

Hochschule der Medien Stuttgart

Fakultät: Electronic Media

Studiengang: Audiovisuelle Medien

Objektive und subjektive Verbesserungen der Abhörsituation durch ein Analyse- und Korrektursystem

Bachelorarbeit

Vorgelegt von

Oliver Jan Kirschig

Matrikel Nr.: 25759

Eingereicht am

29. März 2016

Erstprüfer: Prof. Oliver Curdt

Zweitprüfer: Prof. Jens-Helge Hergesell

Eidesstattliche Versicherung

Hiermit versichere ich, Oliver Jan Kirschig, an Eides statt, dass ich die vorliegende Bachelorarbeit mit dem Titel „Objektive und subjektive Verbesserungen der Abhörsituation durch Analyse- und Korrektursysteme“ selbständig und ohne fremde Hilfe verfasst und keine anderen als die angegebenen Hilfsmittel benutzt habe. Die Stellen der Arbeit, die dem Wortlaut oder dem Sinn nach anderen Werken entnommen wurden, sind in jedem Fall unter Angabe der Quelle kenntlich gemacht. Die Arbeit ist noch nicht veröffentlicht oder in anderer Form als Prüfungsleistung vorgelegt worden.

Ich habe die Bedeutung der eidesstattlichen Versicherung und die prüfungsrechtlichen Folgen (§26 Abs. 2 Bachelor-SPO (6 Semester), § 23 Abs. 2 Bachelor-SPO (7 Semester) bzw. § 19 Abs. 2 Master-SPO der HdM sowie die strafrechtlichen Folgen (gem. § 156 StGB) einer unrichtigen oder unvollständigen eidesstattlichen Versicherung zur Kenntnis genommen.

Stuttgart, den 29. März 2016

A handwritten signature in black ink, reading "Oliver Jan Kirschig", written over a horizontal line.

Zusammenfassung

Ein digitales Raumkorrektursystem wird hinsichtlich seiner Funktionalität zur subjektiven wie objektiven Optimierung des Schallfeldes an einem definierten Abhörpunkt auf Studioniveau untersucht. Insbesondere wird dabei eine tonale Ausgewogenheit sowie eine zeitrichtige Studioakustik angestrebt. Des Weiteren werden Ursachen und Gründe untersucht, welche für eine digitale Raumkorrektur sprechen. Die Messungen finden dabei in unterschiedlichen Regien statt und werden durch Hörversuche und eine Kunstkopfaufnahme zur subjektiven Nachvollziehbarkeit dokumentiert. Die Messergebnisse werden mit den Resultaten des Hörversuchs verglichen, um Aussagen über die Möglichkeiten sowie die Relevanz und Akzeptanz einer automatischen Raumkorrektur zu gewinnen.

Abstract

This paper evaluates the functionality of a digital room correction system concerning the subjective and objective optimization of the acoustic field in a defined listening place in a studio. The aim is both to improve the sound quality to an optimized studio quality, no matter the recording circumstances, and accomplish tonal balance and right timing in terms of the acoustics of the studio during the process of recording. Furthermore, causes and reasons for the use of room correction are analyzed. All measurements are executed in different settings and all results of the experiment of listening by ear and the dummy head recordings are documented for subjective comprehensibility. The measurement results are then compared with the results of the listening experiment. By this, the paper aims to find qualitative statements about the possibilities and the relevance and acceptance of an automatically generated room correction.

Inhaltsverzeichnis

Abbildungsverzeichnis.....	III
Tabellenverzeichnis.....	V
Abkürzungsverzeichnis	VI
1. Einleitung – „Die Wahrheit“	7
1.1 Aufbau der Arbeit	7
2. Grundbegriffe der Raumakustik	9
2.1 Entstehung und Fortbewegung des Schalls	9
2.1.1 Schalldruck und Pegel	10
2.1.2 Schallschnelle	10
2.1.3 Ebene und Kugelwelle	11
2.2 Schallausbreitung im Raum	11
2.2.1 Beugung	11
2.2.2 Absorption	12
2.2.3 Reflektion	12
2.3 Das Schallfeld	15
2.3.1 Direktschall	16
2.3.2 Diffusschall	16
2.3.3 Zeitlicher Verlauf des Schallfeldes	17
3. Psychoakustik	19
3.1 Wahrnehmbarkeitsschwellen und Auswirkungen	19
3.1.1 Pegelunterschiede	19
3.1.2 Frequenzunterschiede	21
3.1.3 Phasenunterschiede	22
4. Regieraum-Akustik	25
4.1 Objektive Qualitätskriterien der Lautsprecherwiedergabe für Abhörräume	25
4.1.1 Anforderungen an das Bezugs-Schallfeld	26
4.1.2 Anforderungen an Regielautsprecher	28
4.1.3 Lautsprecheraufstellung	31
5. Elektronische Raumentzerrung	33
5.1 Signalverarbeitung	33
5.1.1 IIR-Filter	33
5.1.2 FIR-Filter	34
5.2 Trinnov Audio	34
5.2.1 Trinnov MC Optimizer	35

5.3	Möglichkeiten der Raum- und Lautsprecherentzerrung	36
5.3.1	Time-Alignment und Frequenzweichensteuerung	36
5.3.2	Korrektur des frequenzabhängigen Raum-/Lautsprecherverhaltens	37
5.3.3	Korrektur des zeitabhängigen Raum-/Lautsprecherverhaltens	43
5.3.4	Korrektur der Lautsprecherposition	44
6.	Praxis	45
6.1	Messungsaufbau	45
6.2	Testräume	45
6.2.1	HdM Stuttgart, A Regie	45
6.2.2	HdM Stuttgart, B Regie	46
6.2.3	HdM Stuttgart, Hardcut	47
6.2.4	Homestudio	49
6.3	Hörversuch der entzerrten Abhörsituation	50
6.3.1	Teststrategie	50
6.3.2	Qualitätsparameter	51
6.3.3	Testtitel	51
6.3.4	Kunstkopfaufnahmen	52
7.	Ergebnisse	54
7.1	Korrektureinstellungen	54
7.2	Analyse- und Korrekturergebnisse	55
7.2.1	HdM Stuttgart, A Regie, Messung- und Korrekturergebnisse	56
7.2.2	HdM Stuttgart, B Regie, Messung- und Korrekturergebnisse	62
7.2.3	HdM Stuttgart, Hardcut, Messung- und Korrekturergebnisse	64
7.2.4	Homestudio, Messung- und Korrekturergebnisse	69
7.3	Ergebnisse der Umfrage	71
7.3.1	Akustisches Gleichgewicht	71
7.3.2	Durchsichtigkeit	72
7.3.3	Stereofoner Eindruck	72
7.3.4	Störgeräusche	73
7.3.5	Raumeindruck	74
7.3.6	Akustischer Gesamteindruck	74
8.	Fazit	75
8.1	Zusammenfassung	75
8.2	Ausblick	77
	Anhang	LXXIX
	Literaturverzeichnis	LXXXI
	Expertengespräche als adaptierte Interviews:	LXXXIV

Abbildungsverzeichnis

Abb. 1 Kammfilter für drei unterschiedliche Absorptionsgrade der reflektierenden Fläche. Die Frequenz ist auf die Frequenz der ersten Auslöschung normiert.	13
Abb. 2 Zeitliche Folge der Reflektionen in einem Raum bei Impulsschall.....	18
Abb. 3 Kritische Frequenzbänder	20
Abb. 4 Kleinster wahrnehmbarer Pegelunterschied eines 1-kHz-Tones	21
Abb. 5 Wahrnehmbarkeitsschwelle der Frequenzänderung	21
Abb. 6 Reflexionen an der Ohrmuschel bestimmen die Richtungslokalisierung	23
Abb. 7 Lokalisationsverschiebungen durch Laufzeitunterschiede	24
Abb. 8 Haas-Bereich	24
Abb. 9 Toleranzfeld für die Betriebsschallpegelkurve	27
Abb. 10 Toleranzfeld der Nachhallzeit im Studio	28
Abb. 11 Geithein RL 901K, Frequenzgang	29
Abb. 12: HdM Stuttgart, A Regie, Amplitude	29
Abb. 13 Ausschwingverhalten einer optimierten Lautsprechermembran gegenüber einer Raumresonanz.....	30
Abb. 14 Directivity eines kleinen 2-Wege Studio-Monitors in der Horizontalebene.....	31
Abb. 15 Reference loudspeaker arrangement with loudspeakers L/C/R and LS/RS.....	32
Abb. 16 Blockschaltbild eines IIR-Filters	33
Abb. 17 Blockschaltbild eines FIR Filters	34
Abb. 18 Signalfluss des RCS	35
Abb. 19 3D-Messmikrophon	36
Abb. 20 Active crossover.....	37
Abb. 21 Frequenzgang einer Hörposition.....	38
Abb. 22 Wasserfalldiagramm von 20 Hz bis 300 Hz für die Messung an einer Hörposition, ohne Optimierung	39
Abb. 23 Wasserfalldiagramm von 20 Hz bis 300 Hz für die Messung an einer Hörposition, ohne Optimierung	39
Abb. 24 Schröder-Plot der Energiekurven zwischen 40 Hz und 200 Hz.....	40
Abb. 25 Analysemethode für die Abbildung der Lokalisationsschärfe einer Phantomschallquelle, identische Ohrsignale.....	41
Abb. 26 Auswertung zur Lokalisationsschärfe, ohne Optimierung.....	41
Abb. 27 Auswertung zur Lokalisationsschärfe, mit Optimierung	42
Abb. 28 Impulsantwort eines 2-Wege-Lautsprechers mit (blau) und ohne (rot) Laufzeitkorrektur	43
Abb. 29 Signalbearbeitung.....	44
Abb. 30 HdM A Regie, Lautsprecheranordnung und Grundriss	46
Abb. 31 Speaker Information, HdM A Regie	46
Abb. 32 HdM B Regie, Lautsprecheranordnung und Grundriss	47
Abb. 33 Speaker Information, B Regie.....	47

Abb. 34 HardCut 360°	48
Abb. 35 Toleranzschlauch der Nachhallzeit für ein 1700m ³ Kino. RT(500Hz) = 0,5s	48
Abb. 36 HdM HardCut, Lautsprecheranordnung und Grundriss	49
Abb. 37 Speaker Information, Hardcut	49
Abb. 38 Homestudio, Lautsprecheranordnung und Grundriss	50
Abb. 39 Speaker Information, Homestudio	50
Abb. 40 Einstellungen der elektronischen Korrektur	54
Abb. 41 Amplitude, Hardcut, Center, 1/3, 1/6, 1/32 Octave Glättung	55
Abb. 42 Amplitude, HdM A Regie, LR	56
Abb. 43 Amplitude, HdM A Regie, Korrektur um ±10dB	57
Abb. 44 Amplitude, HdM A Regie, ±20dB	58
Abb. 45 Amplitude, HdM A Regie, 30 cm höher	59
Abb. 46 Phase, HdM A Regie, ohne Sub	60
Abb. 47 Gruppenlaufzeit, HdM A Regie, ohne Sub	61
Abb. 48 Impuls, HdM A Regie	62
Abb. 49 Amplitude, HdM B Regie, ±8 dB	63
Abb. 50 Amplitude, HdM B Regie, LR	63
Abb. 51 Amplitude, HdM HardCut	64
Abb. 52 Phase, HdM HardCut, LR und Center	65
Abb. 53 Phase, HdM HardCut, LSRS	66
Abb. 54 Gruppenlaufzeit, HdM HardCut, LR und Center	66
Abb. 55 Gruppenlaufzeit, HdM HardCut, LSRS	67
Abb. 56 Impuls, HdM Hardcut, ohne Sub	68
Abb. 57 Latenz Informationen, Hardcut	68
Abb. 58 Amplitude, Homestudio	69
Abb. 59 Phase, Homestudio	70
Abb. 60 Gruppenlaufzeit, Homestudio	70
Abb. 61 Impuls, Homestudio	71
Abb. 62 Umfrage, subjektive Qualitätsparameter der Akustik	LXXX

Tabellenverzeichnis

Tab. 1 Zusammenhang zwischen psychologischen und physikalischen Größen	19
Tab. 2 Akustisches Gleichgewicht.....	72
Tab. 3 Stereofoner Eindruck	73
Tab. 4 Störgeräusche.....	73
Tab. 5 Raumeindruck.....	74
Tab. 6 Akustischer Gesamteindruck	74

Abkürzungsverzeichnis

AP	Abhörpunkt
DAW	Digital Audio Workstation
Mic	Mikrofon
LS	Lautsprecher
RCS	Raumkorrektursystem
Vpn	Versuchsperson
Pos	Position
IIR	Infinite Impulse Response
Hi-Fi	High Fidelity
FIR	Finite Impulse Response
LR	Linker und rechter Lautsprecher
LS RS	Linker und rechter Surround-Lautsprecher
C	Center Lautsprecher
Sub	Subwoofer
Oct	Oktave
EDT	Early Decay Time

1. Einleitung – „Die Wahrheit“

Die professionelle Audiotechnik war von jeher mit dem Anspruch einer hohen Wiedergabequalität verbunden. Das schließt für die kritische Beurteilung der Audiosignale ein, im Tonstudio die philosophisch angepriesene, unverfälschte „Wahrheit“ abzuhören. Diese zeichnet sich vor allem dadurch aus, dass sich das akustische Ereignis, welches man hört, mit dem wiedergegebenen Signal deckt. Die auditive Kontrolle über Tonmischungen und Aufzeichnungen, sowie die Bewertung der Tonqualität kann nur unter dieser Voraussetzung voll gewährleistet werden. Ist diese gegeben, besteht die größte Chance, dass sich eine Klangvision über das Studio hinaus in andere Räume übersetzt. Für eine neutrale Schallübertragung spielt neben den technischen Voraussetzungen die letzte Instanz des Abhörsystems eine große Rolle: der Raum.

Letztendlich setzt sich die Qualität des Abhörsystems im Wesentlichen aus der Wechselwirkung der Lautsprecher und des beschallten Raumes zusammen. Der Raum als Filter betrachtet, reißt unter Umständen dramatische Verzerrungen in das Klangbild. Die Problematik kann durch eine Anpassung der Raumakustik an die Gegebenheit entschärft werden. Jedoch findet diese meist aus Kosten-, Platz- und Zeitgründen verhältnismäßig geringe Beachtung.

Durch den Fortschritt der digitalen Signalverarbeitung ist seit wenigen Jahren eine Schallfeldanalyse und Entzerrung auf Frequenz- und Zeitebene möglich. So bietet beispielsweise seit 2005 die Firma *TRINNOV Audio* mit ihrem „MC Prozessor“ eine hardwarebasierte elektronische Lösung neben dem konservativen Ansatz an. Dieses soll es möglich machen, ein Abhörsystem auf tonaler und zeitlicher Ebene zu korrigieren. Darüber hinaus soll es möglich sein, frühe Reflektionen zu kompensieren und Lautsprecher per Knopfdruck auf eine virtuelle Position zu verschieben. Internationale Dokumente dienen dabei als Referenz.

In vorliegender Arbeit werden die Ursachen und Gründe untersucht, welche für eine elektronische Raumkorrektur sprechen und inwiefern die Abhörsituation objektiv sowie subjektiv verbessert werden kann. Anhand der objektiven Messungen und des subjektiven Hörversuchs sollen allgemeine Aussagen über die Relevanz und Akzeptanz der elektronischen Raumkorrektur getroffen werden.

1.1 Aufbau der Arbeit

Zunächst sollen die Grundbegriffe der Raumakustik beschrieben werden, aus deren Zusammenspiel sich das Schallfeld mit seinen Eigenschaften bildet. Anschließend wird anhand der Psychoakustik auf die Auswirkungen der objektiven Defizite für die subjektive Empfindung eingegangen. In Kapitel 4 sollen objektive Qualitätskriterien einer Regieraum-

Akustik dargelegt werden, wie sie in internationalen Dokumenten festgehalten sind. Die Anforderungen werden dabei direkt an das Bezugsschallfeld gestellt und indirekt an die Eigenschaften der Regielautsprecher. Kapitel 5 behandelt die Grundlagen der digitalen Signalverarbeitung. Die Möglichkeiten der Schallfeldkorrektur beziehen sich dabei ausschließlich auf das verwendete Raumkorrektursystem. Damit soll der Forschungsbereich auf diese eingegrenzt werden. Soweit sich in die Funktionsweise der Algorithmen Einblick erhalten lässt, sollen erste Grenzen der elektronischen Raumkorrektur festgehalten werden. Die Praxis leitet objektive und subjektive Messungsversuche ein, indem die Gegebenheiten der Räume und die Vorgehensweise bei den Versuchen geschildert werden. Bei der Vorstellung der exemplarischen Ergebnisse sollen in Kapitel 7 bereits erhaltene Erkenntnisse in die Interpretation und Bewertung der Korrekturvorgänge miteinbezogen werden. Im Fazit soll eine Zusammenfassung der gewonnenen Erkenntnisse über die Möglichkeiten und Grenzen der elektronischen Raumkorrektur abgegeben werden. Zuletzt soll die Arbeit kritisch beleuchtet und auf weitere Forschungsmöglichkeiten eingegangen werden.

2. Grundbegriffe der Raumakustik

Um die Phänomene vom Schall im Raum und die damit verbundenen Problematiken der Raumakustik zu verstehen, ist es zunächst erforderlich, sich mit einigen Grundbegriffen der Akustik bekannt zu machen.

2.1 Entstehung und Fortbewegung des Schalls

Bringt eine Schallquelle (z.B. Membran) ihr umliegendes Medium (z.B. Luft) durch Expansion und Kompression zum Schwingen, werden dabei Luftteilchen um ihre Ruhelage hin und her bewegt, was wiederum benachbarte Luftteilchen anstößt. Wenn Luftteilchen aus ihrer Ruhelage gedrängt werden, entsteht eine Luftdruckveränderung. Der Bewegungsimpuls überträgt sich auf benachbarte Luftteilchen bis eine Schallwelle entsteht.

Die Schallgeschwindigkeit (c_0) mit der sich eine Schallwelle vom Erregerpunkt ausbreitet, ist temperaturabhängig und beträgt in der Luft bei 20°C 343,32 m/s oder gerundet:

$$c_0 = 343 \text{ m/s} \quad (2.1)$$

Per Definition ist eine Schwingung ein periodisch wiederkehrender Verlauf des Schalldrucks. Dabei wird die Periodendauer einer Schwingung (T) in Sekunden angegeben. Diese wird aus dem Kehrwert der Frequenz (f) errechnet, welche beschreibt, wie viele Wiederholungen in einer Sekunde stattfinden:

$$T = \frac{1}{f} \quad (2.2)$$

T : Periodendauer einer Schwingung [s]

f : Frequenz einer Schwingung, wird in Hertz angegeben [Hz]

Die Wellenlänge Lambda (λ) beschreibt die Länge einer Schwingung bis zu ihrer Wiederholung und wird in Meter angegeben. Der Zusammenhang aus Periodendauer, Frequenz und Schallgeschwindigkeit ist in folgender Formel zusammengefasst:

$$\lambda = c * T = \frac{c}{f} \quad (2.3)$$

λ : Wellenlänge [m]

c : Schallgeschwindigkeit: 343 m/s

Für den Menschen hör- bzw. wahrnehmbar ist ein Frequenzbereich von 20Hz – 20kHz. Die Wellenlängen erstrecken sich dabei ungefähr von 1,7cm bis 17m.¹

2.1.1 Schalldruck und Pegel

Hörbar wird die Schallwelle durch die Luftdruckveränderung zum normalen Luftdruck. Dieser variiert innerhalb einer Schwingung, d.h. es gibt Stellen mit Überdruck, Unterdruck und an denen keine Druckveränderung zum Normalluftdruck vorhanden ist. Jedoch gibt man in der Praxis nicht den momentanen, sondern den Effektivwert in Pascal [Pa] an. Dieser verändert sich dabei periodisch mit der Frequenz. Die Luftdruckveränderung von 0,00002 Pa bei 2 kHz zum Normalluftdruck von 101300 Pa entspricht ungefähr dem kleinsten wahrnehmbaren Schalldruck.² Um die physikalischen Einheiten besser auf unsere Hörwahrnehmung anwenden zu können, wurde die Pseudoeinheit Dezibel (dB) herangezogen. Da wir Sinnesreizverhältnisse wie Verdopplung oder Halbierung als konstant empfinden, wird dabei das Verhältnis zweier Reize logarithmiert. Das verwendete Maß der Schallstärke ist der Schalldruckpegel (engl. sound pressure level, SPL) und wird mit folgender Formel berechnet:

$$L_p = 20 \log \frac{p}{p_0} \quad (2.4)$$

L_p : Schalldruckpegel

p_0 : kleinster wahrnehmbarer Schalldruck: $2 \cdot 10^{-5}$ Pa

Schalldruck kann mit gegenphasigem Schalldruck abgeschwächt, oder gar ausgelöscht werden. Gegenphasig heißt, dass eine zweite Schallquelle an einem Punkt einen Überdruck erzeugt, wo von einer anderen ein Unterdruck erzeugt wird.

Die subjektiv empfundene Lautstärke weicht u.U. von diesem Pegel ab (3.1).

2.1.2 Schallschnelle

Der Über- und Unterdruck zwingt die Luftteilchen sich vom Über- in den Unterdruck zu bewegen. Diese Bewegung nennt man Schallschnelle. Wie beim Schalldruck wird hier nicht der Momentan-, sondern der Effektivwert in m/s angegeben.³ Die Schallschnelle direkt an einer schallharten Wand beträgt 0 m/s, da die Luftmoleküle nicht ausweichen können. Im letzten Viertel der Wellenlänge finden wir dadurch ein Schalldruckmaximum durch den

¹ Vgl. Görne, 2015 S. 27ff.

² Vgl. Dickreiter, 2013 S. 13

³ Vgl. Friesecke, 2007, S. 15f.

entstehenden Druckstau vor. Dieser kann an der Wand einen Pegelanstieg von 6 dB, in den Raumecken 12dB und in den Raumwinkeln bis zu 18dB betragen.⁴

2.1.3 Ebene und Kugelwelle

Die Idealvorstellung einer eindimensionalen, perfekt gerichteten Welle nennt man ebene Welle, deren Intensität unabhängig von der Entfernung gleich ist. Weitaus geläufiger ist die Kugelwelle, welche aus einer Punktschallquelle ungerichtete Schallenergie abstrahlt. Dabei muss sich die Schallenergie mit zunehmendem Abstand auf immer größere Kugelschalen verteilen, was die Schallenergie verringert. Bei doppeltem Abstand verringert sich die Schallintensität auf ein Viertel des ursprünglichen Wertes. Da die Schallintensität proportional zum Quadrat des Schalldrucks ist, fällt diese auf den halben Wert. Das entspricht einer Pegelabnahme von 6 dB bei doppelter Entfernung.

In der Realität geben die meisten Schallstrahler weder perfekte ebene Wellen, noch Kugelwellen ab. Dabei gilt: ist die Wellenlänge groß gegenüber den Abmessungen des Strahlers, betrachtet man diesen als Kugelschallquelle. Andernfalls wird von einer ebenen Welle ausgegangen.⁵

2.2 Schallausbreitung im Raum

Eine sich ausbreitende Schallwelle ist im Raum einigen Effekten unterworfen. Ihre Auswirkungen sind dabei von der Frequenz abhängig. Diese haben wiederum entscheidende Auswirkungen auf die Raumakustik.

2.2.1 Beugung

Ist die Wellenlänge einer Sinusschwingung größer als ein Hindernis, so wird dieses von der Schallwelle übergangen, als ob es nicht da wäre. Ist sie jedoch kleiner, entsteht hinter der „Schallwand“ (welche das Hindernis darstellt) ein „Schallschatten“. In diesem „Schallschatten“ sollten nur noch die Frequenzen hörbar sein, deren Wellenlängen länger sind als die Größe des Hindernisses. In der Praxis sind das meist tieffrequente Anteile, die eigentlich nicht mehr zu hören sein sollten. Das liegt daran, dass nur mittig auf das Hindernis treffende Schallwellen vollständig abgeschirmt werden. Erst ein Hindernis, das fünfmal so groß ist wie die Wellenlänge lang ist, wirft einen deutlichen Schallschatten. Dazu fangen die Schallwellen an, sich an den Rändern um das Hindernis herum zu beugen. An diesen Stellen entsteht eine Art neue Schallquelle.⁶

Ein Beispiel dafür ist der Beugungseffekt bei Lautsprecherboxen. Geht man hier von einer kleinen Box mit den Maßen 20x40 cm aus, fangen die Schallwellen, die länger als 20 cm

⁴ Vgl. Görne, 2015, S. 43

⁵ Vgl. Görne, 2015, S. 35ff.

⁶ Vgl. Dickreiter, 2013, S. 21

sind (1720Hz) an, sich um die Box herum zu beugen. In diesem Fall würde die Box über 1720 Hz halbkugelförmig und unterhalb von 860Hz (40cm) kugelförmig abstrahlen. Durch die Veränderung des Abstrahlverhaltens verändert sich je nach Frequenz der Diffusfeldanteil des Lautsprechers. Dabei regt der Lautsprecher den Raum unter 860Hz stärker an als über 1720Hz. Dazwischen ist der Übergang fließend.⁷

2.2.2 Absorption

Bei Objekten, die Schallwellen durch Resonanzen oder Reibungsverluste schwächen, spricht man von Absorption. Ein Teil der Schallenergie wird hierbei durch Dissipation (Energieumwandlung in Wärme), Transmission (Durchlassung durch eine Trennfläche) und Absorption (Verlust der Schallenergie durch Reibung) „absorbiert“. Fast alle Objekte haben ein frequenzabhängiges Absorptionsverhalten, weswegen meist der Absorptionsgrad Alpha (α) für bestimmte Frequenzbereiche angegeben wird. Dabei steht der Wert 0 für keine, eine 1 für vollständige Absorption. Der Wert 0,5 bedeutet, dass die Schallenergie zu 50% absorbiert wird, und 50% Restenergie übrig bleibt.⁸

2.2.3 Reflektion

Trifft ein Schallstrahl auf die Fläche eines Hindernisses, so wird er im selben Winkel reflektiert in dem er auf der Fläche aufgetroffen ist. Dieser wird aber nur voll reflektiert, wenn die Abmessung des Hindernisses mindestens der zu reflektierenden Wellenlänge entspricht. Andernfalls wird sie größtenteils um das Hindernis herum gebeugt. Eine Reflektion kann folgende Auswirkungen haben:

2.2.3.1 Interferenzen

Sobald sich zwei Schallwellen aus 2 Schallquellen überlagern, wird der Schalldruck je nach Phasenlage addiert oder ausgelöscht. Das gilt auch für eine reflektierte Schallwelle, welche von der reflektierten Stelle aus als neue Schallquelle betrachtet werden kann. Wenn die Schallwellen sich phasengleich (bei 360°, 720°, 1080°...) überlagern, wird der Schalldruckverlauf beider Schallwellen addiert. An dieser Stelle wird das summierte Signal zweier Signale um bis zu 6 dB lauter. Dagegen löschen sie sich aus, wenn sie gegenphasig (180°, 540°, 900° ...) aufeinandertreffen. Das Signal kann dabei gegen minus unendlich dB reduziert werden.

Durch gleichen Abstand zu allen Lautsprechern kann man Auslöschungen gleicher Signale, welche von den Lautsprechern selbst erzeugt werden, entgegen.

⁷ Vgl. Friesecke, 2007, S. 31f.

⁸ Vgl. Fasold & Veres, 2003, S65f.

2.2.3.2 Kammfilter

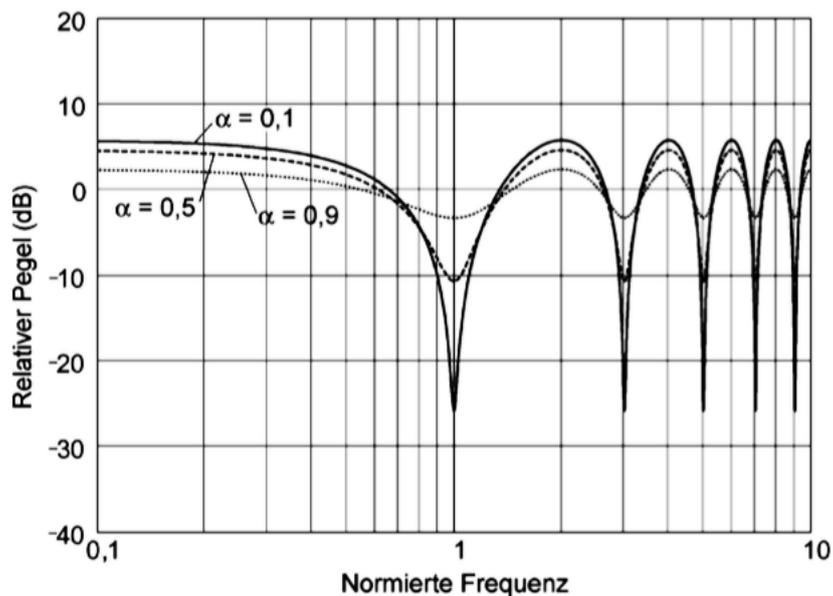
Komplexer wird es bei Interferenzen durch Reflektionen. Wenn sich an einem Punkt im Raum zwei hinreichend ähnliche Schallwellen überlagern, kommt es in Abhängigkeit der Phasenlage zur konstruktiven oder destruktiven Interferenz. Der Phasenunterschied zwischen Direktsignal und Reflektion hängt von der Frequenz und dem Zeitunterschied Δt der beiden Signale ab und berechnet sich mit der Formel:

$$\varphi = \Delta t * f * 360^\circ \quad (2.5)$$

mit:

φ : Phasenwinkel zwischen den Signalen in Grad

Abb. 1 Kammfilter für drei unterschiedliche Absorptionsgrade der reflektierenden Fläche. Die Frequenz ist auf die Frequenz der ersten Auslöschung normiert.



Quelle: [Weinzierl, 2008, S. 283]

Die Stärke des Kammfilters hängt vom Schalldruck der zweiten Schallquelle ab. Schon ab einem Schalldruck von 20 dB unter der vorausgehenden Welle wird dieser hörbar sein.⁹

Die Auslöschungen und Anhebungen setzen sich dabei durch die frequenzabhängige Phasenlage regelmäßig in der Übertragungsfunktion fort. Der Verlauf des charakteristischen Frequenzganges (Abb. 1) wird aufgrund seiner Form als Kammfilter bezeichnet.¹⁰

⁹ Vgl. Weinzierl, 2008, S. 283

¹⁰ Vgl. Friesecke, 2007, S 31ff.

2.2.3.3 Stehende Wellen

Wird eine Schallwelle zwischen zwei gegenüberliegenden schallharten Wänden so reflektiert, dass sich immer gleiche Wellenverläufe der hin- und rücklaufenden Schallwellen phasengleich überlagern, entstehen „Stehende Wellen“ (auch Moden genannt). Die Laufzeit entspricht dabei dem doppelten Wandabstand geteilt durch die Schallgeschwindigkeit c_0 . Kehrwert der Periodendauer ist die Frequenz. Daraus ergibt sich die Formel zur Berechnung der tiefsten Raummode. Diese erlaubt es, die Eigenfrequenzen, an denen eine Auslöschung oder Anhebung zwischen zwei Wänden stattfindet, zu berechnen:

$$f_n = \frac{N * c_0}{2 * d} \quad (2.6)$$

f_n : Frequenzen der Auslöschungen/Anhebungen [Hz]

N : Auslöschung bei ungerader Zahl [1,3,5,...]; Anhebung bei gerader Zahl [(0),2,4,...]

d : Umwegstrecke zwischen zwei Signalen [m]

Weitere Moden entstehen bei Vielfachen dieser Frequenz.

In einem dreidimensionalen, quaderförmigen Raum werden die 6 Flächen zum $\lambda/2$ -Resonator, dessen Resonanzen sich in dreizehn Richtungen ausbreiten können.

- **Axial** zwischen zwei gegenüberliegenden Wänden (drei Richtungen),
- **tangential** zwischen zwei gegenüberliegenden Raumkanten (sechs Richtungen) und
- **diagonal** zwischen gegenüberliegenden Raumecken (vier Richtungen).

Diese können durch die folgende Formel berechnet werden:

$$f_{n_x/n_y/n_z} = \frac{c_0}{2} * \sqrt{\left(\frac{n_x}{l_x}\right)^2 + \left(\frac{n_y}{l_y}\right)^2 + \left(\frac{n_z}{l_z}\right)^2} \quad (2.7)$$

n_x, n_y, n_z : Ordnung der Mode in den jeweiligen Richtungen

l_x, l_y, l_z : Abmessungen in Länge, Breite und Höhe des Raumes [m]

Da sich stehende Wellen zwischen den sechs Begrenzungsflächen im rechteckigen Raum (inkl. der Raumecken) addieren können, gilt es ganzzahlige Vielfache der Raumabmessungen zu vermeiden. Ziel ist ein möglichst gleichmäßiges Auftreten der Moden. Dadurch werden sie nur noch als Teil des Nachhalls wahrgenommen, anstatt als Dröhnen im Bassbereich, Flatterecho in den Höhen oder Pegel einbrüche. Überhöhungen

durch Raummoden werden subjektiv nicht nur über die tonale Verzerrung wahrgenommen, sondern auch durch ein längeres und ungleichmäßiges Ausschwingverhalten des Raumes.¹¹ Sollten sich baubedingt problematische Moden nicht vermeiden lassen, gilt es diese raumakustisch in ihrem Druckmaximum zu bekämpfen.¹²

Je höher die Moden im Frequenzspektrum liegen, desto dichter treten sie nebeneinander auf. Dadurch verlieren sie an Bedeutung, da sie durch Störwirkungen und andere raumakustische Effekte überdeckt werden. Die Grenze des diffus- zum resonanzdominierten Bereich tiefer Frequenzen lässt sich anhand der Schröder-Frequenz benennen. Sie berechnet sich aus der Formel:

$$f_s = 2000 \sqrt{\frac{T_{60}}{V}} \quad (2.8)$$

f_s : Schröder-Frequenz

T_{60} : Nachhallzeit in [s]

V : Raumvolumen in [m³]

Mit zunehmendem Raumvolumen nimmt die Eigenfrequenzdichte zu. Damit wird die Übertragungsfunktion ausgeglichener, während sich die Raummoden zunehmend zu den tiefen Frequenzen hin verschieben. Sobald sie sich unterhalb der Hörgrenze befinden, verlieren sie an Bedeutung.

Studios sind aufgrund ihrer kleinen Abmessungen gegenüber der Wellenlänge tiefer Frequenzen besonders (im Gegensatz zu Kinos oder Konzertsälen) betroffen.¹³ Groß sind dagegen Räume, bei denen mindestens eine der Abmessungen größer ist als die längste Wellenlänge der abgestrahlten Frequenz.¹⁴

2.3 Das Schallfeld

Die Summe des direkt abgestrahlten Schalls und des reflektierten Schalls ergibt das Schallfeld im Raum. Da mit zunehmender Entfernung die Schallenergie des direkt abgestrahlten Schalls immer kleiner wird, gibt es nur einen begrenzten Bereich, in dem der Direktschall gegenüber dem so genannten Diffusschall überwiegt (2.1.3). Ein Schallfeld ohne Diffusschallanteil nennt man Freifeld.

¹¹ Vgl. Goossens & Gutmann, 2008, S. 7

¹² Vgl. Friesecke, 2007, S. 52ff.

¹³ Trikustik GesmbH, kein Datum

¹⁴ Vgl. Görne, 2015, S. 80

2.3.1 Direktschall

Signale innerhalb des Direktfeldes klingen trocken, d.h. ohne oder mit wenig Diffusschallanteil. In der Praxis wird die Ausdehnung des Direktfeldes außer von der Größe des Raumes auch von den richtenden Eigenschaften der Schallquelle beeinflusst.

Die Schallübertragung vom Sender zum Empfänger kann stets als Filterung betrachtet werden. Dabei gelten für jeden Punkt im Raum andere Filterkurven. In kleinen Räumen äußert sich dies als kammfilterartiger Frequenzgang im Bassbereich. Hin zu hohen Frequenzen wird dieser zunehmend linear.

2.3.2 Diffusschall

Den Anteil des Schallfeldes, der durch Reflektionen im Raum entsteht, nennt man Diffusschall. Je unregelmäßiger die Raumgeometrie und Oberflächenbeschaffenheit des Raumes ist, desto besser werden Frequenzen diffus im Raum gestreut. Man kann sagen, dass ein Raum mit starkem Diffusfeldanteil angenehmer klingt als ein rechteckiger Raum mit glatten Wänden. Dieser ist jedoch stark vom Frequenzgang des Raumes geprägt, welcher den Direktschall mit Eigenresonanzen überlagert und durch frequenzabhängige Absorption verzerrt (4.1.2.4). Da das gesamte Schallfeld letztendlich in Diffusschall übergeht, spielt dessen Nachhallzeit eine entscheidende Rolle für die Akustik.¹⁵

2.3.2.1 Nachhall und Hallradius

Unter der Nachhallzeit (T) versteht man das Zeitintervall, innerhalb dessen der Schalldruck nach plötzlichem Verstummen der Schallquelle auf den tausendsten Teil seines ursprünglichen Wertes abgeklungen ist. Dies entspricht einer Pegelabnahme von 60 dB und wird mit dem Wert RT60 (Reverb Time 60) in Sekunden angegeben. Da diese stark vom bestehenden Störpegel abhängig ist, stimmt die sog. Anfangsnachhallzeit (Early Decay Time, EDT), für einen Bereich der Pegelabnahmen um -10 dB mit der subjektiv empfundenen Nachhalldauer besser überein. Dies gilt insbesondere für kleine Lautstärken und bei laufenden Programmen.

Im Wesentlichen ist die Nachhallzeit vom Raumvolumen V (in m^3), den schallabsorbierenden Eigenschaften des Raums und der Frequenz abhängig. Üblicherweise wird sie als Einzelwert für die Mittenfrequenz eines Terzfilters mit der Frequenz von 500 Hz oder 1 kHz angegeben. Computergestützte Nachhallzeitmessungen werden meist aus der Steigung der rückwärtsintegrierten und logarithmierten Raumimpulsantwort (sog. Schroeder-Plot, Schroeder 1965) ermittelt.¹⁶

¹⁵ Vgl. Friesecke, 2007, S. 86ff.

¹⁶ Vgl. Weinzierl, 2008, S. 188f.

Ein RCS ist nicht in der Lage, den Nachhall eines Raumes direkt zu bearbeiten. Jedoch kann davon ausgegangen werden, dass durch eine Veränderung der Betriebsschallpegelkurve der frequenzabhängige Nachhall verändert wird.

Der sogenannte Hallradius gibt die Entfernung zur Schallquelle in Meter an, an welcher der Pegel des Direktschalls dem des Diffusschalls gleicht. Hier im Direktfeld ist der Einfluss des Raumes im Vergleich zum Diffusschall gering, weshalb der AP innerhalb dieses Hallradius anzusiedeln ist. Für ungerichtete Schallquellen lässt sich der Hallradius eines Raumes mit folgender Formel berechnen:

$$r_H = \sqrt{\frac{A}{16\pi}} \approx 0,057 * \sqrt{\frac{V}{T}} \quad (2.9)$$

r_H : Hallradius in [m]

A : Gesamt Absorptionsfläche

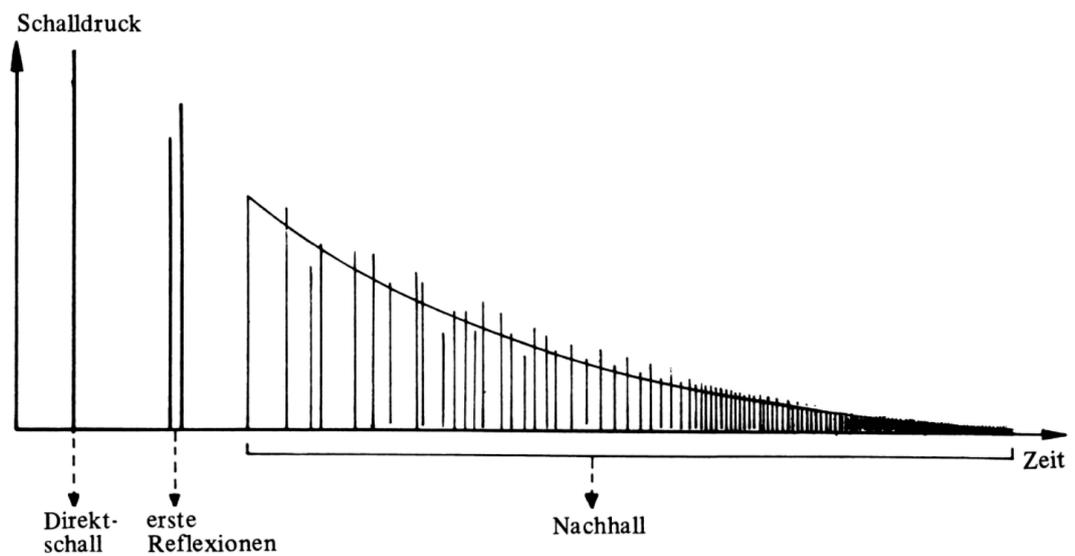
V : Raumvolumen [m³]

T : Nachhallzeit

2.3.3 Zeitlicher Verlauf des Schallfeldes

Wesentlich für den Raumklang ist besonders der zeitliche Verlauf von Direkt- und Diffusschall. Der Direktschall trifft zwangsläufig als erste Schallwelle beim Hörer ein. Dieser ist bislang von den akustischen Raumeigenschaften unberührt. Dem Direktschall folgen die ersten Reflektionen, welche von den umliegenden Raumbegrenzungsflächen und Gegenständen reflektiert werden. Deren Eigenschaften sind für das Hörereignis von großer Bedeutung. Mit einer Verzögerung setzt mit zunehmender Folge der Reflektionen der sich bildende Nachhall ein.

Abb. 2 Zeitliche Folge der Reflexionen in einem Raum bei Impulsschall



Quelle: [Dickreiter, 2013, S. 30]

Das diffuse Schallfeld baut sich um so schneller auf, je kleiner der Raum ist und je häufiger der Schall darin pro cm reflektiert wird. Wobei dies nur für Flächen gilt, deren Abmessungen kleiner als die Wellenlänge der entsprechenden Frequenz sind.¹⁷

Wie störend Reflektionen und frühe Reflexionen auf den Hörer wirken, lässt sich durch die Psychoakustik beschreiben. Die wird im nächsten Kapitel näher betrachtet.

¹⁷ Vgl. Dickreiter, 2013, S. 29f.

3. Psychoakustik

3.1 Wahrnehmbarkeitsschwellen und Auswirkungen

Die subjektive Empfindung eines Schallereignisses ist von psychologischen und physikalischen Größen abhängig. Darum lässt sich eine „gute“ Raumakustik nur bedingt aus objektiv messbaren Schallfeldgrößen bestimmen.

Tab. 1 Zusammenhang zwischen psychologischen und physikalischen Größen

<i>Empfindung</i>	<i>Hängt ab von</i>	<i>Aber auch von</i>
<i>Lautstärke</i>	Pegel	Frequenz, Spektrum, Zeitverlauf...
<i>Tonhöhe</i>	Frequenz	Spektrum, Pegel, Zeitverlauf...
<i>Klangfarbe</i>	Spektrum	Zeitverlauf, Frequenz, Pegel...

Quelle: [Görne, 2008, S. 336]

Da das Ohr des Nutzers letztendlich der Maßstab der Wiedergabequalität ist, wird bei der Interpretation der Messergebnisse die untere Wahrnehmbarkeitsschwelle akustischer Ereignisse berücksichtigt. Damit soll untersucht werden, ob und wie weit in der Praxis eine Korrektur für den Nutzer relevant ist.

3.1.1 Pegelunterschiede

Pegelunterschiede können sich auf die Lokalisation auswirken. Das von der Schallquelle abgewandte Ohr wird vom Kopf abgeschattet und bekommt weniger Pegel als das zugewandte Ohr. Wobei sich unter 300 Hz der Schall um den Kopf herum beugt und demnach kaum noch Pegelunterschiede zwischen linken und rechtem Ohr festzustellen sind.¹⁸

Die geringste wahrnehmbare Pegeldifferenz ist in der Regel bei amplitudenmodulierten Tönen ab 1 dB wahrnehmbar. Das gilt für Töne innerhalb eines kritischen Frequenzbandes, zwischen denen eine Pause stattfindet.

Das menschliche Hörsystem fasst zur Bestimmung der subjektiv empfundenen Lautstärke alle Schalleistungen innerhalb eines Frequenzbandes mit allen Frequenzbändern zusammen. Dabei unterteilt es den hörbaren Frequenzbereich von 20 Hz bis 20 kHz in 25 Frequenzgruppen, die jeweils mit z [bark] gekennzeichnet werden. Würden zwei Töne unterschiedlicher Frequenzgruppen in gleicher Lautstärke wiedergegeben, so wirken diese zusammen 10 dB lauter als einer allein. Dagegen würden zwei Töne innerhalb einer

¹⁸ Vgl. Friesecke, 2007, S. 267

Frequenzgruppe nur um 3 dB lauter empfunden werden.¹⁹ Für besonders leise Signale braucht es eine höhere Schalldruckveränderung von etwa 2 dB, um eine Pegelveränderung festzustellen.²⁰

Abb. 3 Kritische Frequenzbänder

Frequenzband	Mittenfrequenz in Hz	Bandbreite in Hz	Untere Frequenz	Obere Frequenz	Bark
1	50	100	0	100	0
2	150	100	100	200	1
3	250	100	200	300	2
4	350	100	300	400	3
5	450	110	400	510	4
6	570	120	510	630	5
7	700	140	630	770	6
8	840	150	770	920	7
9	1000	160	920	1080	8
10	1170	190	1080	1270	9
11	1370	210	1270	1480	10
12	1600	240	1480	1720	11
13	1850	280	1720	2000	12
14	2150	320	2000	2320	13
15	2500	380	2320	2700	14
16	2900	450	2700	3150	15
17	3400	550	3150	3700	16
18	4000	700	3700	4400	17
19	4800	900	4400	5300	18
20	5800	1100	5300	6400	19
21	7000	1300	6400	7700	20
22	8500	1800	7700	9500	21
23	10500	2500	9500	12000	22
24	13500	3500	12000	15500	23
25	19500	4500	15500	20000	24

Quelle: [Friesecke, 2007, S. 250]

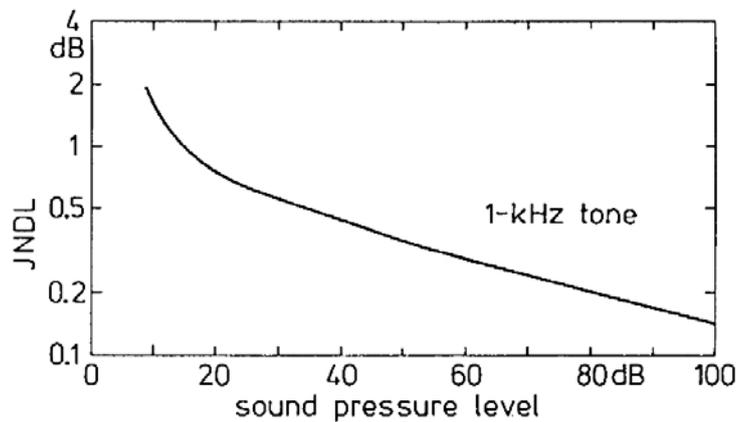
Ein primäres Qualitätsmerkmal der Wiedergabequalität ist der Amplitudenfrequenzgang. In der Praxis wird dieser meist terzgeglättet angezeigt, weil er so der Frequenzauflösung des Gehörs am nächsten kommt. Korrekturen von Einbrüchen, die erst in einer feineren Auflösung sichtbar wären, haben aufgrund der kritischen Frequenzbänder und Maskierungseffekte geringe Relevanz für die Wiedergabequalität breitbandiger Signale wie Sprache oder Musik. Diese werden großenteils aufgrund der genannten Eigenschaften des psychoakustischen Hörsystems überdeckt.²¹

¹⁹ Vgl. Friesecke, 2007, S. 362 ff.

²⁰ Vgl. Fastl & Zwicker, 2007, S. 180f.

²¹ Vgl. Weinzierl, 2008, S. 473

Abb. 4 Kleinster wahrnehmbarer Pegelunterschied eines 1-kHz-Tones. Die Pause zwischen zwei Tönen beträgt 200 ms

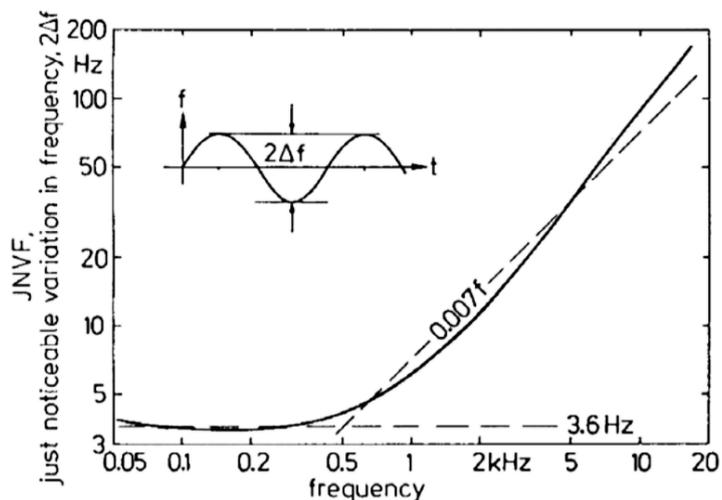


Quelle: [Fastl, H., & Zwicker, 2007, S. 181]

3.1.2 Frequenzunterschiede

Da ein RCS den Pegel nicht während des Betriebs, sondern erst beim Einschalten amplitudenmoduliert, ist hier mehr der Fokus auf die eben wahrnehmbare Frequenzänderung zu setzen. Eine Veränderung in den Mitten und Höhen wird bei 0,7%, also $0,007 \cdot f$ der jeweiligen Frequenz wahrgenommen. Unter 500 Hz wird nur noch eine Veränderung über 3,6 Hz wahrgenommen.

Abb. 5 Wahrnehmbarkeitsschwelle der Frequenzänderung



Quelle: [Fastl, H., & Zwicker, 2007, S. 183]

Wenn auf direkte Unterschiede einer Frequenzänderung geachtet wird, sinkt die Unterscheidungsschwelle um den Faktor 3. Das heißt, ein Unterschied wird schon bei $\Delta 1$ Hz unterhalb von 500 Hz festgestellt. Darüber bei einer Änderung der Frequenz um 0,2%.²²

²² Vgl. Fastl & Zwicker, 2007 S. 183ff.

3.1.3 Phasenunterschiede

Phasenunterschiede können sich als Zeitfehler der Schallreproduktion äußern. Dies kann auch als Delay betrachtet werden, bei dem meist nicht der gesamte Kanal, sondern nur bestimmte Frequenzen verzögert werden. Dabei können beispielsweise die Mitten zu spät, Bässe und Höhen jedoch zeitrichtig wiedergegeben werden. Die Ursache liegt hier in einer Zeitverschiebung innerhalb (Intrachannel) der Wiedergabekanäle oder zwischen ihnen (Interchannel).

Der geringste wahrnehmbare Laufzeitunterschied zwischen linkem und rechtem Ohr liegt bei ca. 10 μ s. Das entspricht einer Phasenverschiebung von 3,6°. Jedoch ergibt erst eine Verspätung von etwa 30 μ s zwischen Stereo-Lautsprechern eine Lokalisationsunschärfe von 2° bis 3°.

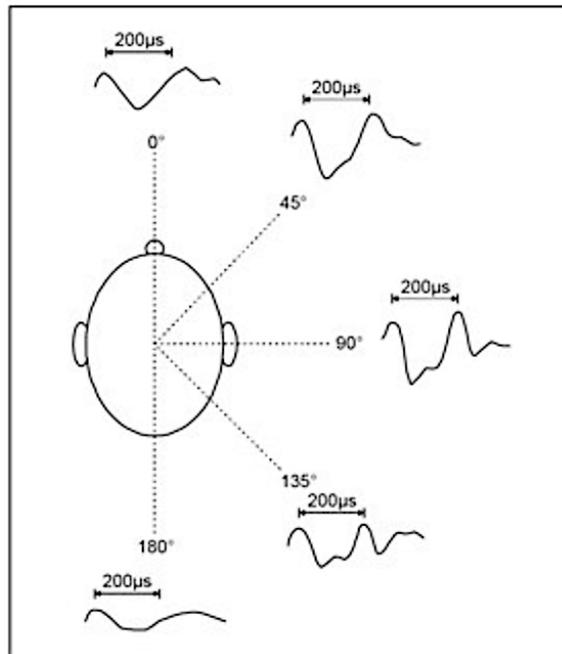
Bei seitlichem Schalleinfall ist der Laufzeitunterschied zwischen linkem und rechtem Ohr maximal. Der bevorzugte Weg über die Stirn misst 0,63 ms, obwohl es auch einen kürzeren Weg über den Hinterkopf mit 0,4 ms gibt. Aus diesem Grund ist die Lokalisation bei seitlichem Schalleinfall deutlich schlechter. Sie liegt bei 12° bis 18°. Tatsächlich hörbare Auswirkungen auf ein Signal haben Phasenfehler erst ab 1 ms. Das entspricht einem 1 kHz Signal einer bei Verschiebung des Signals um 360°.

Die Auswirkungen eines verzögerten Schallereignisses hängen von der zeitlichen Differenz der beiden Schallereignisse ab. Je nachdem, ob das verzögerte Signal aus derselben Richtung wie das Originalsignal, oder durch Reflektion aus verschiedenen Richtungen kommt, treten unterschiedliche Effekte auf. Der Effekt, der in jedem Fall eintritt, ist der Kammfiltereffekt (2.2.3.2).

3.1.3.1 Phasenversetzte Signale aus gleicher Richtung

Als Beispiel sei an dieser Stelle ein Mehrwegelautsprecher genannt. Dabei strahlt der Hochtöner an seiner Trennfrequenz das gleiche Signal im selben Pegel wie der Tieftöner ab. Dabei kann es passieren, dass durch Phasenverschiebungen in der Frequenzweiche die Signale nicht zeitgleich abgestrahlt werden. In der Praxis liegt der Phasenversatz zwischen 20 μ s und 200 μ s. Dies kann dazu führen, dass Phantomschallquellen nicht scharf abgebildet, in die Breite gezogen werden, oder dass durch den Kammfiltereffekt die Lokalisation in eine andere Richtung versetzt wird. Letzteres ist auf den Kammfilter innerhalb der Ohrmuschel zurückzuführen. Wie dieser den Frequenzgang verzerrt, hängt damit zusammen, aus welcher Richtung das Signal eintrifft und wie sich dieser bei einer Kopfneigung verändert. Das Gehirn lokalisiert daraus (Abb. 6), auf Erfahrung basierend, die Schallquelle.

Abb. 6 Reflexionen an der Ohrmuschel bestimmen die Richtungslokalisierung



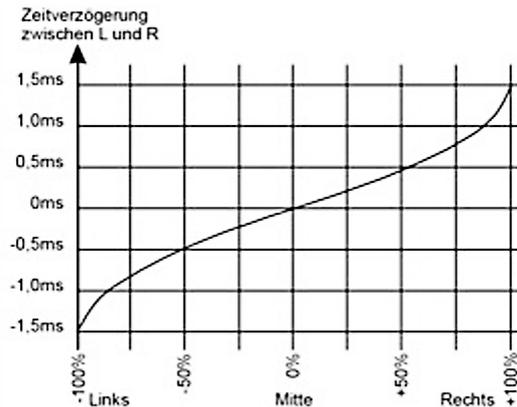
Quelle: [Friesecke, 2008, S. 273]

Zudem kann die räumliche Tiefe einer Mischung darunter leiden. Abgesehen von den Klangverfärbungen im Frequenzgang treten weitere psychoakustische Effekte auf.

3.1.3.2 Phasenversetzte Signale aus unterschiedlichen Richtungen

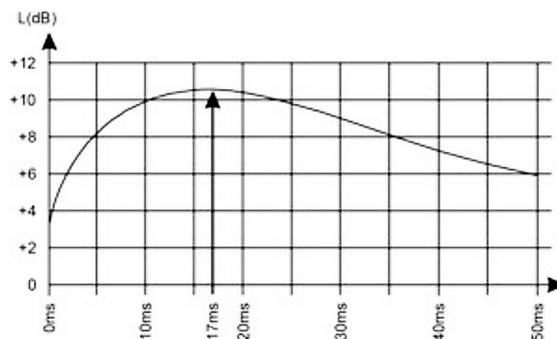
Durch mehrfache Reflektion im Raum kann ein Schallereignis einige Millisekunden nach der ersten Wellenfront am AP eintreffen. Man unterscheidet dabei zwischen einer Zeitverzögerung kleiner 2 ms, 1 ms bis 30 ms und über 30 ms.

Liegt die Zeitverzögerung gleicher Signale aus unterschiedlicher Richtung unterhalb von 2 ms, so verschiebt sich die Lokalisation des Signals. Während aus einem Laufzeitunterschied bis 0,9 ms eine lineare Verschiebung aus der Stereomitte folgt, wird über 1,5 ms das Signal annähernd nur noch aus einem Lautsprecher wahrgenommen. Der Effekt kann durch Pegelunterschiede verstärkt werden. So verschiebt sich die Lokalisation eines um 0,5 ms verzögerten Signals, das um 4 dB leiser ist, um 85% anstatt 50%.

Abb. 7 Lokalisationsverschiebungen durch Laufzeitunterschiede

Quelle: [Friesecke, 2008, S. 399]

Oberhalb einer Verzögerung von 2 ms tritt bis zu einer Pegeldifferenz von 10 dB bei 17 ms der Präzedenzeffekt ein. Dieser besagt, dass zwischen zwei gleichen Ereignissen unterschiedlicher Laufzeit die Lokalisation bei der ersten Wellenfront bleibt. Der Zeitbereich, in dem die Lokalisation bei dem Direktsignal verbleibt, nennt man „Haas-Bereich“. Der Effekt wird z.B. im Live-, oder Kinobereich dazu verwendet, die Aufmerksamkeit auf der Leinwand zu zentrieren oder die Lautstärke am AP zu vergrößern.²³ Der Präzedenzeffekt ist dann besonders effektiv, wenn das Spektrum der vorhandenen Reflektionen dem des Direktschalls möglichst ähnlich ist.²⁴

Abb. 8 Haas-Bereich

Quelle: [Friesecke, 2008, S. 276]

Verzögerungen über 30 ms werden als Echo wahrgenommen. Wann genau ein Signal vom Haas-Bereich in ein Echo übergeht, hängt von der Signalart ab. Kurze perkussive Signale werden in der Regel wesentlich früher als Echo wahrgenommen. Echos verschlechtern die Sprachverständlichkeit und die Lokalisation der Schallereignisse.²⁵

²³ Vgl. Friesecke, 2007, S. 275ff..

²⁴ Vgl. Goertz & Makarski, 2008, S. 6

²⁵ Vgl. Friesecke, 2007, S. 278f.

4. Regieraum-Akustik

Ein Regieraum sollte zur kritischen Beurteilung von Tonsignalen optimale Bedingungen bieten und muss damit zwei Forderungen erfüllen.

1. Er muss *adäquat* sein: Audioproduktionen, die für einen bestimmten Raum gedacht sind, sollen in einer ähnlichen Akustik produziert werden.
2. Er muss *störungsfrei* sein. Frei von Resonanzen und frühen Reflektionen.²⁶

Schall im Raum birgt nicht ausschließlich negative Eigenschaften. Ein Signal, welches unter 30 ms zum AP reflektiert wird, wird dank des Präzedenzeffekts (Gesetz der ersten Wellenfront) nicht als separates Signal wahrgenommen, sondern erhöht subjektiv die Lautstärke und Deutlichkeit des Signals.²⁷ Zudem soll der Abhörraum dem Tonmeister die Möglichkeit bieten, in einer gewohnten räumlichen Umgebung zu arbeiten. Jedoch soll dabei der positive Raumeinfluss so gering sein, dass die Signalinformationen des zu bearbeitenden Tonmaterials nicht verfälscht oder überdeckt werden. Der aufgenommene Klangcharakter, beispielsweise einer Klassikproduktion, wird etwa zu 50% vom Raum bestimmt.²⁸ Die Abhörqualität durch Lautsprecherwiedergabe wird im Wesentlichen von zwei Punkten bestimmt:

1. den geometrischen und akustischen Eigenschaften des Abhörzimmers und
2. der Aufstellung der Lautsprecher und des dadurch gegebenen Abhörpunktes.

Da kein Raum dem andern gleicht, ist es offensichtlich, dass jeder Raum ein Schallfeld anders prägt und damit anders klingt. Das Ohr wird die gleichen Ausgangssignale in jedem anderen Raum anders bewerten, was für Audioproduktionsprozesse unterschiedliche Resultate nach sich zieht. Einer Spezifizierung einheitlicher Abhörbedingungen kommt daher eine erhebliche Bedeutung zu.²⁹ Diese Arbeit orientiert sich an den Anforderungen für Bezugsabhörräume wie sie in den internationalen Empfehlungen EBU Tech 3276 sowie ITU-R BS.1116 niedergelegt sind.

4.1 Objektive Qualitätskriterien der Lautsprecherwiedergabe für Abhörräume

Das Erreichen hochqualitativer Werte des Tonkanals wie Störabstand, nichtlineare Verzerrungen und Frequenzgang, stellt dank der Digitalisierung im Allgemeinen kein großes Problem mehr dar.³⁰ Jedoch zeigt sich, dass der Tonmeister auch in Zukunft nicht ohne eine Raumkorrektur qualitativ arbeiten kann, ohne sich intensiv „einzuhören“.³¹ Natürlich genügt

²⁶ Vgl. Görne, 2015, S. 108

²⁷ Vgl. Görne, 2015, S. 128f.

²⁸ Vgl. Görne, 2015 S. 98f.

²⁹ Vgl. Dickreiter, 2008 S. 1157f.

³⁰ Vgl. Dickreiter, 2008, S. 1111

³¹ Vgl. Friesecke, 2007, S 809

es nicht, allein die Eigenschaften der Lautsprecher aufzuzeigen. Insbesondere muss die akustische Umgebung den Anforderungen genügen. So ist es erforderlich, die durch Absorption vernichtete Energie mit der über die Frequenz abgestrahlten Leistung im Gleichgewicht zu halten. Ziel ist ein Schallfeld mit konstanter Energiedichte.³² Dabei ist die „Diffusfeldenergiedichte w proportional zur vom Lautsprecher abgestrahlten Leistung P und umgekehrt proportional zur äquivalenten Absorptionsfläche A .“³³

$$w = \frac{4P}{cA} \quad (4.1)$$

Dennoch sind hochwertige Lautsprecher als Baustein der Qualitätskette nicht unerheblich für das Gesamtergebnis der Abhörqualität. Hinsichtlich der durch das Raumkorrektursystem veränderbaren Eigenschaften der Wiedergabe, sind objektive Qualitätskriterien der Lautsprecher und des anzustrebenden Schallfeldes am AP aufzuzeigen.

4.1.1 Anforderungen an das Bezugs-Schallfeld

Die Eigenschaften einer hochwertigen Abhörsituation werden indirekt über folgende Parameter des Bezugs-Schallfeldes am AP definiert.

4.1.1.1 Direktschall

Der AP ist mit ausreichend Direktschall zu versorgen (2.3.1). Dessen Qualität ist mitunter geprägt durch den Amplitudenfrequenzgang und das Einschwingverhalten. Die einzelnen Pegel der Kanäle sollten dabei nicht mehr als 0,5 dB voneinander abweichen.

Um die Betriebsschallpegelkurve nach EBU Tech. 3276 zu erreichen, schlägt diese vor, die Abhörräume in ihren Problemfeldern unter 300 Hz akustisch zu behandeln. Sollte dies nicht gelingen, soll demnach durch eine elektronische Raumentzerrung die Vorgabe eingehalten werden.³⁴

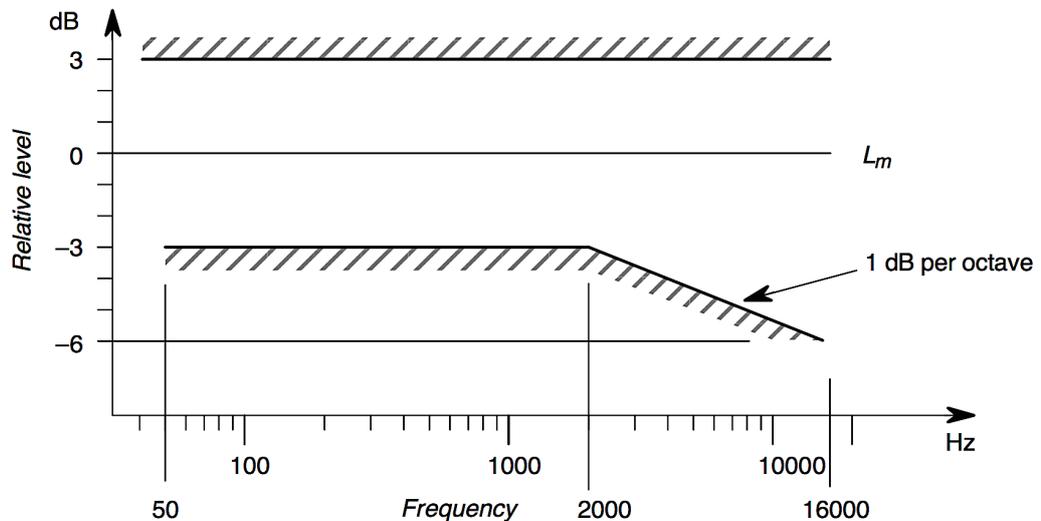
Der Amplitudenfrequenzgang ist darüber hinaus am AP mit den Parametern der Lautsprecheranforderungen gleich zu setzen (4.1.2.1).

³² Vgl. Goertz & Makarski, 2008, S. 4

³³ Goertz & Makarski, 2008, S. 4

³⁴ Vgl. EBU Tech. 3276, 1998, S. 7

Abb. 9 Toleranzfeld für die Betriebsschallpegelkurve. L_m entspricht dem Mittelwert der Terzpegel für die Mittenfrequenzen 200 Hz bis 4 kHz



Quelle: [EBU Tech. 3276, S. 7]

4.1.1.2 Anfangsreflexionen

Reflexionen, welche früher als 15 ms am AP eintreffen, sollen im Frequenzbereich von 1 kHz bis 8 kHz mindestens 10 dB unter dem Pegel des Direktschalles liegen. Andernfalls wird die Lokalisation verschlechtert.

4.1.1.3 Nachhallschallfeld

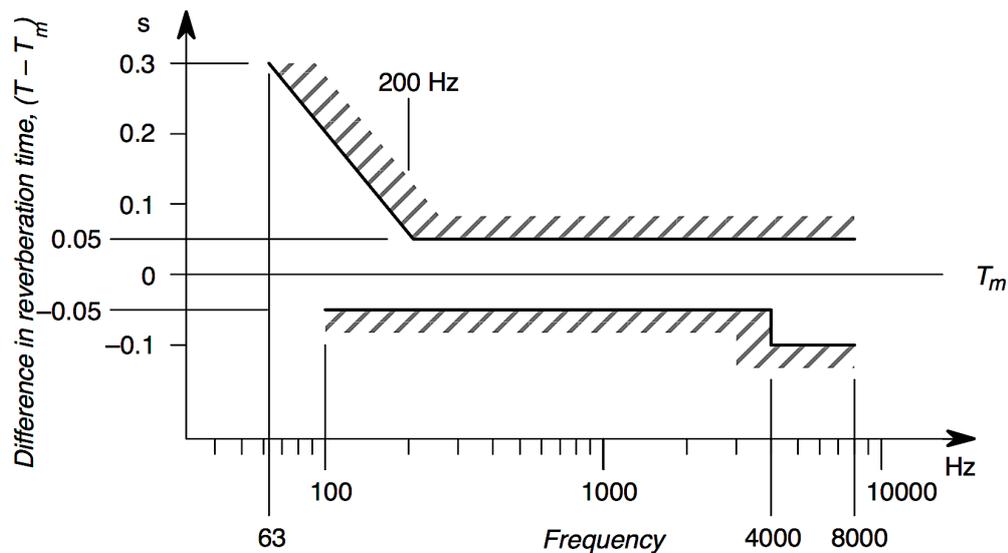
Der Nachhall sollte möglichst diffus sein und über das gesamte Spektrum gleichmäßig abklingen. Plötzliche Schwankungen und Sprünge beeinflussen die Betriebsschallpegelkurve. Dabei ist eine mittlere Nachhallzeit für Studios zwischen 0,2 s und 0,4 s zwischen 200 Hz und 4 kHz anzustreben.³⁵ Wie die Eigenschaften der Reflexionen ist auch der Nachhall frequenzabhängig. Die EBU Tech. 3276 empfiehlt den folgenden Toleranzbereich:

$$T_m = 0,25 \left(\frac{V}{V_0} \right)^{\frac{1}{3}} \quad (4.2)$$

V : Raumvolumen in $[m^3]$

V_0 : Referenzvolumen von $100 m^3$

³⁵ Vgl. Dickreiter, 2008, S. 1161f.

Abb. 10 Toleranzfeld der Nachhallzeit im Studio

Quelle: [EBU Tech. 3276, S. 7]

4.1.2 Anforderungen an Regielautsprecher

Anforderungen an das Schallfeld am AP ergeben sich indirekt aus den Anforderungen an die verwendeten Lautsprecher. Dabei wird Bezug auf den im Rahmen dieser Arbeit verwendeten Lautsprecher Geithein RL 901K genommen. Die angegebenen Werte sind aus Messungen im Freifeld (reflektionsfreiem Raum) entstanden, da nur hier der Lautsprecher ohne die Auswirkungen des Raumes zu erfassen ist. Lautsprecher behalten nur solange ihre gemessenen Eigenschaften wie sie in den Testanlagen der Hersteller stehen. Jeder Ortswechsel verändert den Klangcharakter auf eine nur schwer voraussehbare Weise. Verzerrungen des Signals durch den Abhörraum können immer noch Löcher ungeahnten Ausmaßes in den Frequenzgang reißen.³⁶

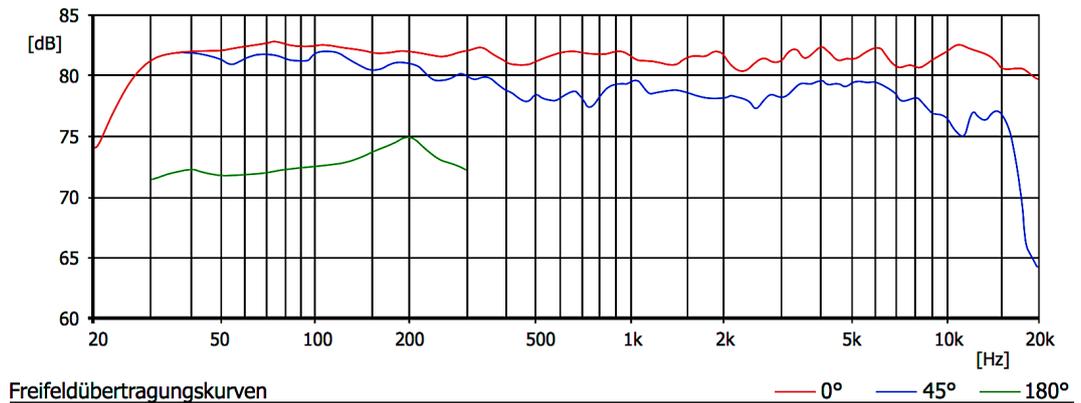
4.1.2.1 Amplitudenfrequenzgang

Der Amplitudenfrequenzgang sollte im Frequenzbereich zwischen 40 Hz und 16 kHz einen Toleranzbereich von 4 dB nicht überschreiten. Die verwendeten Lautsprecher sollten dabei im Bereich von 250 Hz bis 2 kHz nicht über 0,5 dB voneinander abweichen.³⁷

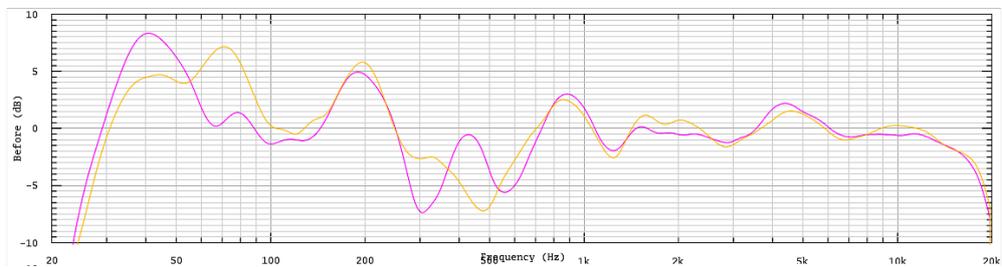
Gemessen im Freifeld genügt der Lautsprecher RL 901K den Anforderungen. Zwischen 25 Hz und 20 kHz gibt der Hersteller eine Abweichung von ± 3 dB an. Wie im Vergleich der Abb. 11. und 12. zu sehen ist, hat der Freifeld-Amplitudenfrequenzgang wenig mit dem Amplitudenfrequenzgang, gemessen am AP der HdM Stuttgart in der A Regie, gemeinsam.

³⁶ Vgl. Schwamkrug, 1986, S. 5ff.

³⁷ Vgl. Dickreiter, 2008, S. 1163

Abb. 11 Geithain RL 901K, Frequenzgang

Quelle: [musikelectronic geithain gmbh]

Abb. 12: HdM Stuttgart, A Regie, Amplitude

Quelle: [Eigene]

4.1.2.2 Phasenfrequenzgang und Gruppenlaufzeit

Da es nicht möglich ist, die Frequenzen unendlich schnell wiederzugeben, vergeht stets eine Zeit bis das Signal gewandelt wird. Der Phasenfrequenzgang beschreibt, mit welcher Phasenverschiebung die jeweiligen Frequenzen umgewandelt werden und am AP ankommen. Die Gruppenlaufzeit stellt die negative Ableitung der Phase über die Frequenz am AP dar. Sie beschreibt die Zeit, welche ein Signal einer bestimmten Frequenz über die Wandlung bis zum AP braucht. Dabei wird ein linearer Phasenfrequenzgang angestrebt, da dies eine konstante Verzögerung aller Frequenzen zur Folge hätte. Diese ist klanglich nicht wahrnehmbar.³⁸ Die Referenz der beiden Parameter ist in der Regel das akustische Zentrum des Hochtöners.

4.1.2.3 Impulsantwort

Die Impulsantwort zeigt die Reaktion eines Übertragungssystems auf einen sehr (mathematisch unendlich) kurzen Spannungsimpuls.³⁹ Im Idealfall wäre der Ausgangsimpuls des Wandlers identisch zum Eingangsimpuls. Dies deutet gleichzeitig auf einen idealen

³⁸ Vgl. Friesecke, 2007, S. 680f.

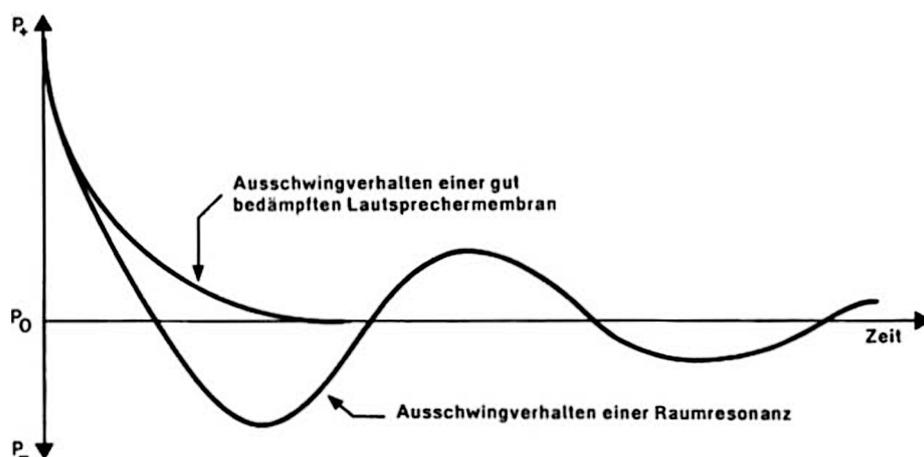
³⁹ Vgl. Weinzierl, 2008, S. 476

Amplituden- und Phasenfrequenzgang des LS hin, da das Eingangssignal nicht verfremdet würde.

In der Praxis reagiert ein Wandler mit einer mehr oder weniger lang ausschwingenden Impulsantwort. Der Grund hierfür kann zum einen die Masseträgheit der Membran sein, welche nicht unendlich schnell auf einen Eingangsimpuls reagieren kann. Zum anderen Resonanzen, die durch Reflexöffnungen erzeugt werden oder auch durch die Membranmasse zusammen mit der elastischen Membranaufhängung.⁴⁰

Ein präzises Impulsverhalten ist sowohl ein wichtiges Kriterium bei der Lautsprecherplanung als auch bei der Kaufentscheidung für Regie-Lautsprecher. Trotzdem ist dieser Punkt nicht überzubewerten. Denn was bringt ein kurzes und sauberes Impulsverhalten des Lautsprechers für die Abhörqualität, wenn der Ausschwingvorgang einer Raumresonanz dieses bei weitem übersteigt.⁴¹ Dies ist ein weiterer Grund dafür, Raumresonanzen zu bekämpfen.

Abb. 13 Ausschwingverhalten einer optimierten Lautsprechermembran gegenüber einer Raumresonanz



Quelle: [Schwamkrug & Römer, 1986, S. 16]

4.1.2.4 Abstrahlverhalten

Das räumliche Abstrahlverhalten eines Lautsprechers wird durch die Richtcharakteristik beschrieben. Dabei unterscheidet man zwischen dem horizontalen und dem vertikalen Abstrahlwinkel. Bei Regielautsprechern ist ein enges vertikales Abstrahlverhalten wünschenswert, um Reflektionen an der Oberfläche des Mischpultes zu vermeiden. Allgemein ist ein frequenzunabhängiges, gleichmäßiges Abstrahlverhalten erwünscht. Frequenzen, deren Wellenlängen länger sind als der Membrandurchmesser, beugen sich

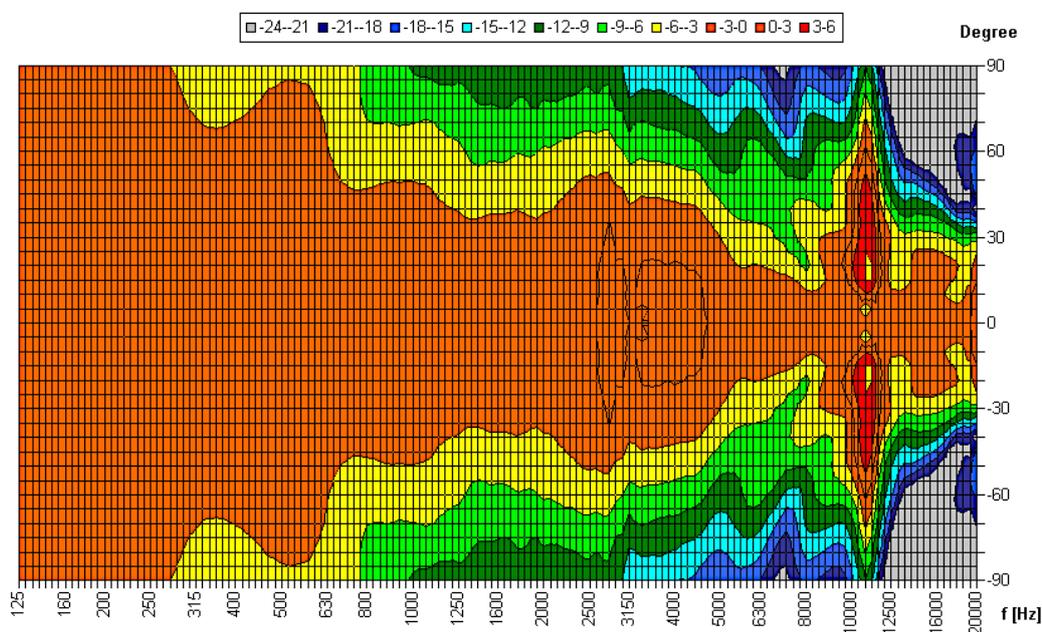
⁴⁰ Vgl. Friesecke, 2007, S. 678f.

⁴¹ Vgl. Schwamkrug & Römer, 1986, S. 16f.

zunehmend um das Gehäuse herum (2.2.1). Damit verändert sich stark das Abstrahlverhalten für entsprechende Frequenzen. Das Bündelungsmaß (C) beschreibt die Richteigenschaften für einen bestimmten Frequenzbereich. Für Studiomonitore sollte dieses im Bereich zwischen 250 Hz und 4 kHz, $4 \text{ dB} \leq C \leq 12 \text{ dB}$ betragen. Die verwendeten Geithin LS entsprechen diesen Anforderungen. Dabei steigt der Pegel zwischen 200 Hz und 10 kHz von 5 dB auf 10 dB.⁴²

Abbildung 13 zeigt das Abstrahlverhalten eines Studiomonitors in der Horizontalebene. Bei Verwendung dieses Monitors ist durch die besonders schmalbandige ausgeprägte Aufweitung bei 11 kHz eine Betonung aus entsprechender Richtung durch Reflektion, je nach Reflektionsfaktor, zu erwarten. Dadurch ist die tonale Ausgewogenheit und Quellenlokalisierung gefährdet.⁴³

Abb. 14 Directivity eines kleinen 2-Wege Studio-Monitors in der Horizontalebene



Quelle: [Goertz & Makarski, 2008, S. 6]

Ein Raumkorrektursystem hat keinen direkten Einfluss auf das Abstrahlverhalten eines LS. Jedoch kann ein unregelmäßiges Abstrahlverhalten, welches störend durch erste Reflektionen wirkt, kompensiert werden.

4.1.3 Lautsprecheraufstellung

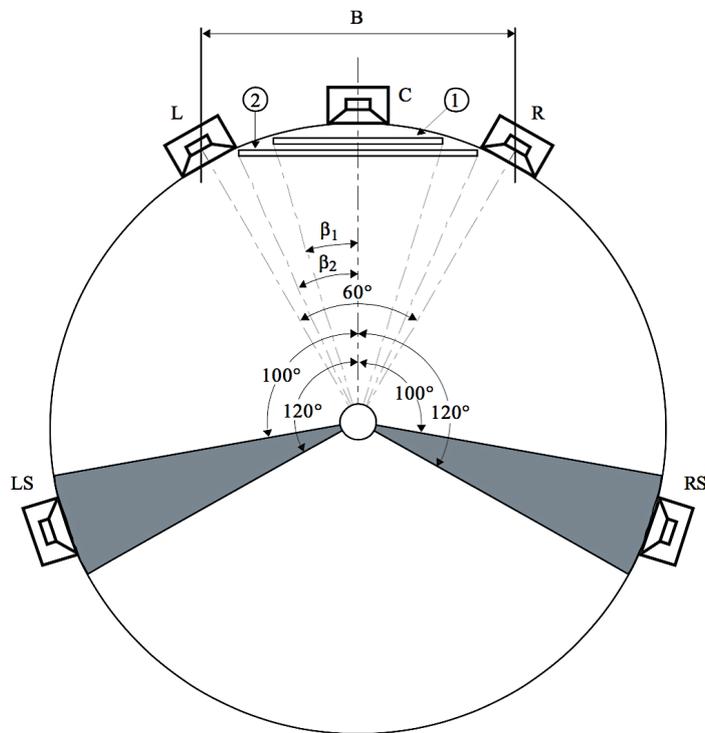
Der internationale Standard für die Boxenanordnung der Stereo- und Surround-Wiedergabe wurde bereits 1992 von der „International Telecommunication Union“ im Dokument ITU-R BS.775-3 niedergelegt. Dieser stellt einen Kompromiss zwischen der Forderung nach

⁴² Vgl. Weinzierl, 2008, S. 483

⁴³ Vgl. Goertz & Makarski, 2008, S. 5f.

optimaler Tondarstellung in einer breiten Hörzone, und einer kompatiblen Zweikanal-Wiedergabe dar.⁴⁴ Bei Stereowiedergabe wird dabei von einem gleichseitigen Dreieck ausgegangen, in welchem der AP die gleiche Distanz zu den Boxen hat wie die Boxen zueinander haben. Für Surround wird diese Aufstellung auf einen Kreisbogen um den AP erweitert. Dabei hat jede Box den selben Abstand zum AP und sollte sich möglichst auf Ohrhöhe befinden. Die Front-Lautsprecher für L und R befinden sich damit im Winkel von $\pm 30^\circ$ zum AP. Surround-Boxen sind im Winkel von $\pm 110^\circ$ zu positionieren. Da die Lokalisation der Surround-Lautsprecher (LS, RS) schlechter ist als die der Frontlautsprecher (3.1.3), dürfen diese um bis zu 15° gekippt werden und eine Winkeltoleranz von bis zu $\pm 10^\circ$ aufweisen. Der Subwoofer sollte frontal in der Mitte aufgestellt werden.⁴⁵

Abb. 15 Reference loudspeaker arrangement with loudspeakers L/C/R and LS/RS



Quelle: [ITU-R BS.775-3, S. 4]

⁴⁴ Vgl. Dickreiter, 2013, S. 240f.

⁴⁵ Vgl. ITU-R BS.775-3, 2008, S. 4

5. Elektronische Raum-/Lautsprecherentzerrung

5.1 Signalverarbeitung

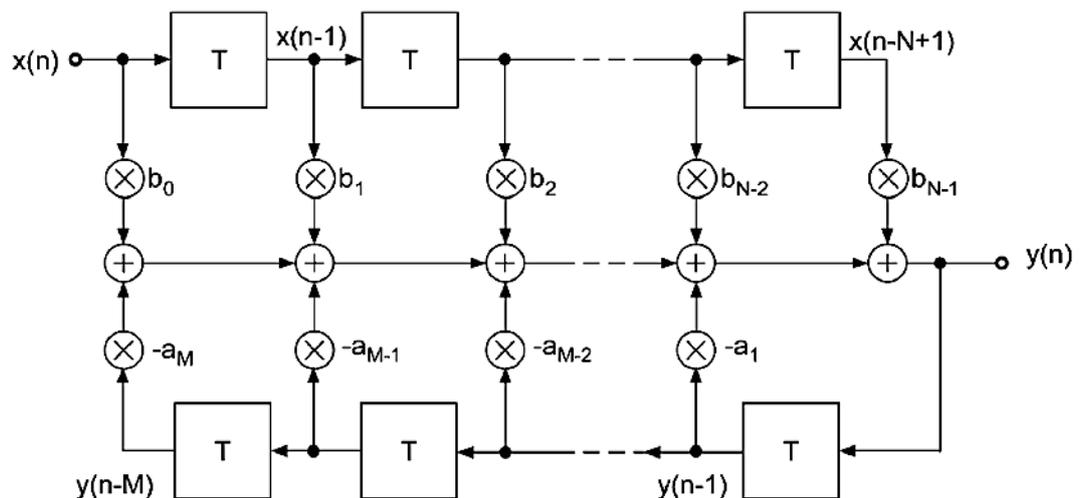
Das RCS verwendet zwei Klassen der digitalen Filterung, um zur gewünschten Übertragungsfunktion zu gelangen.⁴⁶ Die mathematischen Operationen, die dabei verwendet werden, beschränken sich dabei auf Addition, Multiplikation und Zeitverzögerung.⁴⁷ Die Filterklassen IIR- und FIR-Filter besitzen völlig unterschiedliche Eigenschaften und erfüllen unterschiedliche Anforderungsbereiche. Deutlich wird dies im direkten Vergleich miteinander. Aufgrund ihrer Eigenschaften kann durch Kombination beider Filterarten ein Kompromiss zwischen Qualität, Rechenleistung und Latenz geschlossen werden.

5.1.1 IIR-Filter

Ein Infinite Impulse Response (IIR) Filter ist ein rekursiver Filter. Das heißt, ein Teil des Ausgangssignals wird auf den Eingang rekursiv zurückgeleitet. Das führt zu einer theoretisch unendlichen Impulsantwort, sofern Multiplikatoren im Rückführungspfad nicht auf Nullstellen fallen. Voraussetzung für einen stabilen Filter sind sehr genaue Multiplikationskoeffizienten. Ungenaue Koeffizienten potenzieren Fehler am Ausgangssignal, da diese mehrmals durchlaufen werden.

Der Phasengang eines IIR-Filters ist minimalphasig, was zu einer nicht konstanten Gruppenlaufzeit der zu filternden Frequenzen führt. Dabei ist die Gruppenlaufzeit von der Frequenz abhängig.

Abb. 16 Blockschaltbild eines IIR-Filters



Quelle: [Weinzierl, 2008, S. 827]

⁴⁶ Vgl. Trinnov Audio

⁴⁷ Vgl. Meyer, 2014, S. 229

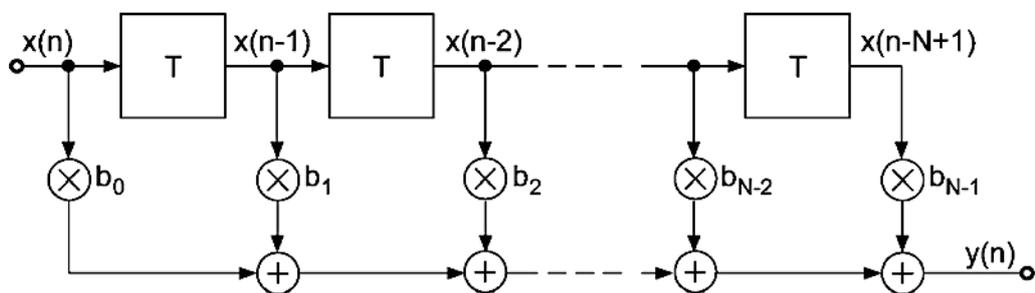
IIR-Filter benötigen aufgrund weniger Bauteile einen sehr geringen Rechenaufwand, wodurch diese eine sehr kurze Einschwingzeit gegenüber FIR-Filter in Anspruch nehmen. Dazu haben diese eine geringe Latenz, wodurch das Nutzsignal schneller ausgegeben werden kann.

5.1.2 FIR-Filter

Der nicht rekursive Finite Impulse Response (FIR) Filter hat keinen Rückführungspfad (nicht rekursiv), wodurch er stabil und weniger anfällig für ungenaue Filterkoeffizienten ist.

48

Abb. 17 Blockschaltbild eines FIR Filters



Quelle: [Weinzierl, 2008, S. 824]

Die endliche, symmetrische Impulsantwort schwingt länger ein, aber kürzer aus als beim IIR-Filter. Der Phasengang ist linear und damit die Gruppenlaufzeit bis auf wenige Punkte konstant. Zu Phasensprüngen kommt es in der Regel nur dort, wo sich ein Amplitudenminimum befindet. Damit bietet er eine sehr hohe Qualität des Ausgangssignals.

Aufgrund eines höheren Rechenaufwandes ist jedoch die Latenz höher als beim IIR-Filter. Diese hängt von der tiefsten zu bearbeitenden Frequenz ab. In durchschnittlichen FIR-Filtern liegt sie bei 1 bis 50 ms.⁴⁹

Die Filterlänge kann beim RCS per ms Eingabe bestimmt werden. Dabei ist darauf zu achten, dass der IIR-Filter ab entsprechender Frequenz für tiefe Frequenzen übernimmt, da sonst eine Lücke ohne Bearbeitung entsteht.

5.2 Trinnov Audio

Aus einem Uni-Forschungsprojekt heraus über 3D-Sound, gründete der Franzose Arnaud Laborie die Firma *Trinnov Audio* im Jahr 2000. Seit 2005 wird das DSP-basierte Optimizer System für den Profimarkt produziert.

⁴⁸ Vgl. Meyer, 2014, S. 313

⁴⁹ Vgl. Weinzierl, 2008, S461

5.2.1 Trinnov MC Optimizer

Das Raumkorrektursystem (RCS) bietet eine Reihe von Analyse- und Korrekturfunktionen, die es ihm erlaubt, durch eine Anpassung der Lautsprecher akustische Defizite im Bezugsschallfeld zu kompensieren. Im Rahmen dieser Arbeit werden ausschließlich die „Optimizer“-Funktionen des *Trinnov MC* untersucht.

Der Prozessor selbst besteht aus einem „Intel I3 Prozessor“⁵⁰ mit einem MMX-Befehlssatz (Multi Media Extension). MMX erlaubt es, parallelisiert Daten zu verarbeiten. Laut Arnaud Laborie werden dadurch 8 – 12 herkömmliche DPS ersetzt, wodurch der Preis und der Entwicklungsaufwand gesenkt würde.⁵¹

Internationale Dokumente wie die EBU-R für Lautstärke oder die SMPTE-/ITU-/AES-Studionormen dienen als Referenz der Optimierungsvorgänge. Formate von 2.0 bis 22.2 können optimiert werden.

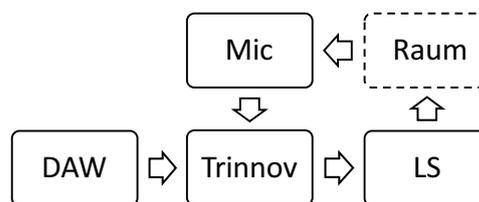
5.2.1.1 Zielsetzung der Entzerrung

Im Gegensatz zu einer bloßen Lautsprecherkorrektur, welche Nichtlinearitäten im Frequenzgang oder unsauberes Impulsverhalten kompensieren soll, ist für die elektronische Raumkorrektur eine Anpassung der Lautsprecher an den Raum das Ziel. Dadurch soll ein tonal ausgewogenes und zeitrichtiges Abhörsystem geschaffen werden. Tonal ausgewogen bedeutet, dass alle Frequenzen mit derselben Energie an den AP transportiert werden. Zeitrichtig, dass sämtliche Frequenzen zur selben Zeit am AP eintreffen.⁵² In einem Satz: „what you heard is what you get.“⁵³

5.2.1.2 Insertierung

Das RCS wird zwischen der Workstation und den Lautsprechern analog per XLR/SUB D25, digital per AES-EBU oder Madi, optisch oder Koaxialkabel mit bis zu 64 Kanälen insertiert. Für die Messung wird das Messmikrofon zusätzlich analog per XLR eingesteckt.

Abb. 18 Signalfluss des RCS



Quelle: [Eigene]

⁵⁰ Trinnov Audio, S. 22

⁵¹ Vgl. Vogt, 2011

⁵² Vgl. Wegmann, 2011, S. 1

⁵³ Vgl. Laborie & Wegmann, 2011, S. 7

5.2.1.3 Messung

Die Messung erfolgt per MSL- (Maximum Length Sequence) Signal anhand eines 3D-Mikrofons mit vier pyramidenförmig angeordneten Kapseln. Dabei wird ein mathematisch berechnetes „Quasizufall“-Signal ausgegeben, welches das gleiche Spektrum und Klang hat wie weißes Rauschen. Im Gegensatz dazu ist es jedoch nicht zufällig. So kann das Eingangssignal genau mit dem Ausgangssignal verglichen und daraus Informationen über Frequenz-, Phasengang und Impulsverhalten des Raum-/Lautsprecher-Systems gewonnen werden.

Durch die Laufzeitunterschiede der eintreffenden Signale zu den einzelnen Kapseln lässt sich die Richtung der eintreffenden Signale auf 0,1 Grad genau analysieren. Zum einen werden dabei die Lautsprecher im Raum lokalisiert, zum anderen Direktschall von Nachhall getrennt. Erkannt werden die Reflektionen durch die Unterschiede in ihrer Amplitude, Frequenz, eintreffenden Richtung und Zeit gegenüber der ersten Wellenfront.⁵⁴

Das Mikrophon sollte dabei möglichst am AP, auf die Mitte des Abhörsystems ausgerichtet und auf Kopfhöhe eingestellt werden.⁵⁵

Abb. 19 3D-Messmikrophon



Quelle: [Trinnov Audio]

5.3 Möglichkeiten der Raum-/Lautsprecherentzerrung

Im Folgenden werden die Möglichkeiten der Raum-/Lautsprecherentzerrung dargelegt. Generell wird dabei aus allen Eventualitäten der beste Kompromiss gebildet.

5.3.1 Time-Alignment und Frequenzweichensteuerung

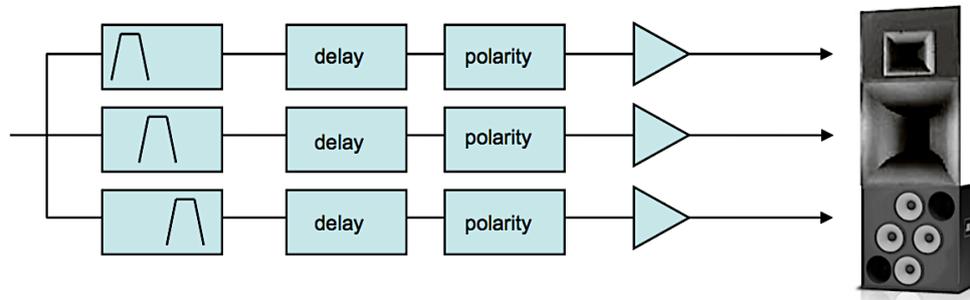
Im Grunde sollten Polarität und Übergänge der Mehrweglautsprecher an der Trennfrequenz von Hoch- zu Tieftöner vom Hersteller bereits optimiert sein. Durch Fehler im Tonkanal kann es jedoch trotzdem passieren, dass Signale den Tieftöner später erreichen und wiedergegeben werden als vom Hochtöner. Gerade Mehrweglautsprecher neigen dazu, Phasenverschiebungen an ihrer Trennfrequenz zwischen Hoch- und Tieftöner aufzuweisen. Ein Phasenfehler kann ein Grund dafür sein, weshalb die Phantomschallquelle an Abbildungsschärfe verliert (3.1.3.1). Für den Fall, dass eine oder mehrere Komponenten

⁵⁴ Vgl. Trinnov Audio, kein Datum

⁵⁵ Vgl. Trinnov Audio, S. 26

nicht in Ordnung sind, passt das RCS die Polarität, Phase und Pegel für jeden einzelnen Tonkanal an. Dieser Vorgang wird auch als Time-Alignment bezeichnet.

Abb. 20 Active crossover



Quelle: (Laborie & Wegmann, 2011)

5.3.2 Korrektur des frequenzabhängigen Raum-/Lautsprecherverhaltens

Mittlere und hohe Frequenz- und Phasengänge werden von FIR-Filtern korrigiert. Aufgrund der steigenden Latenz kommen für Frequenzen unterhalb von etwa 300 Hz IIR-Filter zum Einsatz. Die gesamte Latenz des Systems liegt für linearphasigen Betrieb mit Standardeinstellungen bei etwa 26 ms. Mit minimalphasigem Betrieb lässt sich selbiger Aufwand mit 15 ms bewältigen.

Aus der zuvor ermittelten Ein-Punkt-Messung gewinnt das RCS Informationen zu Phasengang und Übertragungsmaß jedes Lautsprechers. Dessen erste Wellenfront wird primär korrigiert und von frühen Reflektionen gesäubert. Dadurch nimmt die prinzipielle Ortsabhängigkeit der Entzerrung ab, da die Wirkung der ersten Reflektionen im gesamten Abhörbereich in etwa gleich ist. Erst die Wirkung später Reflektionen, welche vom RCS bereits als Nachhall betrachtet werden, variieren u.U. stärker innerhalb des AP.⁵⁶

Mit der Korrektur der Phase verbessert sich die Gruppenlaufzeit, welche die negative Ableitung über die Frequenz darstellt. Der Bezugspunkt der Gruppenlaufzeit richtet sich generell nach dem akustischen Zentrum des Hochtöners.⁵⁷

5.3.2.1 Kompensation der Raummoden

Überhöhungen aufgrund von Raummoden werden unterhalb von 300 Hz von parametrischen IIR-Filtern bearbeitet. Gegenüber der Kompensation der frühen Reflektionen ist die der Wirkung von Raummoden stark ortsabhängig.⁵⁸ Negative Auswirkungen einer Mode steigen damit u.U. an nahe gelegenen Punkten im Raum an. Dies lässt sich durch den Kompromiss

⁵⁶ Vgl. Goossens & Gutmann, 2008, S. 1f.

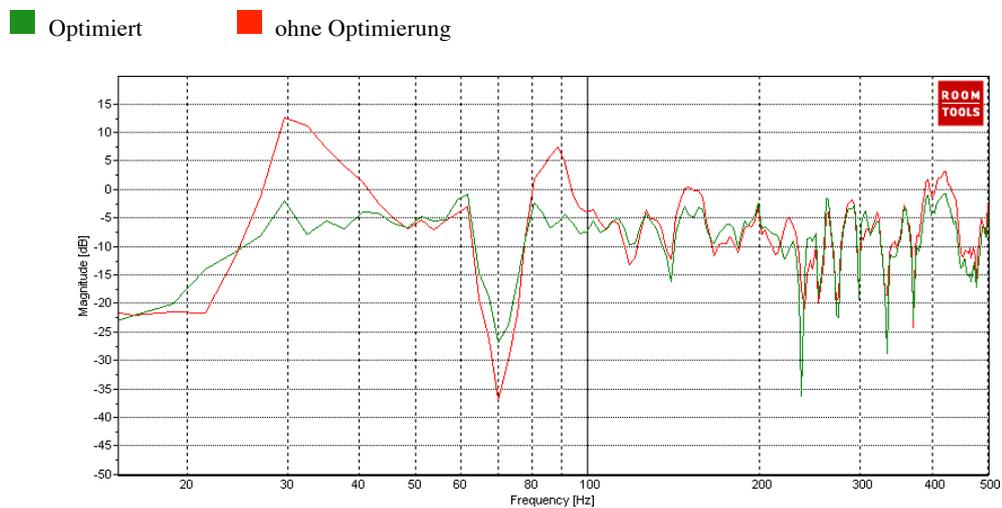
⁵⁷ Vgl. Weinzierl, 2008, S. 474f.

⁵⁸ Vgl. Goossens & Gutmann, 2008, S. 6

einer Mehrfachmessung mit entsprechendem AP verhindern. Für den Fall, dass der AP einen Bereich von einigen Quadratmetern umfasst, ist es empfehlenswert, eine höhere Anzahl von IIR-Filtern entsprechend der Modenanzahl unterhalb der Schröderfrequenz einzustellen. Hierdurch wird gewährleistet, dass die stärksten Auslöschungen aufgrund von Raummoden kompensiert werden.

Folgende Abbildung zeigt die Frequenzgangmessung einer vergleichsweise miserablen Hörposition im Bassbereich. Der Frequenzgang weist eine Überhöhung bei ca. 30 Hz über 15 dB und eine Senke bei ca. 70 Hz um 30 dB auf. Während durch die Korrektur die Überhöhung geebnet wird, kann die Auslöschung nur um 10 dB aufgefüllt werden. Damit bleibt ein Einbruch von 20 dB.

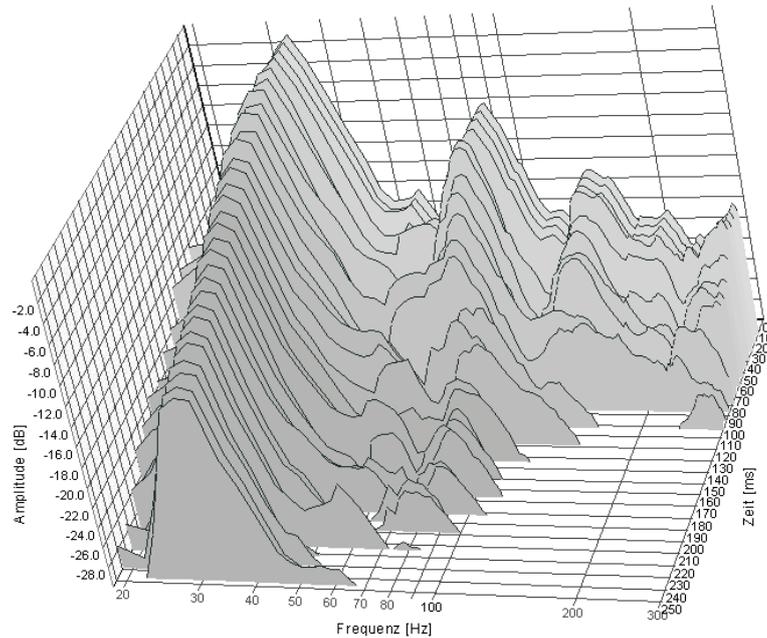
Abb. 21 Frequenzgang einer Hörposition



Quelle: [Goossens & Gutmann, 2008, S. 6]

Das Wasserfalldiagramm in Abb. 22 zeigt den Nachhall der ersten 240 ms bis 300 Hz. Der Bezugspegel entspricht dem Maximalpegel von 0 dB, welcher um bis zu 30 dB abfallen kann. In den ersten 80 ms fallen die Frequenzen oberhalb von 150 Hz deutlich schneller ab als die tieferen Frequenzen. Dies deutet auf ein unregelmäßiges Absorptionsverhalten des Raumes auf den Diffusschall hin.

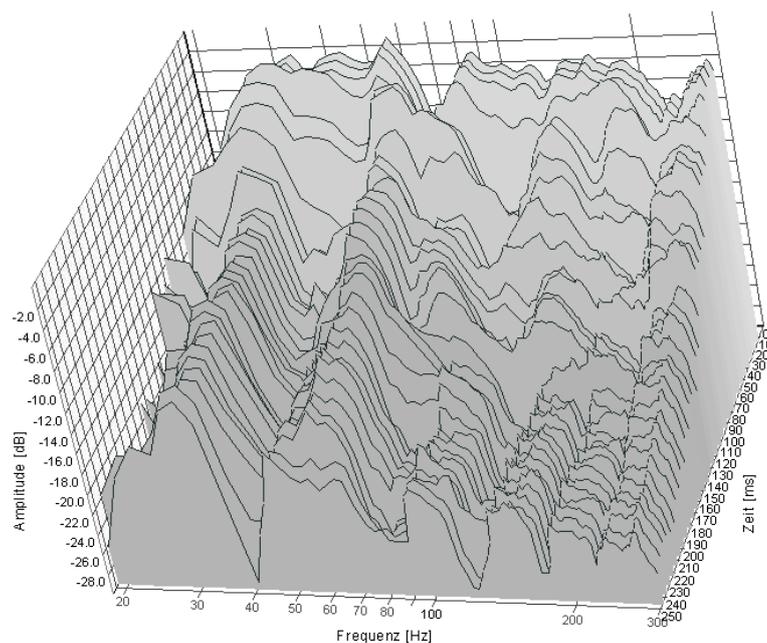
Abb. 22 Wasserfalldiagramm von 20 Hz bis 300 Hz für die Messung an einer Hörposition, ohne Optimierung



Quelle: [Goossens & Gutmann, 2008, S. 7]

Mit eingeschaltetem RCS ist in Abb. 23 in den ersten 80 ms ein schneller Abfall der Amplitude zu erkennen. Die aufgefüllten Lücken und Frequenzen oberhalb von 100 Hz lassen ein gleichmäßigeres Ausschwingverhalten aller Frequenzen erkennen. Das gilt besonders für die 30 Hz Mode. Nach 80 ms bilden sich die charakteristischen Auslöschungen und Überhöhungen des AP ohne Optimierung wieder heraus.

Abb. 23 Wasserfalldiagramm von 20 Hz bis 300 Hz für die Messung an einer Hörposition, ohne Optimierung

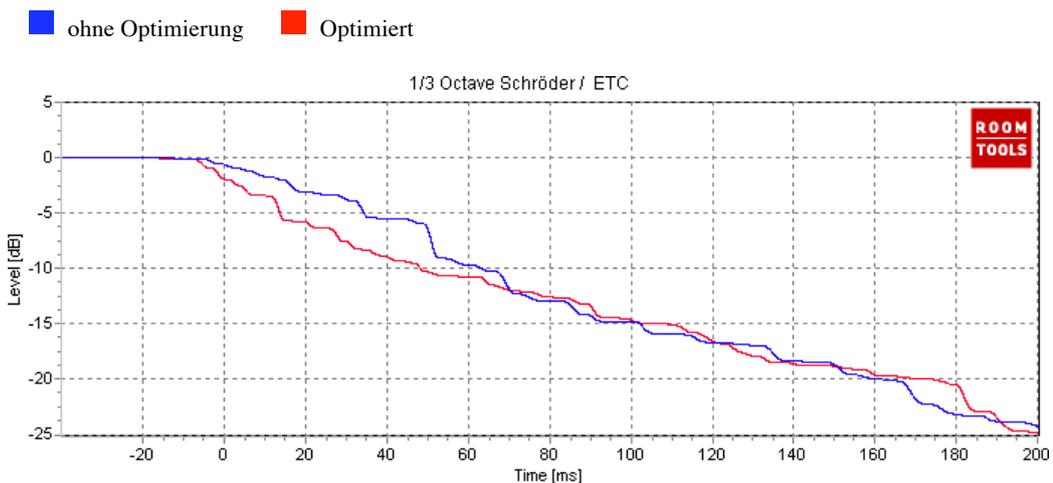


Quelle: [Goossens & Gutmann, 2008, S. 8]

Deutlich wird das verbesserte Abklingverhalten der Energiekurven tiefer Frequenzen auch durch ein Schröder-Plot (Abb. 24). Während die Energiekurve der unoptimierten Akustik bis 70 ms schneller abnimmt, gleicht das Energieniveau ab dieser Zeit dem der optimierten Akustik.

Die Nachhallzeit um einen Pegelabfall von 30 dB bis 60 dB ist für beide Kurven gleichlang. Die EDT (Early Decay Time,) in der die Schröderkurve um 10 dB abfällt, konnte so von 64 ms auf 48 verkürzt werden.

Abb. 24 Schröder-Plot der Energiekurven zwischen 40 Hz und 200 Hz



Quelle: [Goossens & Gutmann, 2008, S. 8]

5.3.2.2 Korrelation der Kanäle

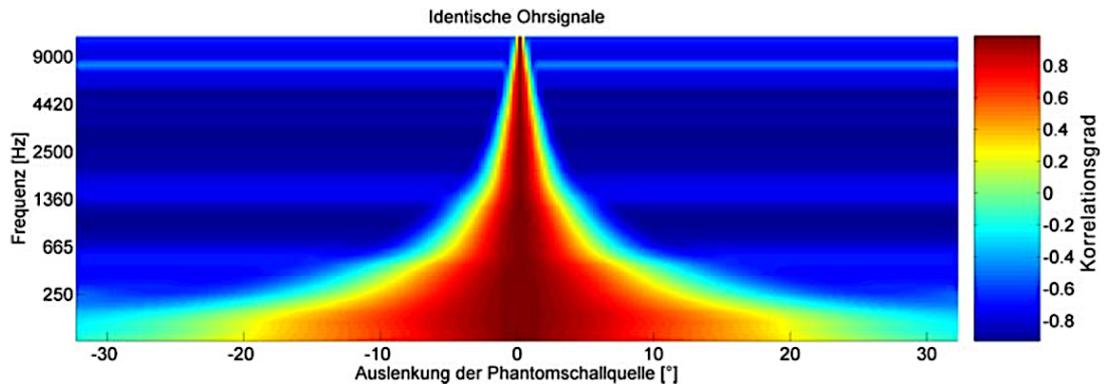
Neben der tonalen Ausgewogenheit und der Zeitrichtigkeit der wiedergegebenen Signale, spielt für den Korrekturvorgang die Korrelation der einzelnen Kanäle zueinander eine wichtige Rolle.⁵⁹ Daher kann es sein, dass Defizite, welche nicht vollständig korrigiert werden können, zumindest aneinander angepasst werden. Besonders die Lokalisationsschärfe wird dadurch verbessert, da diese stark von der Korrelation der Kanäle abhängig ist. Weichen diese durch frequenzabhängige Pegel und Laufzeitdifferenzen voneinander ab, kann dies eine übermäßige Ausdehnung oder eine verzogene Phantommitte zur Folge haben (3.1).

Das von Gutmann entwickelte Analyseverfahren zeigt die objektive Abbildungsschärfe einer Phantomschallquelle, basierend auf einem Wahrnehmungsmodell des menschlichen Gehörs. Das resultierende Diagramm zeigt die Auslenkung der Phantomschallquelle in Grad, bezogen auf die Frequenz. Während hohe Frequenzen scharf lokalisiert werden,

⁵⁹ Wegmann, Expertengespräch, 2016

verschwimmt hin zu tiefen Frequenzen der Korrelationsgrad in die Breite. Grund hierfür ist die zunehmende Wellenlänge.

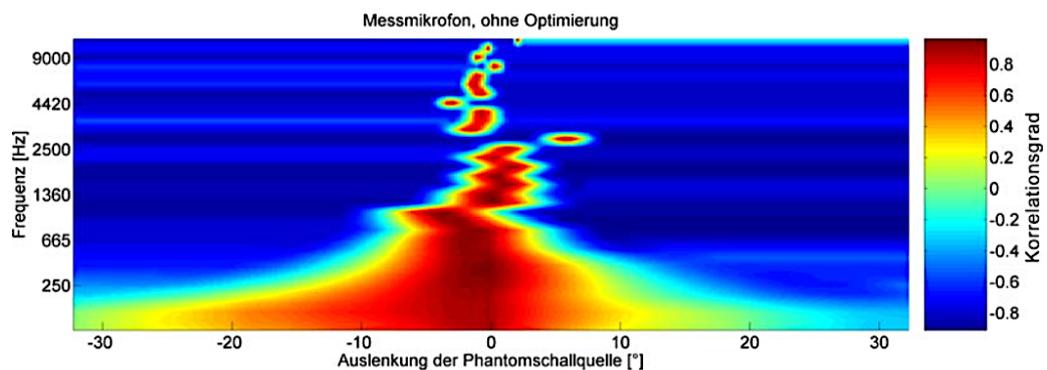
Abb. 25 Analysemethode für die Abbildung der Lokalisationsschärfe einer Phantomschallquelle, identische Ohrsignale



Quelle: [Goossens & Gutmann, 2008, S. 9]

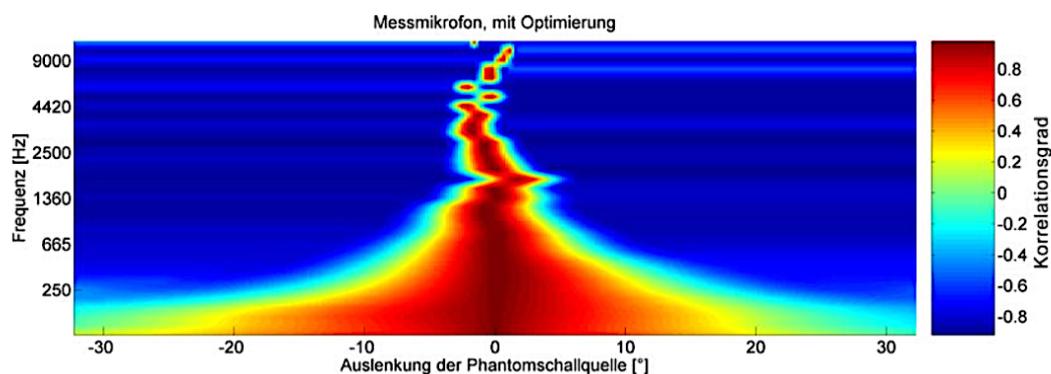
In einer vom IRT (Institut für Rundfunktechnik) durchgeführten Messung per Kunstkopf wurde ein Monosignal aus dem Sweetspot aufgenommen. Dieses wurde subjektiv auf 0 Grad der Stereomitte ausgerichtet. Die objektive Korrelationsanalyse (Abb. 27) zeigt einen leichten Ausbruch nach links bis ca. 1,1 kHz. Ab ca. 1,1 kHz bis ca. 3,2 kHz bricht die Auslenkung der Phantomschallquelle zunehmend nach rechts aus, bis sie bei ca. 3 kHz um 7° verschoben ist. Auffällig sind Abrisse in der Auslenkungskontinuität bei 2,6 kHz, 4,2 kHz und um 9 kHz.

Abb. 26 Auswertung zur Lokalisationsschärfe, ohne Optimierung



Quelle: [Goossens & Gutmann, 2008, S. 9]

Die optimierte Abhörsituation tendiert im Gegensatz zur belassenen deutlich zum Ideal bei identischen Signalen. Verschiebungen aus der Phantommitte sind nur noch bis 2° zu erkennen. Auch Abrisse sind bis 4,5 kHz nicht zu erkennen.

Abb. 27 Auswertung zur Lokalisationsschärfe, mit Optimierung

Quelle: [Goossens & Gutmann, 2008, S. 10]

5.3.2.3 Kompensation erster Reflektionen

Durch den Parameter “Quantity of Early Reflections” lässt sich das Zeitfenster bestimmen, in welchem frühe Reflektionen kompensiert werden. Anders als bei vielen anderen gängigen Optimierungsansätzen, wie per Sweep die Übertragungsfunktion und damit den Frequenzgang am AP zu messen, um entsprechend raumakustische Maßnahmen zu treffen, wird in diesem Schritt ausschließlich versucht, den Direktschall von störenden Reflektionen zu „säubern“. Als Fallbeispiel wird hier vom Hersteller ein frei stehender Lautsprecher genannt, hinter dessen Rückseite sich in einem Abstand eine Wand befindet.⁶⁰ Der durch Beugung kugelförmig abgestrahlte Schall trifft hinter dem Lautsprecher auf die Wand, von der er reflektiert wird. Die Reflektion trifft kurz nach dem Direktschall am AP als zweite Schallwelle mit dem Frequenzgang des nach hinten abgestrahlten Schalls ein. Gemessen am AP wäre der Frequenzbereich, solange das Zeitintervall der Messung beide Schallwellen zusammenfasst, im Amplitudenfrequenzgang erhöht. Eine konservative Korrektur beider Schallwellen per Equalizer würde die Qualität des Direktschalles beeinträchtigen. Dies kann durch die Auslöschung der zweiten Schallwelle verhindert werden.

Um die Reflektion zu kompensieren, regt das RCS durch einen entsprechenden Gegenimpuls den Raum so an, dass am AP die Schallenergie der Reflektion genommen wird. So wird Direktschall von Nachhall „gesäubert“. Der Impuls, der zur Kompensation der Reflektion ausgesendet wird, wird seinerseits weitere ungewollte Reflektionen am AP hervorrufen, welche aber schwächer sind als die der vorhergegangenen Reflexionen. Dieser Prozess wird fünfmal wiederholt, bis die durch die Kompensation hervorgerufenen Auswirkungen schwach genug sind um sie zu vernachlässigen.⁶¹

⁶⁰ Vgl. Trinnov Audio, kein Datum

⁶¹ Vgl. Wegmann, Expertengespräch, 2016

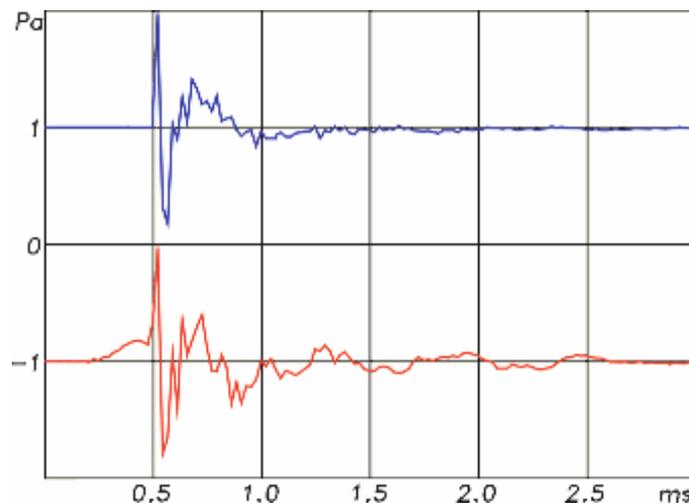
Ein Zeitfenster von „3 cycles“ bedeutet, dass jeweils drei Perioden der entsprechenden Frequenz mit in die Korrektur einbezogen werden. Drei Perioden eines 1 kHz-Tones entsprechen 0,003 s. Reflektionen, die innerhalb dieser Zeit am AP eintreffen, werden korrigiert. Alle später eintreffenden Reflektionen werden als Nachhall betrachtet und ignoriert.⁶²

5.3.3 Korrektur des zeitabhängigen Raum-/Lautsprecherverhaltens

Ein annähernd perfekter Diracimpuls über Lautsprecher lässt sich anhand FIR-Filter oberhalb einer bestimmten Frequenz erzeugen. Diese können das sonstige Laufzeitverhalten eines LS ab dieser Frequenz vollständig kompensieren. Für Mehrwegwiedergabe räumlich versetzter LS gilt dies jedoch nur für einen weit genug entfernten Punkt auf der Mittelachse der Anordnung. Jede andere Position außerhalb dieser Achse führt wieder zu Laufzeitdifferenzen zwischen den Quellen.⁶³

Folgende Abbildung zeigt die Impulsantwort eines 2-Wege-Lautsprechers mit verfrühtem Einsetzen des Tieftöners.

Abb. 28 Impulsantwort eines 2-Wege-Lautsprechers mit (blau) und ohne (rot) Laufzeitkorrektur



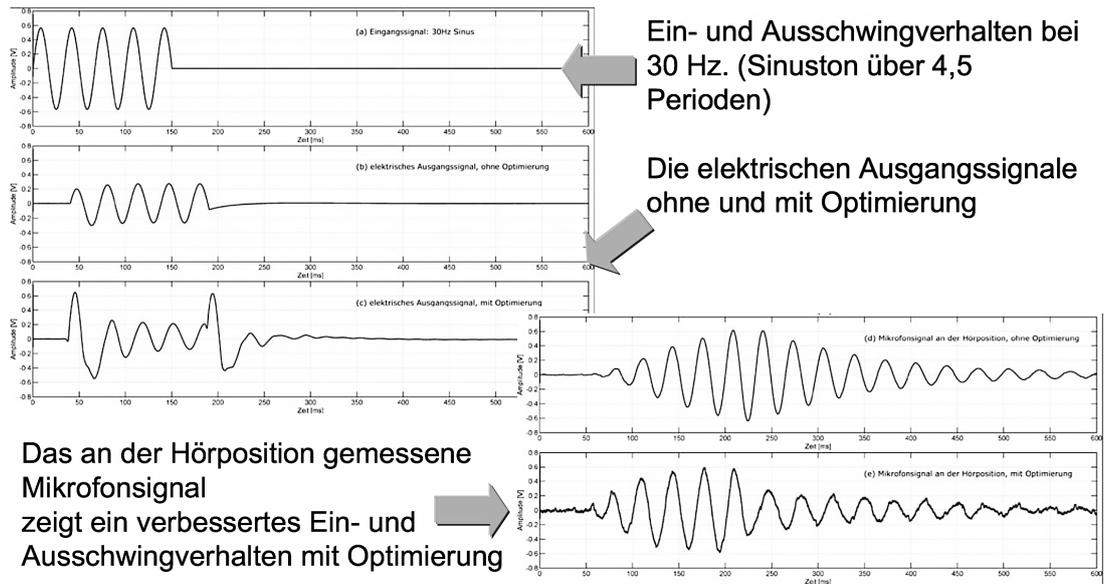
Quelle: [Weinzierl, 2008, S. 476]

Wie Abb. 29 zeigt, kann das Laufzeitverhalten des Ein- und Ausschwingvorgangs tieferer Frequenzen verbessert werden. Dabei wird durch ein verstärktes elektrisches Ausgangssignal bei 40 ms ein schnelleres Einschwingen ermöglicht. Die Phasendrehung und Anhebung des elektronischen Ausgangssignals bei 180 ms verkürzt das Ausschwingverhalten.

⁶² Vgl. Trinnov Audio

⁶³ Vgl. Weinzierl, 2008, S. 476

Abb. 29 Signalbearbeitung



Quelle: [Goossens, 2011, S. 12]

5.3.4 Korrektur der Lautsprecherposition

Anhand des „Remapping“-Algorithmus ist es möglich, fehlpositionierte Lautsprecher wahlweise in 2D bzw. 3D auf die Soll-Position der in (4.1.3) beschriebenen ITU-Empfehlung zu verschieben. Dabei basiert der Algorithmus auf einer Kombination der Bildung von Phantomschallquellen zwischen den LS und einer Laufzeit- und Pegelanpassung der einzelnen Kanäle. Im Raum zwischen den LS kann damit theoretisch das gleiche Schallfeld erzeugt werden, wie es mit der tatsächlichen Lautsprecheraufstellung der Fall wäre.

6. Praxis

Im Folgenden werden die Gegebenheiten und das Vorgehen zur objektiven sowie subjektiven Messung erläutert.

6.1 Messungsaufbau

Da es in dieser Arbeit um die Alltagstauglichkeit des RCS geht, waren durch Alltagsstudiosituationen die optimalen Testvoraussetzungen geschaffen. Darum wurden die Räume im Alltagszustand belassen, da sie so optimiert werden sollten. D.h. störende Faktoren wie Klimaanlage wurden nicht ausgeschaltet, offensichtlich reflektierende Flächen nicht im Vorhinein verdeckt.

Generell wird das Messmikrophon auf Ohrhöhe am AP positioniert und gerade auf die Stereo- bzw. Surroundmitte ausgerichtet. Einzig im Hardcut wurden neun Messungen durchgeführt, welche zum Ziel hatten, die Fläche des optimierten Schallfeldes je nach Gewichtung der Messpunkte zu vergrößern.

Der AP befand sich meist nicht exakt, sondern nur ungefähr im Sweetspot des Stereodreiecks. Dies war durch den tatsächlichen AP der jeweiligen Studios bedingt.

6.2 Testräume

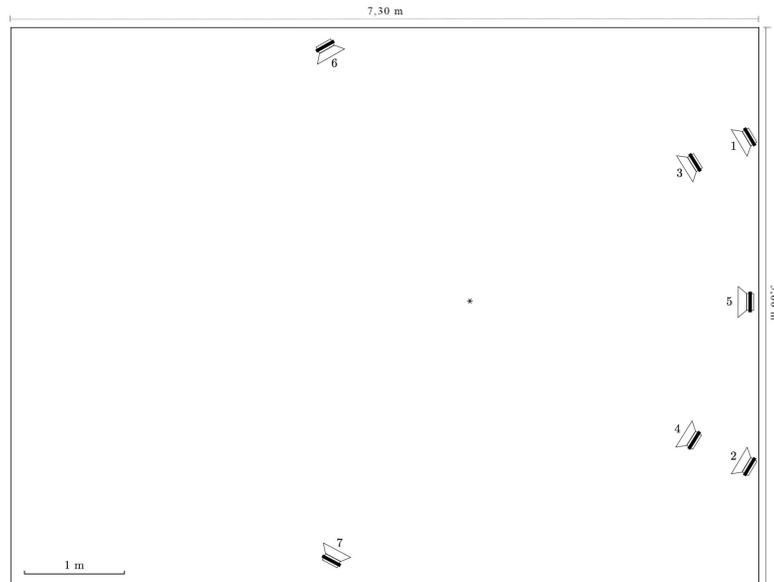
Um einen möglichst umfangreichen Eindruck bei der Arbeit mit dem RCS zu erhalten, wurden vier Räume eingemessen, welche hauptsächlich oder unter anderem als Regie genutzt werden. Dabei waren zwei akustisch aufwändig ausgebaute Studios, ein kaum akustisch behandeltes Homestudio und der HardCut der HdM Stuttgart, welcher auch als Kinosaal verwendet wird.

6.2.1 HdM Stuttgart, A Regie

In der A Regie wurden zwei Lautsprechersysteme im selben Raum eingemessen. Zum einen das Stereo-Paar Geithain RL 901K und die ADAM S2A 5.1 Anlage. Die Regie bietet ca. 40 m² platz bei einem Raumvolumen von etwa 90 m³. Die Wände sind 2,20 m hoch. Der Center LS befindet sich in einem Abstand von 60 cm zur Wand.

Die Nachhallzeit beträgt 0,18 s. Damit liegt der AP außerhalb des Hallradius (1,27 m).

Die Regie ist aufwändig mit breiten Absorbern in den Wänden, einer abgeschrägten Frontscheibe und einem eindimensionalen Diffusor an der Rückwand vor negativen Raumeinflüssen am AP geschützt.

Abb. 30 HdM A Regie, Lautsprecheranordnung und Grundriss

LS 1: geithain Links; LS 2: geithain Rechts; LS 3: ADAM Links; LS 4: ADAM Rechts; LS 5: ADAM Center; LS 6: Links Surround; LS 7: Rechts Surround; *: AP

Quelle: [Eigene]

Abb. 31 Speaker Information, HdM A Regie

Speaker	Distance	Elevation	Azimuth	Level (dBFS, A-weighted)	Delay	Bass Management Delay	Delay Compensation	Polarity ¹	Crest Factor
1	3.31 m	10.2°	30.5°	-37.8 dB	9.64 ms	3.54 ms	4.49 ms	+	34.2 dB
2	3.32 m	10.4°	-30.7°	-38.2 dB	9.66 ms	3.54 ms	4.47 ms	+	34.3 dB
3	2.65 m	1.5°	31.7°	-35.4 dB	7.73 ms	3.54 ms	6.39 ms	+	37.3 dB
4	2.65 m	1.4°	-31.9°	-35.3 dB	7.73 ms	3.54 ms	6.39 ms	+	36.3 dB
5	2.81 m	0.9°	-0.2°	-41.1 dB	8.19 ms	3.54 ms	5.94 ms	+	36.4 dB
6	2.95 m	1.6°	119.4°	-44.1 dB	8.59 ms	3.54 ms	5.53 ms	+	35.1 dB
7	2.96 m	1.8°	-117.9°	-40.1 dB	8.62 ms	3.54 ms	5.51 ms	+	34.9 dB
Sub 1	3.58 m	N/A	N/A	-23.6 dB	10.59 ms	0.00 ms	0.00 ms	-	21.8 dB

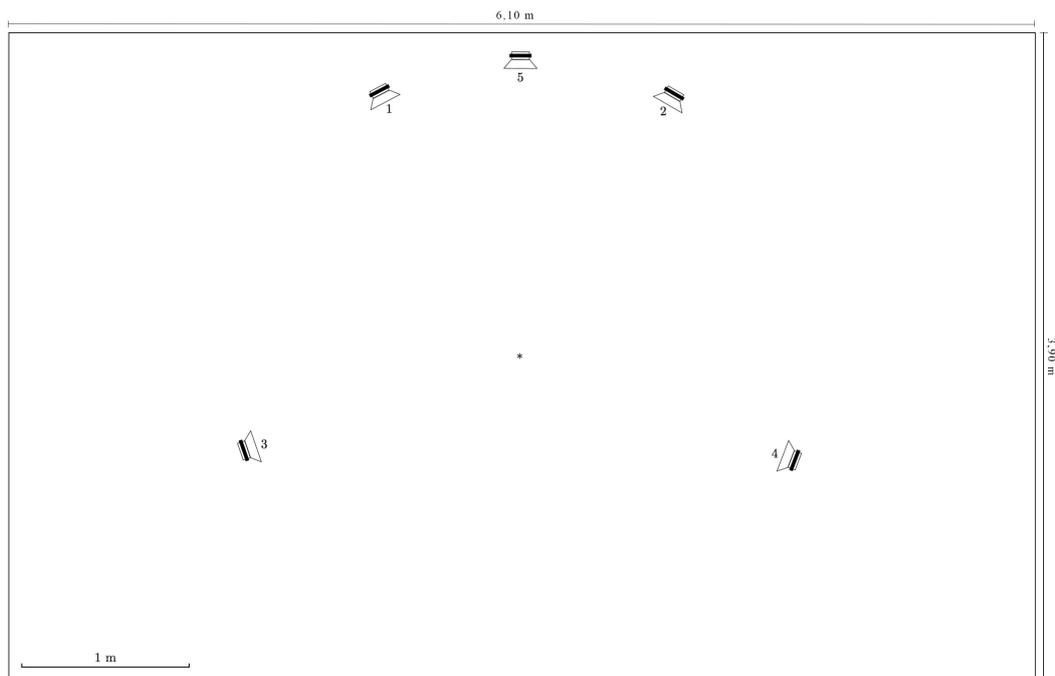
Quelle: [Eigene]

6.2.2 HdM Stuttgart, B Regie

Auf einer Fläche von 23,80 m² misst das Raumvolumen 61,86 m³. Die Raumhöhe beträgt 2,20 m. Der Center-Lautsprecher befindet sich in einem Abstand von 0,65 m zur Wand.

Die Nachhallzeit T₆₀ beträgt 0,19 Sekunden. Der AP liegt ebenfalls außerhalb des Hallradius (1,03 m).

Die Regie ist ebenfalls akustisch mit breiten Absorbern in den Wänden und baubedingt vor direkten frühen Reflektionen und Interferenzen am AP geschützt. Dazu tragen schräge Seitenwände, ein eindimensionaler Diffusor an der Rückwand und breite Absorber in den Wänden bei.

Abb. 32 HdM B Regie, Lautsprecheranordnung und Grundriss

Quelle: [Eigene]

Abb. 33 Speaker Information, B Regie

Speaker	Distance	Elevation	Azimuth	Level (dBFS, A-weighted)	Delay	Bass Management Delay	Delay Compensation	Polarity ¹	Crest Factor
1	1.81 m	4.6°	26.4°	-33.0 dB	5.27 ms	0.00 ms	0.06 ms	+	35.4 dB
2	1.83 m	3.0°	-31.5°	-33.6 dB	5.33 ms	0.00 ms	0.00 ms	+	35.7 dB
3	1.74 m	2.5°	107.6°	-30.2 dB	5.08 ms	0.00 ms	0.25 ms	-	35.2 dB
4	1.76 m	2.2°	-112.1°	-29.7 dB	5.12 ms	0.00 ms	0.21 ms	-	36.0 dB
5	1.82 m	4.9°	-1.4°	-28.7 dB	5.29 ms	0.00 ms	0.04 ms	+	35.5 dB

Quelle: [Eigene]

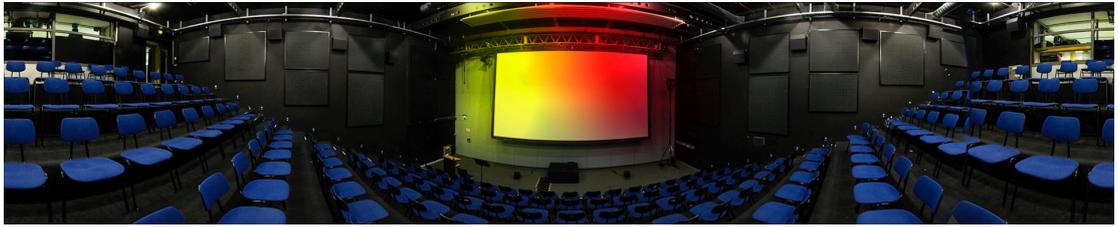
Die B Regie ist besonders interessant, weil dort dieselben Boxen wie in der A Regie zu finden sind und ein ähnlicher Akustikbau betrieben wurde.

6.2.3 HdM Stuttgart, Hardcut

Der große Kinosaal der HdM wurde ursprünglich nie dafür ausgelegt, noch darauf optimiert, besonders „gut“ zu klingen. Außer den Wand- und Deckenabsorbern, die bauseits schon montiert waren, wurde in dem Raum kein Akustikbau betrieben. Trotzdem ist dieser die Hauptbühne für die Präsentationen der meisten *Film*, *visual effects* und *Computeranimation* Produktionen des Studiengangs „*Audiovisuelle Medien*“ an der HdM Stuttgart. Besonders durch seine Raumgröße, die Beschallung von 150 Sitzplätzen und fünffach angesteuerte Surround-Lautsprecher stellt der HardCut eine große Herausforderung dar. Durch die mehrfache Ansteuerung soll als Kompromiss zu einer 5.1 Abhöre nach internationaler Norm,

eine Diffusität für die einzelnen Sitzplätze zu den Surround LS gewonnen werden. So entstehen je nach AP keine allzu großen Unterschiede für das Mischungsverhältnis.

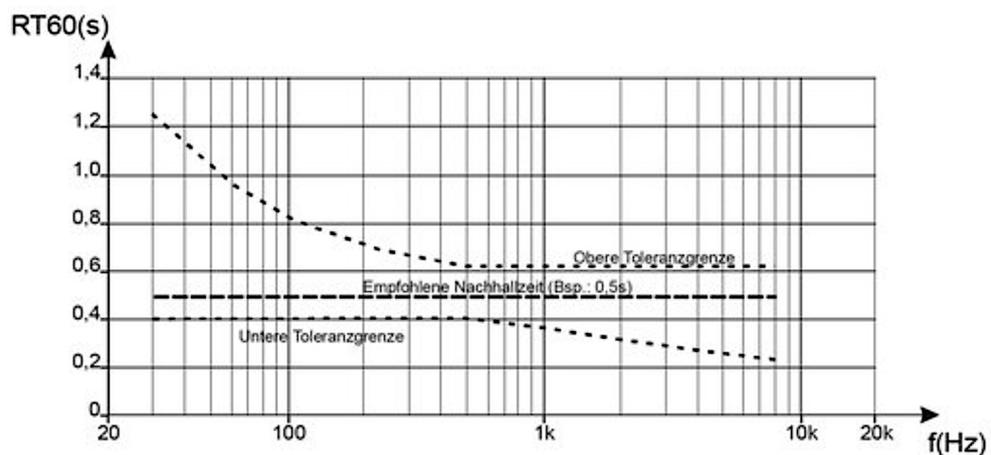
Abb. 34 HardCut 360°



Quelle: [Studiengang Medienwirtschaft, 2015]

Die Raumabmessungen liegen bei 12,50 m Länge auf 11.60 m Breite. Das ergibt eine Fläche von 145 m². Die Sitzreihen in Form eines Treppenstudios umfassen eine Fläche von 70m² in welcher ca. 150 Polsterstühle aufgestuhlt sind. Die Wände sind wie der Boden mit Nadelfilz bezogen. Aufgrund der Oberflächenbeschaffenheit ist von einer zunehmend starken Absorption der Frequenzen ab 2 kHz auszugehen. Ab ca. 4 kHz gibt Dickreiter einen Absorptionsgrad von 0,6 an. Das heißt, dass mehr als die Hälfte der Schallenergie absorbiert wird. Durch den großen Abstand zu den LS ist von einer zunehmenden Absorption für Frequenzen ab 5 kHz auszugehen. Aufgrund der starken Absorption misst das RCS eine Nachhallzeit von nur 0,5 Sekunden. Dies entspricht der dem THX-Standard für 1 kHz.

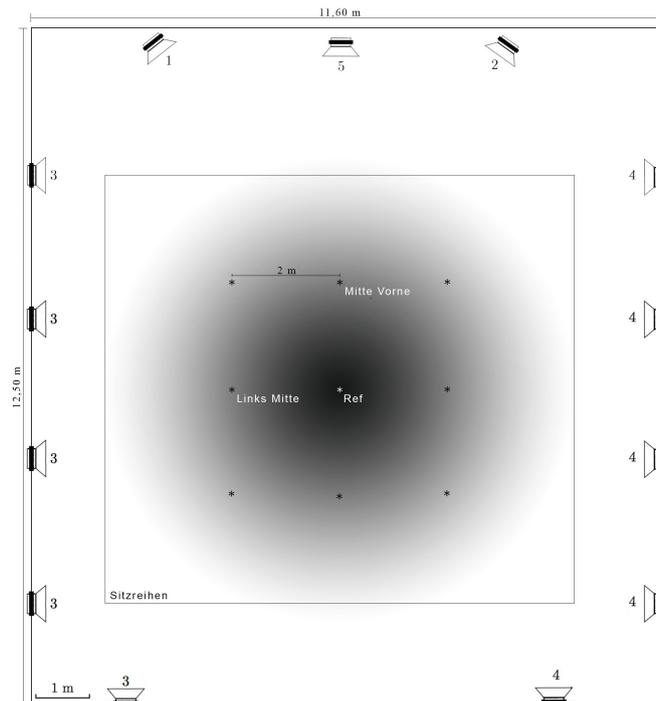
Abb. 35 Toleranzschlauch der Nachhallzeit für ein 1700m³ Kino. $RT(500\text{Hz}) = 0,5\text{s}$



Quelle: [Friesecke, 2007, S. 218]

Im Abstand von 2 m wurden von der Mitte aus 9 Messungen der Akustik im leeren Raum durchgeführt. Der akustische Unterschied eines solchen besetzten Raumes ist laut Dickreiter gegenüber einem unbesetzten gering.⁶⁴ Darum konnte auf eine Messung mit Publikum verzichtet werden.

⁶⁴ Vgl. Dickreiter, 2013, S. 25f.

Abb. 36 HdM HardCut, Lautsprecheranordnung und Grundriss

Quelle: [Eigene]

Abb. 37 Speaker Information, Hardcut

Speaker	Distance	Elevation	Azimuth	Level (dBFS, A-weighted)	Delay	Bass Management Delay	Delay Compensation	Polarity ¹	Crest Factor
1	7.56 m	4.8 °	-94.1 °	-35.4 dB	22.02 ms	0.00 ms	0.25 ms	+	32.0 dB
2	7.64 m	6.5 °	-141.8 °	-35.7 dB	22.27 ms	0.00 ms	0.00 ms	+	32.1 dB
3	6.28 m	19.4 °	-36.8 °	-43.9 dB	18.29 ms	0.00 ms	3.98 ms	+	29.5 dB
4	5.87 m	24.8 °	162.4 °	-43.8 dB	17.10 ms	0.00 ms	5.17 ms	-	30.6 dB
5	6.97 m	7.7 °	-120.3 °	-34.2 dB	20.31 ms	0.00 ms	1.96 ms	+	32.0 dB
Sub 1	7.31 m	N/A	N/A	-28.1 dB	21.25 ms	0.00 ms	1.02 ms	-	19.6 dB

Quelle: [Eigene]

Die acht äußeren Punkte wurden mit der Gewichtung 1 zu 2 in die Lautsprecher-/Raumkorrektur mit einbezogen. In Abb. 36 wird durch den Kreisverlauf die Korrekturgewichtung mit zunehmender Schwärze zur Mitte dargestellt. Der Sweetspot wurde dabei als Referenzpunkt („Ref“) verwendet. Ziel der Entzerrung war, innerhalb der Stuhlreihen eine möglichst tonale Ausgewogenheit zu schaffen. Gleichzeitig ist davon auszugehen, dass dies nicht für alle Plätze des Kinos im selben Niveau erfüllbar ist. Da vom Verständnis dieser Tatsache auszugehen ist, wurde die Korrektur zunehmend auf die Mitte der Stuhlreihen konzentriert.

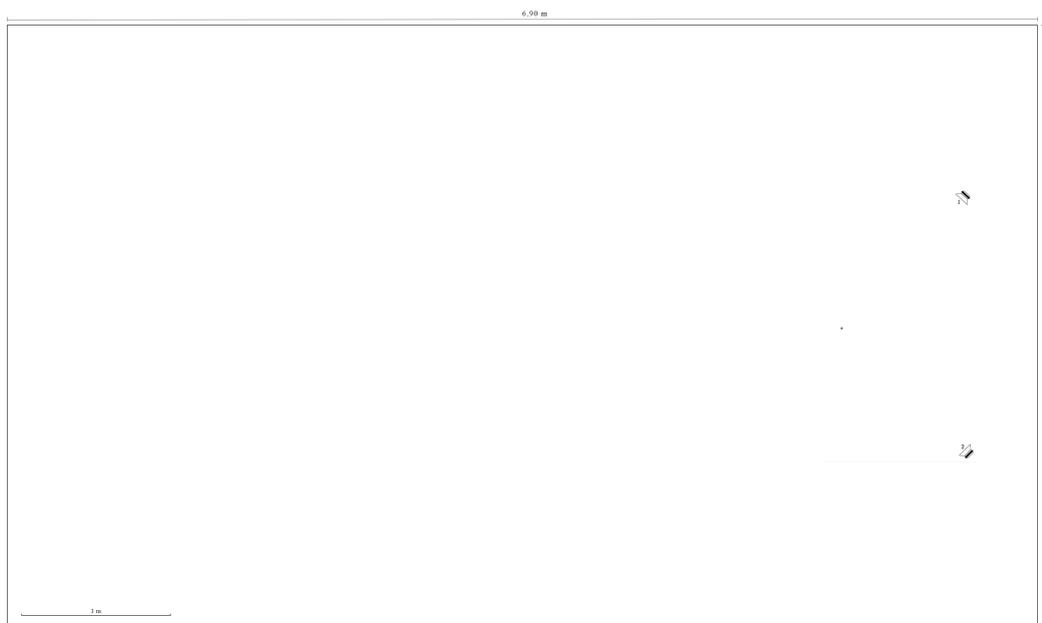
6.2.4 Homestudio

Das Homestudio des Musikproduzenten und Sounddesigners vereint Produktion und Recording in einem. Bis auf wenige Reflektoren, vereinzelte Absorber an den Wänden, einen schweren Vorhang auf der rechten Seite und einen dicken Teppich wurden keine

Akustikelemente installiert. Darum ist mit einer vergleichbar hohen Nachhallzeit und starken Reflektionen am AP zu rechnen.

Das Homestudio hat ein Volumen von 82.04 m^3 auf einer Fläche von $28,29 \text{ m}^2$. Die Wände sind $2,90 \text{ m}$ hoch und die Nachhallzeit (T60) beträgt $0,25 \text{ Sekunden}$. Auch hier befindet sich der AP außerhalb des Hallradius ($1,03 \text{ m}$).

Abb. 38 Homestudio, Lautsprecheranordnung und Grundriss



Quelle: [Eigene]

Abb. 39 Speaker Information, Homestudio

Speaker	Distance	Elevation	Azimuth	Level (dBFS, A-weighted)	Delay	Bass Management Delay	Delay Compensation	Polarity ¹	Crest Factor
1	1.23 m	-2.0 °	47.2 °	-38.8 dB	3.58 ms	0.00 ms	0.00 ms	+	35.3 dB
2	1.20 m	-0.4 °	-44.7 °	-38.4 dB	3.52 ms	0.00 ms	0.06 ms	+	35.1 dB

Quelle: [Eigene]

6.3 Hörversuch der entzerrten Abhörsituation

Im Rahmen dieser Arbeit wurden 20 Tonexperten zu einigen subjektiven Qualitätsparametern des Schallfeldes im akustisch optimierten Raum befragt. Die Untersuchung fand in der A Regie der HdM Stuttgart statt.

6.3.1 Teststrategie

Für die Bewertung einiger subjektiver Qualitätsparameter der Akustik wurde ein Referenz-Vergleichstest durchgeführt. Dabei konnte die Testperson zwischen der optimierten und

unbehandelten Akustik umschalten. Diese Teststrategie eignet sich besonders, da hier selbst kleine Qualitätsunterschiede bemerkt werden können.⁶⁵

Den Versuchspersonen wurde die Möglichkeit gegeben, für jedes Stück den Abhörpegel individuell einzustellen. Dessen Zweck war es, sowohl eine möglichst gewohnte Studioumgebung zu bieten um die Hörerfahrung der Vpn optimal zu nutzen, und das RCS pegelunabhängig zu bewerten.

6.3.2 Qualitätsparameter

Um die komplexen Sinneswahrnehmungen spezieller Qualitätsaspekte in einer Skala festzuhalten, bedarf es differenzierter Parameter, die eine Bewertung möglich machen. Da die Möglichkeit besteht, dass die Differenzierung einzelner Parameter für einzelne Testpersonen nicht eindeutig abzugrenzen ist, befindet sich am Ende der Umfrage ein globales Attribut zur Bewertung der Gesamtabhörqualität. Nach der Empfehlung ITU-R [BS.1284] wird dabei mit einer Vergleichsskala der Unterschied zum unbearbeiteten Schallfeld bewertet.⁶⁶ Der Bewertungsbogen ist als „Abb. 62 Umfrage, subjektive Qualitätsparameter der Akustik“, im Anhang zu finden.

6.3.3 Testtitel

Bei der Auswahl des Hörmaterials war darauf zu achten, möglichst vielseitige Stücke in Sachen Frequenzspektrum, Dynamik und Tiefenstaffelung anzubieten. Einseitig gemischtes Material, wie „dünn“ oder „basslastig“ hätte evtl. zu einseitigen Ergebnissen geführt. Auch ein einseitiger Musikstil aus der so genannten Unterhaltungsmusik (nah mikrophoniert) hätte Fragen gegenüber E-Musik (Jazz, Klassik) offen gelassen. Unter der Annahme, dass zu viele Testbeispiele möglicherweise die Ergebnisse durch Ermüdungserscheinungen oder Gewöhnung an Defizite verwässern könnte, wurde der Hörtest auf drei Titel beschränkt.

Im Vorfeld des Hörversuchs gab es bereits einen Vergleichstest mit Titeln, welche in der A Regie der HdM Stuttgart gemischt wurden und auswärts gemischtem Material. Dabei ergab sich, dass eine akustische Optimierung der bereits in der unbehandelten Akustik gemischten Stücke die Wiedergabequalität, bis auf die Phaseneigenschaften, nur geringfügig verbesserte. Hier würde sich eine Raumkorrektur unter Umständen sogar eher negativ als positiv auswirken, da bereits bestehende Resonanzen und frühe Reflektionen in die Mischung unbewusst miteingeflossen sind. Daher wurden keine Titel in den Versuch miteinbezogen, welche in selbiger Regie gemischt wurden.

Versuch 1: Sprachaufnahme

- *Bob Endress, Chesky Jazz Sampler: Left-Right Imaging Test*

Vgl. Dickreiter, 2008, S. 1166

⁶⁶ Vgl. Dickreiter, 2008, S. 1169f.

Da die menschliche Stimme unabhängig von der musikalischen Hörerfahrung vertraut ist, bietet sich hier der „Left-Right Imaging Test“ von *Chesky Records Jazz* an. Dieser bietet zudem die Möglichkeit eines Lokalisationstests. Dabei nimmt der Sprecher vier Positionen ein, welche er dem Hörer mitteilt. Gewöhnliche sowie ungewöhnliche Stereo-Positionen fordern die Stereoabbildung. Ausgehend vom Center bewegt er sich zur halblinken Position. Von dort zur 100% linken Position. Zuletzt steht er außerhalb des Stereodreiecks. Der Vorgang wird für den rechten Kanal wiederholt. Jeweils die Position außerhalb des Stereodreiecks kann nur von optimal korrelierenden Kanälen wiedergegeben werden. Andernfalls wird der Sprecher zum Großteil aus der Phantomschallmitte lokalisiert.

Versuch 2: Musik

- *Daft Punk - Get Lucky*

Nicht umsonst wird der Titel für etliche Lautsprechertests herangezogen. Er bietet „eine Weite und Luftigkeit, die den gesamten Hörraum einbezieht“. Durch seine Bekanntheit schleicht sich ein Gefühl dafür ein, wie er klingen sollte. Überraschen kann nur noch, wie er frequenz- und phasenkorrigiert klingen kann. Die „sehr saubere und transparent gemasterte Produktion“⁶⁷ hält, wie wir später sehen werden, viel für einen optimierte Akustik bereit.

Versuch 3: 5.1 Musik

- Diana Krall - I Remember You

Der Jazz-Titel bietet durch seine Orchesterbegleitung ausgezeichnete Möglichkeiten, ein Surround-System voll auszufüllen. Der Mix nützt diese voll aus. Dabei sind die perkussiven Jazz-Elemente deutlich vom Orchester abgehoben und im Surroundbild verteilt. Darüber schwebt sanft bis kraftvoll die Stimme, welche vom Orchester umhüllt wird.

6.3.4 Kunstkopfaufnahmen

Um die ungerichteten Kunstkopf-Kugelmikrophone in den Durchschnittsohren, sind alle für das Richtungshören wichtigen anatomischen Eigenschaften eines menschlichen Kopfes nachgebildet. Durch den Ohrabstand, einen schallharten Körper dazwischen und die Form der Ohrmuscheln, kann das Schallfeld für den Hörer annähernd naturgetreu aufgezeichnet und mit Kopfhörern wiedergegeben werden. Dies funktioniert umso besser, je ähnlicher das eigene Ohr diesem Durchschnittsohr gleicht.

Die auf der Anhang-CD befindlichen Titel der Kunstkopfaufnahmen repräsentieren bedingt die subjektiven Verbesserungen der Abhörsituation. Einschränkungen durch die Kopfhöreriwiedergabe wirken sich vor allem auf die Lokalisationsschärfe aus, da der Kopf im Bezug zur Schallquelle nicht geneigt werden kann. Die Veränderungen der Kammfilter im Ohr

⁶⁷ Nubert nuVero 3 – der Klang:, 2013

durch eine Kopfneigung spielen für die Lokalisationsfähigkeit eine entscheidende Rolle. Weitere Abweichungen kommen durch die verwendeten Kopfhörer der Wiedergabe hinzu. Darum sollten wohlbekannte, möglichst neutrale Kopfhörer verwendet werden.

Die Aufnahmen sind jeweils nach folgendem System benannt:

„Titelname, Aufnahmeort, Format, Position, un/optimiert“.

Bei fehlender Angabe ist von Standardformat, -position und oder ausgeschaltetem RCS auszugehen.

Neben den Aufnahmen der drei Titel in un-/optimierter Akustik befinden sich auf der Anhangs-CD auch Spezialaufnahmen wie die (beinahe) reine Phasenkorrektur eines Titels, oder die Aufnahme einer Autoverfolgungsjagd in Surround.

7. Ergebnisse

In Folgendem werden die Korrektoreinstellungen, Messungen und Ergebnisse geschildert und ggf. interpretiert.

7.1 Korrektoreinstellungen

Die Akustik wurde jeweils mit 10 dB Anhebung bzw. Absenkung optimiert, um einen deutlichen Unterschied zur ursprünglichen Abhörsituation zu gewährleisten. Persönlich bevorzuge ich einen schwächeren Eingriff (etwa ± 6 dB), da eine zu starke Bearbeitung das Schallfeld leicht künstlich wirken lässt. Bildlich ist dies mit einem übertrieben ausgereizten HDR (High Dynamic Range) Bild zu vergleichen. Zwar sind alle Farben besser als bei einem herkömmlich belichteten Bild zu sehen, jedoch wirkt es künstlich und verliert durch die Trennung zur Realität an Charme.

Abb. 40 Einstellungen der elektronischen Korrektur

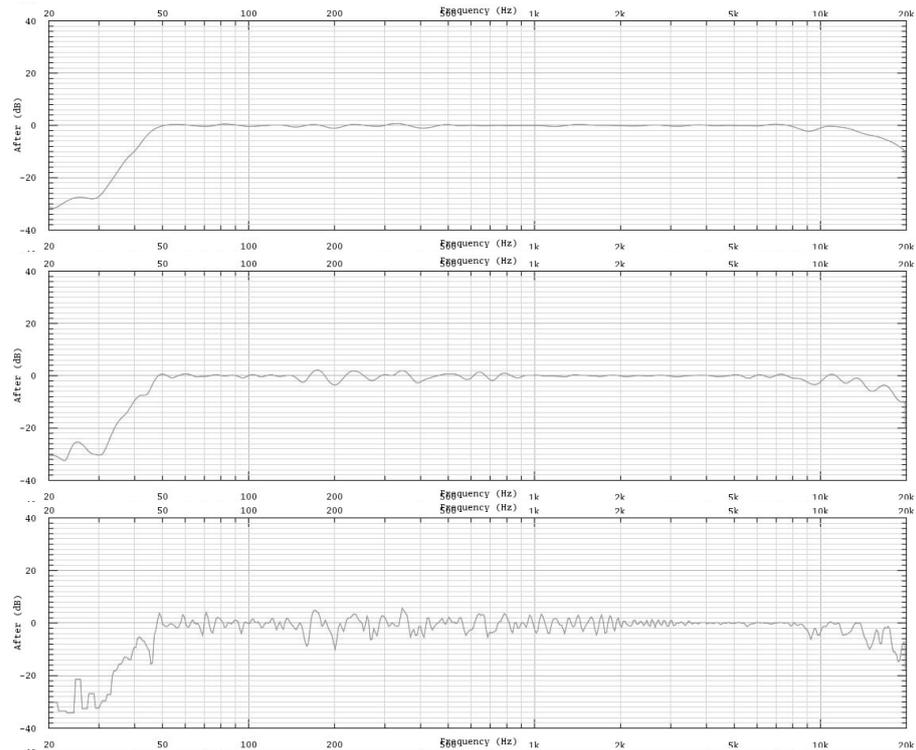
General settings	Sample rate	48000
Acoustics correction settings	Optimize	Amplitude + Phase
	Maximum Boost	10 dB
	Maximum Attenuation	-10 dB
	Quantity of Early Reflections	3 cycles
Display settings	Resolution of Energy Response	1/6 oct
	Display smoothing	1/6 oct

Quelle: [Eigene]

Die Wahl der Korrekturauflösung wurde aufgrund der 24 hörbaren Frequenzgruppen getroffen. Bei Frequenzen oberhalb von 500 Hz teilt das Gehör die hörbaren Frequenzgruppen in kleine Terzen ein. Um eine optimale, aber nicht übertriebene Korrektur innerhalb der Frequenzgruppen zu gewährleisten, wurde die Stufe über der Terz, bzw. 1/3 Oktaven- also die 1/6 Oktaven-Auflösung gewählt (3.1.1). Weinzierl bezeichnet die 1/6 Oct-Auflösung ebenfalls als „praxistauglich und gehörriechtig“.⁶⁸

In folgender Abbildung sehen wir den korrigierten Frequenzgang des Center-Lautsprechers im HardCut Kino der HdM Stuttgart am mittlerem Messpunkt vorn. Dabei ist jeweils dieselbe Auflösung der Display-Glättung wie in den Korrektoreinstellungen gewählt. Gegenüber der 1/6 Oct. Glättung wirkt die 1/3 Oct. Optimierung geradezu perfekt, obwohl diese, wie die 1/32 Oct. Auflösung erahnen lässt, ohne die massive Glättung keinesfalls glatt ist. Die massiven schmalbandigen Einbrüche im Amplitudenfrequenzgang der 1/32 Oct. Auflösung scheinen zunächst furchterregend. Diese werden jedoch durch die Maskierungseffekte des Gehörs und durch Bildung der Frequenzgruppen überdeckt.

⁶⁸ Weinzierl, 2008, S. 473

Abb. 41 Amplitude, Hardcut, Center, 1/3, 1/6, 1/32 Octave Glättung

Quelle: [Eigene]

Während FIR-Filter über das ganze Frequenzspektrum arbeiten, ist für die IIR-Filter, welche nur für den tieffrequenten Bereich zuständig sind, eine Maximalfrequenz einzustellen. Dabei ist zu berücksichtigen, dass der Subwoofer entsprechend nach oben korrigiert wird, sofern man dessen Amplitudenkorrektur nicht manuell einschränkt. Davon unabhängig, ob höhere Frequenzen vom Subwoofer gut wiedergegeben werden können, rückt die Lokalisierbarkeit hin zum Subwoofer, was generell unerwünscht ist. Im Optimalfall sollte die gewünschte Grenzfrequenz gleich der maximalen IIR Filterfrequenz sein. Für folgende Korrekturen wurde eine Maximalfrequenz von 150 Hz gewählt.

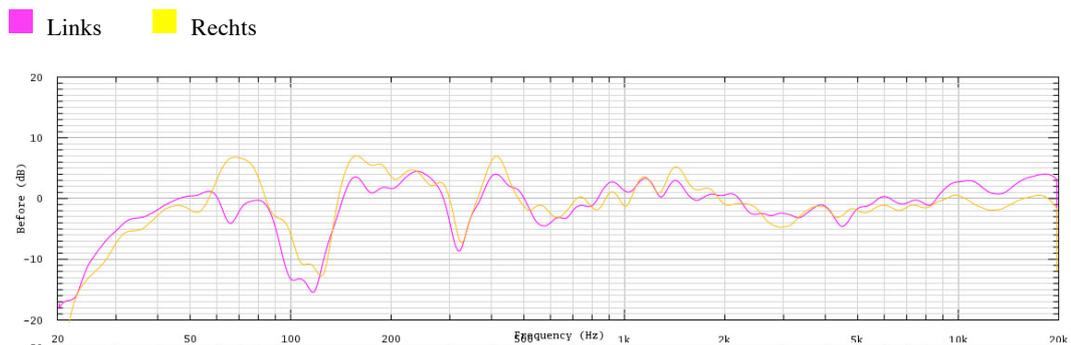
7.2 Analyse- und Korrekturergebnisse

Für die in 6.2 beschriebenen Räume findet im Folgenden eine Analyse und Interpretation der Messergebnisse statt. Dabei wird die mit den beschriebenen Parametern optimierte mit der ursprünglichen Akustik verglichen. Um welche es sich handelt, lässt sich an der Bezeichnung „Before“ bzw. „After“ auf der linken Seite der Abbildung erkennen. Exemplarisch wird zusätzlich für die A Regie der Filter angezeigt, welcher gesetzt wurde um zur optimierten Akustik zu gelangen. Um die Qualität der Abhörsysteme vergleichbar zu gestalten, wurden die Übertragungsfunktionen normiert.

7.2.1 HdM Stuttgart, A Regie, Messung- und Korrekturergebnisse

Besonders massive Probleme hatte die A Regie im Bereich von 60 Hz bis 150 Hz. Beginnend bei etwa 65 Hz wird vom rechten LS ein etwa 10 dB höherer Schalldruck wiedergegeben als vom linken LS, was in diesem Bereich zur Lokalisationsunschärfe führen würde. Dabei findet eine Anhebung des rechten LS um bis zu 7 dB, beim linken um -4 dB statt. Weiter ab 85 Hz bis 150 Hz eine heftige Mode, welche zu einer Auslöschung bis -15 dB bei 120 Hz auf dem linken und -13 dB bei 130 Hz auf dem rechten LS führt. Bei 100 Hz finden wir für linken und rechten LS einen SPL-Unterschied von 7 dB vor. Ab 150 Hz bis 280 Hz wird der SPL um bis zu 7 dB auf dem rechten LS und 5,5 dB auf dem linken LS verstärkt. 180 Hz weist einen Pegelunterschied von 4,5 dB auf. Ab 290 Hz bis 370 Hz finden wir auf dem rechten LS die zweitstärkste Auslöschung bis knapp -9 dB vor, welche sich zu einer Anhebung auf 7 dB bei 420 Hz anhäuft. Auf dem linken LS verstärkt sich der Pegel um bis zu 4 dB. Von der Auslöschung um -4 dB um 550 Hz steigt der Pegel für beide LS beinahe stetig an bis 1500 Hz auf 5 dB. Weiter finden keine Abweichungen über 3 dB bis kurz vor 20 kHz statt.

Abb. 42 Amplitude, HdM A Regie, LR



Quelle: [Eigene]

Im Gegensatz zum Stereo-Setup fallen Auswirkungen des Raumes auf den Center LS geringer aus. Die stärksten Einbrüche befinden sich mit -10 dB bei 120 Hz und knapp -7 dB bei 600 Hz.

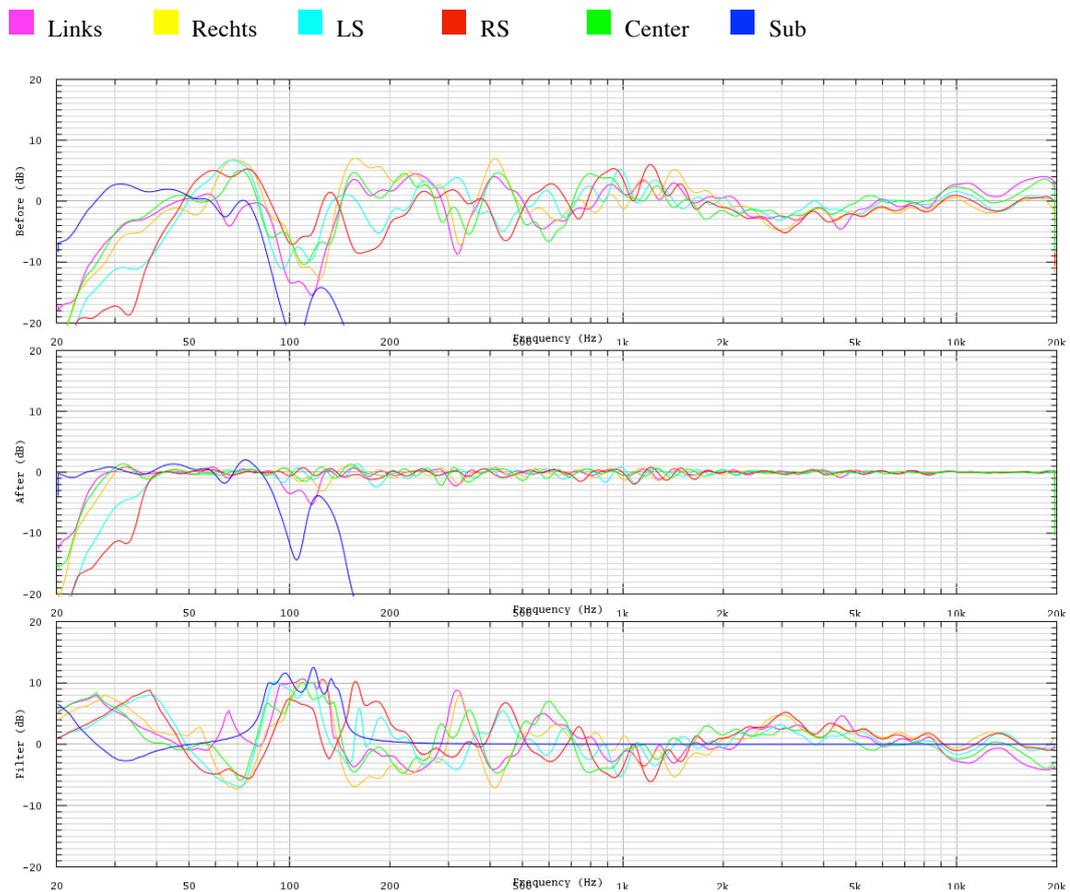
Für den linken Surround-LS befindet sich die erste starke Anhebung bei 70 Hz um 7 dB. Immerhin gleicht diese der Anhebung des rechten LS. Zwischen 80 Hz und 130 Hz befindet sich eine breitbandige Auslöschung um bis zu -11 dB. Die Anhebung um 4 dB bei 220 Hz weicht um 13 dB vom linken LS an selbiger Frequenz ab. Der rechte Surround-Lautsprecher wird zwischen 55 Hz und 80 Hz beinahe gleichmäßig um 5 dB angehoben. Die massivsten Pegel einbrüche befinden sich bei 100 Hz mit -7 dB und 160 Hz mit -8,5 dB. Interessanterweise befindet sich ebenfalls bei 160 Hz die stärkste Anhebung des rechten Lautsprechers. Damit haben die LS bei 160 Hz eine Pegeldifferenz von 16,5 dB. Bei 450 Hz

7. Ergebnisse

befindet sich ein weiterer Einbruch um 6,5 dB. Besonders stechen noch die Anhebungen bei 900 Hz um 5 dB und 1300 Hz um 6 dB heraus. Die Surroundlautsprecher bieten einen etwas späteren Basseinstieg bei 45 Hz gegenüber den anderen LS –mit 40 Hz bei -3dB.

Von selbigem Ansatz her bietet der Subwoofer ab 25 Hz bis 80 Hz einen Pegel über -3 dB. Etwa bei 105 Hz scheint die dortige Mode auch den Bass massiv abzusenken.

Abb. 43 Amplitude, HdM A Regie, Korrektur um ± 10 dB



Quelle: [Eigene]

Bis auf Extreme konnten sämtliche Anhebungen und Auslöschungen korrigiert werden. Bedingt durch die 10-dB-Grenze wurde die Auslöschung des linken LS bei 120 Hz um -15 dB auf -5 dB, und bei 130 Hz von -13 dB auf -3 dB angehoben. Bis auf die genannten Abweichungen der Korrektur finden sich keine Abweichungen über 2 dB ab 40 Hz. Über 1,5 kHz ist keine Abweichung über 1 dB zu erkennen.

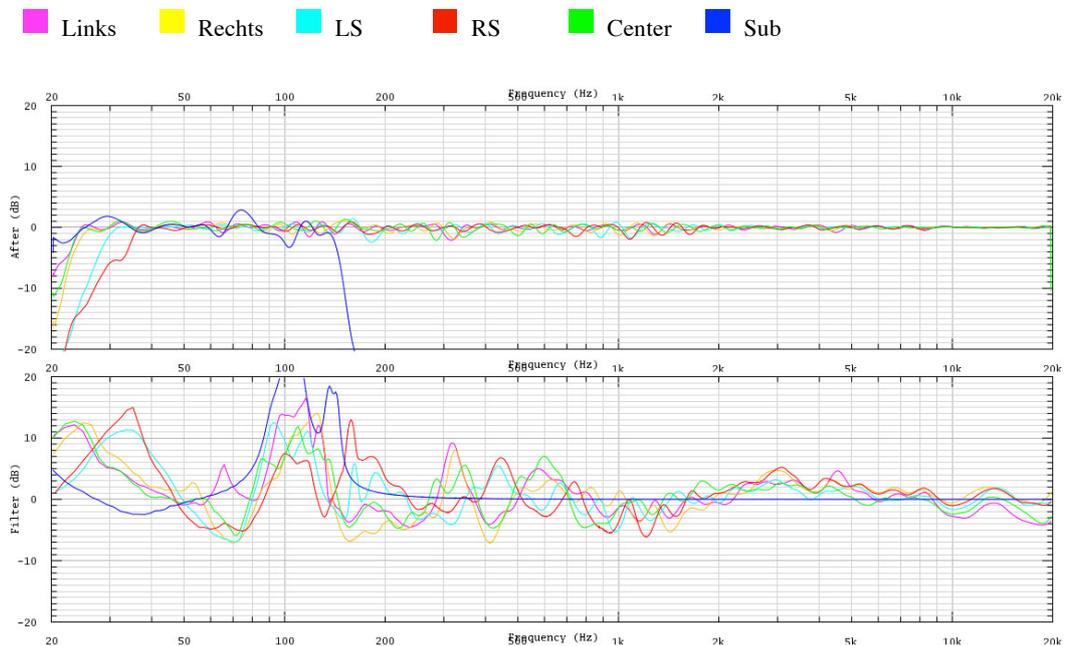
Der gesetzte Filter entspricht dabei einem Negativ der gemessenen Übertragungsfunktion. Dieses und folgendes Beispiel stellen exemplarisch die Arbeitsweise des RCS dar.

Um zu zeigen, dass durchaus eine Korrektur extremer Defizite annähernd korrigiert werden kann, ist in den Ergebnissen folgende Abbildung enthalten. Im Signalfuss werden dabei

7. Ergebnisse

entsprechende Filter gesetzt, um Defizite der Übertragungsfunktion um bis zu ± 20 dB zu korrigieren.

Abb. 44 Amplitude, HdM A Regie, ± 20 dB

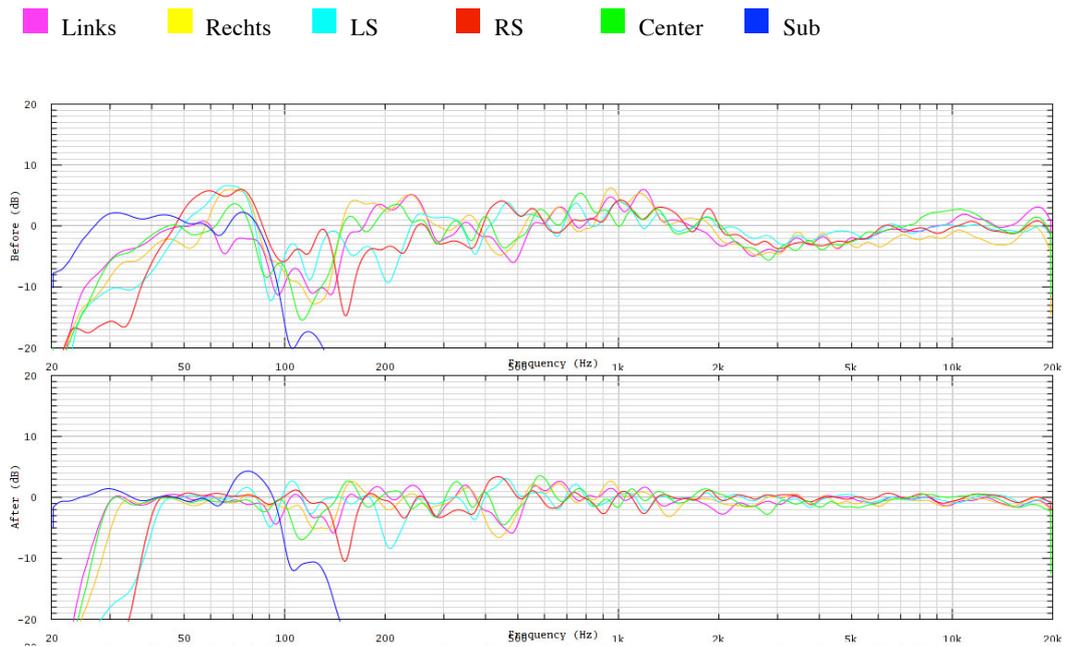


Quelle: [Eigene]

Folgende Messung entstand etwa 30 cm über dem AP der A Regie. Diese soll die Veränderungen des Amplitudenverlaufs durch einen Positionswechsel verdeutlichen. Unterhalb von 90 Hz sind sämtliche Amplitudenverläufe bis auf 1 dB gleich. Bei 110 Hz scheint die Mode weniger stark ausgeprägt zu sein. Das macht sich besonders durch eine 5 dB geringere Absenkung auf den Lautsprecher links, Links-Surround, Center und Sub bemerkbar. Dagegen werden die rechten LS sogar um 1-2 dB mehr abgesenkt.

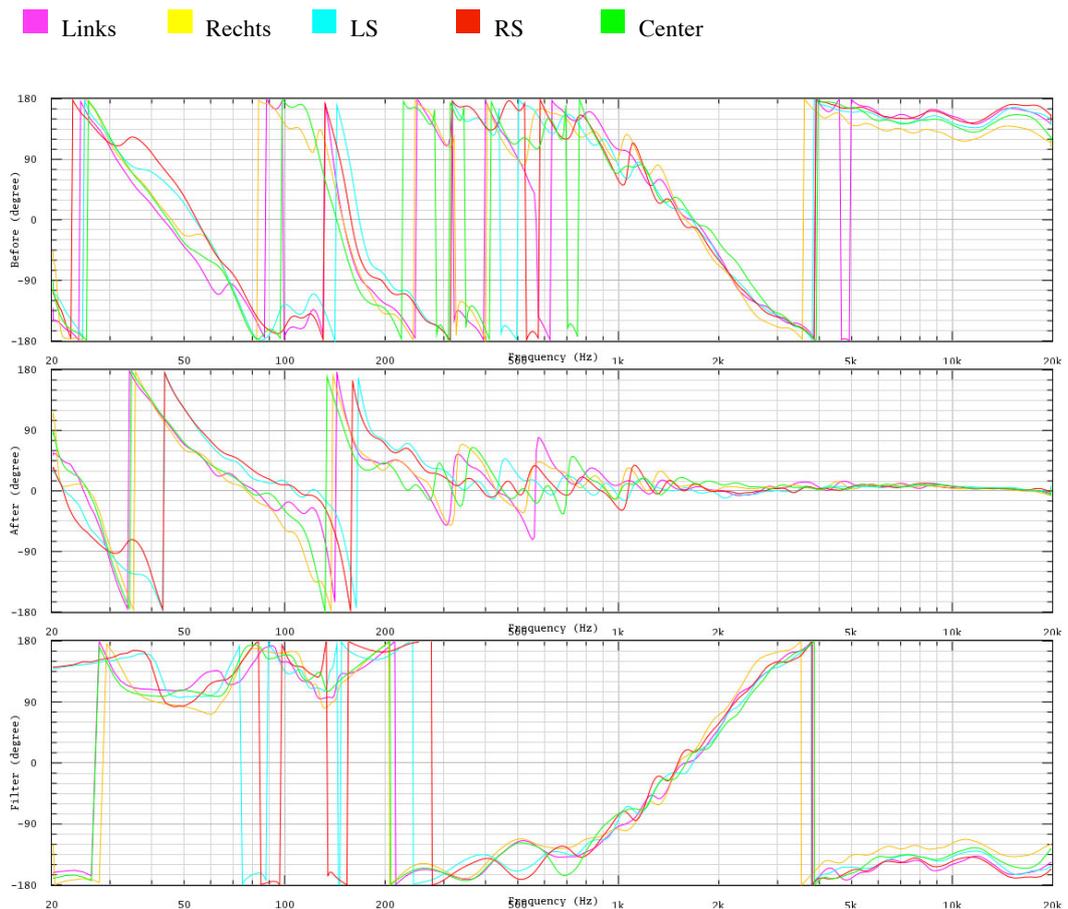
Der rechte Surround-LS wird bei 160 Hz um weitere 6 dB abgesenkt, was an dieser Stelle zu einer Pegeldifferenz von 14 dB zum rechten LS führt. Vom linken LS finden wir eine weitere Absenkung um 7 dB bei 200 Hz gegenüber dem Sweetspot vor.

In 30 cm passt genau eine halbe Wellenlänge von 572 Hz. Damit wird ein Schallwellenmaximum zum -minimum und umgekehrt. Zwischen 400 Hz und 800 Hz kehren sich daher die meisten ehemaligen Auslöschungen nun angehoben um. So wird beispielweise der Output des rechten LS bei 420 Hz um 5 dB abgesenkt, anstatt wie 30 cm tiefer um 7 dB angehoben.

Abb. 45 Amplitude, HdM A Regie, 30 cm höher

Quelle: [Eigene]

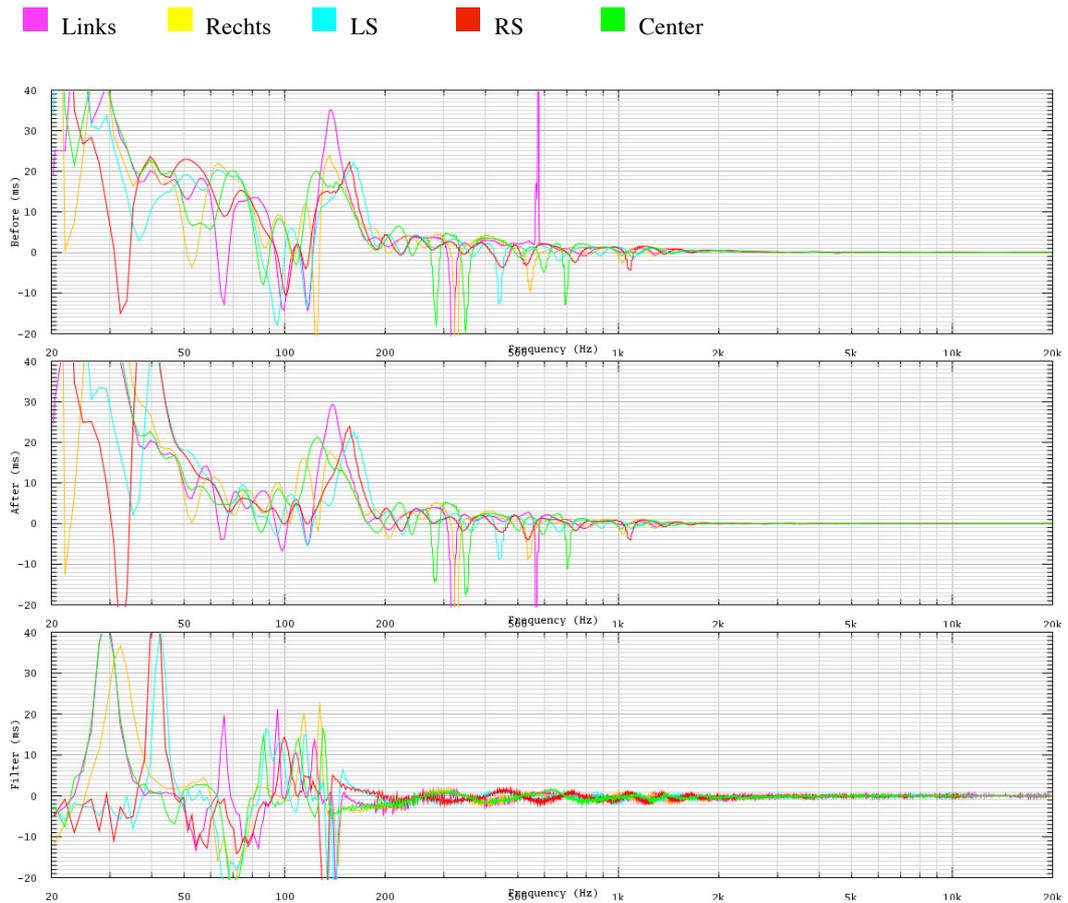
Aufgrund der Latenz erfahren tiefe Frequenzen nur eine leichte Korrektur der Phase (Abb. 46). Teilweise findet nur eine Phasenverschiebung und keine Verbesserung statt. Wie zum Beispiel zwischen Phasensprüngen bei 30 Hz und 90 Hz. Im Gegensatz zum linearen Abfall ähnelt der Phasenverlauf mehr einer $-x^3$ Funktion, für welche der Nullpunkt von 45 Hz auf 80 Hz verschoben wurde. Dabei ist für den mittleren Teil eine deutlich geringere Phasenverschiebung zu erkennen. Von 0° bei 80 Hz ausgehend haben sich die Frequenzen um knapp 90° gegenüber der ursprünglichen bei 0° von 45 Hz ± 20 Hz verbessert. Phasensprünge konnten für die A Regie oberhalb von 150 Hz sehr gut korrigiert werden. Evtl. hat dies etwas mit der hochwertigeren FIR-Filterbearbeitung zu tun. Diese werden durch eine Phasendrehung und einzelne Verzögerungen kompensiert. Von 500 Hz bis ca. 4 kHz ist gut zu sehen, wie der Filter die Phasenverschiebungen durch einen umgekehrten Filter kompensiert. Besonders über 1,5 kHz verläuft dadurch die Phase optimal.

Abb. 46 Phase, HdM A Regie, ohne Sub

Quelle: [Eigene]

Die Phasenkorrektur korrigiert entsprechend die Gruppenlaufzeit. Während vieles verbessert wird, ist die Gruppenlaufzeit unter 50 Hz punktuell deutlich schlechter geworden. Wie zum Beispiel für den rechten LS bei 22 Hz. Während ohne RCS diese Gruppe optimal wiedergegeben wird, kommt sie mit Korrektur 12 ms zu früh am AP an. Der Grund für die zusätzliche Verzögerung für bereits verzögerte Signale ist nicht zu erkennen.

Für die meisten Gruppenlaufzeiten findet zwischen 60 Hz und 150 Hz eine deutliche Verbesserung statt. Die IIR-Filter sind hierbei in der Lage, die verfrühte Abstrahlung des linken LS bei 65 Hz von 13 ms auf 4 ms zu verzögern. Verzögerungen konnten dabei von 20 ms auf unter 10 ms gebracht werden. Die stark verspätete Wiedergabe von 35 ms bei 150 Hz konnte nur um 6 ms auf 29 ms verbessert werden. Unter Umständen wäre hier mit einer höheren Maximalfrequenz der IIR-Filter ein besseres Ergebnis möglich gewesen, da im Gegensatz dazu die FIR-Filter eine deutlich geringere Verbesserung möglich machen. Die extreme Verzögerung von 40 ms bei 580 Hz wird lediglich in das andere Extrem umgekehrt.

Abb. 47 Gruppenlaufzeit, HdM A Regie, ohne Sub

Quelle: [Eigene]

Die Impulsantwort des gesamten LS-/Raumabhörsystems konnte deutlich verbessert werden. Zwar hat sich das Einschwinghalten zeitlich verdoppelt, jedoch in so geringem Maße, dass dies vernachlässigt werden kann. 1 ms nach dem Impuls finden keine deutlichen Verbesserungen mehr statt. Die verbleibenden sind ebenfalls so gering, dass sie vom Hörer ohnehin nicht wahrgenommen werden. Der Graph dient in dieser Hinsicht mehr zur Information über die akustische Lage.

Der Impuls um 6,5 ms der Surround-LS lässt sich mit der Zeitverzögerung von ca. 3,5 ms evtl. auf eine Reflektion und mit einer Umwegstrecke von 1,20 m zurückführen. Was zu entsprechendem Impuls führt, lässt sich aber nicht mit letzter Sicherheit bestimmen. Wie und ob dieser überhaupt wahrgenommen wird, lässt sich nicht sagen.

Abb. 48 Impuls, HdM A Regie

Quelle: [Eigene]

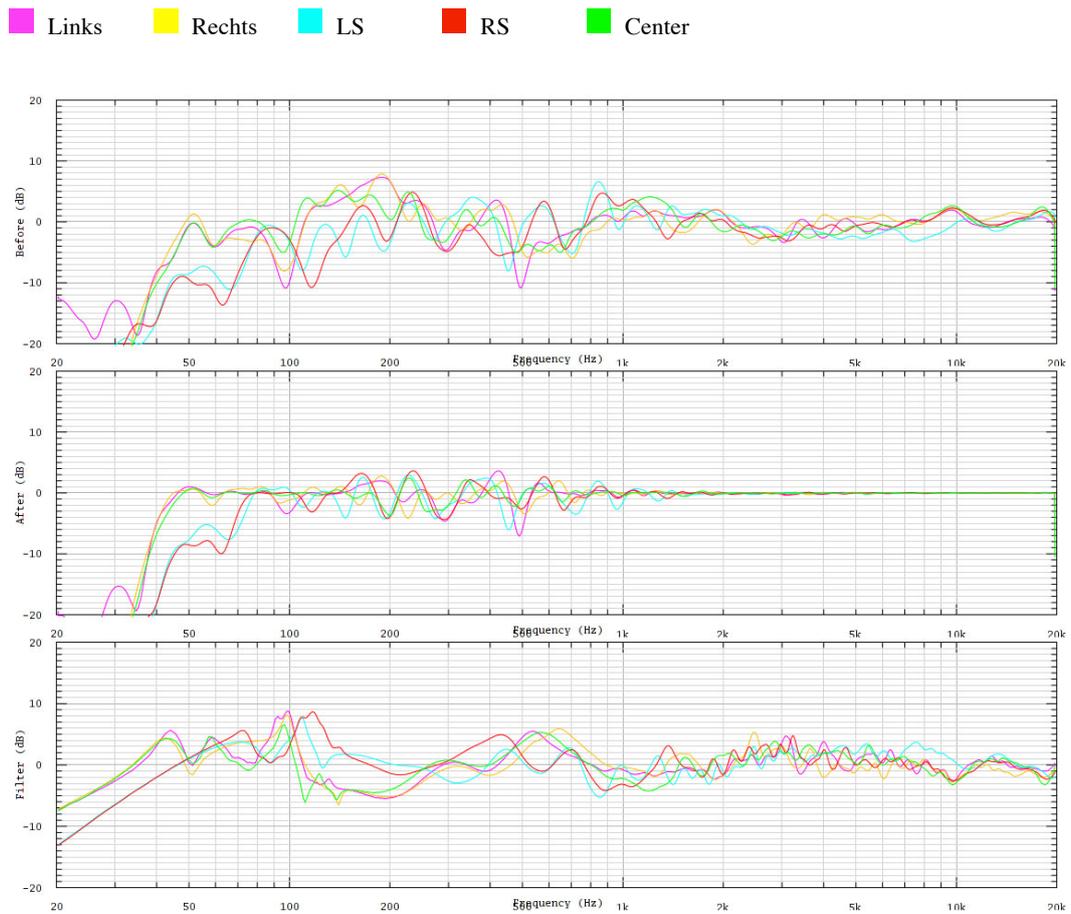
7.2.2 HdM Stuttgart, B Regie, Messung- und Korrekturergebnisse

Für die „B Regie“ fand eine Phasen- und Amplitudenkorrektur von ± 8 dB und die Kompensation der frühen Reflektionen nur auf den Frontlautsprechern statt. Zu Testzwecken soll dabei die Variante eines geringeren Eingriffes untersucht werden. Da der Subwoofer zum Messzeitpunkt leider defekt war, konnte dieser nicht in die Messung miteinbezogen werden. Obwohl es sich bei den Studiomonitoren um die gleichen Lautsprecher wie in der A Regie handelt, haben die Amplituden der Übertragungsfunktionen beider Räume nahezu nichts gemeinsam.

Trotz Verzicht auf die Korrektur der Surround-LS werden diese in ihrer Amplitude einstückweit entzerrt. Der Grund hierfür ist nicht bekannt.

Aufgrund der kleinen Raumabmessungen setzt die untere Grenzfrequenz mit 43 Hz mit -3 dB vergleichbar spät ein. Solche physikalischen Begrenzungen scheinen auch mit RCS nicht erweiterbar.

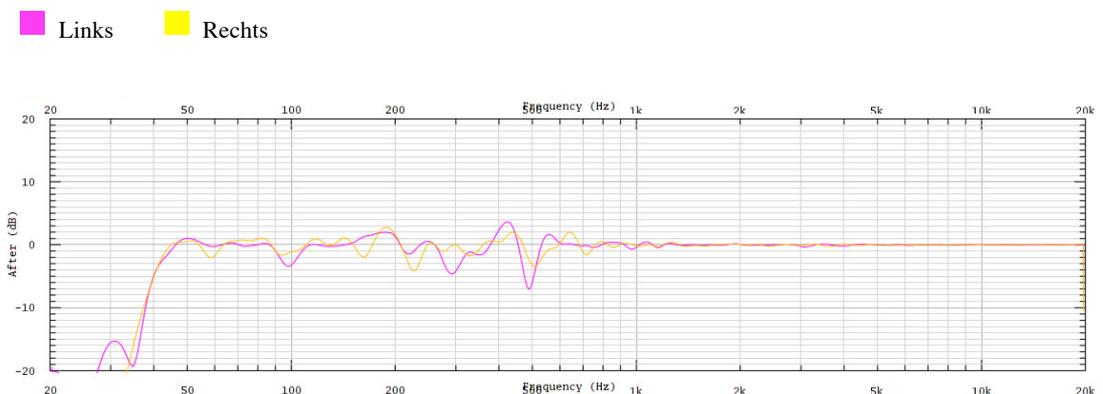
Abb. 49 Amplitude, HdM B Regie, ± 8 dB



Quelle: [Eigene]

Gegenüber der verbesserten Übertragungsfunktion auf ± 2 dB des linken und rechten LS, liefert die Entzerrung zwischen 90 Hz und 700 Hz ein weniger perfektes Ergebnis. Unklar blieb, warum in diesem Frequenzbereich entsprechende Filter ausbleiben.

Abb. 50 Amplitude, HdM B Regie, LR



Quelle: [Eigene]

7.2.3 HdM Stuttgart, Hardcut, Messung- und Korrekturergebnisse

Folgende Korrektur ist durch den Kompromiss aus neun Messpunkten entstanden. Die doppelte Gewichtung des mittleren Mess- und Referenzpunktes ist in Abschnitt 6.2.3 dargelegt. Von der mittleren Position sind auch die meisten Kunstkopfaufnahmen entstanden. Abb. 51 – 56 zeigen die Messungsergebnisse des mittleren AP.

Da anzunehmen ist, dass sich keiner der Plätze innerhalb des Hallradius befindet, ist das Schallfeld geprägt durch ein Diffusschallfeld mit sehr geringem Direktschallanteil. Dies ist bewusst gewollt, da andernfalls der optimal beschallte Bereich sehr klein und eine komplexe 5.1 Mischung für den Großteil der Plätze nicht konform wäre. Dazu tragen ebenfalls die 10 Surround-LS bei. Das Diffusschallfeld ist besonders durch den Absorptionsgrad der bestehenden Materialien geprägt. Da der Raum zur Schalldämmung bis auf die Decke mit Nadelfilz bezogen ist und die Stühle mit Polstern bezogen sind, ist ab 1 kHz der erwartete zunehmende Abfall der Höhen zu sehen. Durch den Kompromiss der 9 Messpunkte leidet vor allem die Korrelation der Kanäle unterhalb von 80 Hz. Die merkwürdigen Ausbrüche des Filters für den rechten Surround-LS bei ca. 2,8 kHz und 15 kHz – 20 kHz werden ebenfalls dadurch hervorgerufen.

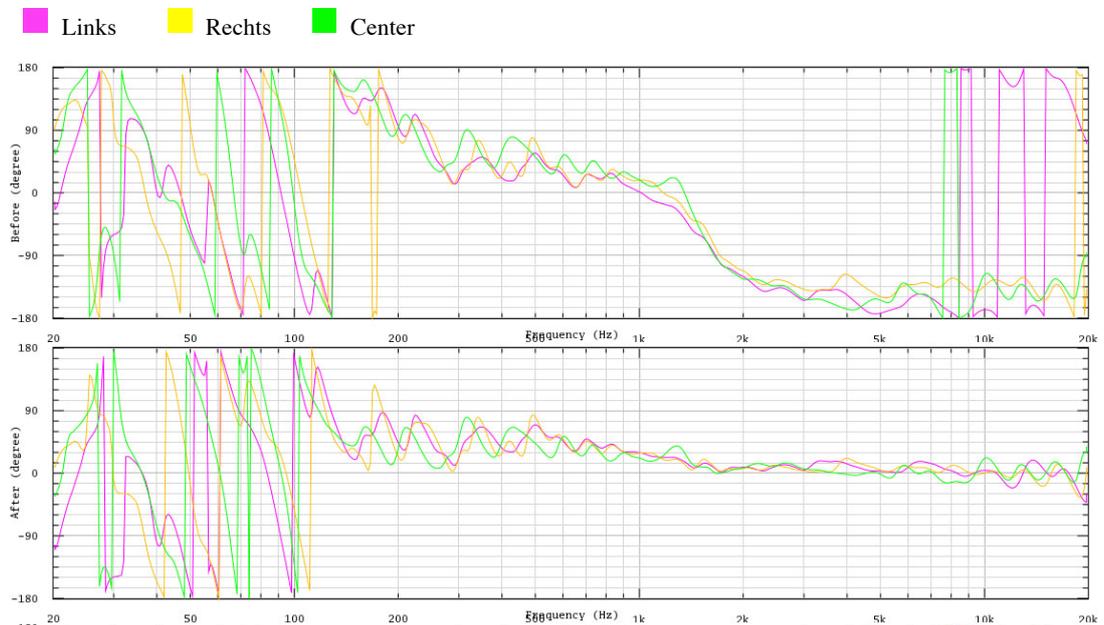
Abb. 51 Amplitude, HdM HardCut



Quelle: [Eigene]

Die Frontlautsprecher konnten besonders ab dem Einsatz der FIR-Filter bei 150 Hz in ihrem Phasenverhalten verbessert werden. Um 60 Hz sind durch die Korrektur weitere Phasensprünge hinzugekommen.

Abb. 52 Phase, HdM HardCut, LR und Center



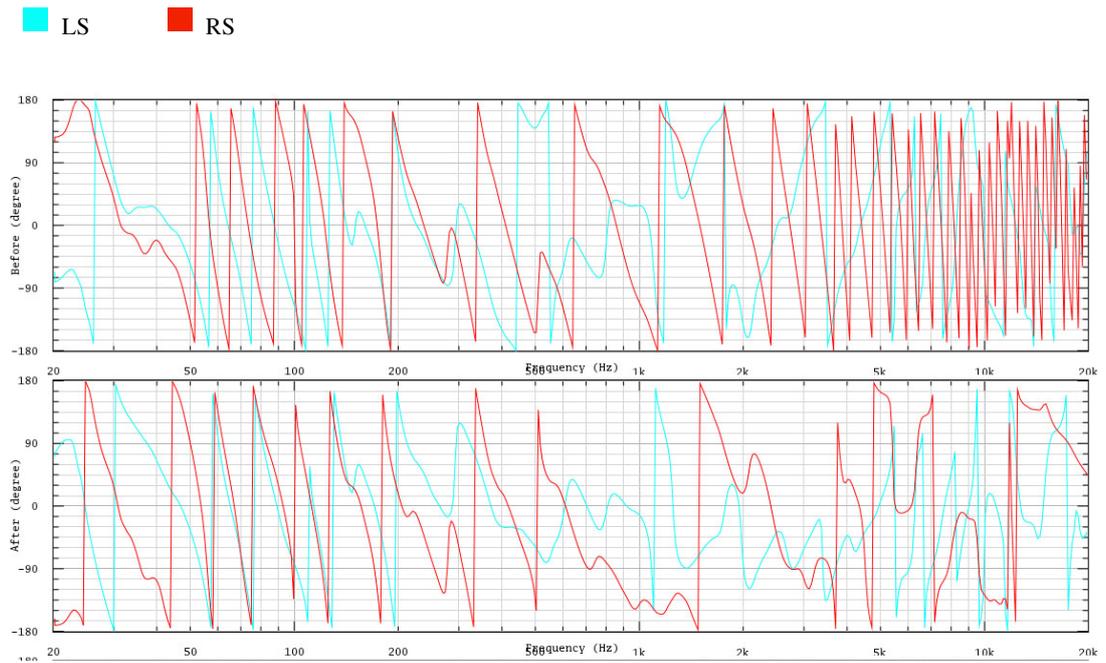
Quelle: [Eigene]

Das Phasenverhalten konnte durch die Mehrfachsteuerung der Surround-LS unterhalb von 800 Hz kaum erfasst und nur geringfügig verbessert werden. Eine deutliche Verbesserung ist für das Phasenverhalten oberhalb von 3 kHz zu erkennen.

Um die subjektive Verbesserung der Phasenkorrektur besser einschätzen zu können, wurde im HardCut eine Kunstkopfaufnahme einer auf die Phasenkorrektur beschränkten Abhörsituation, des Titels „Get Lucky“ und „I Remember You“ aufgenommen (siehe Anhang-CD). Dabei war es nicht möglich, die Amplitudenkorrektur ganz auszuschalten. Diese wurde aber auf ± 1 dB beschränkt.

Auf der Aufnahme ist eine subjektive Verbesserung der Klarheit zu vernehmen. Abgesehen von der miserablen tonalen Ausgewogenheit, werden einzelne Signale, wie „Clapps“ oder die „High-Hat“, präziser im Stereobild wiedergegeben. Wie zu erwarten, werden zudem negative Phaseneffekte reduziert. Besonders ist dies an der Stimme in „Get Lucky“ zu hören. Auch die Abgrenzung der einzelnen Instrumente, weg vom Einheitsbrei, hin zu klarer Tiefenstaffelung, profitiert von der Phasenkorrektur. Zu hören im Titel „I Remember You“ bei 00:43 zwischen Gitarre, Percussion und Kontrabass. Letzterer ist besonders durch die Phasenkorrektur erst als solcher, anstelle eines tiefen „Wummerns“, erkennbar.

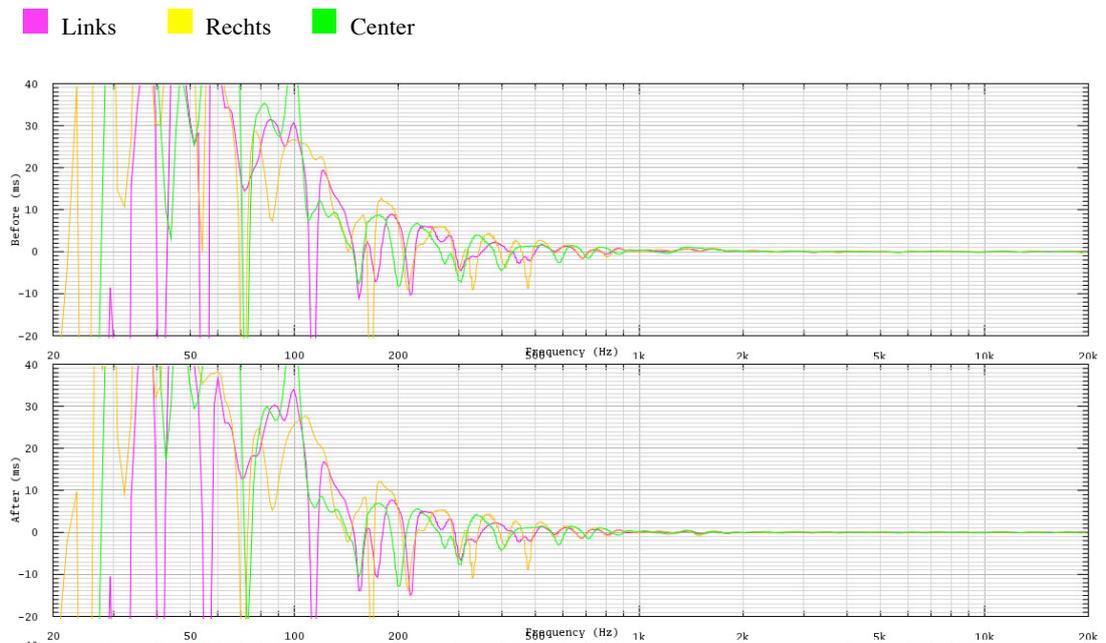
Abb. 53 Phase, HdM HardCut, LSRS



Quelle: [Eigene]

Die Korrektur der Gruppenlaufzeit zeigt kaum Verbesserungen. Die Verzögerungen im tieffrequenten Bereich sind so massiv, dass sie auf der Skala nicht mehr zu erkennen sind. Es ist jedoch zu vermuten, dass sich immerhin die Korrelation verbessert hat.

Abb. 54 Gruppenlaufzeit, HdM HardCut, LR und Center

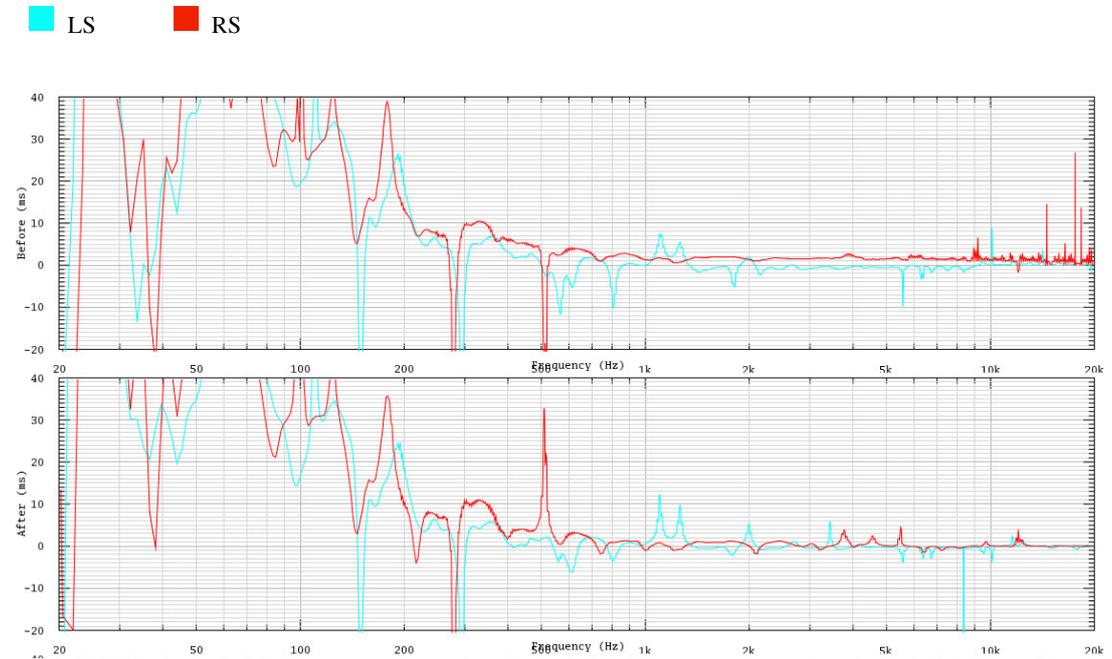


Quelle: [Eigene]

7. Ergebnisse

Sehr positiv ist der Gruppenlaufzeitkorrektur des rechten Surround-LS zu entnehmen, wie vor allem Verzögerungen über 9 kHz kompensiert werden. Für den tieffrequenten Bereich wirkt sich die Korrektur objektiv stellenweise positiv, neutral oder gar negativ aus.

Abb. 55 Gruppenlaufzeit, HdM HardCut, LSRS



Quelle: [Eigene]

Der Impuls der Frontlautsprecher zeigt gegenüber der unkorrigierten Akustik eine gute Verbesserung. Ein so optimaler Impuls, wie in der A/B Regie ist hier aufgrund der Entfernung zu den LS wohl nicht möglich.

Auch die Impulsantwort der Surround LS konnte aufgrund der Mehrfachansteuerung nicht erfasst und verbessert werden.

Abb. 56 Impuls, HdM Hardcut, ohne Sub



Quelle: [Eigene]

Besonders relevant für Abhörsysteme mit Bild ist auch die Latenz, welche durch die einzelnen Arbeitsschritte hervorgerufen wird. Bedingt durch die neun Messpunkte der Surround-Korrektur weist die Optimierung des HardCut mit 23 ms die längste Latenz auf. Dies entspricht etwa einem Halbbild bei 24 Bilder pro Sekunde. Dies konnte aber durch entsprechende Verzögerung des Bildes zum Ton problemlos mit kompensiert werden.

Abb. 57 Latenz Informationen, Hardcut



Quelle: [Eigene]

7.2.4 Homestudio, Messung- und Korrekturergebnisse

Zwischen 100 Hz und 200 Hz findet keine Amplituden-Korrektur statt, da hier die IIR-Filter auf max. 100 Hz beschränkt wurden. Eine manuelle FIR-Filtergrenze für tiefe Frequenzen wurde nicht eingestellt. Die Korrektur der Amplitude wurde auf ± 10 dB beschränkt.

Die untere Grenzfrequenz beginnt mit 24 Hz bei -3 dB vergleichsweise tief. Dies ist den langen Abmessungen des Raumes zu verdanken. Die Anhebung der LS unter 30 Hz wurde zusätzlich um jeweils 1 dB verstärkt. Aufgrund der schlechten Wahrnehmung solch tiefer Frequenzen dürfte dies aber nicht negativ auffallen. Bis auf den Ausfall der Korrektur zwischen 100 Hz und 250 Hz wurde die Übertragungsfunktion auf ± 2 dB korrigiert. Der Grund für den Ausfall zwischen 150 Hz und 250 Hz ist nicht zu erkennen. Der charakteristische Kammfilterverlauf, welcher durch starke Reflektionen der umliegenden Raumabmessungen verursacht wird, konnte auch mit gesetztem FIR-Filter nicht vollständig getilgt werden.

Abb. 58 Amplitude, Homestudio

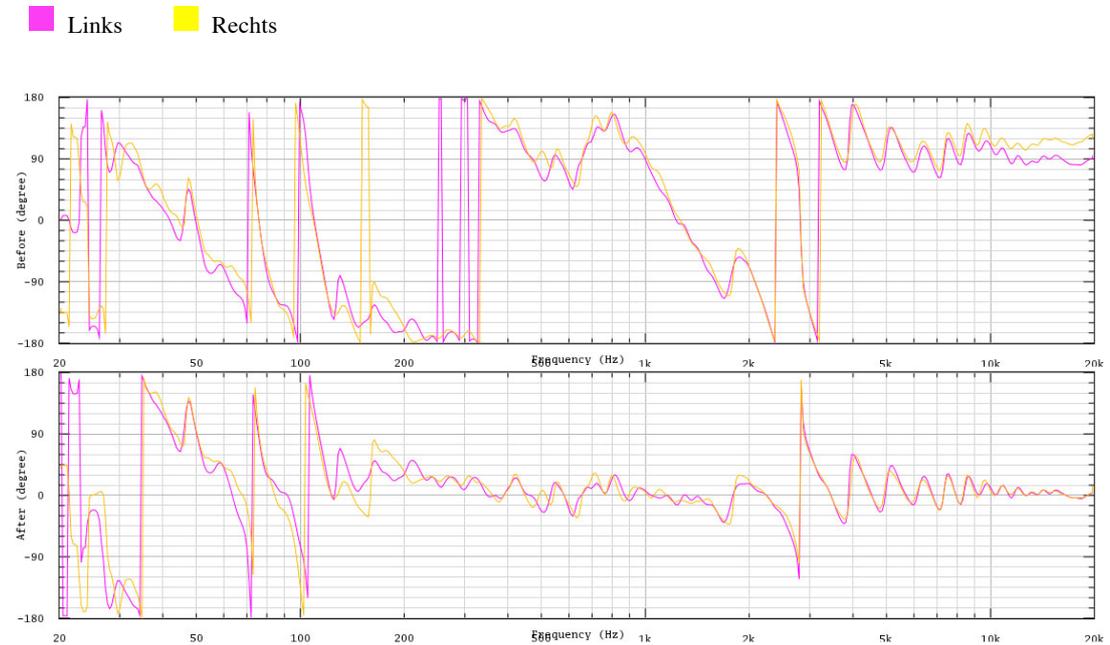


Quelle: [Eigene]

7. Ergebnisse

Die Phasenkorrektur zeigt sehr gute Ergebnisse im mittelfrequenten Bereich. Die Kammfilter der Frequenzen ab 2 kHz zeigen auch hier massive Schwankungen, welche nur insgesamt angepasst anstatt kompensiert werden können.

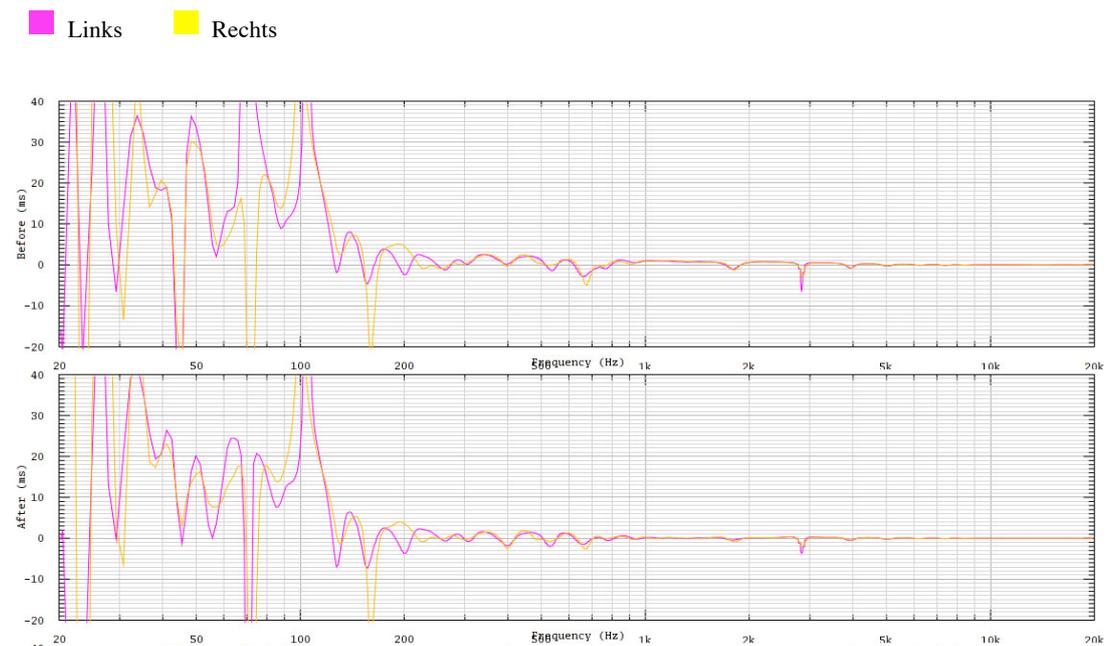
Abb. 59 Phase, Homestudio



Quelle: [Eigene]

Besonders im tieffrequenten Bereich profitiert der Korrelationsgrad der LS von der Korrektur. Während bei 62 Hz die Gruppenlaufzeiten der LS bei über 60 ms voneinander abdriften, korrelieren die Kanäle immerhin zur vorgezogenen Wiedergabe.

Abb. 60 Gruppenlaufzeit, Homestudio



Quelle: [Eigene]

Der unsichere Impuls konnte deutlich verbessert werden. Die starke Schwankung zwischen 3,8 ms bis 4,3 ms der Zeitskala konnte insgesamt deutlich verbessert werden. Jedoch bleibt deren stärkster Impuls bei 3,9 ms beinahe unverändert stehen. Der Zeitversatz von 0,9 ms weist auf eine raumakustische Störwirkung mit einer Umwegstrecke von 30 cm hin. Näher konnte die Ursache dafür nicht ermittelt werden.

Abb. 61 Impuls, Homestudio



Quelle: [Eigene]

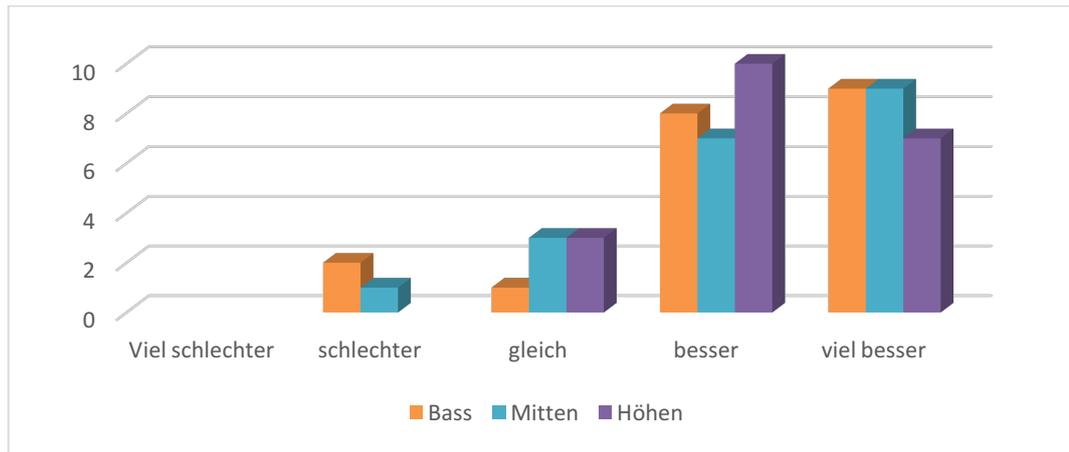
7.3 Ergebnisse der Umfrage

Am Hörversuch nahmen 20 männliche Personen im Alter von durchschnittlich 25 Jahren teil. Bei den Versuchspersonen handelt es sich ausschließlich um Tonexperten mit langjähriger Hörerfahrung.

Aus einer Voruntersuchung mit 10 Personen ohne Studioerfahrung hat sich ergeben, dass die emotionale Wirkung für die Hälfte der Vpn nachgelassen hat. Daraus lässt sich schließen, dass die Ergebnisse der Umfrage mit Laien anstelle der Experten, bezüglich der Gesamtabhörqualität deutlich neutraler ausgefallen wäre.

7.3.1 Akustisches Gleichgewicht

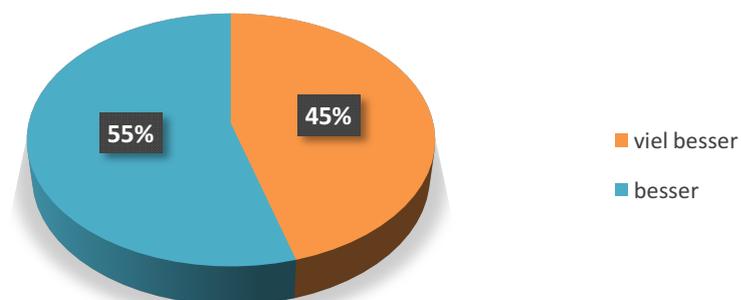
Das akustische Gleichgewicht mit den Teilaspekten Lautstärkegleichgewicht, Dynamikbereich und Klangfarbe konnte insgesamt deutlich verbessert werden. Die negativen Stimmen könnten darauf zurückzuführen sein dass wie eben erwähnt, die emotionale Wirkung durch eine Veränderung der Klangfarbe nachgelassen hat.

Tab. 2 Akustisches Gleichgewicht

Quelle: [Eigene]

7.3.2 Durchsichtigkeit

Eine klare Wiedergabe äußert sich in verschiedenen Aspekten. Zum einen können durch die räumliche Durchsichtigkeit Instrumente besser voneinander differenziert und im Klangbild geortet werden. Zum anderen verschwimmen auf zeitlicher Ebene auch schnelle Passagen nicht. Problematiken wie die Überbetonung eines Frequenzbereiches, Reflektionen oder Echos, welche andere Bereiche überdecken, können die Durchsichtigkeit beeinträchtigen. Wichtig für das Surround-Erlebnis ist eine hohe Durchsichtigkeit, damit es ein Erlebnis bleibt. Auch die Textverständlichkeit profitiert stark von diesem Parameter.



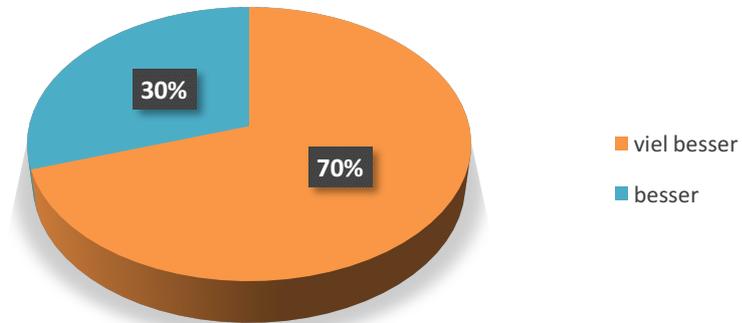
Quelle: [Eigene]

7.3.3 Stereofoner Eindruck

Die Lokalisationsschärfe, Abbildungsbreite und das Richtungsgleichgewicht haben sich am stärksten verbessert. Dies ist sicher darauf zurückzuführen, dass hier verschiedene Punkte, wie akustisches Gleichgewicht, Störgeräusche und Raumeindruck zusammen die Qualität des stereophonen Eindrucks beeinflussen. Beispielsweise profitieren Transienten von der

Phasenkorrektur, indem sie zeitgleich am Ohr ankommen. Gleichzeitig werden diese durch störende Einflüsse des Raumes, wie „wummernde“ Moden oder Reflektionen nicht überdeckt oder verwaschen.

Tab. 3 Stereofoner Eindruck

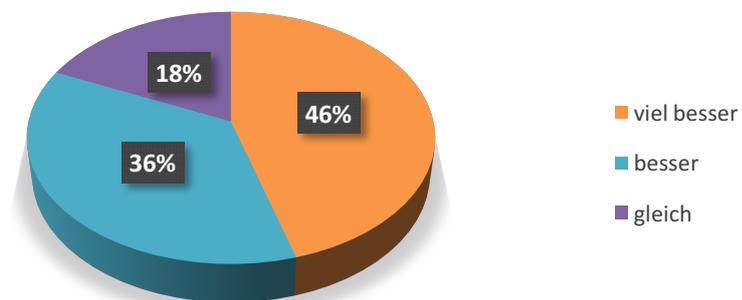


Quelle: [Eigene]

7.3.4 Störgeräusche

Dieser Parameter ist auf die akustischen Störwirkungen und raumakustische Irregularitäten wie Moden, Flatterechos oder unregelmäßiges Absorptionsverhalten bezogen. Da die Untersuchung in der aufwändig ausgebauten A Regie der HdM Stuttgart durchgeführt wurde, war mit einer geringen Verbesserung der akustischen Störwirkungen zu rechnen. Dennoch zeigt die Umfrage ein positives Ergebnis. Dies ist möglicherweise auf die Kompensation der Raumresonanzen oder des ungleichmäßigen Absorptionsverhaltens zurückzuführen.

Tab. 4 Störgeräusche

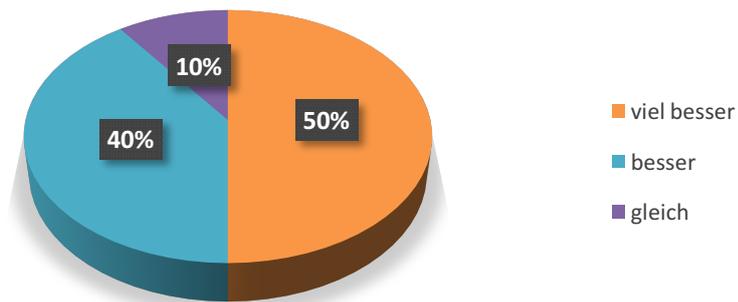


Quelle: [Eigene]

7.3.5 Raumeindruck

Der Raumeindruck beschreibt die empfundene Raumgröße der Wiedergabe. Ein guter Wert steht für eine gute Übersetzbarkeit der eingestellten Breite und Entfernung der Signale im Raum. Dies führt wiederum zu einer differenzierbaren Tiefenstaffelung des Tonmaterials. Fast alle Vpn haben eine Abnahme der negativen Raumeinflüsse mit eingeschaltetem RCS festgestellt. Der Grund hierfür könnte ebenfalls die Kompensation der Raumresonanzen sein, was zu einem frequenzunabhängigen gleichmäßigeren Abklingen der Schallenergie führt.

Tab. 5 Raumeindruck

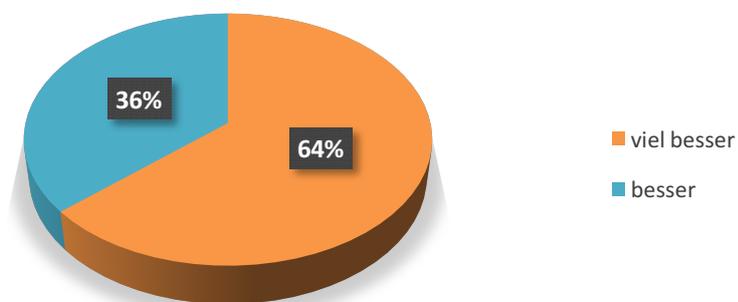


Quelle: [Eigene]

7.3.6 Akustischer Gesamteindruck

Der akustische Gesamteindruck ist in der Regel stark vom Zweck der Beschallung abhängig. In diesem Fall geht es um einen professionellen Ansatz zur kritischen Beurteilung von Tonsignalen im Studio. Aus der Bilanz lässt sich an dieser Stelle getrost eine deutliche Verbesserung der gesamten subjektiven Abhörsituation festhalten. Diese toppt sogar den Durchschnitt aller vorhergegangenen Parameter.

Tab. 6 Akustischer Gesamteindruck



Quelle: [Eigene]

8. Fazit

8.1 Zusammenfassung

In der vorliegenden Arbeit wurden objektive und subjektive Verbesserungen der Abhörsituation durch ein Korrektur- und Analysesystem untersucht. Nach der Hinführung zum Thema wurde die Fragestellung genannt und die geplante Vorgehensweise erläutert um diese zu beantworten. In Kapitel 2 wurden die Grundlagen der Raumakustik inkl. der relevanten Parameter für die Schallausbreitung im Raum beschrieben. In Kapitel 3 wurde der Zusammenhang der objektiven Defizite auf die subjektive Wahrnehmung untersucht. Kapitel 4 behandelte die objektiven Faktoren einer guten Abhörsituation. Im Wesentlichen wurde dabei auf die Parameter des Bezugs-Schallfeldes, welche indirekt durch die Regie-Lautsprecher gegeben sind, eingegangen. Kapitel 5 beleuchtete die Grundlagen der digitalen Signalverarbeitung und die Möglichkeiten der elektronischen Raum-/Lautsprecherkorrektur, durch das verwendete RCS. Durch die Darstellung der Funktionsweise wurde gezeigt, wie die zuvor beschriebene gute Akustik durch Modifizierung des LS-Signals erreicht werden kann. Kapitel 6 beleuchtete die räumlichen Gegebenheiten, in denen später objektive sowie subjektive Untersuchungen durchgeführt wurden. Dabei wurde explizit auf die Gründe für die Wahl der Räume und der Untersuchungsstrategie eingegangen. Die Ergebnisse aus Kapitel 7 wurden exemplarisch analysiert und nach Möglichkeit interpretiert.

Der Arbeit ist kritisch anzumerken, dass sämtliche eigens durchgeführten objektiven Messungsergebnisse aus eben diesem RCS stammen. Dabei wurde die optimierte Akustik (bis auf einen exemplarischen Testversuch) nicht durch ein externes Messsystem gegengeprüft. Eine Abweichung der Phasen-/Amplitudenfrequenzgänge, Gruppenlaufzeiten und Impulsantworten wäre im Detail nicht auszuschließen. Zudem konnten die einzelnen Möglichkeiten der Korrektur gar nicht oder nur bedingt bewertet werden, da sich diese nicht vollständig voneinander abgrenzen ließen. Zudem ist es mir nicht möglich zu begründen, warum es dem RCS stellenweise nicht gelang, die objektiven Qualitätsparameter zu verbessern. Daher wurde nur bedingt untersucht, ob mit einer Modifizierung der erweiterten Korrektureinstellung ein noch besseres Ergebnis möglich gewesen wäre.

Sämtliche vorgetragenen subjektiven und objektiven Qualitätsparameter der Abhörsysteme konnten durch die Frequenz- und Phasenkorrektur sowie die Kompensation störender früher Reflektionen deutlich verbessert werden. Im Vergleich der Räumlichkeiten hat sich gezeigt, dass ein akustisch schlechterer Raum eine spürbar höhere Verbesserung der Akustik erfahren hat als die akustisch ausgebauten Räume. Das ist besonders für eine Produktionspipeline, in der Tonmedien von einem Studio zum nächsten weitergereicht werden, beruhigend. Auf Tonmaterial, welches in gleicher Akustik gemischt wurde, hat die Korrektur aus den genannten Gründen u.U. negative Auswirkungen (6.3.3).

Besonders profitiert hat von der Korrektur die Durchsichtigkeit des Schallfeldes, welche sich durch eine klare und präzise Wiedergabe äußert. Möglich wird dies durch die Modifizierung des Lautsprecher Signals, so dass Überhöhungen durch Raummoden kompensiert werden, ein akustisches Gleichgewicht hergestellt wird und die Signale zeitrichtig am Ohr ankommen. Obwohl das RCS keinen direkten Einfluss auf den Nachhall hat, kann dadurch (besonders in der frühen Nachhallzeit) ein schnelleres und gleichmäßigeres Ein- und Ausschwingverhalten über den tieffrequenten Bereich gewonnen werden. Vor allem impulsartige Signale werden durch die Impuls- und Phasenkorrektur verbessert, so dass Transienten deutlich an Schärfe und breitbandige Signale an Durchsichtigkeit gewinnen.

Durch die erhöhte Transparenz und fokussierte Abbildung der Phantomschallquellen wird das analytische Hören erleichtert. Damit stellt sich das RCS definitiv als Workflow-Tool im Mixing-Prozess heraus. Die präzisere Wiedergabe, die verbesserten Phantommitten und die einheitliche Klangfarbe der LS sind hilfreich, um für einzelne Signale Pegel, Panorama und EQ-Einstellungen im Mixing-Prozess zueinander einzustellen.

Die Remapping-Funktion stellt für Studios, welchen raumbedingt eine Aufstellung nach ITU Norm nicht möglich ist, eine gute Referenz bzw. Alternative (je nach Anforderung) zur Normaufstellung dar. Vor allem für Studios, die als Zwischenstation einer Produktionskette für ein bestimmtes Format produzieren, wird durch die eingehaltene Norm ein Teil der Übersetzbarkeit gewährleistet. Dabei sollte der Algorithmus der Remapping-Funktion und dessen Grenzen bekannt sein. Da dieser auf der Bildung von Phantomschallquellen zwischen Lautsprechern beruht, ist es nicht möglich, sämtliche Front- oder Surround-Lautsprecher in ihrer vertikalen Höhe zu verschieben. Ebenso ist es nur schwer möglich, Lautsprecher voneinander weg zu verschieben. Zu geringe oder unmögliche Forderungen verwässern ggf. durch Phasenproblematiken die Abhörsituation.

Im Studio dienen Mehrfachmessungen - der Empfindung des Autors nach - mehr zur Orientierung des Toningenieurs, der hierdurch erkennen kann, inwiefern eine Korrektur ortsabhängig bleibt, als einer Verbesserung der gesamten Abhörsituation. Mit dem Wissen, dass die Korrektur ortsabhängig ist, braucht man hiermit deutlich weniger Kompromisse einzugehen als mit einer Mittelung mehrerer Messpunkte. Wie die Amplituden- wird auch die Phasenkorrektur unter der Ausweitung des AP leiden. Da es aber nur hörbare Phasenverschiebungen der Signale zueinander gibt, macht sich die Korrektur der Intrachannel-Phasenfehler auch in einem größeren Bereich positiv bemerkbar.

Die Grenzen der elektronischen Raumkorrektur durch das verwendete RCS liegen bei einer Korrektur von Interferenzen in der Übertragungsfunktion von maximal ± 20 dB. Die untere Grenzfrequenz der Übertragungsfunktion ist durch die gegebenen Raumabmessungen oder die physikalischen Grenzen der LS begrenzt. Eine Erweiterung der unteren Grenzfrequenz

kann durch das RCS entweder gar nicht, oder nur durch eine extreme Anhebung der tiefen Frequenzen erreicht werden. Dies könnte jedoch u.U. nichtlineare Verzerrungen fördern, welche durch die physikalischen Grenzen der LS, wie zu kleinem Membranhub, entstehen. Auf die verzerrungsfreie Wiedergabe und die Richtcharakteristik hat das RCS keinen Einfluss.

Eine Korrektur der tieffrequenten Gruppenlaufzeit könnte nur durch Gesamtverzögerung des Systems kompensiert werden. Da dies nicht passiert, finden nahezu keine Verbesserungen der tieffrequenten Gruppenlaufzeit statt.

Festzuhalten bleibt, dass eine wohldurchdachte Raumakustik inkl. Aufstellung der Lautsprecher unverzichtbar für ein Hörsystem auf internationalem Studioniveau bleibt. Extreme Defizite wie Kammfilter können zwar verbessert werden, aber nicht entfernt. Ob mit oder ohne RCS: auch der Korrelationsgrad der Kanäle, welcher entscheidend für die Abbildung von Phantommitten ist, profitiert von einer guten Raumakustik. Somit führt die Kombination aus elektronischer Korrektur und gewissenhafter Raumakustik zu den besten Ergebnissen.

Insgesamt bringt die elektronische Akustikkorrektur des Schallfeldes durch das Analyse- und Korrektursystem die Abhörsituation der „Wahrheit“ nach internationaler EBU Tech. 3276 Norm ein starkes Stück näher. Während die Korrektur zur tonalen Neutralität objektiv sowie subjektiv durchgängige Verbesserungen möglich machte, sind die Verbesserungen zur zeitrichtigen Wiedergabe kompliziert zu differenzieren. Dabei sind diese subjektiv mehr als objektiv vorhanden und vom wiedergegebenen Material abhängig.

Die Stärke der Verbesserung weist auf entsprechend starke Defizite, selbst der aufwändig akustisch ausgebauten Studios, hin. Daher ist die Relevanz einer elektronischen Raumkorrektur im professionellen Studio sehr hoch.

8.2 Ausblick

Kaufargumente für industrielle Musikmedien sind gegenüber den Kulturmedien mehr von der Qualität als vom Inhalt abhängig.⁶⁹ Da aber gleichzeitig die Bereitschaft dafür sinkt, überhaupt Geld für Musikmedien auszugeben⁷⁰, müssen meiner Meinung nach die Bedingungen für die Musikproduzierenden im Workflow verbessert werden. Und zwar so, dass Musik weder billiger noch „Fließband-Industrieller“, sondern zielführender und damit schneller produziert werden kann.

Durch den Einsatz einer elektronischen Lautsprecher-/Raumakustikkorrektur wird die Abhörsituation ggf. zielführender und ausdauernder. Denn aufgrund der verbesserten

⁶⁹ Vgl. Johne, 2016

⁷⁰ Vgl. Bundesverband Musikindustrie e.V., 2009, S. 21

Abhörsituation müsste weniger auf weiteren Abhörsystemen zur Kontrolle gegenhört werden. Damit könnten Entscheidungen schneller und zielsicherer getroffen werden. Auch Ermüdungserscheinungen aufgrund des „sauberen“ Direktschalls treffen vermutlich später ein als es ohne RCS der Fall wäre. Zudem ist zu vermuten, dass Klangvorstellungen aufgrund der besseren Übersetzung zwischen Studios mit RCS höher und dadurch mit geringerem Aufwand verbunden ist. Bereits getroffene Tonbearbeitungen müssten in späteren Arbeitsschritten aufgrund eines anderen Schallfeldes nicht verbessert werden.

Um diese Ergebnisse zu prüfen, wäre der Vergleich eines Dauerprüfverfahrens mit und ohne RCS im Studioalltag mit verschiedenen RCS wünschenswert.

Aufgrund der Relevanz und des Potentials solcher Raumkorrektursysteme ist anzunehmen, dass diese weiter an Bedeutung gewinnen werden. Das gilt für den Profi- als auch den Hi-Fi-Markt.

Anhang

Inhalt der Anhangs-CD:

1. Hörtest, inkl. Kunstkopfaufnahmen und Originaltitel
2. Messungen
3. Online pdf

Abb. 62 Umfrage, subjektive Qualitätsparameter der Akustik

Datum:	HdM Stuttgart																		
Elektronische Raumakustik-Korrektur																			
Raumeindruck: Nachhall, Tiefenstaffelung, empfundene Raumgröße	<table style="margin-left: auto; margin-right: auto;"> <tr> <td></td> <td></td> <td style="text-align: center;">gleich</td> <td></td> <td></td> </tr> <tr> <td style="text-align: right;">Viel schlechter</td> <td><input type="radio"/></td> <td><input type="radio"/></td> <td><input type="radio"/></td> <td><input type="radio"/></td> <td style="text-align: left;">Viel besser</td> </tr> </table>			gleich			Viel schlechter	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	Viel besser							
		gleich																	
Viel schlechter	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	Viel besser														
Kommentar: _____																			
Stereofoner Eindruck: Lokalisationsschärfe, Abbildungsbreite, Richtungsgleichgewicht	<table style="margin-left: auto; margin-right: auto;"> <tr> <td><input type="radio"/></td> <td><input type="radio"/></td> <td><input type="radio"/></td> <td><input type="radio"/></td> <td><input type="radio"/></td> </tr> </table>	<input type="radio"/>																	
<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>															
Kommentar: _____																			
Durchsichtigkeit Textverständlichkeit, Deutlichkeit	<table style="margin-left: auto; margin-right: auto;"> <tr> <td><input type="radio"/></td> <td><input type="radio"/></td> <td><input type="radio"/></td> <td><input type="radio"/></td> <td><input type="radio"/></td> </tr> </table>	<input type="radio"/>																	
<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>															
Kommentar: _____																			
Akustisches Gleichgewicht Lautstärkegleichgewicht, Dynamikbereich, Klangfarbe	<table style="margin-left: auto; margin-right: auto;"> <tr> <td style="text-align: right;">Bässe</td> <td><input type="radio"/></td> <td><input type="radio"/></td> <td><input type="radio"/></td> <td><input type="radio"/></td> <td><input type="radio"/></td> </tr> <tr> <td style="text-align: right;">Mitten</td> <td><input type="radio"/></td> <td><input type="radio"/></td> <td><input type="radio"/></td> <td><input type="radio"/></td> <td><input type="radio"/></td> </tr> <tr> <td style="text-align: right;">Höhen</td> <td><input type="radio"/></td> <td><input type="radio"/></td> <td><input type="radio"/></td> <td><input type="radio"/></td> <td><input type="radio"/></td> </tr> </table>	Bässe	<input type="radio"/>	Mitten	<input type="radio"/>	Höhen	<input type="radio"/>												
Bässe	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>														
Mitten	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>														
Höhen	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>														
Kommentar: _____																			
Störgeräusche akustische Störwirkungen, raumakustische Irregularitäten	<table style="margin-left: auto; margin-right: auto;"> <tr> <td><input type="radio"/></td> <td><input type="radio"/></td> <td><input type="radio"/></td> <td><input type="radio"/></td> <td><input type="radio"/></td> </tr> </table>	<input type="radio"/>																	
<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>															
Kommentar: _____																			
Akustischer Gesamteindruck	<table style="margin-left: auto; margin-right: auto;"> <tr> <td><input type="radio"/></td> <td><input type="radio"/></td> <td><input type="radio"/></td> <td><input type="radio"/></td> <td><input type="radio"/></td> </tr> </table>	<input type="radio"/>																	
<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>															
Kommentar: _____																			
Sonstige Kommentare:																			
Durchgeführt von Oliver Kirschig																			

Literaturverzeichnis

Literatur:

- Dickreiter, M. (2008). *Handbuch der Tonstudioteknik* (7. Ausg., Bd. II). München: K. G. Saur Verlag.
- Dickreiter, M., Dittel, V., Hoeg, W., & Wöhr, M. (2013). *Handbuch der Tonstudioteknik* (8. Ausg., Bd. I). München: K. G. Saur Verlag.
- Fasold, W., & Veres, E. (2003). *Schallschutz und Raumakustik in der Praxis* (2. Auflage Ausg.). Berlin: Verlag Bauwesen.
- Fastl, H., & Zwicker, E. (2007). *Psychoacoustics. Facts and Models*. Berlin: Springer-Verlag.
- Friesecke, A. (2007). *Die Audio-Enzyklopädie: Ein Nachschlagewerk für Tontechniker*. München: K. G. Saur Verlag.
- Friesecke, A. (2007). *Studio Akustik: Konzepte für besseren Klang*. Bergkirchen: PPVMEDIEN GmbH.
- Görne, T. (2015). *Tontechnik* (4. aktualisierte Auflage Ausg.). München: Hanser Verlag.
- Goertz, A., & Makarski, M. (2008). *Interaktion von Lautsprecher und Raum im Tonstudio*. VDT.
- Goossens, S. (2011). *Abhörräume elektronisch korrigieren*. Nürnberg: VDT.
- Goossens, S., & Gutmann, C. (2008). *Möglichkeiten und Grenzen der elektronischen Lautsprecher- und Raumkorrektur*. Deggendorf: Institut für Rundfunktechnik.
- Laborie, A., & Wegmann, V. (2011). *Digital Acoustic Correction for Audio Monitoring*. Nürnberg: Trinnov Audio.
- Möser, M. (2010). *Technische Akustik*. Berlin.
- Meyer, M. (2014). *Signalverarbeitung*. Wiesbaden: Springer-Verlag.
- Schwamkrug, G., & Römer, R. (1986). *Lautsprecher Dichtung und Wahrheit*. Aachen: Elektor.
- Toole, F. E. (2008). *Sound Reproduction: Loudspeakers and Rooms*. Oxford: Focal Press.
- Trinnov Audio. (kein Datum). *Optimizer Reference Manual v3.6_v7*.
- Weinzierl, S. (2008). *Handbuch der Audiotechnik*. Berlin: Springer-Verlag.

Online PDF:

Bundesverband Musikindustrie e.V. (31. Oktober 2009). *Hörgewohnheiten der Konsumenten und deren Wahrnehmung*. Abgerufen am 18. März 2016 von tonmeister.de:

https://www.tonmeister.de/symposium/2009/np_pdf/B06.pdf

musikelectronic geithain gmbh. (kein Datum). Abgerufen am 07. Januar 2016 von www.me-geithain.de: <http://www.me-geithain.de/images/stories/Produkte/RL901K/Downloads/RL901K.pdf>

Wegmann, V. (September 2011). *Testbericht Trinnov Optimizer*. (S. Magazin, Hrsg.)

Abgerufen am 21. Januar 2016 von

http://www.medialantic.com/files/studio%20magazin%2009_11trinnov_optimizer.pdf

Websites:

Nubert nuVero 3 – der Klang:. (August 2013). Abgerufen am 17. Januar 2016 von

<http://www.fairaudio.de/test/lautsprecher/2013/nubert-nuvero-3-lautsprecher-test-dipol-2.html>

Studiengang Medienwirtschaft. (2015). *HdM 360°, HardCut*. (H. d. Medien, Produzent)

Abgerufen am 24. Februar 2016 von https://mw.hdm-stuttgart.de/~interaktive_medien/hdm360/hardcut/

Trikustik GesmbH. (kein Datum). *Rechner Raummoden*. Von

<http://trikustik.at/wissen/rechner-raummoden/>

Trinnov Audio. (kein Datum). *loudspeaker room optimization, How it works*. Abgerufen am

25. Januar 2016 von http://www.trinnov.com/technologies/loudspeaker-room-optimization/how-it-works-optimization/how-it-works-2/?lang=en_us&PHPSESSID=a6e0cddc2dc6e9c66c4e6910391710ba

Trinnov Audio. (kein Datum). *TECHNOLOGIES » LOUDSPEAKER/ROOM*

OPTIMIZATION » 3D SIMULATIONS. Abgerufen am 2016. Februar 07 von http://www.trinnov.com/technologies/loudspeaker-room-optimization/3d-simulations-optimization/?lang=en_us

Vogt, R. (22. Februar 2011). Abgerufen am 17. November 2015 von Profi-Prozessor Trinnov

ST 2 HiFi: <http://www.connect.de/ratgeber/prozessor-trinnov-st-2-hifi-1091148.html>

Normen:

EBU Tech. 3276. (Mai 1998). *Listening conditions for the assessment of sound programme material: monophonic and two-channel stereophonic.*

ITU-R [BS.1284]. (2002). *General methods for subjektive assessment of sound quality.*
Geneva.

ITU-R [BS.775-3]. (August 2008). *Multichannel stereophonic sound system with and without accompanying picture.*

Expertengespräche als adaptierte Interviews:

Interview mit Veit Wegmann (Inhaber *MediaLantic*, Vertrieb von *Trinnov Audio*)

Frage: „Wie werden frühe Reflektionen am Abhörpunkt kompensiert?“

"Der reflektierte Schall trifft am Abhörpunkt nach der Zeit X ein. Das RCS regt durch einen entsprechenden Gegenimpuls den Raum so an, dass am AP die Schallenergie der Reflektion genommen wird. So wird Direktschall von Nachhall „gesäubert“. Der Impuls, welcher zur Kompensation der Reflektion ausgesendet wird, wird zwar wieder ungewollte Reflektionen am AP hervorrufen, diese jedoch schwächer sind als die der vorhergegangenen Reflektionen. Dieser Prozess wird sechsmal wiederholt, bis die durch die Kompensation hervorgerufenen Auswirkungen schwach genug sind um sie zu vernachlässigen.“

Frage: „Welche Forderungen sind an die Korrektur außerdem gestellt?“

„Neben der Korrektur des Phasen- und Amplitudenfrequenzganges auf entsprechende Norm ist die Korrelation aller Kanäle zueinander ein weiteres Kriterium der Korrektur.“

Interview mit Andreas Johne (SWR, IVD)

Frage: „Was sind primäre Kaufargumente für kulturelle Medien?“

„Kulturelle Medien sind gegenüber industriellen vor allem durch die Relevanz des Inhaltes anstelle der Qualität (solange sie hoch genug ist), für die Verbraucher interessant. Der Fokus liegt hier auf der Aktualität und Funktionalität. Innovation und High-End Qualität sind Kaufargumente für industrielle Produktionen.“