mit erhöhtem
   Dynamikbereich (> 130 dB)
- AES/EBU digital IO
- Dante Audionetzwerk IO
- Wordclock IO (Dante Gerät)
- Abtastratenwandler für Eingangssignale <> 96 kHz

#### Signalverarbeitung

- IIR-Filter: bis zu 96 parametrische Filter frei konfigurierbar
- IIR Frequenzweichenfilter mit Flankensteilheiten von 6-60 dB/Oktave
- Ein FIR-Filter pro Ausgangskanal
- Entzerrung mit linearer und minimaler Phase möglich

- 8 analoge Ausgänge
- Ansteuerung über Ethernet (TCP/IP)
- Software HD2 Control verfügbar
- Mainboard als Einbaulösung erhältlich
- Geräte erhältlich als Blackbox (Installationen), auch ohne Dante
- Variante mit 4 Ausgängen erhältlich
- Max. Frequenzauflösung der FIR-Filter: 3 Hz
- Limiterschwellen für Verstärker (Peak und RMS) und Lautsprecher (Peak und Thermo) getrennt einstellbar
- Berechnung der FIR-Filter aus den Lautsprechermessungen mittels Crossover-Wizard in Monkey Forest

#### **Audio Performance**

- Max. Eingangspegel: +28
- Max. Ausgangspegel: +18 dBu
- Frequenzgang: (-0.5 dB) 4 bis 45 kHz

#### **Dynamischer Bereich**

- ADC: > 130 dB (Zweibereichsmodus)
- ADC: 118 dB (Normaler Betrieb)
- DAC: 121 *dB*
- Insgesamt: 121 dB (Zweibereichsmodus)

#### **THD** (1 kHz)

- ADC: -113 dB (+4dBu)
- ADC: -105 dB (0 dBFS)
- DAC: -110dB (+4 dBu)
- DAC: -102dB (+18 dBu)

Alle Angaben ref. 20 Hz - 20 kHz, lineare Bewertung (Four-Audio, 2016c)

## Kapitel 4

# Akustische Messungen im reflexionsarmen Halbraum

Vor der Entwicklung der Frequenzweiche muss man die Frequenzgänge und Impedanzverläufe der drei Wege des Masteringlautsprechers genau bestimmen. Dies fand in dem reflexionsarmen Halbraum des *Institus für Akustik und Audiotechnik* (IFAA) statt. Dazu wurden die Impendanzkurven, die Frequenzgänge im Fernfeld und bei den Tieftönern auch im Nahfeld sowie die Verzerrungen der einzelnen Wege aufgenommen.<sup>1</sup> Aus diesen Messungen der einzelnen Chassis konnte dann die FIR- und IIR-Frequenzweiche und -entzerrung (Kapitel 5) erstellt werden.

#### 4.1 Versuchsbedingungen

#### 4.1.1 Reflexionsarmer Halbraum

Wie schon oben erwähnt, hat man den Masteringlautsprecher "MP1 MK2" im reflexionsarmen Halbraum (RAHR bzw. Halbfreifeldraum) gemessen. In einem reflexionsarmen Halbraum ist im Gegensatz zum reflexionsarmen (Voll-)Raum (RAR) der Boden schallhart. Durch diese Gegebenheit ist der gemessene Schalldruck  $L_p$  um  $6\ dB$  größer, als er im Freifeld oder reflexionsarmen Vollraum wäre. Da das am bodenliegende Mikrofon auf der Grenzfläche zur Quelle liegt, empfängt dieses durch die Reflexion am schallharten Boden den Schalldruck zweier kohärenten Quellen. (Möser, 2009)

Der reflexionsarme Halbraum hat ein Volumen von ungefähr  $300~m^3$  (Nettomaß:  $10~m \cdot 6~m \cdot 5~m$  und 85~cm-Absorberkeile) und eine untere Grenzfrequenz von ungefähr  $f_g = 100~Hz$ , ab der Messungen der im Freifeld entsprechen. Bei

 $<sup>^{1}</sup>$ Bei allen Pegelmessungen bei denen keine genaue dB-Bezeichnung vorhanden ist, sind diese Pegel relativ. Dies gilt auch in den Kapiteln 5 und 6.

Messungen von Frequenzen unter dieser Grenzfrequenz  $f_g$  muss man diese im Nahfeld durchführen (Abschnitt 4.2.3.3), da Reflexionen und Modenbildungen das Messergebnis im Fernfeld verfälschen.

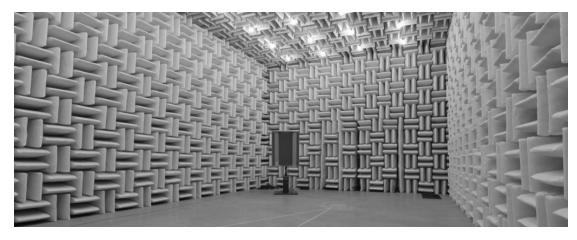


ABBILDUNG 4.1: Reflexionsarmer Halbraum der Firma (IFAA)

#### 4.1.2 Messsystem - Monkey Forest

Das Herzstück der akustischen Messungen im reflexionsarmen Halbraum war das Audiomesssystem Monkey Forest von Four Audio. Das DOS-basierte Messsystem ist mit einem RME Multiface ausgestattet und kann somit Frequenzgänge mit  $96\ kHz$  Abtastfrequenz  $f_s$  und einer Bittiefe von  $24\ Bit$  aufnehmen. Eine interne  $20\ W$  Endstufe mit einem Shunt-Widerstand ermöglicht Referenzund Impedanzmessungen ohne umständliches Umstecken über die Software. Neben den üblichen akustischen- bzw. audiotechnischen Messsverfahren (wie Sensetivity, THD,...) ist es mit der Monkey Forest Software machbar, direkt aus gemessenen Frequenzgängen Frequenzweichen mit IIR- und FIR-Filtern berechnen zu lassen, dass das Kapitel 5 genauer aufgreift.

#### 4.1.3 Mikrofon

Die Messungen hat das Freifeldmikrofon der Firma Brüel & Kjær 1/4" 4939 mit einem Frequenzbereich von 4~Hz bis 100~kHz und der Empfindlichkeit von 4~mV/pa – mit dem ein Dynamikbereich von 28~ bis 164~ dB abgedeckt wird – aufgenommen. Die Phantomspannung von 200~ V und die Verstärkung kam von dem Messverstärker 2610~ der gleichen Firma.

#### 4.2 Lautsprechermessungen

Im reflexionsarmen Raum wurden alle notwendigen akustischen Messungen zur Entwicklung der durchgeführt. Diese beinhalteten die Impedanzverläufe zur Bestimmung der Resonanzfrequenz  $f_c$  der Lautsprecherchassis im geschlossenen Gehäuse, die Fernfeldmessung aller Lautsprecherchassis sowie Nahfeldmessung der Tieftontreiber. Außerdem hat man die Verzerrungen des

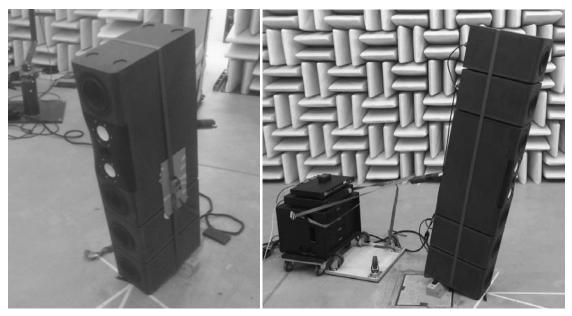


#### 4.2.1 Positionierung des Lautsprechers

Die einzelnen Lautsprecherchassis (Tiefmittel, Mittel- und Hochtöner), die im Center-Lautsprecher verbaut sind, wurden alle "on-axis" gemessen, d.h. der akustische Mittelpunkt des Lautsprechers war auf das Mikrofon gerichtet. Für die Messungen der Treiber im Centerlautsprecher sowie die Messungen von jeweils zwei Tieftoneinheiten neigte man das Lautsprechergehäuse, so dass der Hochtöner im Lot zu dem auf dem Boden liegenden Messmikrofon war (siehe Abbildung 4.3). Auch die Messungen des entzerrten Lautsprechers wurden gekippt durchgeführt.

#### 4.2.2 Impedanzmessung

Als erstes wurden die Impedanzverläufe der drei verschiedenen Lautsprecherchassis mittels des internen Shunt-Widerstands im Monkey Forest aufgenommen. Dazu haben die einzelnen Lautsprechertreiber sowie die Woofer und die



(A) Center mit zwei Tieftoneinheiten gekippt in Richtung des Messmikrofons (on-axis)

(B) Vollständiger Lautsprecher gekippt

ABBILDUNG 4.3: Lautsprecher im reflexionsarmen Halbraum gekippt

Mitteltöner mit jeweils zwei parallel geschalteten 8  $\Omega$  Chassis im Verbund gemessen.

Die Abbildungen 4.4 zeigt eine Tieftoneinheit (Lautsprecher 1 links und 2 rechts) und Abbildung 4.5 die zwei Tiefmitteltöner aus dem Centerlautsprecher (Lautsprecher 1 links und 2 rechts), die sich untereinander kaum unterscheiden. Die Impedanzverläufe zeigen, dass die Tieftontreiber zwischen 80~Hz und 500~Hz einen weitestgehend konstante Impedanz haben. Unterhalb von 80~Hz steigt der Widerstand stark an und der Tieftontreiber mit geschlossenen Gehäuse hat seine Resonanzfrequenz bei  $f_c=48~Hz$  mit einem Maximum von  $39~\Omega$  bei den Tiefmitteltönern, das auf Grund der parallel Schaltung etwa halb so groß ist wie der der einzelnen Tieftöner.

Die zwei Keramikmitteltöner sollen von 300~Hz bis etwa 3~kHz arbeiten. So scheint der Impedanzverlauf in Abbildung 4.6 ideal zu sein. Bei 300~Hz hat der Lautsprecher eine Widerstand von  $5~\Omega$ , sinkt leicht auf  $4,6~\Omega$  ab und steigt dann ab etwa 450~Hz auf  $5,3~\Omega$  bei 3~kHz. Bei den den Mitteltönern ist der maximale Wert bei der Resonanzfrequenz  $f_c = 180~Hz$  zwischen den beiden Lautsprechern unterschiedlich, was allerdings kein Problem ist, da dieser außerhalb des Arbeitsbereiches ist.

Der X-Art-Hochtöner hat auf Grund seiner Leiterbahnen fast über die ganze Frequenz einen Gleichstromwiderstand, der von  $100\ Hz$  bis  $20\ kHz$  nahezu

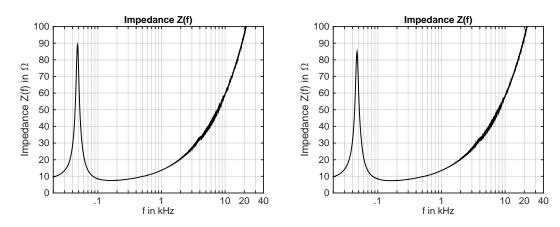


ABBILDUNG 4.4: Impedanzverlauf zweier Tieftöner (Lautsprecher 1 und 2)

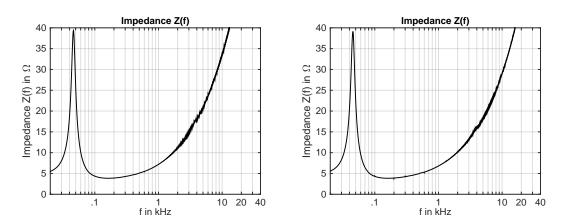


ABBILDUNG 4.5: Impedanzverlauf der Tiefmitteltöner (Lautsprecher 1 und 2)

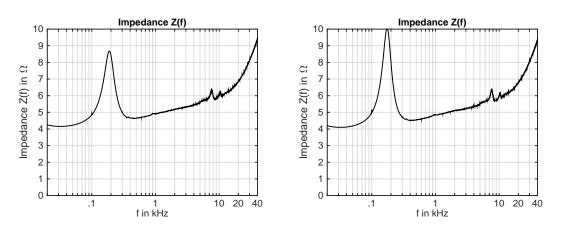


ABBILDUNG 4.6: Impedanzverlauf des Mitteltöners (Lautsprecher 1 und 2)

ideal bei  $4 \Omega$  liegt (siehe Abbildung 4.7).

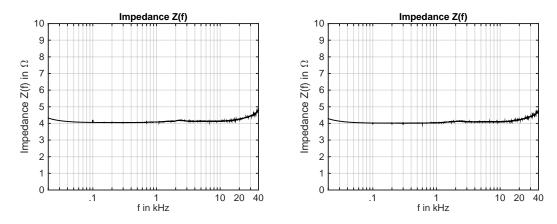


ABBILDUNG 4.7: Impedanzverlauf des X-Art Hochtöners (Lautsprecher 1 und 2)

#### 4.2.3 Frequenzgangmessung

Die Frequenzgangmessungen eines Lautsprechers hat man, unter der Annahme, dass sich dieser im Fernfeld² befindet, gemacht. Mit der Höhe des Centerlautsprechers von 1 m und der Grenzfrequenz  $f_g=100~Hz$  des reflexionsarmen Raums muss der Messabstand r viel größer als 1,36~m sein (siehe Gleichung 4.1 und 4.3). Der Messabstand r aller vier Chassis war daher 4~m. Auf Grund auftretender Reflexionen unterhalb von 100~Hz wurden die Tieftontreiber auch in einem Messabstand von r=2~m und r=1~cm (Nahfeld) gemessen, um anschließend aus diesen drei Messungen den vollständigen Frequenzgang der Tieftöner zu erstellen.

Um alle Lautsprechertreiber "on-axis" messen zu können, wurden zu erst die in dem Centerlautsprecher verbauten Chassis geneigt gemessen und wurden nacheinander die Tieftoneinheiten hinzugefügt, um diese aufnehmen zu können (siehe Bild 4.3). Dazu wurden zuerst die einzelnen Lautsprecherwege und dann nach und nach die Treiber im Verbund gemessen. Die Messungen beinhalteten die des X-Art Hochtöners, die der zwei Keramikmitteltöner und die der Tiefmitteltöner in dem Centergehäuse, sowie die der Tieftöner in den einzelnen Subgehäusen. Folgende Abschnitte 4.2.3.1 bis 4.2.3.1 beschreiben die Frequenzgangsmessungen genauer sowie erläutert Abschnitt 4.2.4.1 die Abstrahlcharakteristik des Lautsprechers durch Winkel- und Balloon-Messungen genauer. Außerdem hat man nach der digitalen Entzerrung den gesamte Frequenzgang "on-axis" (Abschnitt 4.2.4), sowie in drei Winkeln gemessen. Die folgenden Unterkapiteln führen die Frequenzgänge der einzelnen Wege sowie

den des kompletten Lautsprechers auf.

#### 4.2.3.1 X-Art Hochtöner

Der X-Art Hochtöner (siehe Abbildung 4.8) hat einen Hochpass ähnlichen Frequenzgang mit einer Flankensteilheit von 10~dB, was fast einem idealen Hochpass 2. Ordnung entspricht. Die Cut-Off-Frequenz dieses akustischen Hochpasses wäre somit bei einer ungefähren Frequenz von  $f_{X-Art,cut}=2,5~kHz$ . Dieser Zusammenhang passt perfekt damit zusammen, dass genau in diesem Bereich der Übergang zwischen Mittel- und Hochtöner sein sollte.

Allgemein verläuft der Frequenzgang des Hochtöners sehr stetig. Der Einbruch bei zirka  $1,8\ kHz$  stellt kein großes Problem das, da dieser leicht mit einem EQ ausgefüllt werden kann, genau so wie der konstante Abfall des Frequenzgangs ab  $10\ kHz$  mittels eines High-Shelfs.

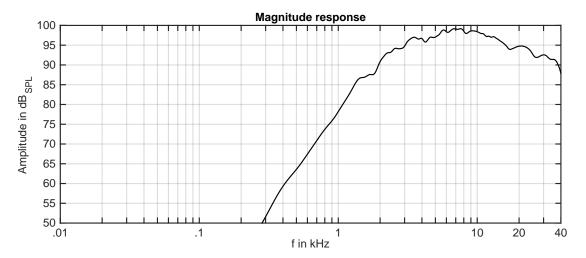


ABBILDUNG 4.8: Betragsfrequenzgangmessung mit gefensterter Impulsantwort des AMT-Hochtöners

$$r \gg l$$
 (4.1)

$$\frac{l}{\lambda} \ll \frac{r}{l} \tag{4.2}$$

$$r \gg \lambda$$
 (4.3)

 $<sup>^2</sup>$ Die Bedingungen des Fernfeldes (Fernfeldbedingungen) werden durch den Abstand r von der Schallquelle, die Schallquellenabmessung (z.B. Strahlerlänge l) und die abgestrahlte Wellenlänge  $\lambda$  bzw. die Wellenzahl k ( $k=\frac{\omega}{c}=\frac{2\pi}{\lambda}$ ) geprägt, die im Folgenden beschrieben sind. (siehe Gleichungen 4.1, 4.2 und 4.3). (Lerch et al., 2009)

#### 4.2.3.2 Mitteltöner

Der Mitteltöner (siehe Abbildung 4.9) hat in seinem Arbeitsbereich zwischen 200 Hz und 4 kHz einen sehr linearen Frequenzgang. Mit der Ausnahme bei etwa 1,8 kHz. Dort gibt es eine Erhöhung um etwa  $\pm 2~dB$ . Diese Erhöhung könnte auf Grund von progressiver Interferenzen durch Schwingen der Sicke entstehen, da deren Durchmesser  $d_{Sicke}$  genau der halben Wellenlänge  $\lambda$  bei 1,8 kHz entspricht (siehe Gleichung 4.4). Der ansonsten sehr konstante Frequenzverlauf des Mitteltöners wird durch die extrem steife Keramikmembran erzielt, die erst weit über dem Arbeitsbereich des Mitteltöners ab 5~kHz der auf Grund der Geometrie und Materialeigenschaften der Membran in starke Partialschwingungen aufbricht (vergleiche Kapitel 3.3.2). Diese schwingen in Phase mit der Sicke, wodurch die starken Resonanzen entstehen.

$$d_{Sicke} = \frac{c_{Luft}}{f \cdot 2} = \frac{343 \frac{m}{s}}{1800 Hz \cdot 2} = 9,5 cm$$
 (4.4)

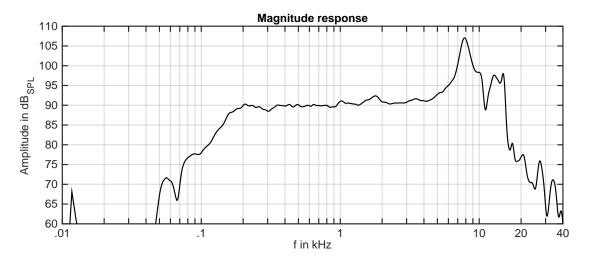


ABBILDUNG 4.9: Betragsfrequenzgangmessung mit gefensterter Impulsantwort der zwei parallelgeschalteten Mitteltönern in  $4\,m$  Entfernung

#### 4.2.3.3 Tiefmittel- und Tieftöner

Bei den Tiefmitteltönern, die auch den der Tieftöner entsprechen, wurden drei Messungen im Fern- (1 m und 4 m) und Nahfeld (1,5 cm) durchgeführt und anschließend verknüpft, um eine pegelgenaue Addition zu ermöglichen. Dabei verbindet man die 4 m- mit der 1 m-Messung bei zirka 300 Hz und die 1 m-Messung mit der Nahfeldmessung bei zirka 120 Hz und erhält den kompletten Frequenzgang der in Abbildung 4.11 zu sehen ist. Auch dieser Lautsprecher

hat einen idealen Frequenzverlauf mit Hochpassverhalten 2. Ordnung (12 dB pro Oktave) mit einer Cut-Off-Frequenz bei ca. 45 Hz (siehe Abbildung 4.11) und arbeitet ab  $60\ Hz$  bis  $170\ Hz$  sehr linear mit leicht steigender Tendenz. Bei  $170\ Hz$  erhebt sich der Frequenuzgang um circa  $1\ dB$  und fällt dann ab  $300\ Hz$  wieder leicht ab.

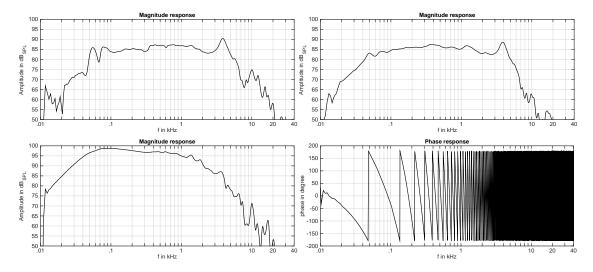


ABBILDUNG 4.10: Betragsfrequenzgangmessung zwei parallelgeschalteter Tiefmitteltöner: (A)  $r=4\ m$ , (B)  $r=1\ m$ , (C) Nahfeld, (D) Phasengang der Kombination aus (A), (B) und (C)

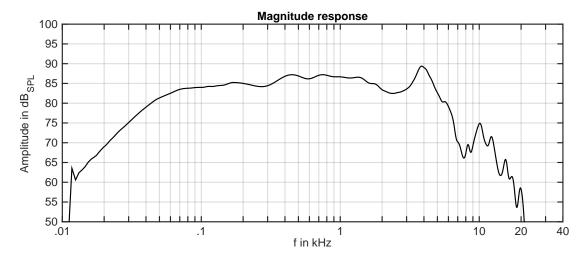


ABBILDUNG 4.11: Betragsfrequenzgangmessung zwei parallelgeschalteter Tieftöner der Kombination aus Nah- und Fernfeld

## 4.2.4 Frequenzgang nach FIR-Filterung

Nach Beendigung der Messungen der einzelnen Chassis konnte man die digitale Frequenzweiche aus FIR-Filtern für den DSP-Controller mittels "Monkey

Forest"' erstellt. Die genaue Beschreibung der verwendeten Filtertypen und deren Eigenschaften erläutert das Kapitel 5 "Entwicklung der Frequenzweiche".

Abbildung 4.12 und 4.13 zeigen den Betragsamplitudengang und -phasengang des im Tief- und Tiefmitteltonbereich minimalphasig und im Mittel- und Hochtochbereich linearphasig FIR-entzerrten Masteringlautsprechers. Dies ist ein Kompromiss aus Gesamtlaufzeit und Gruppenlaufzeiten, was die Abbildung 4.13 gut aufzeigt. Dieser hat über einen Frequenzbereich von  $100\ Hz$  einen konstant flachen Frequenzbereich mit maximalen Abweichungen von  $\pm 1\ dB$ . Die Verstärkung des Tieftonbereichs bei  $50\ Hz$  um  $6\ dB$  war bewusst, um eine gute Basswahrnehmung auch in großen Räumen realisieren zu können.

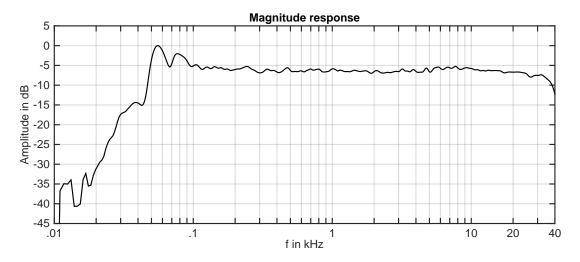


ABBILDUNG 4.12: Betragsfrequenzgang des gesamten Lautsprechers mit FIR-Filter

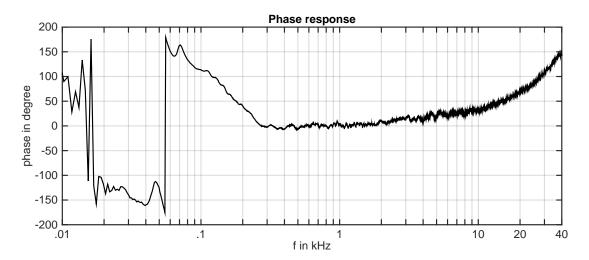


ABBILDUNG 4.13: Phasengangmessung des gesamten Lautsprechers mit FIR-Filterung

#### 4.2.4.1 Winkelmessungen und Ballonmessungen

Ein weiteres wichtiges Kriterium eines jeden Lautsprechers ist das Abstrahlverhalten. Dieses ist zu hohen Frequenzen hin immer stärker richtungsabhängig. Diese Richtcharakteristik entsteht auf Grund der Abmessungen der Strahlerfläche im Bezug auf die wieder zugebende Frequenz (Wellenlänge). So werden hohe Frequenzen von großen Strahlerflächen stärker gerichtet. Des Weiteren entstehen durch die Anordnung der einzelnen Lautsprecher Interferenzen auf Grund von unterschiedlichen Signallaufzeiten sowie Reflexionen am Gehäuse, die das Abstrahlverhalten beeinflussen. Genauso entstehen Interferenzen durch die unterschiedlichen Abstrahlorte auf der Membranoberfläche eines Lautsprechers, der als Modell vieler Punktschallquellen betrachtet werden kann. In Abbildung 4.14 ist diese Richtcharakteristik gut erkennbar und hat bis circa 20° immer noch einen annähernd linearen Frequenzgang. In den Abbildungen 4.15 in denen die Balloon-Messungen des "MP1 MK2"-Centers dargestellt sind, zeigt sich die Richtwirkung des Hochtöners auf Grund der Strahlergröße in Relation zu der zu spielenden Frequenz (Wellenlänge). Diese Abstrahlcharakteristik beginnt ab ungefähr 1 kHz. Die Abstrahlcharakteristik des AMT-Hochtöners ist zu Beginn seines Arbeitsbereichs (2, 8 kHz) sehr breit und wird deshalb durch einen Waveguide konstant gebündelt, um einen stetigen Übergang zum Mitteltöner sowie zu hohen Frequenzen zu garantieren. (Dickason, 1996)

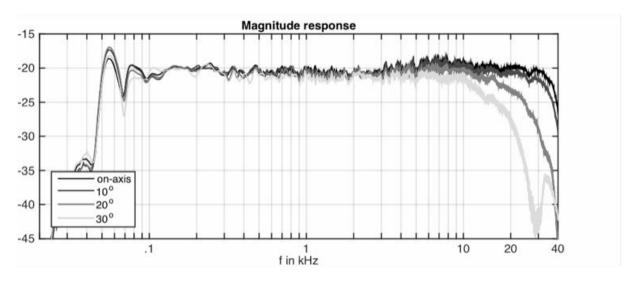


ABBILDUNG 4.14: Winkelmessung des Lautsprechers mit FIR-Filterung

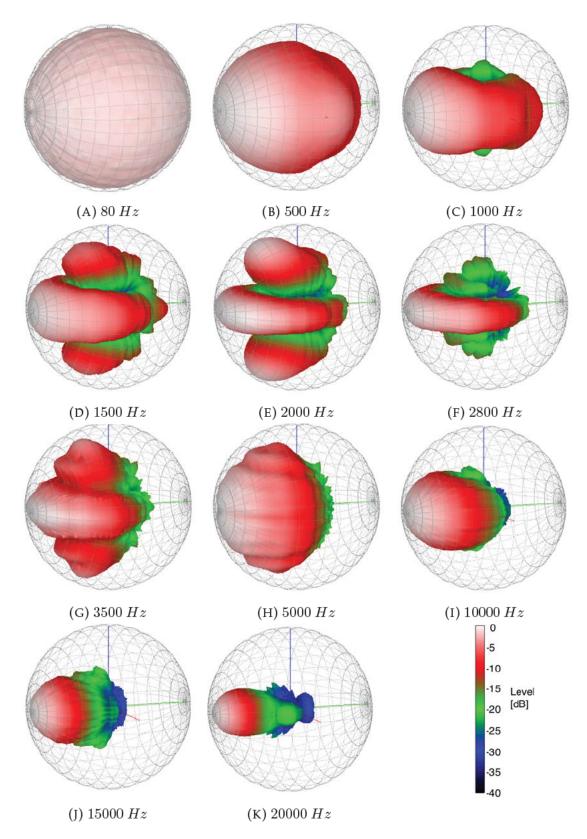


Abbildung 4.15: Balloonmessungen des Lautsprechers "MP1 MK2" im reflexionsarmen Halbraum

## 4.2.5 Messung der Verzerrungen

Alle elektrischen und mechanischen LTI-Systeme haben bei deren Anregung mit einem (Sinus)-Signal Oberwellen vom Vielfachen deren Frequenzen sogenannte harmonische Verzerrungen<sup>3</sup> (auch Klirr genannt), so auch Lautsprechersysteme und dessen Verstärker. Nichtlinearitäten der einzelnen Teilsysteme erzeugen diese, wobei die Lautsprechertreiber das schwächste Glied in der Systemkette sind und die meisten Verzerrungen erzeugen.(Weinzierl, 2008)

Die Verzerrungen der einzelnen Lautsprecherchassis sowie der entzerrte Lautsprecher wurden mit einer üblichen THD-Messung<sup>4</sup> (Total Harmonic Distrotion, Unterkapitel 4.2.5.1) in Abhängigkeit von der Frequenz bei konstanter Spannung ermittelt, bei der ein Sinuston mit einem konstanten Pegel schrittweise über die Frequenz abgespielt wird (Sinusburst). Dazu hat man die einzelnen Lautsprechertypen unterschiedlich belastet (Hochtöner  $1\ W$ , Mitteltöner  $5\ W$  und Tieftöner  $10\ W$ ). Des Weiteren wurde der THD(f) vom gesamten Lautsprechersystem und dessen Intermodulationsverzerrungen (IMD, siehe Unterkapitel 4.2.5.2) mittels eines Multisinus, dessen Energieverteilung über die Frequenz dem eines Musiksignals entspricht, gemessen.

#### 4.2.5.1 THD Messung

Die Verzerrungsmessungen der einzelnen Wege mittels THD-Messung über die Frequenz zeigen schon ein grobes Bild der Qualität der Lautsprechers (siehe Abbildung 4.16). Bei Lautsprechern bestimmen die zweiten und dritten harmonischen Verzerrungen maßgeblich die gesamte Verzerrung (THD) des Lautsprechers und bekommen daher mehr Aufmerksamkeit. Der Hochtöner hat in seinen "Haupt"-Arbeitsbereich zwischen 2,5 und 10~kHz bei K3-Verzerrungen von maximal ungefähr 0,25~% und verläuft ab 3~kHz meist bei 0,1~% oder niedriger. Die K2-Verzerrung fallen ab 2,5~kHZ von 1~% bis 3~kHZ auf 0,3~% und

$$THD_{dB} = 20 \ dB \cdot log \frac{\sqrt{\sum_{k=2}^{n} A_k^2}}{A_1} = 10 \ dB \cdot log \frac{\sum_{k=2}^{n} A_k^2}{A_1^2}$$
 (4.5)

<sup>&</sup>lt;sup>3</sup>Harmonische Verzerrungen sind Vielfache einer angeregten Frequenz. So gibt es harmonische Verzerrungen 2. Ordnung (K2), 3. Ordnung (K3), 4. Ordnung (K3) usw.. Der Mensch nimmt vor allem Verzerrung ungerader Ordnung als unangenehm war, also K3 und K5. Höhere Verzerrungen sind meist so stark gedämpft, dass sie keine Rolle mehr spielen. (Weinzierl, 2008)

<sup>&</sup>lt;sup>4</sup>THD (gesamte harmonische Verzerrung auch Klirrfaktor genannt) beschreibt, wie hoch die gesamte Verzerrung eines LTI-Systems ist. Hierzu gibt es verschiedene Ansätze dies zu berechnen. In der Audiotechnik steht dazu die Summe der Effektivamplituden der Harmonischen im Quadrat im Verhältnis zur Anregungsamplitude (siehe Gleichung 4.5). (Weinzierl, 2008)

bleibt dort konstant bis 10~kHz. Die Mitteltöner haben bei einer Belastung von 5~W, was im Vergleich mit den THD Messungen in Abbildung 4.17 des gesamten Lautsprechers ungefähr 100~dB bei 1~m Abstand entspricht, sehr konstante K3-Werte von 300~Hz bis 2~kHz leicht über 0,1~%. Dieser steigt dann bis 2,5~kHz auf über 0,32~% an. Dieser Anstieg könnte auf die Partialschwingung der Sicke zurückzuführen sein, was schon im Kapitel 4.2.3.2 erläutert wurde. Die zweite harmonische Verzerrung ist etwas sprunghafter und haben im Arbeitsbereich (300~bis~2,5~kHz) Werte von maximal 1~% bis minimal <~0,01~%. Im Schnitt liegen die Werte aber etwa bei 0,1~%. Der Verlauf der zweiten und der dritten harmonischen Verzerrungen der Tiefmitteltöner ähneln sich sehr. Sie klirren im Tieftonbereich (50~bis~70~Hz) mit etwa 1~% und fallen dann auf circa 0,03~% ab. Die K2-Verzerrung steigt dann wieder auf 0,32~% und bleibt dort bis über 300~Hz konstant. Die dritte harmonische Verzerrung steigt allerdings bis etwa 0,8~% an.

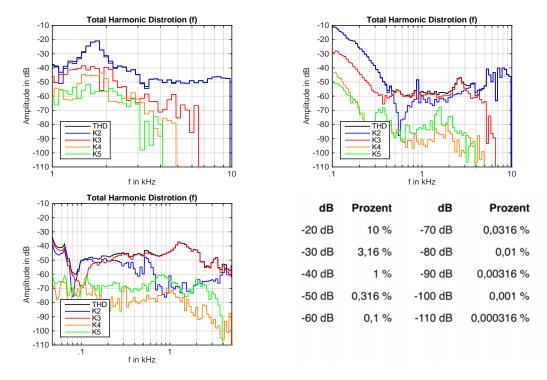


ABBILDUNG 4.16: Total Harmonic Distrotion (f) - Hochtöner:  $1\ W$  (oben links), Mitteltöner:  $5\ W$  (oben rechts) und Tieftöner:  $10\ W$  (unten links)

Der Klirr des gesamten Lautsprechers verändert sich zu den einzeln Messungen etwas, da nun alle sechs Tieftöner arbeiten und somit der Tieftonweg entlastet wird. Dies spiegelt sich auch im Klirrverlauf mit 90~dB bei 1~m Abstand wider. Hier sinken die K2- und K3-Verzerrung im Tieftonbereich auf 0,3~% und kleiner und haben dann bis 400~Hz etwa 0,8~%. Der K3 verläuft mit etwa 0,3~%

bis 2,5~kHz weiter und steigt auf Grund des Mitteltöners wieder auf fast 1~% an.

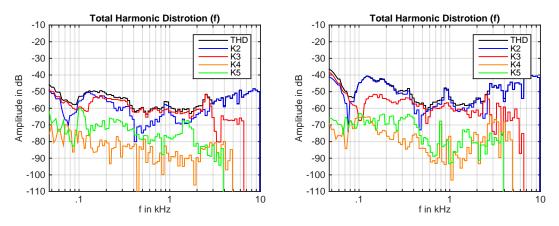


ABBILDUNG 4.17: Total Harmonic Distrotion (f) des Lautsprechers "MP1 MK2," bei  $90~dB_{spl}$  @ 1~m (links) und  $100~dB_{spl}$  @ 1~m (rechts)

#### 4.2.5.2 Verzerrungsmessung mit Multisinussignal

Zuletzt hat man die Intermodulationsverzerrungmessung (IMD) mit einem Multisinus durchgeführt. Das dazu verwendete Signal besteht aus einem Betragsfrequenzgang von Sinustönen von 20~Hz bis 5~kHz, die gleichverteilt (geometrisch mit einem 1/6-Oktav Abstand) auf der logarithmierten Frequenzachse liegen und einem zufälligen Phasengang haben (siehe Abbildung 4.18). Durch den randomisierten Phasenverlauf erhält das Testsignal einen hohen Crestfaktor von 12~dB und entspricht ungefähr dem eines gemasterten Musikstücks. Das Signal ist nach dem Vorgehen EIA-426-B von *Keele* erzeugt worden, dass für eine optimale Leistungbewertung von Lautsprechern und Verstärkern entwickelt wurde. Es hat den Vorteil, dass die Belastung der einzelnen Treiber mit einem Multisinus nach dessen Gewichtung mit dem EIA-426-B-Verfahren (siehe Abbildung 4.19) der eines Musiksignals entspricht. Dies vereinfacht den Vergleich der einzelnen Wege untereinander. (Keele, Jr., 2001)

Diese Messung zeigt deutlich, dass nicht wie erwartet der Hochtöner, die höchsten Verzerrungen erzeugt, sondern die Tiefmitteltöner, Tieftöner und die Mitteltöner. Außerdem ist auch aus der Grafik 4.19 zu erkennen, dass die Partialschwingungen der Mitteltönersicke (siehe Kapitel 4.2.3.2) evtl. auch den Klirr bei 1,5 bis  $2\,kHz$  erhöhen. Die wohl größte Schwachstelle bei den Verzerrungen des Lautsprechers, da diese gerade in einem vom Menschen sehr hörempfindlichen Bereich fallen.

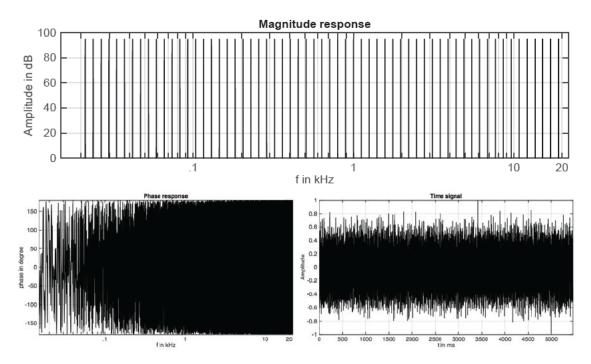


ABBILDUNG 4.18: Intermodulation Distortion (IMD) Signal mit einem Crestfaktor von  $12\ dB$  (Betragsfrequenzgang (oben), Phasengang (unten links), Signal im Zeitbereich (unten rechts)

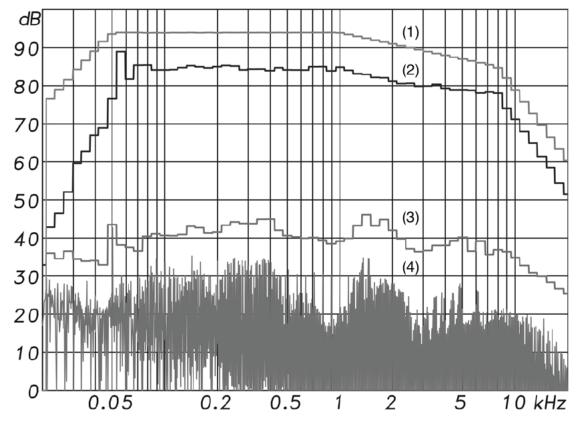


ABBILDUNG 4.19: Intermodulation Distortion (IMD) Messung mit EIA-426-B Gewichtung mit  $-42\ dB$  Verzerrung - (1) Gemitteltes Anregungssignal, (2) gemittelte Messung, (3) gemittelte Verzerrung, (4) gemessene Verzerrung

## Kapitel 5

# Entwicklung der digitalen Frequenzweiche

Nach der Messung der einzelnen Lautsprecherchassis im reflexionsarmen Raum (4.2) erfolgte die Filterung der einzelnen Lautsprecherwege. Für die Erstellung der drei Frequenzweichen kamen unterschiedliche Filtertypen zum Einsatz. Dies war eine Filterung mittels FIR-Filterung mit komplettem linearen Phasengang, eine hybride Filterung, bei der minimalphasige Filter den Tieftonbereich entzerren und nur der Mittel- und Hochtonbereich eine konstante Gruppenlaufzeit (linearphasig) hat, sowie eine Filterung aus IIR-Filtern mit kleinstmöglicher Signallaufzeit. Die Erstellung der Filter übernahm die Crossover- bzw. J-Filter-Funktion von "Monkey Forest".

## 5.1 Filtererstellung

Aufgabe des Lautsprechercontrollers "HD 2" ist die Aufteilung bestimmter Frequenzen eines Audiosignals auf die dementsprechenden Lautsprecherwege. Hinzu kommt bei der FIR-Filterung die Linearisierung des gesamten Phasengangs. Diese Aufteilung erfolgt aus den akustischen Messungen der einzelnen Lautsprecherchassis in Kapitel 4.2. Des Weiteren muss noch die gewünschte Trennfrequenz der Wege, die Flankensteilheit der Filter, sowie die unterste Grenzfrequenz der Tieftöner aufgeführt werden. Aus diesen Randparametern bilden sich die Prototypenbandpässe, aus denen sich entweder "per Hand" mit Standardfiltern (Hochpass-, Tiefpass-, Bandpass-, Bellfilter usw.) eine IIR-Frequenzweiche (Kapitel 5.1.3) erstellen lässt oder dies übernimmt "Monkey Forest" für die FIR-Filtererstellung mit Hilfe einer Approximation durch inverse Fouriertransformation und Ausfensterung der entstehenden Impulsantwort,

die das Kapitel 5.1.1 genauer beschreibt. Außerdem werden die drei verschiedenen erstellten digitalen Frequenzweichen vorgestellt und deren Eigenschaften erläutert (siehe Kapitel 5.1.2 und 5.1.3). (Müller, 1999)

# 5.1.1 Grundlagen der FIR-Filtererstellung mittels "Monkey Forest"

Die FIR-Koeffizientengenerierung von Monkey-Forest, die in Abbildung 5.1 zu sehen ist, beruht auf der Erstellung eines Amplitudengangs des Wunschfilters, dessen Phase konstant Null ist. Aus diesem und dem Betragsfrequenzgang mit Phasenverlauf berechnet sich die ideale Filterfunktion. Anschließend fenstert man dessen Impulsantwort (das Maximum wird in die Mitte geschoben) des Wunschspektrums, das man durch inverse Fourier-Transformation erhält. Je nach Sinnhaftigkeit der Filterlänge (Koeffizientenanzahl) können nun die Koeffizienten symmetrisch um das Maximum der Impulsantwort abgelesen werden. Dabei entnimmt man bei Lautsprecherwegen mit verringerter Abtastrate um den Faktor n nur jeden n-ten Filterkoeffizienten.

Wie das letzte Diagramm der Abbildung 5.1 zeigt, ist die Flankensteilheit des Filters über die Frequenz umgekehrt proportional zur Filterkoeffizientenlänge. Dies hat zur Folge, je tiefer der Filter liegt, desto mehr Koeffizienten sind notwendig, um eine hohe Flankensteilheit zu erreichen. IIR-Filtern weisen dieses Problem nicht auf.

Um einen FIR-Filter mit linearem Frequenzgang zu erhalten, prägt man dem Spektrum der erhaltenen Impulsantwort eine konstante Gruppenlaufzeit mit der Länge des halben Zeitausschnitts auf. Ein minimlaphasiger FIR-Filter lässt sich durch eine Hilber-Transformation über das Spektrum berechnen.

Die vollständige FIR-Filter-Koeffizientengenerierung läuft wie folgt ab und wird in der Abbildung 5.2 dargestellt. Zu erst misst man die einzelnen Lautsprecherwege. Diese werden anschließend entsprechend ihrer Abtastfrequenz tiefpassgefiltert. Danach werden die erhaltenen Frequenzgänge invertiert und mit den Prototypbandpässen (aus dem Wunschfrequenzgang entstanden) multipliziert, um den Frequenzgang des gewünschten FIR-Filters zu errechnen. Durch inverse Transformation und Fensterung berechnet sich die FIR-Impulsantwort. (Müller, 1999)

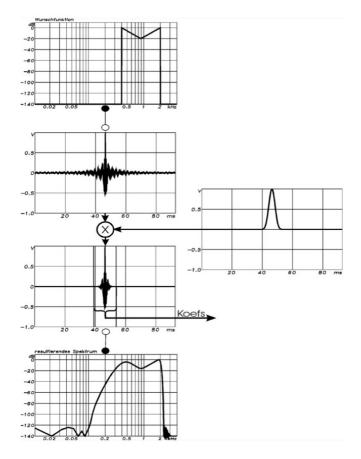


ABBILDUNG 5.1: FIR-Koeffizientengenerierung (Quelle: Müller (1999))

# 5.1.2 FIR-Filtererstellung mit der Crossover-Funktion von "Monkey Forest"

Die Crossover-Funktion von "Monkey Forest" berechnet durch die Eingabe bestimmter Randbedingungen und der Messungen der einzelnen Lautsprecher das FIR-Filter (minimal- oder linearphasig). Dieses braucht dafür zuerst die Anzahl der Filterkoeffizienten, den Faktor n der Unterabtastung der einzelnen Wege und die Art der Fensterung nach inverser Fourier-Transformation (siehe Tabelle 5.1). Durch Fensterung mit der Kaiser-Bessel Funktion erhält das Filter eine gute Sperrdämpfung.

	KoeffAnzahl	Faktor $n$ (Unterabtastung)	Fensterung
TT	400	16	Kaiser-Bessel
TMT	400	16	Kaiser-Bessel
MT	200	4	Kaiser-Bessel
HT	200	1	Kaiser-Bessel

TABELLE 5.1: Parameter der FIR-Filter für die "MP1 MK2"-Frequenzweiche

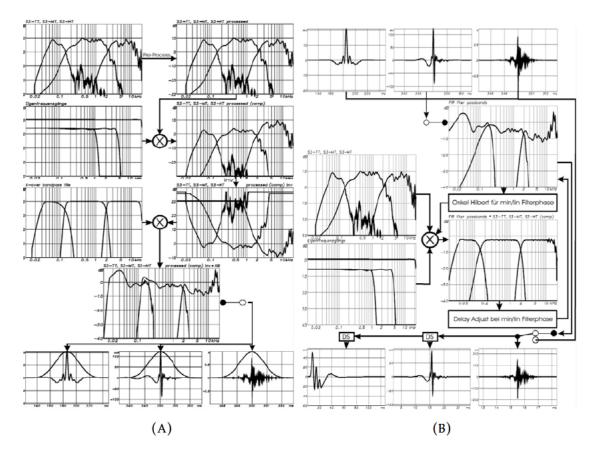
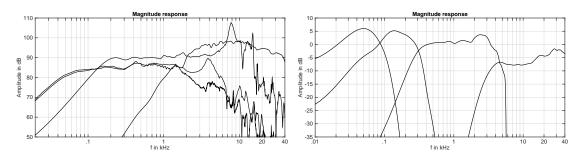


ABBILDUNG 5.2: FIR-Filter-Koeffizientengenerierung: (A) Erster Teil des Entzerrablaufs mit Vorverarbeitung, Eigenfrequenzgang-Berücksichtigung, Bandpass-Aufprägung, Invertierung, IFFT und Fensterung der Impulsantworten. (B) Zweiter Teil des Entzerrungsablaufs mit Kontrolle der Durchlaßverstärkung, Generierung der minimalphasigen Filter, Delayanpassung und Koeffizientenextrahierung. (Quelle: Müller (1999), S. 179-180)

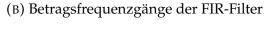
Durch die anschließende Erstellung des Zielbetragsfrequenzgangs (siehe Abbildung 5.3) berechnen sich mit der Angabe der gewünschten Filtertypen und der anteiligen Verstärkung der einzelnen Wege im Übergang die Prototypbandpässe (siehe Tabelle 5.2). Aus diesen und dem Zielbetragsfrequenzgang entstehen die Bandpassfilter, aus denen sich zuletzt mit den Eigenfrequenzgängen des Lautsprechercontollers (je nach Abtastrate des Weges) und den Frequenzgangmessungen die FIR-Filter-Koeffizienten ermitteln lassen. Zuvor entscheidet man noch zwischen minimal- bzw. linearphasiger Entzerrung der einzelnen Wege. Zudem können noch die Limitereinstellungen für die zu verwendeten Verstärker und Lautsprecherchassis zugewiesen werden, die in der Filter-Datei gespeichert sind.

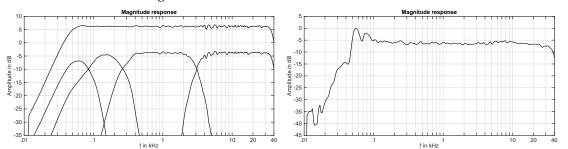
Zielfrequenzgang	35 Hz bis $40 kHz$			
Weg	TT	TMT	MT	HT
Hochpassfilter				
Cuttoffrequenz	80~Hz	300~Hz	3 kHz	
Filtertyp	LR	LR	LR	
Flankensteilheit	48 dB	48 dB	48 dB	
Tiefpassfilter				
Cuttoffrequenz		300~Hz	3 kHz	
Filtertyp		BW	LR	LR
Flankensteilheit	24 dB	48 dB	48 dB	48 dB
Gewichtung	0 dB	-9 dB	0 dB	0 dB
FIR-Typ	lin./min.	lin./min.	lin	lin

TABELLE 5.2: Parameter der Prototypenbandpässe der FIR-Generierung in "Monkey Forest" (BW = Butterworth, LR = Linkwitz-Riley)



(A) Messungen der einzelnen Lautsprecherwege





(C) Berechnete Frequenzgänge der einzel- (D) Gemessenen Freuqenzgang mit FIRnen Wege und des gesamt Frequenzgangs Filterung (Tief- und Tiefmittelton minimalmit FIR-Filterung phasig; Mittel- und Hochton linearphasig

ABBILDUNG 5.3: FIR-Filter-Generierung mit "Monkey Forest"

## 5.1.3 IIR-Filter-Erstellung

Das J-Filtertool von "Monkey Forest" übernahm die Anfertigung der IIR-Filter. Das Ziel war es den Amplitudenverlauf der FIR-Filterung mit IIR-Filtern (Hochpass-, Tiefpass-, Bell-, Highshelf- und Lowshelf-Filtern) nachzubauen.

Zuerst bildeten diese IIR-Filter die FIR-Entzerrung grob nach. Durch Vergleichsmessungen (zwischen FIR- und temporärer IIR-Filterung) wurden die Parameter der IIR-Filter (z.B. beim Tiefpass: Filterart, Sperrfrequenz, Filterordnung, Güte und Verstärkung) angepasst. Das Ergebnis (siehe Abbildung 5.4) ist ein fast identischer Frequenzgang zur FIR-Filterung, der lediglich im Frequenzbereich über  $20\ kHz$  Abweichungen aufzeigt. Die Filtererstellung fand im Akustiklabor von *ADAM Audio* (siehe Bild 5.5) statt.

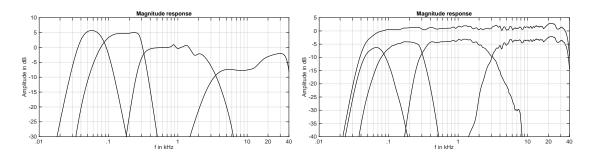


ABBILDUNG 5.4: IIR-Filter-Nachbau auf der Grundlage der FIR-Filter

# 5.2 Vergleich der drei angewendeten Filterentzerrungen

Die Abbildung 5.5 zeigt jeweils den Betragsfrequenzgang sowie den Phasenverlauf der drei verschiedenen Entzerrungen. Die Messungen erfolgten im akustischen Labor von *ADAM Audio*. Die Betragsfrequenzgänge wurden mit 1/6 Oktave geglättet und blieben ungefenstert, um die Information in den Tieftonbereich zu behalten.

Die FIR-Filter sind im Amplitudengang identisch, da das gleiche Verfahren deren Koeffizienten berechnet hat. Aber auch der Amplitudenverlauf des IIR-Filters zeigt kaum Unterschiede zu den FIR-Filterverläufen. Er bricht lediglich bei ungefähr  $2\ kHz$  stärker ein und hat bei ungefähr  $1,5\ kHz$  eine leichte Erhöhung. Außerdem fällt der Frequenzgang bei ca.  $23\ kHz$  etwas früher als bei den FIR-Filter. Dies liegt allerdings weit außerhalb des hörbaren Frequenzbereichs.

Die Unterschiede der Filterarten verdeutlichen sich beim Vergleich der Phasengänge. Die drei Filtertypen haben unterschiedliche Grundlatenzen, die beim minimalphasigen FIR-Filter  $40\ ms$ , beim minimalisierten  $20\ ms$  und beim IIR-Filter  $5\ ms$  betragen. Zum besseren Vergleich wurde diese Latenzen kompensiert. Die Abbildungen 5.5-(B), (D) und (F) zeigen die Phasenverläufe der Entzerrungen. Bei allen drei Phasengängen sind die Reflexionen des Raums von

50~Hz bis 200~Hz erkennbar. Es zeigt sich ein Unterschied zwischen der kompletten linearen FIR-Filterung (5.5-(B)) und der minimalphasigen FIR-Filterung (5.5-(D)). So verläuft die Phase der linearen Entzerrung ab 70~Hz ziemlich konstant. Der minimalphasige Phasengang beginnt erst ab 300~Hz, ab der Frequenz die linearphasigen FIR-Filter arbeiten, linear zu verlaufen. Bei der Phase des IIR-Filters (5.5-(F)) wird die Differenz noch stärker. Die Flanken und deren Grenzfrequenz der Hoch- und Tiefpass-IIR-Filter sind in dem Phasenverlauf gut erkennbar. Durch den durch rekursiven Aufbau der IIR-Filter dreht sich Phase des Frequenzgangs bei dessen Grenzfrequenz hin und wieder weg. Aus diesem Verhalten resultiert die frequenzabhängige Laufzeit des Signals.

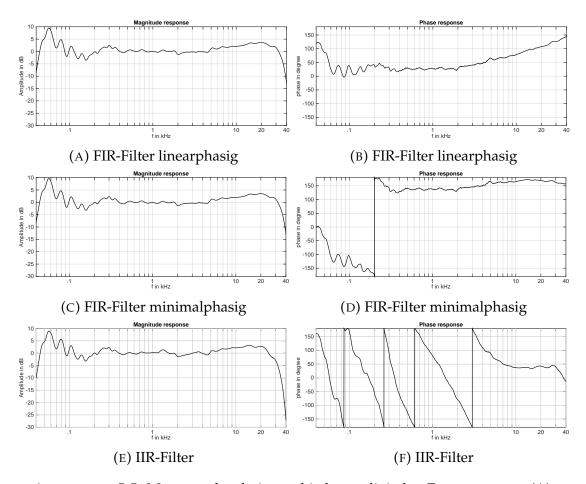


ABBILDUNG 5.5: Messung der drei verschiedenen digitalen Entzerrungen - (A) und (B) linearphasige FIR-Filterung, (C) und (D) minimalphasiger FIR-Filterung sowie (E) und (f) IIR-Filterung im Akustiklabor von *ADAM Audio* (links: Betragsfrequenzgang (Glättung: 1/6 pro Oktave); rechts: Phasengang vorheriger Latenzkompensation)

## Kapitel 6

## Hörversuch

Ein Lautsprecher dient dazu, Audiosignale in Schall zu wandeln. Dabei ist der Rezipient in den aller meisten Fällen menschlicher Gestalt. Daher ist es sehr ratsam, nach jeder entwickelten Audiotechnik diese mit einem Hörversuch zu validieren. Menschen nehmen akustische Signale verschieden wahr. Durch eine Vielzahl an Hörversuchen mit individuellen Testteilnehmern lässt sich allerdings aus den einzelnen subjektiven aufgenommenen Daten statistisch eine objektive Aussage berechnen. Für die Entwicklung des Lautsprechers "MP1 MK2" und dessen Filtern fand daher ein Hörversuch statt. Einerseits ein ABX-Versuch (Kapitel 6.3) der die Validität der Behauptung sowie die "Qualifikation" der Probanden für den zweiten Versuch untersuchte. Andererseits sollte ein AB-Hörtest die Unterschiede zwischen IIR- und FIR-Filterung (siehe Kapitel 5) klanglich beurteilen. Des Weiteren sollte im zweiten Teil des Hörversuchs eine allgemeine Aussage über Klangeigenschaften des Lautsprechers getroffen werden.

Die Hörversuche beobachteten nur die Klangunterschiede zwischen dem linearphasigen FIR- und dem IIR-Filter. Der minimalphasige FIR-Filter blieb dabei außen vor. Um einen direkten AB-Vergleich zu ermöglichen, ohne dass es zu langen Umschaltzeiten des Lautsprechercontrollers kommt oder Probanden einen Amplitudengangunterschied zwischen den Filterarten hören könnten, wurde dem FIR-gefilterten Lautsprecher die IIR-Phase aufgeprägt. Dazu wurde auf das zuhörende Musiksignal eine Impulsantwort mit konstantem Betragsfrequenzgang von 0 und der IIR-Phase gefaltet. Das Unterkapitel 6.2.2 erklärt diesen Zusammenhang genauer.

## 6.1 Vorbetrachtung

Über die optimale Qualität eines Audiosystems lässt es sich streiten. Denn hierbei spielen weitaus mehr Faktoren eine Rolle, die nicht unbedingt auf den ersten Schein einen direkten logischen Zusammenhang haben müssen, wie bei einer technischen Beurteilung bei der optimale Eigenschaften meist klar und logisch definierbar sind. Auf Grund der subjektiven Wahrnehmung des Rezipienten kann eine umfassende Aussage über die Qualität eines Audiosystems nur mit einer technischen sowie mit einer Messung mittels Hörversuchs gemacht werden. Jeder Mensch nimmt akustischen Schall unterschiedlich wahr. Äußere Einwirkungen und persönliches Befinden beeinflussen dessen Wahrnehmung ständig. Aus diesem Grund kann ein Hörversuch nur dann ein valides Ergebnis einbringen, wenn eine Vielzahl an Testteilnehmern diesen durchgeführt haben und dieser am Ende statistisch ausgewertet wird.

#### 6.1.1 Stand der Technik

Es gibt viele Untersuchungen, die sich schon mit den Unterschieden zwischen IIR- und FIR-Filterung beschäftigt haben. Zusammengefasst sind Phasenunterschiede zwischen den beiden Filterformen durchaus hörbar. Die Differenzen sind kaum vernehmbar und meist nur im Tieftonbereich zu identifizieren. Die Messunger der Unterschiede mittels Hörversuch funktionieren leichter mit Kopfhörern als mit Lautsprechern und die Erkennbarkeit sinkt mit dem Hörabstand zum Lautsprecher, da die Phase des Lautsprechersystems in der Phase des Raums untergeht. (Müller, 1999), (Toole, 2008)

## 6.2 Allgemeines Vorgehen

Bei diesem Hörversuch bei dem sich die hörbaren Unterschiede zwischen IIRund FIR-Filterung auf Phasenunterschiede beschränken, war eine sehr geringe Effektstärke zu erwarten. D.h. die Erwartung war im vornherein sehr groß, dass kaum Unterschiede zuhören sind. So ist eine Aussage über die Ergebnisse des AB-Hörversuchs und dessen Qualität mit Vorsicht zu genießen. Zusätzlich ist es wichtig, bei einem Hörversuch die abhängigen Variablen sehr klein zu halten, um eventuell erfasste Varianzen eindeutig bestimmen zu können. Die Anzahl der unabhängigen Variablen kann allerdings beliebig groß sein, da diese sich gegenseitig nicht beeinflussen und eventuell nicht erwartete Zusammenhänge aufdecken könnten. Für einen AB-X- und einen AB-Vergleichstest sind schnelle Umschaltzeiten notwendig, da das akustische Gedächtnis nur sehr kurz Klangunterschiede speichern und anschließend differenzieren kann. Da das Umschalten zwischen zwei Filtertypen des Lautsprechercontrollers "HD 2" etwa 5 s dauert, war ein Umschalten über diesen Weg ausgeschlossen. Ferner war es für die beiden Hörversuche (AB-X- 6.3 und qualitativer AB-Test 6.4) wichtig, dass nur Phasenunterschiede hörbar sind. Da aber der Amplitudenverlauf der IIR-Filterung nicht genau der FIR-Filterung entspricht, war dies ein weiterer Grund, den Unterschied der Phasenverläufe und somit Gruppenlaufzeiten auf einen anderen Weg zu erreichen. Die Lösung ist die Aufprägung des Phasenverlaufs der IIR-Filterung auf den verwendeten Stimulus, den auch die FIR-entzerrten Lautsprecher abspielen. Dies entspricht einer IIR-Filterung mit einem exakt gleichen Betragsfrequenzgang wie der FIR-Filterung. Dieses Verfahren ermöglicht somit ein latenzfreies Umschalten zwischen den zwei verschiedenen Filtertypen (IIR und FIR) mit dem selben Betragsfrequenzgang.

### 6.2.1 Klangliche Unterschiede zwischen IIR- und FIR-Filtern

Die Literatur beschreibt den Klang eine FIR-Filters im Tieftonbereich auf Grund der gleichmäßigen Frequenzwiedergabe als präzise, impulsgenau und klar. Außerdem wird dessen Klang als sehr klar und scharf bewertet. IIR-Filter werden dagegen durch deren verzögerte Basswiedergabe als schwammig im Bass und als diffus in den Höhen beurteilt. Diese Klangeigenschaften sind "eher theoretisch" und sind auch nur im direkten Vergleich wahrnehmbar. (Toole, 2008)

## 6.2.2 Erstellung der Impulsantwort zum Aufprägen der IIR-Phase auf den linearphasigen Lautsprecher

Der FIR-Filter linearisiert nicht nur den Phasenverlauf der einzelnen Filter (Hochpass, Tiefpass, usw.), sondern auch den Phasenverlauf der genutzten Lautsprechertreiber, so dass am Ende der Signalkette ein linearer Phasenverlauf entsteht. Daher muss für die Erstellung der Impulsantwort mit konstanten Betragsfrequenzgang und IIR-Phasengang nicht nur der Phasenverlauf der IIR-Filter genutzt werden, sondern es sind auch die Phasenverläufe der einzelnen Lautsprechertreiber zuberücksichtigen. Dies geschieht durch komplexe Multiplikation dieser akustischen Messungen (FFTs) mit den Messungen der einzelnen IIR-Filterwege des "HD 2" (FFTs). Durch anschließende komplexe Addition der einzelenen Wege erhält man den gesamten Betragsfrequenzgang

mit Phase. Diese Phase kann in die FFTs eines Diracimpuls (konstanter Betragsund Phasenfrequenzgang von 0) kopiert werden. Die IFFT dieses manipulierten Diracspektrums ist die Impulsantwort. Mit dieser kann durch Faltung einem beliebigen Signal der Phasenverlauf des IIR-Filters eingeprägt werden, ohne den Amplitudenverlauf zu ändern. Der systematische Vorgang dieser Impulsantworterstellung illustriert Abbildung 6.1.

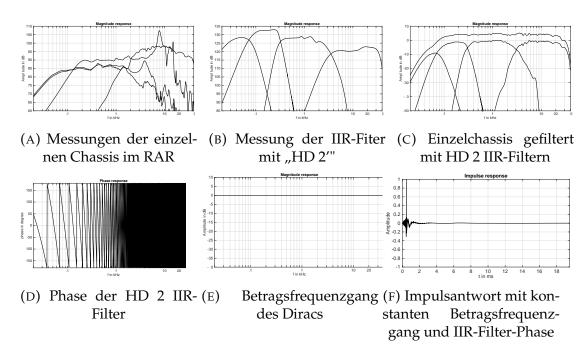


ABBILDUNG 6.1: Systematischer Vorgang zur Erstellung der Impulsantwort mit konstantem Betragsfrequenzgang und Phasengang der IIR-Filterung

#### 6.2.3 Hörversuchsteilnehmer

Der Mastering Lautsprecher "MP1 MK2" wurde sowohl für den Profi- als auch für den Highend-Audiomarkt entwickelt. Da im vornherein klar war, dass die Unterschiede zwischen den zu vergleichenden Filtertypen kaum hörbar sind, spielte die Wahl der Probanden eine wichtige Rolle. Die Teilnehmer sollten daher eine gewisse "Audioerfahrung" und ein geschultes Ohr mitbringen.

An dem Hörversuch haben 22 Personen teilgenommen, davon drei Testpersonen nur am ABX-Versuch beteiligt waren. 16 Hörversuchsteilnehmer, von denen sich elf Teilnehmer für die AB-Auswertung "qualifizierten", haben den AB-Hörversuch durchgeführt und den Fragebogen ausgefüllt. Alle 16 Probanden sind im Bereich "Musik" oder "Audiotechnik" tätig und mehr als die Hälfte in beiden Bereichen. Die meisten Testteilnehmer haben ein grundlegendes Wissen über digitale Filtertechnik und haben mehr als sechs Lautsprecher gehört, aber

sie haben nicht mit mehr als zwei Lautsprechern gearbeitet (siehe Abbildung 6.2). Zu Beginn der Versuche hat jeder Testteilnehmer ein Informationsschreiben zum Versuchsablauf durchgelesen (siehe Anhang A.1 und A.1).

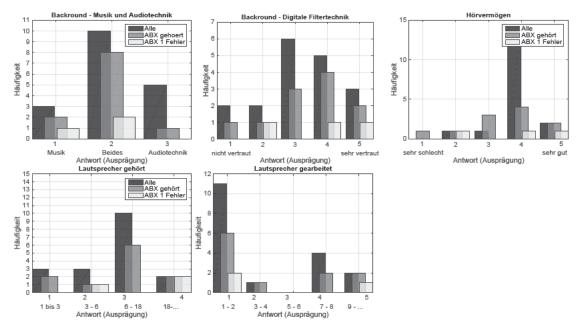


ABBILDUNG 6.2: Erfahrungsparameter der Probanden

#### 6.2.4 Ort des Hörversuchs

Das Akustiklabor der Firma *ADAM Audio* hat durch eine professionelle Raumdämmung gute akustische Raumeigenschaften. Die Lautsprecher standen bei dem Hörversuch auf der langen Seite des Raums in einem Stereodreieck (gleichseitige Dreieck) mit Seitenlängen von  $2\,m$  (bei einem Lautsprecherabstand von  $1,73\,m$ ) (siehe Abbildung 6.3). Dies entspricht zwar nicht dem optimalen Lautsprecherabstand für dieses System, der eher bei 2 bis  $4\,m$  liegen sollte. Anderseits verringert diese Aufstellung die Gewichtung der Phasenänderung durch den Raum.

#### 6.2.5 Versuchssoftware für AB-X- und AB-Test

Kernstück der Hörversuche war ein selbst programmierter "Max MSP"-Patch (siehe Abbildung 6.4), mit dem mittels schneller Faltung die IIR-Filterphase in "Echtzeit" auf den Stimulus geprägt wurde (seihe Anhang A.2 und A.3). Diese Hörversuchsoftware ist sowohl über die Tastatur als auch über MIDI mit einem Smartphone bzw. Tablet steuerbar.



ABBILDUNG 6.3: Hörversuch: ABX-Test, Akustik Labor der Firma *ADAM Audio*, Ederstraße 16, 12059 Berlin

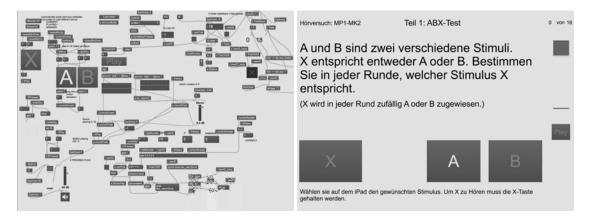


ABBILDUNG 6.4: Versuchssoftware des ABX-Tests: MAX-MSP-Patch (links) und -Bedieneroberfläche (rechts)

## 6.3 ABX-Test

## 6.3.1 Zu untersuchendes Messobjekt

Das Ziel des ABX-Tests ist die Überprüfung der Validität der Aussage, ob die oben genannten Unterschiede (siehe Abschnitt 6.2.1) zwischen der IIR- und der FIR-Filterung des Lautsprecherpaars "MP1 MK2" bzw. dessen Phasenunterschiede von den Probanden wahrnehmbar sind.

Außerdem war der ABX-Test ein Eignungstest, die Fähigkeit der Probanden für den darauf folgenden AB-Versuch festzustellen. D.h., dass beim AB-Test nur

die Daten der Probanden auswertbar sind, die auch die Unterschiede zwischen linearer FIR-Phase und IIR-Phase gehört haben.

### 6.3.2 Versuchsbeschreibung

Beim ABX-Versuch muss der Proband zwischen zwei Stimuli (A und B) entscheiden, ob einer dem Referenz Stimulus (X) entspricht. Diesen einzelnen Versuch hat der Proband so häufig zu wiederholen, bis statistisch die Wahrscheinlichkeit so klein ist, dass der Proband den Versuch durch Raten nicht bestehen kann. D.h. der Versuch ist dann aussagekräftig, wenn das Signifikanzniveau  $\alpha$  (Irrtumswahrscheinlichkeit) kleiner 0,05 ist ( $\alpha$  < 0,05). Da der Unterschied zwischen den zwei digitalen Filtertypen kaum hörbar ist und er eine sehr geringe Effektstärke besitzt, mussten die Probanden die Einzeldurchläufe (Trials) des ABX-Versuchs sehr häufig wiederholen, um eine valide Aussage zu messen. Hinzu kommt, dass durch die kleinen Unterschiede und durch das ständige Wiederholen des gleichen Stimuli, das Gehör ermüdet. Folglich könnte es sein, dass gegen Ende der Wiederholungen die Probanden kaum noch Unterschiede gehört haben. Daher wurde der Versuch für jeden Probanden auf 18 Wiederholungen beschränkt. Um am Ende trotz alledem eine Aussage des Hörversuchs treffen zu können, fasst man alle Versuche der Probanden zusammen und berechnet aus diesen das Signifikanzniveau.

#### 6.3.3 Stimulus

Der Stimulus war ein Schlagzeugloop von der Test-CD "Drum & Track Disc, for Audio Component Testing and Evaluation" von *The Sheffield Lab* mit einer Länge von etwa fünf Sekunden . Die Auswahl geschah deshalb, weil Schlagzeugaufnahmen schnelle Transienten und ein breites Frequenzspektrum besitzen.

## 6.3.4 Ergebnisse

#### 6.3.4.1 Statistische Auswertung

An dem AB-X-Test haben 22 Personen Teilgenommen, die jeweils den Versuch 18 mal wiederholt haben. Die Wahrscheinlichkeit bei einem AB-X-Test, ob die Testperson den Unterschied des untersuchten Objekts gehört hat, wird mit der

Binomialverteilung berechnet. Diese Gleichung 6.1 berechnet die r-fache Wahrscheinlichkeit P aus der Anzahl N der Durchläufe mit der Einzelereigniswahrscheinlichkeit p.

$$P_{bino}(r|p,N) = \binom{N}{r} p^r (1-p)^{n-r} fuer \ r = 0, 1, ..., n$$
 (6.1)

Überlicherweise betrachtet man beim AB-X-Test immer die Nullhypotese  $H_0$ , ob kein Unterschied wahrnehmbar ist. Die Nullhypothese verliert allerdings erst dann an Geltung, wenn ein Signifikanzniveau größer 95 % besteht, d.h. der Fehler 1. Art  $\alpha$  kleiner als 5 % ist. Das wiederum heißt, die Probanden haben den Unterschied gehört. Der Fehler 1. Art entspricht der Wahrscheinlichkeit P, dass der Versuch mit seinen Wiederholungen N durch Raten korrekt beantwortet wird.

Bei wenigen Wiederholungen und einer geringen Effektstärke des Unterschieds sollte allerdings die Berechnung der Binomialverteilung etwas verändert werden. So zieht man der Anzahl an richtigen Versuchen um eine korrekte Antwort ab (r-1). Was in diesem Fall bedeutet, dass 13 anstelle von 12 richtigen Antworten notwendig waren, um den Unterschied signifikant ( $\alpha=4,81~\%$ ) zu hören. (Leventhal, 1986)

Bei den durchgeführten Versuchen haben 15 von 22 Probanden den Unterschied signifikant gehört. Diese Testpersonen haben von 18 Wiederholungen mindestens 13 mal richtig entschieden (siehe Tabelle 6.1). Bei dem Rest der Probanden konnte die Nullhypotese  $H_0$  nicht verworfen werden. Damit konnten diese statistisch keinen Unterschied zwischen linearer FIR- und IIR-Phase hören.

Mit der Berechnung aller AB-X Wiederholung der gesamten 22 Testpersonen mit der Gleichung 6.1 ergibt sich ein Fehler 1. Art von  $\alpha < 0,000001$  (Wiederholungen: 396 und richtig: 293). Womit die Gruppe der Probanden den Unterschied eindeutig hören konnten.

Von den 15 Probanden, die den Unterschied gehört haben, haben allerdings nur 11 Versuchspersonen den AB-Versuch (Abschnitt 6.4) und den allgemeinen Teil (Abschnitt 6.4) durchgeführt, sowie Angaben zu ihrer Person (Abschnitt 6.2.3) gegeben.

Prob.	$P_{bino}$	r	$H_0$	Prob.	$P_{bino}$	r	$H_0$
1	1,544%	4	verworfen	12	0,377%	3	verworfen
2	1,544%	4	verworfen	13	0,377%	3	verworfen
3	0,007%	1	verworfen	14	< 0,001%	0	verworfen
4	4,813%	5	verworfen	15	1,544%	4	verworfen
5	0,007%	1	verworfen	16	40,726%	8	bestätigt
6	4,813%	5	verworfen	17	59,274%	9	bestätigt
7	4,813%	5	verworfen	18	40,726%	8	bestätigt
8	4,813%	5	verworfen	19	59,274%	9	bestätigt
9	0,377%	3	verworfen	20	40,726%	8	bestätigt
10	0,007%	1	verworfen	21	24,034%	7	bestätigt
11	1,544%	4	verworfen	22	11,894%	6	bestätigt

TABELLE 6.1: Ergebnisse des ABX-Tests, bei jeweils 18 Wiederholungen n pro Proband

## 6.4 Qualitativer Hörversuch (AB-Versuch)

## 6.4.1 Zu untersuchendes Messobjekt

Nach der ABX-Testdurchführung schloss direkt ein qualitativer Hörversuch an, um die Klangeigenschaften des Lautsprechers im Abhängigkeit des Phasengangs (lineare FIR-Phase gegen nichtlinearer IIR-Phase) mittels eines AB-Vergleich genauer zu untersuchen. Die Aufgabe der Probanden war es, die Klangeigenschaften der FIR- und IIR-Filterung im AB-Vergleich mittels fünf verschiedener Musikstücke zu beurteilen (relative Unterschiede).

Schon die akustischen Messergebnisse zeigen, dass der Lautsprecher einen sehr linearen Frequenzgang, so wie kaum Verzerrungen hat. Auch die Abstrahlcharakteristik des Lautsprechers hat kaum Einbrüche oder ähnliches. Daher sollten auch die allgemeinen Klangeigenschaften aus diesem Teil des Hörversuchs ermittelt werden, um im besten Fall die guten technischen Messergebnisse zu untermauern (absolute Unterschiede).

## 6.4.2 Versuchsbeschreibung und -stimuli

Der qualitative Hörversuch untersuchte mit einem AB-Vergleich die Klangeigenschaften der linearphasigen FIR- und der IIR-Filterung. Dazu hörten die einzelnen Probanden vier verschiedene Musikstücke (je ca.  $3\ min$ ), die sie durch vorgegebene Klangeigenschaften auf einer Bewertungsskala beurteilten. Im folgenden sind die zu bewertenden Musikstücke aufgelistet:

- The Persuasions Sometimes You Can't Make it On Your Own (Musikstück 1, Acapella)
- Beethoven Symphony #8 In F,
   Op. 93 (Musikstück 2, Klassik)
- Holly Cole I Can See Clearly Now (Musikstück 3, Soul/Jazz)
- Hope Abangoma (The Healers) (Musikstück 4, Jazz/Rock)
- Kraftwerk Aéro Dynamik (Musikstück 5, Elektro)

Mit dem Max-MSP-Patch konnten die Probanden den Stimulus während des Abspielens zwischen den Filter- bzw. Phasentypen pausenlos umschalten. Diesen konnten sie so lange wie nötig hören sowie vor- und zurückspulen. Die Abspielreihenfolge der Musikstücke wählte der *MAX MSP*-Patch zufällig, damit keine Abhängigkeit der Bewertung auf diese zurück zuführen ist. Genauso wurde die Filtertypzuordnung auf A oder B nach jedem Musikstück per Zufall entschieden, damit der Proband keine Entscheidungen auf Grund von Vorwissen (akustische Placeboeffekt), wie etwa der FIR- oder IIR-Filter klingen sollte, trifft.

Folgende Klangeigenschaften waren Bestandteile des Hörversuchs, die in der Tabelle A.1 im Anhang genau beschrieben sind. Die Klangeigenschaften sind dem Testmanual "Spatial Audio Quality Inventory (SAQI)" entnommen (Lindau et al., 2014).

- Klangfarbe
- Schärfe
- Rauigkeit
- Kammfilterartigkeit
- Tonhaltigkeit
- Lokalisierbarkeit
- Knackigkeit
- Dynamik

- Verzerrungen
- Klarheit
- Natürlichkeit
- Präsenz
- Gefallen
- Kompressoreffekte
- Externalisierungsgrad

Mit 15 Klangeigenschaften ist die Anzahl der unabhängigen Variablen sehr groß. Außerdem war im vornherein klar, dass viele Variablen kaum messbar sind. Nimmt man allerdings eine hohe Anzahl an unabhängigen Variablen in

die Messung auf, sinkt die Wahrscheinlichkeit, eine eventuell korrelierende Variable nicht zu messen.

Die Probanden mussten während des Hörens der Musikstücke in einem Fragebogen (auf einem Tablet) die oben genannten Klangeigenschaften des Lautsprecherpaars auf einer fünfstufigen Skala beurteilen (siehe Tabelle 6.2).

Nach dem Hören und Bewerten aller Musikstücke mussten die Probanden außerdem das Lautsprecherpaar "MP1 MK1" subjektiv bewerten. D.h. sie sollten anhand der fünf gehörten Musikstücke das Lautsprecherpaar im Vergleich zu schon einmal gehörten Lautsprechern, auf einer fünfstufigen Skala bewerten (siehe Tabelle 6.2).

FIR	FIR	FIR - IIR	IIR	IIR
stärker	wenig stärker	gleich	wenig stärker	stärker
MP1 MK2	MP1 MK2	MP1 MK2	MP1 MK2	MP1 MK2
schwach	weniger schwach	neutral	weniger stark	stark

TABELLE 6.2: Bewertungsskala des AB-Versuchs (Ausprägung): 1. Unterschied FIR-IIR (oben) 2. allgemeine Bewertung des Lautsprechers "MP1 MK2" (unten)

### 6.4.3 Ergebnisse

# 6.4.3.1 AB-Versuch "Relative Bewertung" zwischen linearer FIR- und nichtlinearer IIR-Phase

Die Tabelle 6.3 führt die Ergebnisse anhand einer deskriptiven Statistik auf und dies veranschaulichen die Histogramme 6.5, 6.6 und 6.7 grafisch. Dabei wurden verschiedene Gruppen für eine differenziertere Auswertung gebildet, die sich aus der Fehlerquote beim ABX-Test zusammensetzten. Dies sind die Gruppen "ABX" und "ABX 1 Fehler"¹. In der ersten Gruppe sind alle Teilnehmer, die die Unterschiede des ABX-Tests wahrgenommen haben und in der zweiten, die die ihn mit einem Fehler gehört haben. Die zweite Gruppen Aufteilung bezieht sich auf die Musikstücke. Hierbei fasst man alle Musikstücke ("alle"), die Musikstücke ohne Rhythmusinstrumente ("Musikstücke 1 und 2")² und die Musikstücke mit Rhythmusinstrumente ("Musikstücke 3, 4 und 5") zusammen.

<sup>&</sup>lt;sup>2</sup>Die Gruppe "ABX 1 Fehler" besteht zwar nur aus drei Testteilnehmer. Daher ist diese nicht wirklich repräsentativ. Allerdings sollte sie als richtungsweisende Gruppe nicht unbetrachtet bleiben, da man davon ausgehen kann, dass diese Testteilnehmer im AB-Test am genausten differenziert haben.

<sup>&</sup>lt;sup>2</sup>Bei Musikstück 2 "Beethoven - Symphony # 8 In F, Op 93" sind sowohl auch Rhythmusinstrumente vorhanden. Allerdings sind deren Transienten nicht sehr schnell und dies stehen

Die Histogramme mit und ohne Gruppenaufteilungen sowie die deskriptive Statistik zeigen auf, dass bei vielen Klangeigenschaften keine Unterschiede zu hören waren. Dies zeigt sich sehr klar, wenn der Mittelwert nah bei "3" (neutral) liegt und kaum streut. Dies ist bei den Klangeigenschaften "Rauigkeit", "Kammfilterartigkeit", "Externalisierungsgrad", "Dynamik", "Kompressoreffekte" und "Verzerrung" gegeben. Die unabhängigen Variablen "Klangfarbe", "Schärfe", "Knackigkeit", "Klarheit", "Natürlichkeit", "Präsenz" und "Gefallen" wurden sehr different bewertet. D.h. die Streuung ist groß und es ist keine Richtung der Eigenschaft erkennbar, aber auch nicht, dass sie neutral wären. Lediglich "Lokalisierbarkeit" und "Tonhaltigkeit" haben eine gleichverteilte bis breit verstreute Anordnung.

Einen Einstichproben-Hypothesentest (siehe Tabelle 6.4 und Abbildung 6.8) kann die Gültigkeit der Nullhypothese, dass kein Unterschied wahrnehmbar ist, be- oder widerlegen. Dieser sollte aber mit Vorsicht betrachtet werden, da die Bewertungsskala diskret und nicht kontinuierlich ist und somit die statistischen Berechnungen nicht unbedingt repräsentativ sind. Diese Tatsache verwischt sozusagen die Genauigkeit der Messungen. Auch der t-Test (Einstichproben Hypothesentest) weist die oben genannten Ergebnisse auf. So zeigt nur die Rauigkeit nach dieser Rechenart ein signifikanten Unterschied auf. (Kuckartz et al., 2013)

ë. ë	Klangfarbe	Schaerfe	Rauigkeit	Kammfilterartigkeit	Tonhaltigkeit	Lokalisierbarkeit	Externalisierur
Valid	55	55	55	54	55	55	
Missing	0	0	0	1	0	0	
Mean	3.091	3.109	3.164	3.056	2.927	3.073	3
Std. Deviation	0.8665	0.8750	0.5697	0.5961	0.8357	0.7163	0.0
Minimum	1.000	1.000	2.000	1.000	1.000	1.000	1
Maximum	5.000	5.000	4.000	4.000	5.000	4.000	4

ungsgrad	Knackigkeit	Dynamik	Kompressoreffekte	Verzerrung	Klarheit	Natuerlichkeit	Praesenz	Gefaller
55	55	55	55	53	55	54	54	55
0	0	0	0	2	0	1	1	0
3.000	3.018	3.000	2.945	2.962	3.000	2.963	2.963	2.945
0.6086	0.9717	0.6086	0.6212	0.4789	0.9623	0.9309	0.9104	1.026
1.000	1.000	1.000	2.000	2.000	1.000	1.000	1.000	1.000
4.000	5.000	4.000	4.000	4.000	5.000	5.000	5.000	5.000

TABELLE 6.3: Deskriptive Statistik der relativen Bewertung der Klangeigenschaften zwischen FIR-Phase und IIR-Phase (alle Probanden haben ABX gehört)

nicht sehr im Vordergrund (vor allem im Tieftonbereich). Des Weiteren sind bei dieser klassischen Aufnahme die einzelnen Musikinstrumente nicht durch Effekte, wie Kompressor oder EQ bearbeitet worden, wie es bei den anderen Pop- bzw. Rock-Aufnahmen gemacht wurde.

Samn		

						95% Confide	ence Interva
	t	df	р	Mean Difference	Cohen's d	Lower	Upper
Klangfarbe	0.778	54	0.440	0.091	0.105	2.857	3.325
Schaerfe	0.925	54	0.359	0.109	0.125	2.873	3.346
Rauigkeit	2.130	54	0.038	0.164	0.287	3.010	3.318
Kammfilterartigkeit	0.685	53	0.496	0.056	0.093	2.893	3.218
Tonhaltigkeit	-0.645	54	0.521	-0.073	-0.087	2.701	3.153
Lokalisierbarkeit	0.753	54	0.455	0.073	0.102	2.879	3.266
Externalisierungsgrad	0.000	54	1.000	0.000	0.000	2.835	3.165
Knackigkeit	0.139	54	0.890	0.018	0.019	2.756	3.281
Dynamik	0.000	54	1.000	0.000	0.000	2.835	3.165
Kompressoreffekte	-0.651	54	0.518	-0.055	-0.088	2.778	3.113
Verzerrung	-0.574	52	0.569	-0.038	-0.079	2.830	3.094
Klarheit	0.000	54	1.000	0.000	0.000	2.740	3.260
Natuerlichkeit	-0.292	53	0.771	-0.037	-0.040	2.709	3.217
Praesenz	-0.299	53	0.766	-0.037	-0.041	2.714	3.211
Gefallen	-0.394	54	0.695	-0.055	-0.053	2.668	3.223

Note. Student's T-Test.

Note. All tests, hypothesis is population mean is different from 3.

TABELLE 6.4: Hypothesentest (Einstichproben-t-Test auf 3) der relativen Bewertung der Klangeigenschaften zwischen FIR-Phase und IIR-Phase (alle Probanden ABX gehört)

#### 6.4.3.2 AB-Versuch "Absolute Bewertung"

In folgenden Tabellen und Histogrammen sind die Ergebnisse der allgemeinen Bewertung aufgeführt. Die Histogramme 6.9 beinhalten die einzelnen Klangeigenschaften mit der Häufigkeit der aufgetretenen Antworten (Ausprägung). Dabei fanden auch die gleichen Gruppen wie im vorigen Abschnitt Anwendung und wurden noch um die Gruppe "Alle" erweitert, die alle 16 Versuchsteilnehmer einschließt. Allerdings wird nicht im Detail auf die Ergebnisse aus den Gruppenbildungen eingegangen. Des Weiteren hat einer der Teilnehmer im Fragebogen die absolute Bewertung nicht ausgefüllt.

In den Tabellen sind außerdem die allgemeine deskriptive Statistik (siehe Tabelle 6.5) und ein Einstichproben-t-Test (auf 3) (siehe Tabelle 6.6) zur Überprüfung der Nullhypothese  $H_0$  und deren deskriptiven Diagramme (siehe Abbildung 6.10) aufgeführt. Die Nullhypothese  $H_0$  zeigt bei diesen Messungen, dass der Lautsprecher einen durchschnittlichen Klang hat. (Kuckartz et al., 2013)

Hierbei gab es im Gegensatz zur Bewertung der Klangunterschiede zwischen linearer FIR-Phase und IIR-Phase sehr eindeutige Ergebnisse. So lässt sich aus den Diagrammen des Einstichproben-t-Tests 6.10 lesen, dass die Streuungen der Antworten bei fast allen Eigenschaften nicht sehr hoch sind. Des Weiteren wurde bei allen Eigenschaften außer dem "Externalisierungsgrad", der "Tonhaltigkeit" und der "Schärfe" die Nullhypothese  $H_0$  signifikant aufgehoben. Wobei die letzteren zwei sich nur knapp nicht signifikant unterscheiden.

Auch zeigen die Ergebnisse, dass die Probanden den Lautsprecher in allen Katigorien besser als ihre "innere" Referenz bewertet haben. So sticht vor allem heraus, dass sie den Lautsprecher als sehr knackig, klar und verzerrungsarm eingeordnet haben.

*	Gefallen	Klangfarbe	Schärfe	Rauigkeit	Kammfilterartigkeit	Tonhaltigkeit	Lokalisierbarkeit
Valid	17	17	17	17	17	17	17
Missing	1	1	1	1	1	1	1
Mean	4.118	3.471	3.412	2.353	2.176	3.235	3.588
Median	4.000	3.000	3.000	2.000	2.000	3.000	4.000
Std. Deviation	0.6002	0.5145	0.9393	0.8618	0.8090	0.5623	1.004
Minimum	3.000	3.000	2.000	1.000	1.000	2.000	1.000
Maximum	5.000	4.000	5.000	4.000	3.000	4.000	5.000

Externalisierungsgrad	Knackigkeit	Dynamik	Kompressoreffekte	Verzerrung	Klarheit	Natürlichkeit	Präsenz
17	17	17	17	17	17	17	17
1	1	1	1	1	1	1	1
3.059	3.882	3.647	2.647	2.176	3.941	3.647	3.941
3.000	4.000	3.000	3.000	2.000	4.000	4.000	4.000
0.7475	0.6002	0.7859	0.4926	0.8090	0.4287	0.6063	0.8993
2.000	2.000	3.000	2.000	1.000	3.000	3.000	2.000
5.000	5.000	5.000	3.000	3.000	5.000	5.000	5.000

TABELLE 6.5: Deskriptive Statistik der absoluten Bewertung der Klangeigenschaften aller Probanden

_	_		_	
One	Samp	le T-	Test	•

						95% Confide	ence Interva
	t	df	р	Mean Difference	Cohen's d	Lower	Upper
Gefallen	7.677	16	< .001	1.118	1.862	3.809	4.426
Klangfarbe	3.771	16	0.002	0.471	0.915	3.206	3.735
Schärfe	1.807	16	0.090	0.412	0.438	2.929	3.895
Rauigkeit	-3.096	16	0.007	-0.647	-0.751	1.910	2.796
Kammfilterartigkeit	-4.197	16	< .001	-0.824	-1.018	1.761	2.592
Tonhaltigkeit	1.725	16	0.104	0.235	0.418	2.946	3.524
Lokalisierbarkeit	2.416	16	0.028	0.588	0.586	3.072	4.104
Externalisierungsgrad	0.324	16	0.750	0.059	0.079	2.674	3.443
Knackigkeit	6.061	16	< .001	0.882	1.470	3.574	4.191
Dynamik	3.395	16	0.004	0.647	0.823	3.243	4.051
Kompressoreffekte	-2.954	16	0.009	-0.353	-0.716	2.394	2.900
Verzerrung	-4.197	16	< .001	-0.824	-1.018	1.761	2.592
Klarheit	9.051	16	< .001	0.941	2.195	3.721	4.162
Natürlichkeit	4.400	16	< .001	0.647	1.067	3.335	3.959
Präsenz	4.315	16	< .001	0.941	1.047	3.479	4.404

Note. Student's T-Test.

Note. All tests, hypothesis is population mean is different from 3.

TABELLE 6.6: Hypothesentest (Einstichproben-t-Test auf 3) der absoluten Bewertung der Klangeigenschaften aller Probanden

## 6.5 Fragebogen Auswertung

Nach der Durchführung der Hörversuche und der Bewertung der Klangeigenschaften des Lautsprechers, mussten die Probanden noch einen Fragebogen zu ihrer Person und zum Ablauf der Hörversuche beantworten. Ein Auszug der Antworten wurde unteranderem schon im Abschnitt 6.2.3 "Hörversuchsteilnehmer" aufgeführt. Weitere Fragen waren die Schwierigkeit der einzelnen Hörversuche und die Selbsteinschätzung, die Unterschiede (siehe Abbildung 6.11) gehört zu haben. Ferner haben die meisten Probanden die Versuche als schwierig empfunden und der Versuch hat meist auch länger als 45 Minuten gedauert, was das Gehör sehr ermüdete. Die Mehrzahl der Probanden gab an, Unterschiede im ABX-Test gehört zu haben, jedoch beim AB-Hörversuch weniger bis gar keine. Darüber hinaus haben 11 von 15 Probanden angegeben, dass sie beim ABX-Test den Unterschied im Nachklang der Bassdrum erkannt haben. Was leicht auf die nicht konstante Tieftonwiedergabe im Bassbereich der IIR-Phase zurückzuführen ist, bei der tiefe Frequenzen bis zu 20 ms verzögert abgespielt werden. Einige gaben aber auch an den Unterschied in der Snaredrum gehört zu haben, was auch plausibel wäre, da diese auch im unteren Tiefmitteltonbereich präsent ist.

## 6.6 Diskussion der Hörversuchsauswertung

Der durchgeführte Hörversuch hat grundlegend gezeigt, dass der Unterschied zwischen einer linearen FIR und IIR-Phase mittels ABX-Test signifikant von den meisten Probanden hörbar ist. Was man wiederum nicht so eindeutig messen konnte, ist, ob es wahrnehmbare Einflüsse auf die Klangeigenschaften des Lautsprechers gibt, die der AB-Test untersuchte. Jedoch zeigen die Ergebnisse aller Musikstücke auch nicht, dass es keine hörbaren Unterschiede gab. So ist die Antwortverteilung bei Klangeigenschaften wie der "Knackigkeit" oder vielleicht auch der "Präsenz", die keinen eindeutigen Mittelwert besitzten, recht verstreut. Die meisten Probanden antworteten bei den Musikstücken 3, 4 und 5, dass sie bei der "Knackigkeit" einen Unterschied hören konnten und die "ABX 1 Fehler" Gruppe belegt dies noch deutlicher. Allerdings waren die Antworten zueinander entgegengesetzt, d.h. FIR-Phase bzw. IIR-Phase knackiger. Dass die lineare Phase bzw. die nichtlinear Phase die "Knackigkeit"des Lautsprechers verändert, ist in erster Linie plausibel. Als welches Klangverhalten der Rezipient dieses wahrnimmt ist nicht ganz klar. So kann ein länger anhaltender

tieffrequenter Ton durch die unterschiedlichen Verzögerungen niedriger Frequenzen der IIR-Phase ein Musikstück, das im Bass eher nicht so "fett" produziert wurde, knackiger klingen lassen. Umgekehrt kann aber ein im Bassbereich zu stark komprimiertes Stück durch die lineare Phase knackiger klingen. Auch bei der "Schärfe", "Klangfarbe", "Klarheit" und "Präsenz" sind gleichlautende Antworten feststellbar und man kann ähnlich Analogien ziehen. Dieser Zusammenhang könnte daher in zukünftigen Arbeiten, die sich mit diesem Thema genauer beschäftigen, untersucht werden.

Die Ergebnisse der Bewertung der allgemeinen Klangeigenschaften des Lautsprechers "MP 1 MK2" spiegeln zweifellos die gemessenen technischen Parameter wider. Dies zeigt z.B., dass der Lautsprecher nicht nur auf dem "Blatt" verzerrungsarm ist, sondern die Rezipienten nahmen diesen auch als weniger rau und unverzerrt wahr. Durch die geschlossene Bauform des Lautsprechers gibt dieser den Tieftonbereich im Gegensatz zu ventilierten Gehäusen sehr dynamisch und zeitkonstant wieder. Dies bestätigten auch die Probanden und bewerteten den Lautsprecher als präzise, knackig und dynamisch. Im Ganzen wirkte das Lautsprecherpaar im Hörtest positiv auf die Testteilnehmer, was sich aus der Verteilung "Gefallen" sehr gut projizieren lässt.

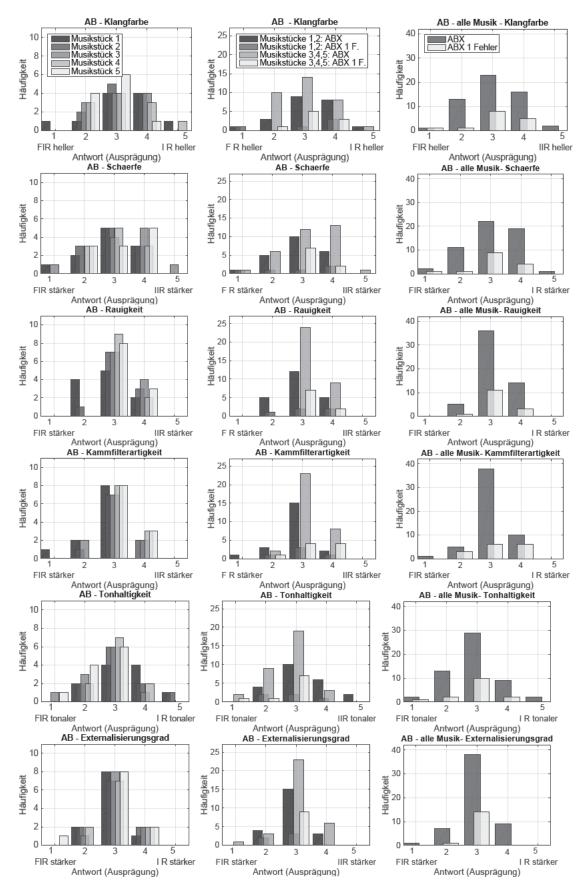


ABBILDUNG 6.5: AB Hörversuch - Klangunterschiede zwischen FIR und IIR (verdeckt)

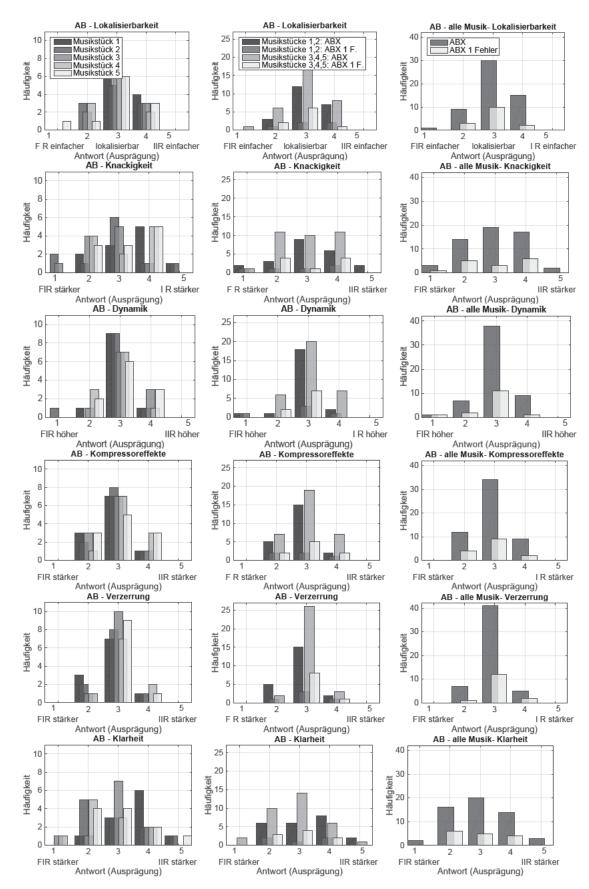


ABBILDUNG 6.6: AB Hörversuch - Klangunterschiede zwischen FIR und IIR (verdeckt)

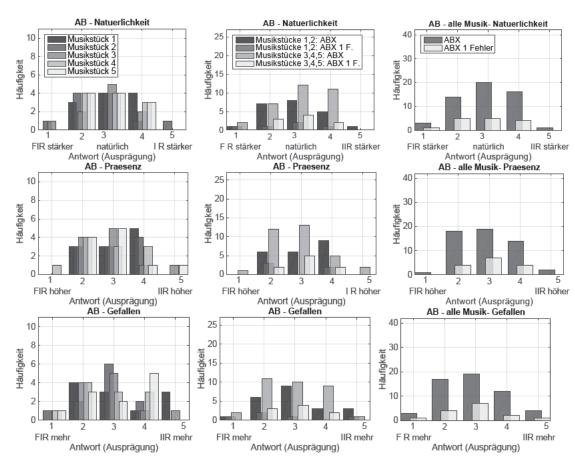


ABBILDUNG 6.7: AB Hörversuch - Klangunterschiede zwischen FIR und IIR (verdeckt)

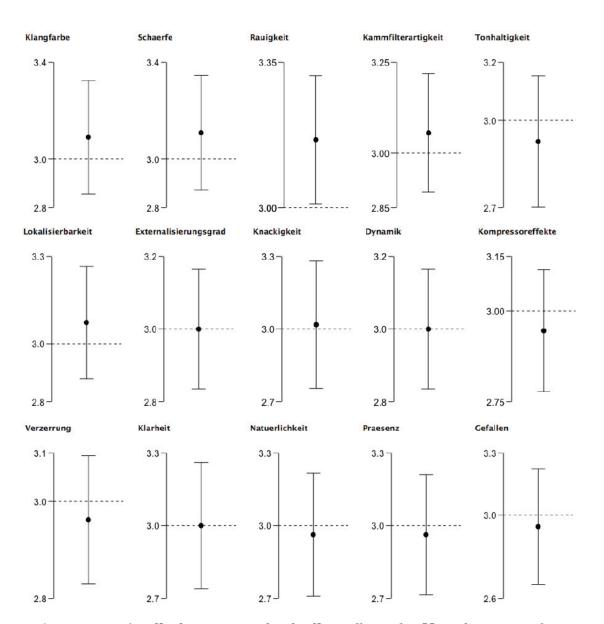


ABBILDUNG 6.8: Deskriptive graphische Darstellung des Hypothesentests der relativen Bewertung der Klangeigenschaften zwischen FIR-Phase und IIR-Phase (alle Probanden ABX gehört)

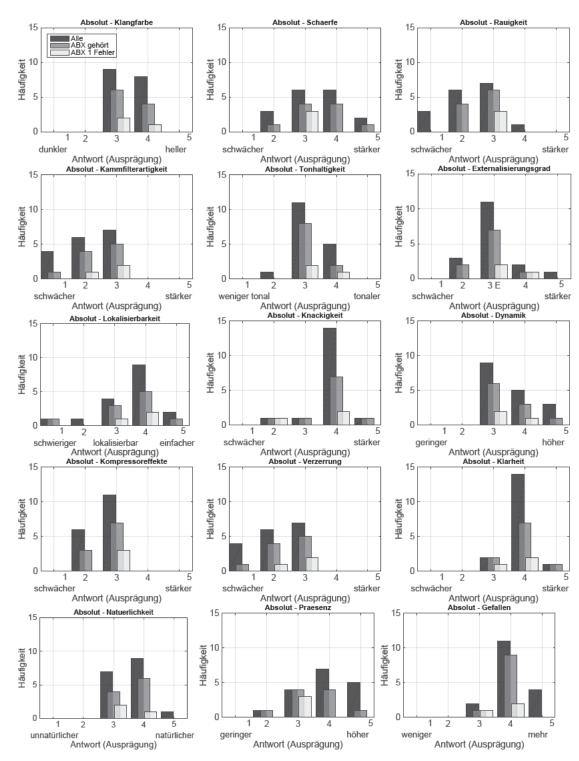


ABBILDUNG 6.9: Histogramme der absoluten Bewertung der Klangeigenschaften der Probanden (nach dem AB-Hörversuch)

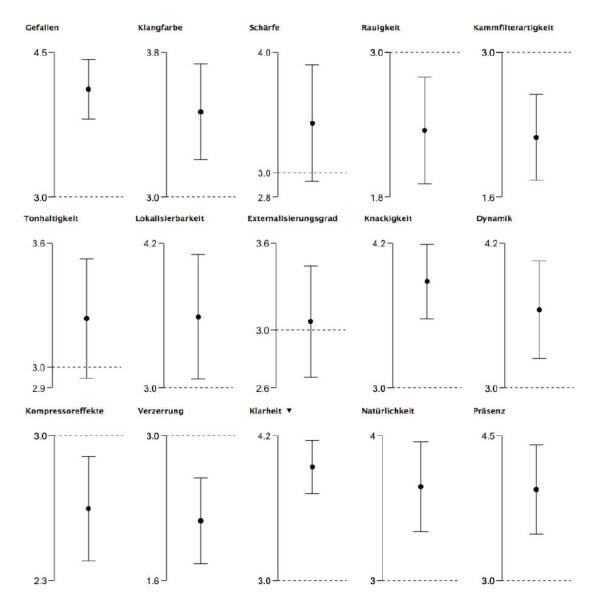


ABBILDUNG 6.10: Deskriptive graphische Darstellung des Hypothesentests der absoluten Bewertung der Klangeigenschaften aller Probanden

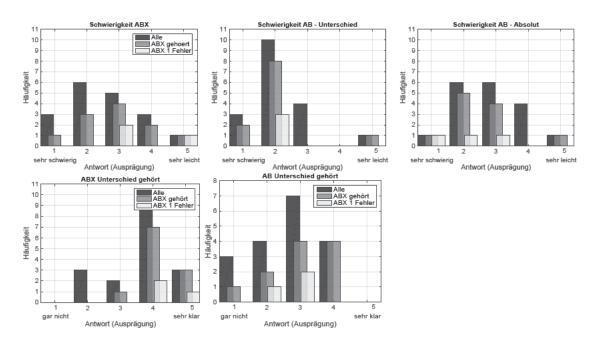


ABBILDUNG 6.11: Erfahrungsparameter der Probanden

## Kapitel 7

## **Fazit**

Zusammenfassen stellt man nach den Messungen der einzelnen Lautsprecherkomponenten (Kapitel 4), der anschießenden Erstellung der unterschiedlichen Frequenzweichen (Kapitel 5) und den durchgeführten Hörversuchen (Kapitel 6) fest, dass die Entwicklung eines referenzwürdigen Lautsprechers gelungen ist. Er weist geringe Verzerrungswerte auf, hat einen optimalen flachen Frequenzgang und gibt Signale sehr präzise wieder. Des Weiteren beweisen die Hörversuche, dass der Unterschied zwischen linearer und nichtlinearer Phase auch mit Lautsprechern in einem nichtschalltoten Raum¹wahrnehmbar ist und dass der Phasengang eines Lautsprechers weitestgehend seine Klangeigenschaften beeinflusst.

Der Lautsprecher "MP1 MK2" hat ab 70 Hz immer Verzerrungswerte der dritten Harmonischen unter 0,32 % (bei  $90_{dB_SPL}$  @ 1 m). Dieser sehr niedrige Klirrfaktor macht den Lautsprecher sehr detailtreu und die Probanden bestätigten in den Hörversuchen die akustisch gemessenen Werte, indem sie diesen im Vergleich zu anderen Lautsprechern als wenig verzerrend einstuften.

Durch den ABX-Test haben 18 von 22 Probanden den Unterschied zwischen einer IIR- und FIR-Phase signifikant herausgehört und der AB-Test ergab, dass durchaus Klangunterschiede zwischen den beiden Phasen rezipierbar sind. Diese Klangunterschiede konnten die Probanden jedoch nicht wirklich genau zuordnen, da diese oft nur Nuancen sind und nur in sehr kurzen Zeitpunkten in den Stimuli hörbar sind. Es fehlt daher leider der Nachweis, welche genauen Auswirkungen die zwei Filtertechniken auf die einzelnen Klangcharakteristiken haben. Diese könnten allerdings Thema weiterer Untersuchungen sein, bei denen besser geschulte Hörprobanden die Unterschiede detaillierter feststellen könnten.

Die Frage, ob sich die Linearisierung des Phasengangs durch eine FIR-Filterung

<sup>&</sup>lt;sup>1</sup>Schalltoter Raum entspricht einem reflexionsarmen Raum.

Kapitel 7. Fazit 76

rentiert, kann nach der die Lautsprecherentwicklung und den Hörtests mit einem "Jein" beantwortet werden. So zeigte zwar der AB-Hörversuch, dass es Klangunterschiede gibt, allerdings wurden diese nur unter aufwendigen Bedingungen, wie schnellem Schalten der Stimuli und einer guten Raumakustik, nachgewiesen. So beeinflusst ein Lautsprecher mit einer linearisierten Phase durch FIR-Filterung das Ergebnis einer Musikproduktion nur kaum. Allerdings sollte der Lautsprecher als letztes Glied der Audiosystemkette und Schnittstelle zwischen Mensch und Maschine so detailgetreu wie möglich arbeiten. Es ist zu empfehlen den Vorteil der FIR-Phase in Betracht zu beziehen soweit hohe Latenzen für bestimmte Anwendungsbereiche z.B. "Musik hören" oder Mastering akzeptabel sind.

# Anhang A

# Anhang

#### 1. Versuch: AB-X Test

Bei dem AB-X Test hören Sie drei Stimuli A, B und X (A, B unterschiedlich, X entspricht A oder B) auf den von uns entwickelten Lautsprechern. X wird zufällig gewählt und entspricht entweder A oder B. Sie müssen entscheiden, ob A oder B X entspricht.

Diesen Test müssen Sie mehrmalig wiederholen, um die Ratewahrscheinlichkeit stark zu minimieren.

#### 2. Versuch: AB Test

#### Teil 1: Klangunterschiede (relativ)

Bei diesem Test werden Ihnen zwei verschiedene Stimuli A und B (zufällig) vorgespielt und Sie müssen deren Klangeigenschaften zueinander (relativ) vergleichen. Hierzu notieren Sie die Unterschiede auf der fünfstufigen Skala. Dieser Test wird mit fünf verschiedenen Musikstücken durchgeführt.

Skala:

A stärker ausgeprägt		gleich		B stärker ausgeprägt
3	2	3	4	5

#### Teil 2: Allgemeine Klangeigenschaften (absolut)

Nachdem der AB-Test vollständig beendet ist, sollen Sie nun die Klangeigenschaften des Lautsprechers im allgemeinen bewerten. Hierbei werden die gleichen Klangeigenschaften wie bei dem AB-Test abgefragt, jedoch sollen diese nicht in einem direkten Vergleich der beiden Stimuli zu einander getroffen werden, sondern Sie sollen nach eigenem Ermessen die Klangeigenschaften im Allgemeinen bewerten. D h. wie würden Sie die Klangeigenschaften dieser Lautsprecher bewerten im Bezug zu Lautsprechern, die Sie schon einmal gehört haben.

ABBILDUNG A.1: Hörversuchsbeschreibung

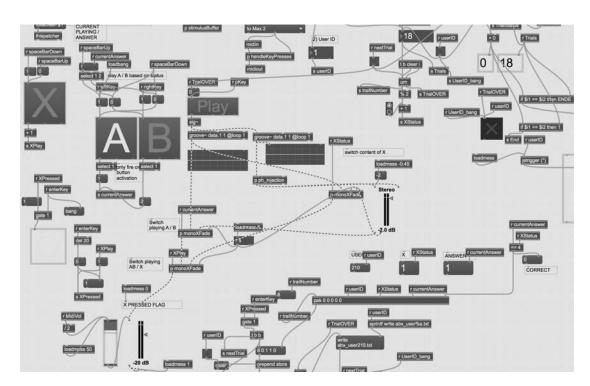


ABBILDUNG A.2: Max Patch - AB-X Test

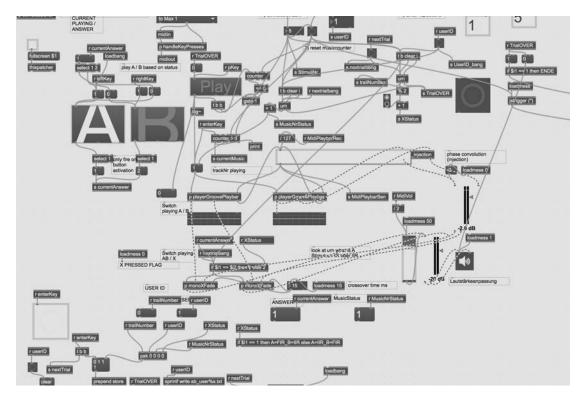


ABBILDUNG A.3: Max Patch - AB Hörversuch

79

Klangeigenschaft	Präzisierende Ergänzung	Skalenpole
Klangfarbe	Klangeindruck der durch das Verhältnis hoher zu tiefer Frequenzanteile bestimmt wird.	dunkler - heller
Schärfe	Klangeindruck der z.B. auf den Kraftaufwand schließen lässt, mit dem ein Klangquelle angeregt wird. Bsp: Hart/weich angeschlagene Perkussionsin- strumente, hart/weich gezupfte Saiteninstrumente (klass. Gitarre, Harfe). Eine Überbetonung hoher Frequenzen kann einen 'scharfen' Klangein- druck fördern.	schwächer ausgeprägt - stärker ausgeprägt
Rauigkeit	Klangeindruck heftiger oder aggressiver Modulation/Vibration, wobei Einzelschwingungen kaum mehr unterscheidbar sind. Oft als unange- nehm bewertet.	schwächer ausgeprägt - stärker ausgeprägt
Kammfilterartigkeit	Oft tonal wirkende Klangverfärbung. 'Hohler' Klang. Beispiel: Sprechen durch ein Rohr.	schwächer ausgeprägt - stärker ausgeprägt
Tonhaltigkeit	Wahrnehmbarkeit einer Tonhöhe in einem Klang. Beispiele tonhaltiger Signale: Stimmhafte Sprachanteile, Pieptöne.	weniger tonal - tonaler
Lokalisierbarkeit	Bei geringer L. sind räumliche Ausdehnung und Ort einer Schallquelle schlecht abschätzbar bzw. erscheinen diffus. Bei hoher L. erscheint eine Schallquelle dagegen klar umgrenzt. Geringe L./große L. gehen oft mit großer bzw. geringer wahrgenommener Ausdehnung einer Schallquelle einher. Beispiele: Schallquellen in stark diffusen Schallfeldern sind schlecht lokalisierbar.	schwieriger lokalisierbar - einfacher lokalisierbar
Knackigkeit	Eigenschaft, die durch die Impulstreue von Systemen beeinflusst wird. Wahrnehmung des Verlaufs von Einschwingvorgängen, können im Ver- gleich weicher/verschliffener/weniger präzise, aber auch umgekehrt schneller/präziser/exakter sein. Beispiel für 'verschliffenere' Transienten: Ein Übertragungssystem, das starke Gruppenlaufzeitverzerrungen ein- fügt. Gegenbeispiel: Ergebnis einer auf Linearphasigkeit abzielenden Phasenentzerrung.	schwächer ausgeprägt - stärker ausgeprägt
Dynamik	Größe der Lautheitsunterschiede zwischen lauten und leisen Passagen. Bei Signalen geringerer Dynamik unterscheiden sich laute und leise Passagen weniger von der durchschnittlichen Lautheit. Dagegen enthal- ten Signale mit hoher Dynamik sowohl sehr laute als auch sehr leise Passagen.	geringer - höher

Verzerrungen	Perzept infolge von nichtlinearen Verzerrungen, wie sie z.B. durch Über- steuerungen entstehen. "Kratziger" oder 'kaputter' Sound. Oft von Sig- nalamplitude abhängig. Kann seine Qualität je nach Art der Übersteue- rung stark ändern. Beispiel: Clipping bei Übersteuerung von digitalen Eingangsstufen.	schwächer ausgeprägt - stärker ausgeprägt
Klarheit	Klarheit/Deutlichkeit beliebiger Szeneninhalte. Eindruck davon, wie klar Szeneninhalte voneinander unterschieden, wie gut verschiedenste Eigen- schaften einzelner Szeneninhalte erkannt werden können. Der Begriff ist also weiter gefasst, als der in der Raumakustik durch das Klarheitsmaß prädizierte Eindruck einer mit steigender Nachhallenergie sinkenden Transparenz.	schwächer ausgeprägt - stärker ausgeprägt
Natürlichkeit	Eindruck, dass ein Signal der Erwartung/Erfahrung an ein solches Signal entspricht.	unnatürlicher - natürlicher
Präsenz	In-der-Szene-Sein' im Sinne räumlicher Präsenz. Eindruck in einer präsen- tierten Szene vor Ort, in die Szene räumlich integriert zu sein.	geringer - höher
Gefallen	Unterschied bzgl. Angenehmheit/Unangenehmheit.	gefällt weniger - gefällt mehr

Tabelle A.1: Genaue Beschreibung der Klangeigenschaften des qualitativen Hörversuchs

## Literaturverzeichnis

- ADAM-Audio (2016): X-ART. URL http://www.adam-audio.com/de/technology/x-art. Zugriff 2016-07-23.
- Audio, ADAM (2016): X-ART-Treiber. URL http://www.adam-audio.com/de/technology/x-art-driver. Zugriff 2016-07-23.
- D'Appolito, Joseph A. (1983): "A Geometric Approach to Eliminating Lobing Error in Multiway Loudspeakers." In: *Audio Engineering Society Convention* 74.
- Dickason, Vance (1996): Lautsprecherbau. Elektro-Verlag, Aachen.
- Four-Audio (2016a): Betrachtung der Rechenleistung, Länge der Impulsantworten und Frequenzauflösung der FIR-Filter im HD2.

  URL http://www.fouraudio.com/de/hintergrund/betrachtung-der-rechenleistung-laenge-der-impulsantworten-und-frequenzaufloesung-der-fir-filter-im-hd2.html. Zugriff 2016-08-26.
- Four-Audio (2016b): *Inside the HD2*. URL http://www.fouraudio.com/de/hintergrund/inside-the-hd2.html. Zugriff 2016-08-26.
- Four-Audio (2016c): Lautsprecher Management System HD2. URL http://www.fouraudio.com/de/produkte/hd2.html. Zugriff 2016-08-26.
- Heil, Oskar (1972): "Acoustic transducer with a diaphragm forming a plurality of adjacent narrow air spaces open only at one side with the open sides of adjacent air spaces alternatingly facing in opposite directions." US Patent 3,636,278.
- Heinz, Klaus (1999): "Air Motion Transformer Principle Loudspeaker Drives." In: *Audio Engineering Society Convention* 106.
- Keele, D. B. (Don), Jr. (2001): "Development of Test Signals for the EIA-426-B Loudspeaker Power Rating Compact Disk." In: *Audio Engineering Society Convention* 111.

- Kuckartz, U.; S. Rädiker; T. Ebert und J. Schehl (2013): *Statistik: Eine verständliche Einführung*. VS Verlag für Sozialwissenschaften.
- Lerch, R.; G.M. Sessler und D. Wolf (2009): *Technische Akustik: Grundlagen und Anwendungen*. Springer.
- Leventhal, Les (1986): "Type 1 and Type 2 Errors in the Statistical Analysis of Listening Tests." In: *J. Audio Eng. Soc*, 34(6) S. 437–453.
- Lindau, Alexander et al. (2014): "A Spatial Audio Quality Inventory for Virtual Acoustic Environments (SAQI)." In: *Acta Acustic u. w. Acustica*.
- Möser, Michael (2009): *Messtechnik der Akustik*. Springer-Verlag Berlin Heidelberg.
- Müller, Swen (1999): *Digitale Signalverarbeitung für Lautsprecher*. Ph.D. thesis, Technischen Hochschule Aachen.
- Toole, F.E. (2008): Sound Reproduction: Loudspeakers and Rooms. Focal Press. Elsevier.
- Weinzierl, Stefan (2008): *Handbuch der Audiotechnik*. Springer-Verlag Berlin Heidelberg.