

Masterarbeit

Untersuchung des Publikumseffekts auf den FoH-Mix mit Methoden der virtuellen Akustik

Beuth Hochschule für Technik Berlin

Veranstaltungstechnik und -management

Master of Engineering

FB VIII – Maschinenbau, Veranstaltungstechnik, Verfahrenstechnik

Abgabedatum

01. März 2021

Eingereicht von: Lucas Meyer
lucas.meyer@web.de

Betreuer: Prof. Dr. rer. nat.
Alexander Lindau

Matrikelnummer: 868585

Gutachter: Dipl.-Tonmeister
Holger Schwark

Eigenständigkeitserklärung

Ich versichere, dass ich die vorliegende Masterarbeit selbstständig verfasst und keine anderen als die angegebenen Hilfsmittel benutzt habe. Die Stellen, die anderen Werken dem Wortlaut oder dem Sinn nach entnommen wurden, habe ich in jedem einzelnen Fall durch die Angabe der Quelle, auch der benutzten Sekundärliteratur, kenntlich gemacht.

Ort, Datum

Unterschrift

„Keine Sorge, wenn das Publikum da ist, wird es besser klingen...“

*(Antwort jedes*jeder Livemischer*in auf Klangfragen beim Soundcheck)*

Danksagung

An dieser Stelle möchte ich mich bei einigen Personen bedanken, die besonders zum Gelingen dieser Masterarbeit beigetragen haben:

Zuerst möchte ich mich bei Prof. Dr. rer. nat. Alexander Lindau bedanken, der diese Arbeit betreut und begutachtet und zu Beginn der Coronavirus-Pandemie für den entscheidenden Impuls gesorgt hat, aus der geplanten Vor-Ort-Messung mit realem Publikum eine Simulation zu machen. Bei Dipl.-Tonmeister Holger Schwark möchte ich mich für die Begutachtung dieser Arbeit und einige spannende Denkanstöße während der Bearbeitung bedanken. Ich möchte mich bei Robert Friederichs bedanken, der mir den Zutritt zum Astra Kulturhaus ermöglicht hat. Weiter möchte ich Lukas Aspöck vom Institut für Technische Akustik an der RWTH Aachen für die Bereitstellung der RAVEN Simulationssoftware danken. Für Anregungen in der Programmierung mit MATLAB möchte ich David Ackermann vom Fachgebiet Audiokommunikation an der TU Berlin und Lukas Aspöck vom Institut für Technische Akustik an der RWTH Aachen danken. Frau Danielmeyer von der Firma AFMG Technologies GmbH möchte ich für die Bereitstellung der Software EASE SpeakerLab Pro danken. Ich möchte mich bei Toni Mudrack bedanken, der mir erlaubt hat, seine Musik als Hörbeispiel für den Fragebogen zu verwenden. Außerdem bin ich ihm für die jahrelange Arbeit als sein Livemischer dankbar, weil ich dadurch inspiriert wurde, den Effekt des Publikums zu untersuchen. Ich möchte mich bei Theresa Weinstein und Verena Volkmer für die emotionale Unterstützung und sprachlich-wissenschaftliche Beratung bedanken. Außerdem möchte ich Andreas Zwirchmair für viele fachliche Diskussionen und Denkanstöße danken, welche die Simulation in Zukunft verbessern können. Zum Schluss möchte ich mich bei allen teilnehmenden Experten bedanken, die den simulierten Publikumseffekt bewertet haben, auch wenn die Erfahrungen mit realem Publikum durch die Coronavirus-Pandemie ca. ein Jahr zurückliegen und den einen oder anderen sentimental berührt haben.

Abstract

Das Publikum hat bei Konzerten einen großen Einfluss auf die Raumakustik. Besonders bei Rock- und Popkonzerten können Livemischer*innen diesen Effekt zwischen leerem Veranstaltungsort beim Soundcheck und (eng) stehendem Publikum beim Konzert deutlich wahrnehmen. Am Beispiel des Astra Kulturhaus in Berlin untersucht diese Arbeit mithilfe der raumakustischen Simulationssoftware RAVEN, wie sich die raumcharakterisierenden Parameter durch die Anwesenheit von (simuliertem) Publikum verändern. Neben der erwarteten Verkürzung der Nachhallzeit konnte eine Verbesserung der Sprachverständlichkeit durch die Parameter C80, D50 und STI gezeigt werden. Um den simulierten Publikumseffekt mit den Erfahrungen von Livemischer*innen abzugleichen, wurden Hörbeispiele aus den generierten binauralen Raumimpulsantworten erzeugt und mittels eines Fragebogens beurteilt. Die Expert*innen nahmen an den zwei simulierten FOH-Positionen einen hörbaren Unterschied zwischen leerem und vollem Zustand wahr. Die Mehrheit der Befragten gab an, dass der simulierte Effekt mit ihren Erfahrungen aus der Realität übereinstimmt. Die Arbeit zeigt, dass der Publikumseffekt in einem gegebenen Veranstaltungsort mithilfe von akustischer Simulation erzeugt und charakterisiert werden kann. Durch Auralisation ist es erstmals möglich, den Klang des FOH-Mix ohne Publikum und den Klang des FOH-Mix mit Publikum im direkten Vergleich anzuhören und entsprechend anpassen zu können.

The presence of an audience heavily influences the room acoustics at concerts. Especially at rock and pop concerts, livesound mixers can clearly perceive this effect between an empty venue during sound check and a (tightly packed) standing audience during the concert. By the example of Astra Kulturhaus in Berlin, this thesis uses the room acoustic simulation software RAVEN to study how the presence of (simulated) audience changes the room characterizing parameters. Besides the expected shortening of the reverberation time, an improvement of speech intelligibility by the parameters C80, D50 and STI could be shown. In order to match the simulated audience effect to the experience of livesound mixers, audio samples were created from the generated binaural room impulse responses and assessed by experts through a survey. The experts perceived an audible difference between empty and full state at the two simulated FOH positions. The majority of respondents confirmed that the simulated effect matched their real-world experience.

The thesis shows that the audience effect in a given venue can be generated and characterized using acoustic simulation. Auralization makes it possible for the first time to listen to the sound of the FOH mix without an audience and the sound of the FOH mix with an audience in direct comparison and to adjust it accordingly.

Inhaltsverzeichnis

Eigenständigkeitserklärung	II
Danksagung	IV
Abstract	V
Tabellenverzeichnis.....	X
Abbildungsverzeichnis.....	XI
Abkürzungsverzeichnis	XII
1. Einleitung	1
2. Theoretische Grundlagen	4
2.1. Raumakustik	4
2.1.1. Absorption	4
2.1.2. Reflexion.....	5
2.1.3. Raumgeometrie	6
2.1.4. Raumimpulsantwort.....	6
2.1.5. Raumakustische Parameter	7
2.1.6. Mittelwertbildung und Variationen der Zeitgrenzen	10
2.1.7. Einfluss des Publikums.....	10
2.2. Räumliches Hören	13
2.2.1. HRTFs	13
2.2.2. BRIR.....	14
2.3. Raumsimulation	14
2.3.1. Methoden der Raumsimulation.....	14
2.4. Auralisation	18
3. Methodik	19
3.1. Modellauswahl – Astra Kulturhaus Berlin	19
3.2. Vorbereitung des Modells für Simulation.....	19
3.2.1. Aufmaß	20
3.2.2. Impulsantworten	20
3.2.3. 3D-Modell	22
3.2.4. Materialien	23
3.2.5. Publikum.....	24
3.2.6. Quellen	25
3.2.7. Empfänger.....	27
3.3. Simulationsparameter.....	28

3.4.	Raumakustische Simulation	31
3.4.1.	Generierung von BRIRs	31
3.4.2.	Berechnung der Raumparameter	32
3.5.	Auralisation	34
3.5.1.	Kopfhörerentzerrung.....	34
3.5.2.	Quellmaterial	35
3.5.3.	Workflow der Auralisierung.....	35
3.6.	Hörversuch und Fragebogen	38
4.	Ergebnisse	40
4.1.	Vergleich der Vor-Ort-Messung mit der Simulation	40
4.2.	Frequenzspektrum.....	41
4.3.	Raumcharakterisierende Parameter.....	44
4.3.1.	Vergleich Nachhallzeit.....	44
4.3.2.	Vergleich nach DIN.....	46
4.3.3.	Erweiterter Vergleich	47
4.3.4.	Vergleich in Oktavbändern	47
4.4.	Fragebogen	51
5.	Diskussion.....	56
5.1.	Interpretation der Ergebnisse	56
5.1.1.	Vergleich der Vor-Ort-Messung mit der Simulation	56
5.1.2.	Frequenzspektrum.....	56
5.1.3.	Raumcharakterisierende Parameter.....	58
5.1.4.	Hörversuch und Fragebogen.....	62
5.1.5.	Publikumseffekt	63
5.2.	Einschränkungen	64
5.3.	Empfehlungen und Ausblick	66
6.	Fazit	68
7.	Literaturverzeichnis.....	69
8.	Anhang.....	77
A.	Datenblatt Audix TM1-Plus	77
B.	Datenblatt Roland EDIROL UA25-EX	79
C.	Datenblatt Martin Audio W8LM	81
D.	Datenblatt Martin Audio W8VDQ	82
E.	Astra Technical Rider.....	83

F.	Anleitung zum Fragebogen	85
G.	Fragebogen	87
H.	Fragebogen: Kopfhörer der Teilnehmenden	89
I.	Fragebogen: Ergebnisse der Bewertung der Hörbeispiele	90
J.	Spektrum: Backline-Quelle, FOH-Position Mitte	92
K.	Spektrum: Backline-Quelle, FOH-Position Hinten.....	92
L.	Spektrum: PA-Links, FOH-Position Mitte	93
M.	Spektrum: PA-Links, FOH-Position Hinten	93
N.	Spektrum: PA-Rechts, FOH-Position Mitte	94
O.	Spektrum: PA-Rechts, FOH-Position Hinten.....	94
P.	Spektrum: Delay-Links, FOH-Position Mitte.....	95
Q.	Spektrum: Delay-Links, FOH-Position Hinten	95
R.	Spektrum: Delay-Rechts, FOH-Position Mitte.....	96
S.	Spektrum: Delay-Rechts, FOH-Position Hinten	96

Tabellenverzeichnis

Tabelle 1: Übersicht der Impulsantwort-Messungen im Astra	21
Tabelle 2: Raumparameter des Astra	22
Tabelle 3: Materialübersicht für die im Modell verwendeten Materialien	23
Tabelle 4: Parametervergleich der Vor-Ort-Messungen mit der Simulation	40
Tabelle 5: Parametervergleich nach DIN 3382-1 + BR & STI.....	46
Tabelle 6: Erweiterter Parametervergleich für Veranstaltungsorte für Rock- und Popmusik.....	47
Tabelle 7: Oktavbandvergleich an FOH-Position: Mitte, Quelle: PA (gemittelt).....	48
Tabelle 8: Oktavbandvergleich an FOH-Position Hinten, Quelle: PA (gemittelt)	48
Tabelle 9: Oktavbandvergleich an FOH-Position Mitte, Quelle: Backline	49
Tabelle 10: Oktavbandvergleich an FOH-Position Hinten, Quelle: Backline	49
Tabelle 12: Parametervergleich zwischen Adelman-Larsen (2014) und dieser Arbeit	64

Abbildungsverzeichnis

Abb. 1: Aufteilung einer einfallenden Schallwelle auf ein Bauteil	4
Abb. 2: Schallstreuung an rauher Oberfläche	5
Abb. 3: Unterschiedliche Anteile einer Impulsantwort	7
Abb. 4 Absorptionskoeffizienten von Publikum	11
Abb. 5: Frequenzgang einer HRTF für ein eintreffendes Schallereignis aus 90° Links (90° Azimut, 0° Elevation) für beide Ohren	13
Abb. 6: Spiegelschallquellen-Modell mit S als Quelle und R als Empfänger	15
Abb. 7: Raytracing Methode	16
Abb. 8: Zusammensetzung einer Impulsantwort mithilfe des hybriden Simulations- verfahrens	17
Abb. 9: Astra Kulturhaus Berlin	19
Abb. 10: Zwei-Kanal FFT Messaufbau	20
Abb. 10: SketchUp-Modell des Astra Kulturhaus im <i>vollen</i> Zustand	22
Abb. 12: Winkelung der PA (8x Martin Audio W8LM)	25
Abb. 13: EASE SpeakerLab Kalkulationsparameter und Exporteinstellungen	27
Abb. 14: Spektrum des Kunstkopfes FABIAN für linkes (oben) und rechtes Ohr (unten) für einen Schalleinfallswinkel von 0° Elevation	27
Abb. 15: Signalrouting der Auralisation	36
Abb. 16: Vergleich des Frequenzspektrums für die Quelle PA-Links über die beiden Zustände <i>leer</i> und <i>voll</i>	42
Abb. 17 Vergleich der T30 Nachhallzeiten für die akustische Messung vor Ort, die Simulation im <i>leeren</i> Zustand und die Simulation im <i>vollen</i> Zustand	44
Abb. 18: T30 Vergleich zwischen <i>leer</i> und <i>voll</i> an der FOH-Position Mitte	45
Abb. 19: T30 Vergleich zwischen <i>leer</i> und <i>voll</i> an der FOH-Position Hinten	45
Abb. 20: Fragebogen: Vertrautheit der Teilnehmenden mit der Akustik des Astra	51
Abb. 21: Fragebogen: Hörbare Unterschiede zwischen den Hörbeispielen	52
Abb. 22: Fragebogen: Übereinstimmung des Publikumseffekts mit Erfahrungen aus anderen Clubs	54

Abkürzungsverzeichnis

BR	Bass Ratio (Bassverhältnis)
BRIR	Binaural Room Impulse Response (binaurale Raumimpulsantwort)
C80	Clarity (Klarheitsmaß)
D50	Definition (Deutlichkeit)
dB	Dezibel
EDT	Early Decay Time (Frühe Abklingzeit)
FFT	Fast Fourier Transform
FOH	Front of House (Position des Mischpults)
G	Gain (Stärkemaß)
HpTF	Headphone Transfer Function (Kopfhörerübertragungsfunktion)
HRTF	Head-Related Transfer Function (Kopf-bezogene Übertragungsfunktion)
ITD	Interaural Time Differences
ILD	Interaural Level Differences
m	Meter
ms	Millisekunden
MVStättVO	Muster-Versammlungsstättenverordnung
PA	Public Address (System)
RAVEN	A Real-Time Framework for the Auralization of interactive Virtual Environments
RIR	Room Impulse Response (Raumimpulsantwort)
s	Sekunden
STI	Speech Transmission Index (Sprach-Übertragungs-Index)
T30	Nachhallzeit
Ts	Schwerpunktzeit

1. Einleitung

Livemischer*innen in Veranstaltungsorten für Popmusik lernen früh in ihrer Karriere, dass das Publikum große Auswirkungen auf den Klang des FOH-Mix im Raum hat. Auch wenn beim Soundcheck alles sorgfältig an die Raumakustik des Veranstaltungsortes angepasst wurde, klingt die Musik dumpfer und leiser sobald das Publikum im Raum ist. Das Publikum verändert entscheidend die akustischen Eigenschaften des Raumes. Bodenreflexionen zwischen den Lautsprecherboxen und der Mischpultposition verschwinden, da das Publikum auf dieser Fläche steht und so den Übertragungsweg blockiert. Während der ersten Lieder des*der Künstler*in kann man die Mischer*innen am Mischpult beobachten, wie sie versuchen, den FOH-Mix möglichst schnell an die neuen akustischen Gegebenheiten anzupassen. Erfahrenen Mischern*innen gelingt diese Anpassungen in der Regel schneller, da sie den Effekt besser kennen und ihren Mix während des Soundchecks dementsprechend einschätzen können. Trotz aller Erfahrung wird eine Anpassung nötig sein. Doch dies ist häufig auch ein Grund, warum Livemischer*innen ihren Job so lieben: Man hat nur eine Chance es „richtig“ zu machen.

In dieser Arbeit wird der sogenannten Publikumseffekt untersucht, der durch anwesendes, stehendes Publikum bei Rock- und Popmusik-Konzerten in entsprechenden Veranstaltungsorten (Clubs) entsteht und unter anderem als die klangliche Veränderung zwischen Soundcheck und Konzert beschrieben werden kann.

Obwohl seit mehreren Jahrzehnten Forschung zur Raumakustik von klassischen Konzertsälen stattfindet (Ahnert & Tennhardt, 2008; Barron, 2010; Beranek, 1996; Kuttruff, 2000; Sabine, 1923), gibt es bisher wenig Literatur zu den akustischen Eigenschaften von Veranstaltungsorten für Rock- und Popmusik. Diese unterscheiden sich jedoch oft grundlegend von klassischen Konzerthäusern. Im Gegensatz zu klassischen Konzerten finden Rock- und Popmusik Konzerte meist nicht in speziell dafür konzipierten Gebäuden statt. Häufig sind dies ehemals anders genutzte Gebäude, die nur begrenzte Möglichkeiten zur Anpassung der Raumakustik bieten. Außerdem können durch die elektrische Verstärkung der Instrumente und die anschließende Verteilung über Beschallungsanlagen einige Anforderungen an die Raumakustik, wie sie für klassische Konzertsäle ohne elektroakustische Verstärkung zu beachten sind, vernachlässigt werden. Dennoch sind Veranstaltungsorte für

Popmusik noch wenig erforscht. Erst in den letzten 10 Jahren haben vereinzelt Forscher*innen damit angefangen, auf solche Orte einzugehen und auch eng stehendes Publikum bei Rock- und Popmusikkonzerten zu untersuchen (Adelman-Larsen, 2014; Hammond et al., 2018a; La Roda, 2020; Mouterde et al., 2020; Shabalina, 2013). Im Gegensatz zu sitzendem Publikum in klassischen Konzertsälen kann Publikum bei Rock- und Popmusikkonzerten Absorptionskoeffizienten größer als 1 für Frequenzen oberhalb von 1kHz haben. Das ist möglich, da die Oberfläche der Menschen größer ist als die Fläche auf der sie stehen (Adelman-Larsen, 2014).

Ursprünglich war geplant, während realer Konzerte im Astra Kulturhaus Berlin Raumimpulsantworten zu messen. Ahnert et al. (2006) und J. Meyer (1992) zeigen, dass dafür auch Programmton verwendet werden kann, wenn man ausreichend Mittelungen verwendet. So hätte der *leere* Zustand ohne Publikum während des Soundchecks und der *volle* Zustand während des Konzerts mit Publikum gemessen werden können. Kurz nach dem Zeitpunkt der Idee bis zur Fertigstellung dieser Arbeit hat jedoch die globale Coronavirus-Pandemie dafür gesorgt, dass alle Veranstaltungen mit Publikum abgesagt oder verschoben werden mussten. Da aus diesem Grund keine realen Messungen des Publikumseffekt im Astra möglich waren, wird der Effekt in dieser Arbeit mit Methoden der virtuellen Akustik untersucht.

Mithilfe des am Institut für Technische Akustik (ITA) der RWTH Aachen entwickelten akustischen Simulationsprogramms RAVEN (Real-Time Framework for the Auralization of interactive Virtual Environments) (Schröder & Vorländer, 2011) und der ebenfalls dort entwickelten ITA-Toolbox (Bomhardt et al., 2017) für MATLAB (MATLAB, 2020) wird für diese Arbeit das Astra simuliert. Hierfür wird ein 3D-Modell des Astra, einmal im *leeren* Zustand und einmal *voll* mit einem „virtuellen“ Publikum versehen, erstellt. Aus der Simulation wurden Binaurale Raumimpulsantworten (BRIR) gewonnen, die anschließend mit Quellmaterial gefaltet werden können. So lässt sich ein direkter A/B-Vergleich zwischen dem *leeren* Soundcheck-Zustand und dem *vollen*, mit simuliertem Publikum gefüllten Astra, ermöglichen. Hiermit könnte sich ein Trainingssimulator für Nachwuchsmischer*innen entwickeln lassen, mithilfe dessen diese den Publikumseffekt hören und antizipieren können.

Im ersten Teil der Arbeit werden die theoretischen akustischen Grundlagen erläutert. Auf deren Basis werden dann die Methoden der Simulation aufgebaut. Anschließend werden die Differenzen der beiden Zustände *leer* und *voll* in Kapitel 4 dargestellt bevor sie in Kapitel 5 mit Bezug auf den FOH-Mix diskutiert werden. Es

werden einige Vorschläge für weitere Vertiefungen gegeben, die im Rahmen dieser Arbeit nicht umsetzbar waren. Im sechsten Kapitel wird ein Fazit gezogen.

2. Theoretische Grundlagen

In diesem Kapitel wird ein Überblick über die physikalischen Hintergründe der in dieser Arbeit behandelten Phänomene anhand der bestehenden und aktuellen Forschung geboten. Dafür wird zunächst beleuchtet, welche Faktoren die Raumakustik beeinflussen. Anschließend wird erläutert, wie wir Menschen hören und wie die Raumakustik auf uns wirkt. Danach wird beschrieben, wie das gewonnene Wissen eine Simulation ermöglicht, bevor anschließend auf die Hörbarmachung der Simulation eingegangen wird.

2.1. Raumakustik

Die Raumakustik beschreibt, wie und unter welchen Bedingungen sich Schall in einem geschlossenen Raum ausbreitet. Ein Schallereignis wird in einem geschlossenen Raum von dessen Begrenzungsflächen zurückgeworfen. Diese Rückwürfe überlagern sich nach und nach, sodass man ab einem gewissen Abstand von der Schallquelle (Hallradius r_H), von einem diffusen Schallfeld spricht. Ab diesem Radius ist die Energie des Diffusschalls größer als die des Direktschalls (Ahnert & Tennhardt, 2008; Möser, 2005). In den folgenden Abschnitten sollen die Faktoren, die maßgeblich für die Beeinflussung der Raumakustik verantwortlich sind, genauer beschrieben werden.

2.1.1. Absorption

Wenn eine Schallwelle mit einer bestimmten Schallintensität (I_{ein}) auf ein Hindernis stößt, zersetzt sie sich in die unterschiedlichen Anteile Schallreflexion (I_{ref}), Schalldissipation (I_{dis}) und Schalltransmission (I_{trans}), die je nach Beschaffenheit des Hindernisses unterschiedlich groß ausfallen (siehe Abbildung 1). Die Differenz zwischen eintreffender Schallintensität und reflektierter Schallintensität wird Absorption genannt.

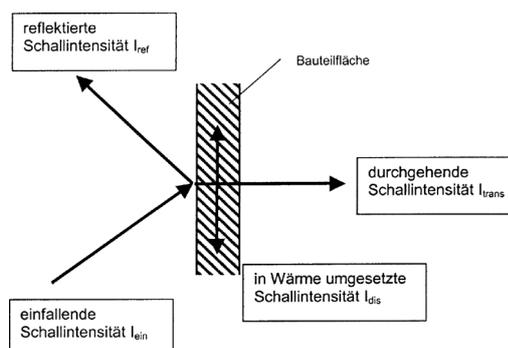


Abb. 1: Aufteilung einer einfallenden Schallwelle auf ein Bauteil (Ahnert & Tennhardt, 2008)

Für die Raumakustik werden die Schallabsorptionseigenschaften im Allgemeinen durch den Schallabsorptionsgrad α mit

$$\alpha = \frac{I_{ein} + I_{ref}}{I_{ein}} = \frac{I_{trans} + I_{dis}}{I_{ein}} \quad (1)$$

beschrieben. Dieser Faktor wird für unterschiedliche Materialien nach DIN EN ISO 453 (2003) in einem Hallraum bestimmt. Die Absorption der Luft wurde von (Harris, 1966) hinsichtlich unterschiedlicher Temperaturen und relativer Luftfeuchtigkeit untersucht und liegt der aktuell geltenden Norm DIN EN ISO 9613-2 (1999) zu Grunde. Jahrzehntelange Untersuchungen zur Bestimmung des Absorptionskoeffizienten α unterschiedlicher Materialien und Gase wurden in Referenztabellen zusammengefasst.

2.1.2. Reflexion

Die Schallreflexion (I_{ref}) ist neben der Absorption von besonderer Bedeutung für die raumakustische Simulation. Je nach Oberflächenstruktur des Hindernisses kann sich die Reflexion frequenzabhängig streuen (siehe Abbildung 2).

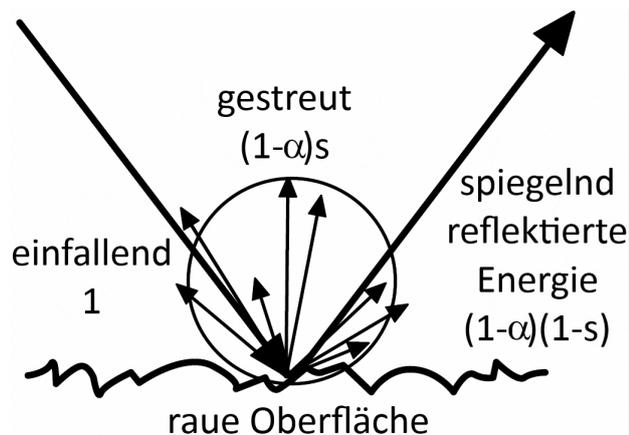


Abb. 2: Schallstreuung an rauher Oberfläche (Vorländer & Mommertz, 2000)

Frequenzen mit großer Wellenlänge im Verhältnis zur Oberflächentiefe werden wie die gemittelte Tiefe der Oberfläche reflektiert. Sobald jedoch die Oberflächentiefe annähernd gleich der Wellenlänge der eintreffenden Schallwelle ist, wird diese an der Oberfläche gestreut. Kleinere Wellenlängen werden dann an der Oberfläche in einem spitzeren Winkel reflektiert (Vorländer, 2008). Um diese Werte für raumakustische Simulationen nutzen zu können, hat Embrechts (2001) untersucht, wie sich unterschiedliche Oberflächenstrukturiefen auf den Streukoeffizienten auswirken.

2.1.3. Raumgeometrie

Einen weiteren großen Einfluss auf die Raumakustik hat die Geometrie des Raumes. Hier wird klassisch zwischen den Geometrien Schuhkarton, Fächer, Hufeisen und Weinberg unterschieden (Barron, 2010). Besonderheiten und Herausforderungen können noch Balkone, Logen und Galerien sowie bspw. Orchestergräben darstellen. Alle Geometrien besitzen in der Regel akustische Vorteile für ihre jeweilige Nutzungsart. Akustische Nachteile können durch Anbringen von Sekundärelementen wie Reflektoren und Absorbern teilweise ausgeglichen werden (Ahnert & Tennhardt, 2008). Generell besteht das Ziel, möglichst viel Direktschall und frühe, seitliche Reflexionen zum*zur Hörer*in zu bringen. Weitere Eigenschaften und Besonderheiten der unterschiedlichen Geometrien und deren akustischen Auswirkungen sind in der Fachliteratur u.a. bei Barron (2010) und Beranek (2004) gut dokumentiert.

2.1.4. Raumimpulsantwort

Die Impulsantwort eines Raumes (engl. „Room Impulse Response“, RIR) beschreibt den Schallübertragungsweg von einer Quelle zu einem Empfänger in einem Raum und verhält sich als weitgehend lineares, zeitinvariantes System (LTI). In realen Räumen können diese Impulsantworten $h(t)$ durch unterschiedliche impulsartige Schallsignale $s(t)$ wie Pistolenschüsse erzeugt und das System mit dem Ausgangssignal $g(t)$ an der Empfängerposition mit der Formel

$$g(t) = h(t) * s(t) \quad (2)$$

vollständig beschrieben werden. Da diese impulsartigen Schallsignale jedoch das gesamte Frequenzspektrum nicht ausreichend anregen, sind neue Verfahren wie das Sinus-Sweep oder das Maximalfolgeverfahren (MLS) entwickelt worden (siehe DIN EN ISO 18233 (2006)). Diese Verfahren können durch digitale Signalverarbeitung ein größeres Spektrum abbilden, einen besseren Dynamikbereich erreichen und durch Wiederholungen der Messung den Signalrauschabstand vergrößern (Bradley, 1996; Farina, 2000; Müller & Massarani, 2001).

Eine Impulsantwort kann in drei unterschiedliche Teile aufgeteilt werden, die für unterschiedlichen Wahrnehmungen durch das menschliche Gehör wichtig sind (siehe Abbildung 3).

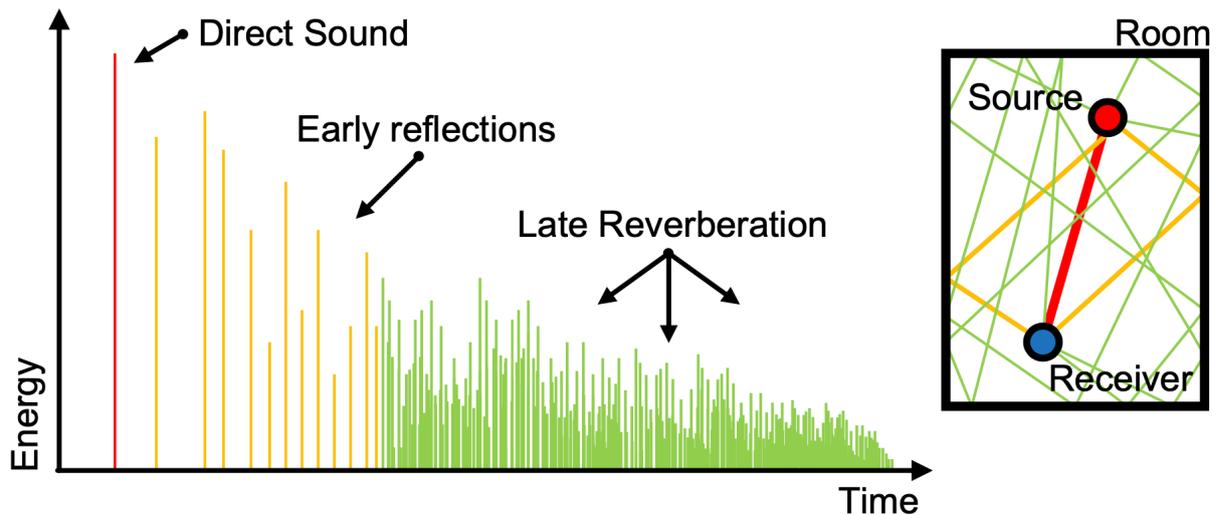


Abb. 3: Unterschiedliche Anteile einer Impulsantwort (Schröder, 2011)

Der Direktschall (rot) ist der zuerst eintreffende und stärkste Impuls am Empfänger und sorgt für die Ortung der Quelle (Präzedenzeffekt) (Blauert, 1997). In gelb sind die frühen Reflexionen (erster bzw. niedriger Ordnung) dargestellt, die in der Regel nur an einem Hindernis reflektiert werden. Die frühen Reflexionen können bis 10 dB lauter sein als der Direktschall, ohne einen Einfluss auf die Lokalisierung der Quelle zu haben (Haas Effekt) (Haas, 1949). Außerdem dienen diese Reflexionen zur Verbesserung der Sprachverständlichkeit, der Lautheit und der wahrgenommenen Breite der Quelle. Alle Reflexionen, die später als 50-80 ms nach dem Direktschall eintreffen, werden als späte Reflexionen (grün) bezeichnet. Es können keine einzelnen Reflexionen mehr wahrgenommen werden und so wirkt dieser diffuse Nachhall als Einhüllung des*der Hörers*in und gibt jedem Raum seinen spezifischen Klang.

Impulsantworten lassen sich außerdem durch unterschiedliche Reflektogramme darstellen, die den Vorteil haben, bestimmte Eigenschaften des Ausklingverhaltens hervorzuheben. Die Energy-Decay-Curve (EDC), auch Schroederplot genannt, gilt als eines der wichtigsten Reflektogramme und stellt die rückwärtsintegrierte und logarithmierte Raumimpulsantwort dar (Schroeder, 1965).

2.1.5. Raumakustische Parameter

Räume akustisch beschreiben und vergleichen zu können wurde durch die Forschungen von W.C. Sabine und insbesondere durch die daraus resultierende Definition der Nachhallzeit ermöglicht (Sabine, 1923). In den 1960er-Jahren wurden vermehrt Räume akustisch vermessen, um neben den subjektiven Kriterien zur

Raumempfindung auch objektive Kriterien anhand von physikalischen Maßen zu ermitteln. Im Folgenden sollen nun einige für diese Arbeit relevante raumakustische Parameter näher beschrieben werden, die aus unterschiedlichen Abschnitten der EDC abgeleitet werden können. Eine größere Auflistung ist unter anderem bei Ahnert und Tennhardt (2008), Beranek (1996), Kuttruff (2000) und in der DIN EN ISO 3382-1 (2009) zu finden.

Nachhallzeit, T

Die Nachhallzeit (T) ist die am frühesten erforschte und bedeutendste raumakustische Größe. Sie beschreibt die Zeit, die vergeht, bis eine Schallquelle im Raum einen bestimmten Schalldruckpegelabfall (messtechnisch) erfahren hat. Dieser Pegelabfall ist in DIN EN ISO 3382 (2009) für die Nachhallzeiten T10 (-5 bis -15 dB), T20 (-5 bis -25 dB) und T30 (-5 bis -35 dB) definiert.

Frühe Abklingzeit, EDT

Die frühe Abklingzeit (engl. „Early Decay Time“, EDT) beschreibt die Zeit, in der die Impulsantwort von 0 bis -10 dB abgefallen ist. Sie dient als bessere Beschreibung zur menschlichen Wahrnehmung der Nachhallzeit (Halligkeit), insbesondere wenn Musik spielt (Adelman-Larsen, 2014). Deshalb besteht die Möglichkeit, dass ein Raum trotz zu langer T30-Nachhallzeit aber kurzer EDT als akustisch akzeptabel angesehen wird.

Bassverhältnis, BR

Das Bassverhältnis (engl. „Bass Ratio“, BR) wurde von Beranek (1962) als das Verhältnis der Nachhallzeiten der unterschiedlichen Oktavmittenfrequenzen 125 Hz, 250 Hz, 500 Hz und 1000 Hz definiert.

$$BR = \frac{T_{125\text{Hz}} + T_{250\text{Hz}}}{T_{500\text{Hz}} + T_{1000\text{Hz}}} \quad (3)$$

Stärkemaß, G

Das Stärkemaß (engl. „Gain“, G) beschreibt den subjektiven Schallpegel. Es berechnet sich aus dem Verhältnis des Schalldrucks an der Hörposition $p(t)$ und dem Schalldruck, den dieselbe Quelle in 10 Meter Entfernung im Freifeld $p_{10}(t)$ hat.

$$G = 10 * \log \left(\frac{\int_0^{\infty} p^2(t) dt}{\int_0^{\infty} p_{10}^2(t) dt} \right) \quad (4)$$

Klarheit, C

Frühe Reflexionen haben einen großen Einfluss darauf, wie wir reflektierten Schall wahrnehmen. Das Klarheitsmaß (engl. „Clarity“, C) beschreibt das Energieverhältnis von frühen zu später eintreffenden Reflexionen. Für Musik wird es mit der Zeitgrenze 80 ms berechnet.

$$C_{80} = 10 * \log \left(\frac{\int_0^{0,080} p^2(t) dt}{\int_{0,080}^{\infty} p^2(t) dt} \right) \quad (5)$$

Deutlichkeit, D

Die Deutlichkeit (engl. „Definition“, D) beschreibt die früh eintreffende Schallenergie im Verhältnis zur Gesamtenergie. Meist wird als Zeitgrenze 50 ms verwendet, welche sich besonders für Sprache gut eignet. Das Maß C_{50} , auch als Deutlichkeitsmaß bekannt, kann aus D_{50} berechnet werden.

$$D_{50} = \frac{\int_0^{0,050} p^2(t) dt}{\int_0^{\infty} p^2(t) dt} \quad (6)$$

Schwerpunktzeit, T_s

Die Schwerpunktzeit (T_s) (Kürer, 1972) betrachtet nur den Zeitpunkt des ersten Momentes in der quadrierten Impulsantwort und wird wie folgt berechnet

$$T_s = \frac{\int_0^{\infty} t p^2(t) dt}{\int_0^{\infty} p^2(t) dt} \quad (7)$$

Sprach-Übertragungs-Index, STI

Der Sprach-Übertragungs-Index (engl: „speech transmission index“, STI) gibt die Sprachübertragungsqualität einer Quellen-Empfänger-Beziehung an. Der STI variiert mit der Nachhallzeit und den akustischen Störgeräuschen und wird insbesondere für die objektive Bewertung von Räumen für Sprache, wie bspw. Unterrichtsräume, als auch für die Verständlichkeit von Beschallungsanlagen und Evakuierungsanlagen verwendet (DIN EN ISO 9921:2004-02, 2004). Zur Berechnung des STI wird eine Modulationsübertragungsfunktion (MTF) verwendet (Houtgast & Steeneken, 1973).

$$m(F) = \frac{1}{\sqrt{1 + (2\pi F \frac{T}{13.8})^2}} * \frac{1}{1 + 10^{-\frac{S/N}{10dB}}} \quad (8)$$

Die MTF ist abhängig von der Modulationsfrequenz F in Hz, welche Sprachschwankungen beschreibt, die durch akustische Trennung von Sätzen und Wörtern entsteht, sowie der Nachhallzeit T in s und dem Signal-Stör-Verhältnis S/N in dB. Unterschiedliche Spektralbereiche der Sprache (sieben Oktavbandträger von 125 Hz bis 8 kHz) werden mit einer oder mehreren Modulationsfrequenzen von 0,63 Hz bis 12,5 Hz moduliert. Die Ergebnisse der Einzelberechnungen werden anschließend in Oktavbändern gemittelt und nach einer Frequenzgewichtung als der STI ausgegeben (DIN EN 60268-16:2012-05, 2012; DIN EN ISO 9921:2004-02, 2004).

Silbenverständlichkeit	Unverständlich	Schwach	Angemessen	Gut	ausgezeichnet
STI-Wert	0 - 0,3	0,3 – 0,45	0,45 – 0,6	0,6 – 0,75	0,75 - 1

2.1.6. Mittelwertbildung und Variationen der Zeitgrenzen

Viele Richtwerte der akustischen Parameter, die in der Literatur angegeben werden, beziehen sich hauptsächlich auf klassische Konzertsäle und Räume ohne Beschallungsanlagen. Eine differenzierte Betrachtung der Parameter für Räume mit elektroakustischen Verstärkungen wird von Adelman-Larsen (2014) empfohlen. So können veränderte Zeitgrenzen, andere Frequenzbänder und bestimmte Verhältnisse zwischen unterschiedlichen Parametern bessere Einschätzungen von Räumen für Rock- und Popmusik bieten. Ein Beispiel dafür ist das EDT/T30-Verhältnis (Adelman-Larsen, 2015).

2.1.7. Einfluss des Publikums

In der vorhandenen Literatur wurden bereits in den 1960er-Jahren Versuche durchgeführt, die Absorption von Menschen zu bestimmen, um eine Bestuhlung für klassische Konzertsäle so zu entwerfen, die im unbesetzten Zustand dieselben akustischen Eigenschaften besitzen, wie wenn diese Bestuhlung durch Publikum besetzt ist (Beranek & Hidaka, 1998; Kath & Kuhl, 1964; Martellotta et al., 2011). Nachdem dieses Wissen seit Jahrzehnten so gekonnt eingesetzt wird, hat man in den vergangenen Jahren weitere Studien zu den akustischen Eigenschaften des Publikums durchgeführt. Beispielsweise haben Jeong et al. (2012) zwei- bis dreistündige Konzerte an vier bis fünf unterschiedlichen Positionen im Raum aufgenommen, um Publikumsgeräusche zu extrahieren. Sie haben festgestellt, dass

die technischen Grundgeräusche, die es in einem Konzertsaal gibt, durch die Publikumsgeräusche im Mittel um 8 dB verdeckt werden. Weiter noch, umso lauter die technischen Hintergrundgeräusche, desto lauter der Publikumsgrundpegel.

Shabalina (2013) hat untersucht, wie sich tiefe Frequenzen (30-100 Hz) durch Publikum hindurch ausbreiten. Sie untersuchte das Publikum als poröses Medium mithilfe einer BEM-Simulation und bestätigte dies weiter mit Messungen bei einem Open-Air-Festival. Es zeigt sich, dass Publikum eine andere Impedanz hat als Luft und sich somit tiefe Frequenzen anders durch Publikum hindurch ausbreiten. Durch die unterschiedliche Impedanz können sich tiefe Frequenzen im Publikum anders reflektieren und dadurch einen höheren Schalldruck und Interferenzen erzeugen als es ohne Publikum durch die Luft der Fall wäre. Martellotta et al. (2011) untersuchten die akustischen Auswirkungen von Personen hinsichtlich unterschiedlicher Besetzungsdichten (sitzend oder stehend) und getragener Kleidung (Sommer/Winter) in Reihen. Adelman-Larsen hat mit seinen Studien einen neuen Weg eingeschlagen, in dem er statt klassischer Konzertsäle Mehrzweckhallen und Gebäude für Rock- und Popmusik raumakustisch untersucht hat (Adelman-Larsen, 2014; Adelman-Larsen et al., 2007). Im Jahr 2004 hat der Autor im Veranstaltungsort „Pumpehuset“ in Kopenhagen eine Messung zur Absorption von Publikum durchgeführt, die in Abbildung 4 zu sehen ist.

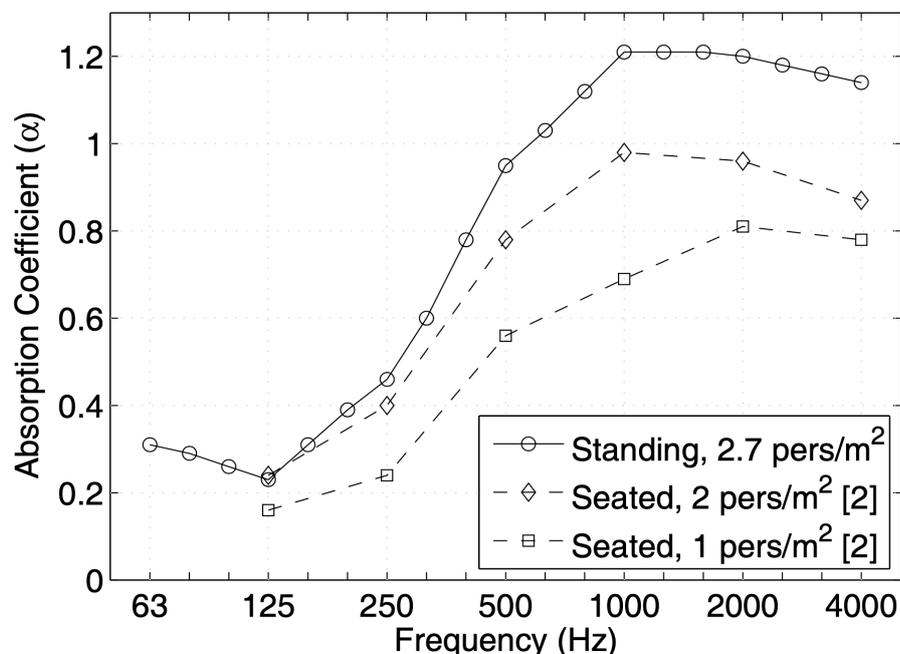


Abb. 4 Absorptionskoeffizienten von Publikum (Adelman-Larsen et al., 2007)

Das Publikum hat auch einen Effekt auf den Frequenzbetrag und die Phase von Lautsprecherarrays. Lautsprechersysteme werden in der Regel in *leeren*

Veranstaltungsorten installiert und anschließend eingemessen. Mouterde et al. (2020) haben untersucht, welchen Einfluss das Publikum bei tiefen Frequenzen auf die Einmessung von geflogenen Lautsprechersystemen und Groundstacks hat. Sie konnten zeigen, dass Publikum Tiefpassfilter-ähnlich wirkt und Frequenzberge zu tieferen Frequenzen hin verschiebt. Außerdem konnten sie zeigen, dass mit höherer Dichte des Publikums diese Verschiebung ebenfalls höher ausfällt. Weitere Informationen zum Einfluss von Publikum auf PA-Systeme, wie man diese optimal einstellt und während Vorstellungen und Konzerten anpasst, können u.a. bei Corteel et al. (2017) oder McCarthy (2016) gefunden werden.

Ein Mensch gibt nach Becker (2011) bei nicht-physischer Tätigkeit und 20°C Raumtemperatur ca. 35 g Wasser pro Stunde an seine Umgebung ab und hat eine Wärmeleistung von ca. 120 Watt. Bei Rock- und Popmusik Konzerten bewegt und tanzt ein Großteil des Publikums, was sowohl die Feuchtigkeitsabgabe durch Atmen und Schwitzen, als auch die Wärmeleistung erhöht. Formel (9) aus G. Meyer und Schiffner (1986) beschreibt die relative Luftfeuchtigkeitszunahme für ungesättigte Luft als

$$\phi = \frac{mD \cdot RD \cdot T}{ps \cdot V} \quad (9)$$

mit

ϕ = relative Luftfeuchtigkeitszunahme

mD = Masse des hinzukommenden Wasserdampfes (kg)

RD = Gaskonstante für Wasserdampf (461,5 Nm/kgK)

T = Temperatur in [K] (20°C = 293 K)

ps = Wasserdampfsättigungsdichte (kg/m³)

V = Raumvolumen

Beispiel: Bei einem zweistündigen Konzert und nicht-physisch aktiven Personen gibt jede Person 70g Wassermenge an die Luft ab. Mit der Volumenkenzahl (Raumvolumen / Anzahl an Personen) nach Fasold und Veres (2003) kann mit 2517 m³ / 828 Personen (Raumvolumen Astra / Anzahl an simulierten Personen) 3 m³ Luft pro Person zugewiesen werden. Daraus folgend ergeben sich 23,3 g/m³ und für 828 Personen ca. 19 kg. Mit $ps = 2337 \text{ N/m}^2$ (bei 100 kPa Luftdruck) errechnet sich eine relative Luftfeuchtigkeitszunahme von 43,7 %.

Zusammenfassend muss Publikum immer genau betrachtet werden, da sich je nach Besetzungsdichte und Besetzungsart die Raumakustik stark verändert. Neben

dem Absorptionskoeffizient verändert sich auch die Raumtemperatur und die Luftfeuchtigkeit durch Wärme- und Wasserabgabe der Menschen, welche wiederum sehr mit der physischen Aktivität des Publikums variiert.

2.2. Räumliches Hören

Menschen hören in der Regel mit zwei Ohren (binaural), die es ermöglichen, Schallereignisse zu lokalisieren. So kommt eine Schallquelle an beiden Ohren zu unterschiedlichen Zeitpunkten (engl. „Interaural Time Differences“, ITD) und mit unterschiedlicher Lautstärke (engl. „Interaural Level Differences“, ILD) an. Außerdem hat dieselbe Schallquelle an beiden Ohren ein unterschiedliches Frequenzspektrum, welches unter anderem durch Beugung und Reflexionen an Kopf, Schulter und der Ohrmuschel entsteht (Blauert, 1997; Møller, 1992).

2.2.1. HRTFs

Diese Eigenschaften des räumlichen Hörens können durch die Außenohrübertragungsfunktion (engl. „Head-Related Transfer Funktion“, HRTF) beschrieben werden. Ein binaurales Paar von HRTFs enthält die Frequenzen des eintreffenden Schalls, die Entfernung der Schallquelle und die Schalleinfallrichtung. Durch Division der beiden HRTFs können interaurale Phasen- und Gruppenlaufzeitdifferenzen sowie Pegeldifferenzen berechnet werden (Kohlrausch et al., 2013).

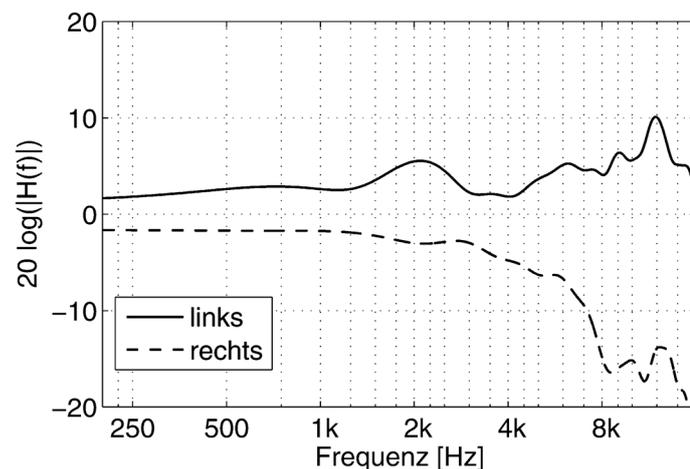


Abb. 5: Frequenzgang einer HRTF für ein eintreffendes Schallereignis aus 90° Links (90° Azimut, 0° Elevation) für beide Ohren (Blauert & Braasch, 2008)

HRTFs spielen in Simulationen eine wichtige Rolle, da Schallquellen durch HRTF gefiltert Ohrsignale erzeugen. Aufgrund der Beugung und Reflexion von Schall an Kopf, Schulter und den Ohrmuscheln, die bei jedem Menschen anders sind, lohnt es sich individuelle HRTFs für Kopfhörersimulationen zu nutzen, da ansonsten die

Schallquellen möglicherweise schlecht externalisiert, diffus oder nicht korrekt lokalisiert werden können (Hartmann & Wittenberg, 1996; Wightman & Kistler, 1989). Mithilfe von Kunstköpfen können akustische Messungen vor Ort gemacht werden, die die HRTF bereits in der akustischen Messung integrieren.

2.2.2. BRIR

Binaurale Raumimpulsantworten (engl. „Binaural Room Impulse Response“, BRIR) kombinieren nun die akustische Beschreibung einer Quellen-Empfänger-Beziehung in einem Raum durch die Impulsantwort mit der Richtungsinformation, welche durch eine HRTF beschrieben wird. Mithilfe von BRIRs können anschließend in der Binauralsynthese nachhallfreie Quellsignale gefaltet werden, um eine Rekonstruktion des gemessenen Schallfeldes mitsamt der Richtungsinformation zu ermöglichen.

2.3. Raumsimulation

In realen Gebäuden können akustische Messungen durchgeführt werden, die den Status Quo erheben. Anhand der Ergebnisse können dann Maßnahmen zur Verbesserung der Akustik dieses Raumes vorgenommen werden. Jedoch gibt es auch hier viele Handlungsoptionen, z.B. an welchen Stellen Absorber oder Reflektoren installiert werden können, um ein bestmögliches Ergebnis zu erzielen. Um dies kostenfreundlich zu gestalten, hat man bereits früh angefangen, Räume als Maßstabs-Modell nachzubauen und damit Tests durchzuführen und diesen somit zu simulieren (Ahnert & Tennhardt, 2008). Heutzutage können mithilfe modellbasierter computergestützter Raumakustiksimulationen selbst nicht-reale Räume akustisch simulieren werden. So können beispielsweise akustische Optimierungen vor der physischen Installation in der virtuellen Simulation evaluiert werden. In den folgenden Abschnitten soll detaillierter auf die Arbeitsweise von heutzutage weit verbreiteten raumakustischen Simulationen eingegangen werden.

2.3.1. Methoden der Raumsimulation

Raumakustische Eigenschaften können durch mathematische Berechnungen simuliert werden. Die Berechnungen basieren auf zwei verschiedenen Ansätzen: Dem wellenbasierten Verfahren und der geometrischen Akustik. Die Wellenbasierten Verfahren, wie die Finite Elemente Methode (FEM), teilen Räume in eine endliche Anzahl an Teilräumen auf und berechnen für diese einzeln die Lösungen der Gleichung. Dieser Ansatz bietet eine sehr hohe Genauigkeit, da er die Eigenheiten

der Wellenausbreitung (Beugung und Bildung von Raummoden) betrachtet (Schröder, 2011). Allerdings ist dieses Verfahren sehr rechenintensiv und eignet sich dadurch vor allem für tiefe Frequenzen und kleine Räume, die aufgrund von Modenbildung nicht durch andere Methoden berechnet werden können.

Die Schröderfrequenz $f = 2000 * \sqrt{\frac{T}{V}}$ bestimmt die Grenze, ab welcher sich die Raummoden statistisch überlappen. Oberhalb dieser Grenze können Frequenzen mithilfe von geometrischer Akustik simuliert werden, da davon ausgegangen wird, dass die Wellenlänge der Frequenzen im Vergleich zu den geometrischen Abmessungen der im Raum vorkommenden Flächen klein ist (Lerch et al., 2009). Bei der geometrischen Akustik werden Schallwellen durch Strahlen simuliert, die von einer Quelle aus in den Raum gesendet werden und als eine ebene Wellenfront mit deren Ausbreitungsrichtung angesehen werden. Moderne geometrische Raumakustiksimulationen nutzen zur Berechnung der Strahlen eine Kombination aus Spiegelschallquellen und dem aus der Optik bekannten Teilchenverfolgungsmodell Raytracing.

2.3.1.1. Deterministische Spiegelschallquellen

Der deterministischen Spiegelschallquellenmethode von Allen und Berkley (1979) liegt eine einfache geometrische Berechnung zugrunde. Hier wird die Reflexion einer Quelle an Raumbegrenzungsflächen durch Spiegelung erzeugt (siehe Abbildung 6).

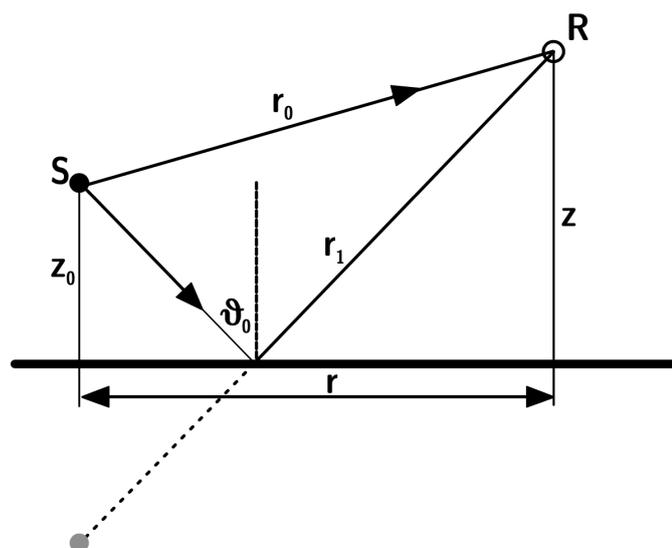


Abb. 6: Spiegelschallquellen-Modell mit S als Quelle und R als Empfänger (Vorländer, 2008)

Spiegelschallquellen, die eine einfache Reflexion abbilden, entsprechen Spiegelschallquellen erster Ordnung. Weitere Spiegelungen entsprechen dann n-ter Ordnung. Die Berechnung von Spiegelschallquellen ist sehr exakt, steht jedoch in ihrer Berechnungszeit in exponentiellem Zusammenhang zwischen den Raumbegrenzungen und der Reflexionsordnung (Ahnert & Tennhardt, 2008).

2.3.1.2. Stochastisches Raytracing

Das Raytracing funktioniert durch Aussenden einer definierten Anzahl von „Partikeln“, die auf einer Quelle gleichmäßig verteilt sind (siehe Abbildung 7).

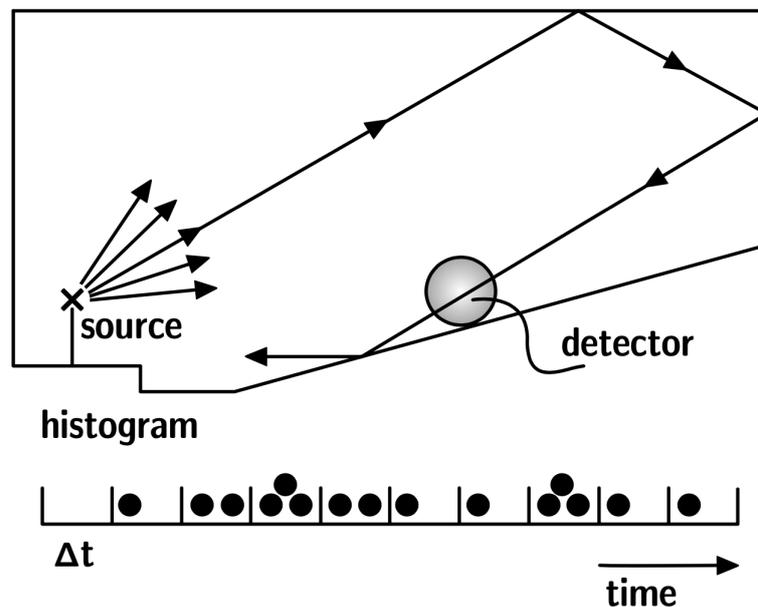


Abb. 7: Raytracing Methode (Vorländer, 2008)

Diese Partikel besitzen eine gewisse Energie, die von der Richtwirkung der Quelle abhängig ist. Sie bewegen sich mit Schallgeschwindigkeit durch den Raum und werden von geometrischen Objekten reflektiert. Während der Ausbreitung verlieren die Partikel Energie durch die Absorption der Luft und die materialabhängige Absorption und Streuung an geometrischen Flächen. Am Empfänger werden die ankommenden Partikel nach Zeit des Eintreffens mit ihrer verbleibenden Energie registriert (Schröder, 2011; Vorländer, 2008). Der Rechenaufwand dieser Methode ist proportional zur Wandanzahl (Ahnert & Tennhardt, 2008).

2.3.1.3. Hybride Verfahren

Das hybride Verfahren nutzt die Vorteile beider Methoden der geometrischen Akustik um die bestmögliche Ergebnisqualität ins Verhältnis zur Rechenzeit zu

stellen. Abbildung 8 zeigt die Zusammensetzung der Impulsantwort durch die Teil-Ergebnisse beider Methoden. Die frühen, besonders für die Lokalisierung der Quelle wichtigen, Reflexionen werden mit der Spiegelschallquellenmethode berechnet. Die späten Reflexionen werden mithilfe des stochastischen Raytracing ermittelt.

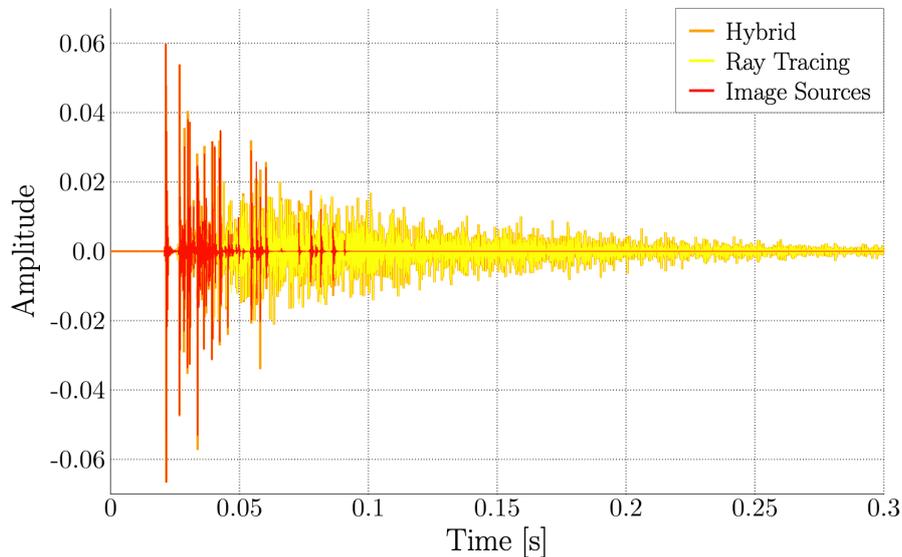


Abb. 8: Zusammensetzung einer Impulsantwort mithilfe des hybriden Simulationsverfahrens (Schröder, 2011)

Der in dieser Arbeit verwendete Raumakustik Simulator RAVEN (Real-Time Auralization of Virtual ENvironments) (Schröder & Vorländer, 2011) verwendet die hybride Methode zur *vollständigen* Beschreibung der akustischen Umgebung. Die BRIR wird zunächst durch Multiplikation aller am Übertragungsweg beteiligten Transfer- und Filterfunktionen des LTI-Systems im Frequenzbereich berechnet, bevor sie schlussendlich in den Zeitbereich zurück transformiert wird (Vorländer, 2008). In der folgenden Formel (10) ist dies für eine Quellen-Empfänger Beziehung dargestellt.

$$H_{Q \rightarrow E} = H_{D,Quelle} \cdot H_{Luft} \cdot H_{Kopf} \cdot \prod_{HitWalls} H_{E_i} \quad (10)$$

Hier ist $H_{Q \rightarrow E}$ die Übertragungsfunktion des Weges von der Schallquelle zum Empfänger, $H_{D,Quelle}$ die Richtcharakteristik der Quelle, H_{Luft} die Luftabsorption, H_{Kopf} die HRTF und H_E die Übertragungsfunktion jedes Zusammentreffens der Schallwelle mit einer Oberfläche. Klirrranteile werden in der Simulation nicht berücksichtigt.

2.4. Auralisation

Zur Hörbarmachung der numerisch simulierten, gemessenen oder synthetisierten Daten von akustischen Räumen wird die Auralisation verwendet (Kleiner et al., 1993; Vorländer, 2008). Diese wird durch Falten des meist nachhallfreien Quellmaterials mit der Impulsantwort erzeugt. Die Wiedergabe der Auralisation kann über Lautsprecheranordnungen (wie Wellenfeldsynthese oder Higher Order Ambisonics) erfolgen oder als Binauralsynthese über Kopfhörer. Die Auralisation muss laut Vorländer (2008) jedoch nicht physikalisch perfekt sein. Es reicht aus, wenn sie von der menschlichen Wahrnehmung als korrekt angenommen werden kann. Dies zeigten auch Studien von Lindau und Weinzierl (2012) und Moldrzyk et al. (2005), die untersuchten, ob Simulationen von akustischen Umgebungen als plausibel empfunden werden.

Die Binauralsynthese über Kopfhörer bringt viele Vorteile mit sich. Sie ist kostengünstig, portabel und ermöglicht ein schnelles Umschalten von akustischen Stimuli, bspw. von unterschiedlichen Positionen innerhalb von virtuellen Umgebungen, unabhängig vom physikalischen Raum und dessen akustischen Eigenschaften, in welchem sie stattfindet (Lindau et al., 2007). Damit die Binauralsynthese jedoch unabhängig von den Mikrofonfrequenzgängen des Kunstkopfes, von den Frequenzgängen des Kopfhörers und dem Übertragungsweg zwischen Kopfhörer und individuellem Ohrkanal ist, gibt es Kompensationsfilter, die zur Entzerrung des Übertragungswegs angewendet werden können, wie die Kopfhörerübertragungsfunktion (engl. „Headphone Transfer Function“, HpTF) (Møller, 1992). Wenn man die für die Auralisation verwendeten Kopfhörer auf dem Kunstkopf entzerrt, ist eine individuelle HpTF nicht nötig und führt sogar zu einer realistischeren Wahrnehmung der Simulation (Lindau & Brinkmann, 2012).

Mithilfe eines Trackingsystems kann die Position des Kopfes ermittelt werden und ermöglicht dadurch realistischere Ergebnisse durch eine dynamische Binauralsynthese. In modernen Auralisationssystemen wird dafür der realen Kopfposition die entsprechende BRIR zugewiesen. Die dynamische Binauralsynthese spielt in dieser Arbeit eine sekundäre Rolle, da nur statische BRIRs in dieser Arbeit berechnet werden. Weitere Informationen zur dynamischen Binauralsynthese können bei Lindau (2014b), Moldrzyk et al. (2004) oder Vorländer (2008) gefunden werden.

3. Methodik

3.1. Modellauswahl – Astra Kulturhaus Berlin

Um die akustischen Auswirkungen auf einen FOH-Mix durch das Publikum anhand der Eigenschaften eines realen Raumes zu untersuchen, wurde in dieser Arbeit das Astra Kulturhaus Berlin als Fallbeispiel verwendet. Das Astra ist ein angesehener und gut gebuchter Livemusik-Club und eignet sich durch seine Schuhschachtel-Geometrie besonders gut für eine virtuelle Simulation. Es hat eine angegebene Kapazität für 1500 Menschen, besitzt eine ca. 80 m² große Bühne und eine der Raumgröße entsprechende Beschallungsanlage (siehe „Technical Rider“ im Anhang E). Das ehemalige Kulturhaus der DDR-Reichsbahn besitzt zwischen den acht quadratischen Säulen einen echten Parkettfußboden. An den seitlichen Wänden wurde die Holzvertäfelungen aus dem ehemaligen DDR-Rundfunksaal eingebaut (Asadolahzadeh, 2009). Weitere akustische Maßnahmen sind u.a. die schweren Samtvorhänge an den Fluchttüren und Stirnseiten sowie die abgehängte Akustikdecke.



Abb. 9: Astra Kulturhaus Berlin. Foto von Frank Eidel (www.frank-eidel.de)

3.2. Vorbereitung des Modells für Simulation

Um eine Simulation erfolgreich durchzuführen ist es notwendig, im Vorhinein möglichst alle Werte des zu simulierenden Gebäudes zu bestimmen, damit die Simulation möglichst genau das reale Gebäude abbildet. Hierfür wurde zunächst im Astra Aufmaß genommen, anschließend wurden über die installierte PA

Impulsantwort-Messungen durchgeführt, um die Simulation an die reale Impulsantwort anzupassen und später die durch die Simulation generierten Impulsantworten mit den real gemessenen zu vergleichen.

3.2.1. Aufmaß

Das Aufmaß wurde mithilfe eines Lasermessgeräts, Gliedermaßstabes und Maßbands im Astra vorgenommen. Dabei wurden die unvollständigen Maßangaben des Grundrisses des Astra (siehe Anhang E, „Technical Rider“) mit den gemessenen Werten überprüft und ergänzt. Besonders wurde der Parkettfußboden in der Mitte des Saals, die Deckenhöhe und die einzelnen Höhen der getroffenen raumakustischen Optimierungen ausgemessen. Die Position der Saalstützen wurde korrigiert und die zweite FOH-Position bestimmt, die sich zwischen der dritten Säulenreihe von der Bühne gesehen aus befindet. Zusätzlich wurde die Winkelung der PA bestimmt, damit der Abstrahlwinkel in der Simulation mit dem realen Astra übereinstimmt.

3.2.2. Impulsantworten

Nachdem das Aufmaß vorhanden war, wurde das Astra akustisch vermessen. Die Impulsantwort-Messungen über die PA wurden vor Ort mit der Software Smart in der Version 8 (Rational Acoustics, 2020) durchgeführt. Hierfür wurde ein zweikanaliger Aufbau gewählt, der nach Herlufsen (1984) besonders für Impulsantwort-Messungen geeignet und in Abbildung dargestellt ist. Als Messmikrofon wurde ein Audix TM1-Plus an einem Roland Edirol UA-25EX Audiointerface verwendet. Das Messsignal wurde direkt mit einem lokalen Input des Digico SD8 Mischpults verbunden. Im Mischpult lief das Signal ohne jegliche Klang- oder Dynamikveränderung direkt über den Masterbus durch eine Matrix.

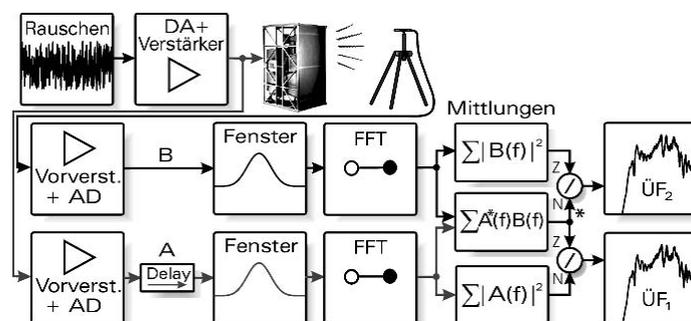


Abb. 10: Zwei-Kanal FFT Messaufbau (Müller, 2008)

Über die „Delayfinder“-Funktion in Smart wurden die beiden Signale zeitlich übereinandergelegt. Dadurch wird die Systemlatenz des Mischpults, des

Systemkontrollers (inkl. seiner Laufzeiteinstellungen für die gesamte PA), sowie der Weg des Schalls, von der PA durch den Raum zum Messmikrofon (FOH-Position Mitte: 16,17 m zur PA; Hinten: 23,75 m zur PA-Links und 24,46 m zur PA-Rechts), kompensiert.

Gemessen wurde nacheinander an der FOH-Position Mitte, welche sich von der Bühne zwischen der dritten Säulenreihe befindet. Dort wurde einmal auf 1,8 m und einmal auf 0 m Höhe gemessen. Bei der 0 m Messung wird aus dem Kugelmikrofon eine Halbkugel-Grenzfläche, bei welcher Bodenreflexionen nicht mehr auftreten können. Anschließend wurde noch am festen Saal-FOH gemessen, welcher sich an der Hallenrückwand befindet und auf einem 25,5 cm hohen Podest steht. Dort wurde nur die Messung auf 1,8 m über dem Podest aufgenommen, da der FOH an der Vorderseite verblendet ist.

Als Messsignale (siehe Tabelle 1, Spalte „Sti“) wurden sowohl rosa Rauschen (pn) als auch Sinus-Sweeps (ps) verwendet. Die FFT-Längen und die Anzahl der Mittelung wurden variiert. Tabelle 1 zeigt eine Übersicht der Messungen, die für alle drei Messpositionen durchgeführt wurden. Bei den beiden Messreihen an der FOH-Position Mitte wurde nur die PA-Links und PA-Rechts gemessen. An der FOH-Position Hinten gab es noch drei Messungen der Delaylautsprecher. Diese hängen auf derselben Höhe wie die FOH-Position Mitte.

Tabelle 1: Übersicht der Impulsantwort-Messungen im Astra

				FOH-Mitte 1,8 m		FOH-Mitte 0 m		FOH-Hinten 1,8 m			
Temperatur [°C]				12		11		11		11	
Lautsprecher				PA-L	PA-R	PA-L	PA-R	PA-L	PA-R	DLY-L	DLY-R
Referencedelay [ms]				56.53	56.48	57.62	57.33	77.92	79.92	47.58	50.73
Nr.	Sti	FFT	Avg	RT60	RT60	RT60	RT60	RT60	RT60	RT60	RT60
1	pn	256k	0	0,806	0,789	0,763	0,733	0,860	0,838	-	-
2	pn	256k	4	0,823	0,789	0,759	0,756	0,912	0,865	-	-
3	pn	64k	0	0,841	0,804	0,743	0,714	0,862	0,812	0,744	0,769
4	pn	64k	4	0,794	0,788	0,770	0,756	0,881	0,829	0,736	0,750
5	pn	64k	16	0,844	0,795	0,763	0,754	0,866	0,869	-	-
6	ps	64k	0	0,715	0,703	0,719	0,654	0,815	0,820	0,694	0,690
7	ps	64k	4	0,773	0,663	0,733	0,675	0,832	0,845	-	-
8	ps	64k	16	0,763	0,663	0,702	0,665	0,846	0,847	-	-
MW je Messreihe				0,795	0,749	0,744	0,713	0,859	0,841	0,725	0,736
SD =				0,044	0,062	0,024	0,043	0,030	0,020	0,027	0,041

3.2.3. 3D-Modell

Das 3D-Modell wurde anhand des Aufmaßes in SketchUp Make 2016 (Trimble Inc., 2016) erstellt. SketchUp wurde als CAD Programm verwendet, da es ein Plug-in für RAVEN gibt, welches es ermöglicht, das 3D-Modell für die Simulationsumgebung zu exportieren (Aspöck et al., 2014). Neben den Maßen der einzelnen Flächen gilt es in SketchUp auch den einzelnen Flächen Materialien zuzuweisen. Hierfür wurden den unterschiedlichen Flächen wie beispielsweise Parkett, Holzvertäfelung oder Akustikdecke unterschiedliche Farben zugewiesen. Später werden dann über RAVEN den unterschiedlichen Farbflächen Absorptions- und Beugungswerte zugewiesen, damit diese die akustischen Eigenschaften des Raumes repräsentieren. Als letzten Schritt werden die RAVEN-Quellen und -Empfänger im Modellraum platziert. Über das Plug-in werden zum Schluss alle Einstellungen als RAVEN-Project-file (.rpf) und das Modell als 3D-Object (.ac) exportiert. In Tabelle 2 sind einige raumspezifische Parameter für das Astra dargestellt.

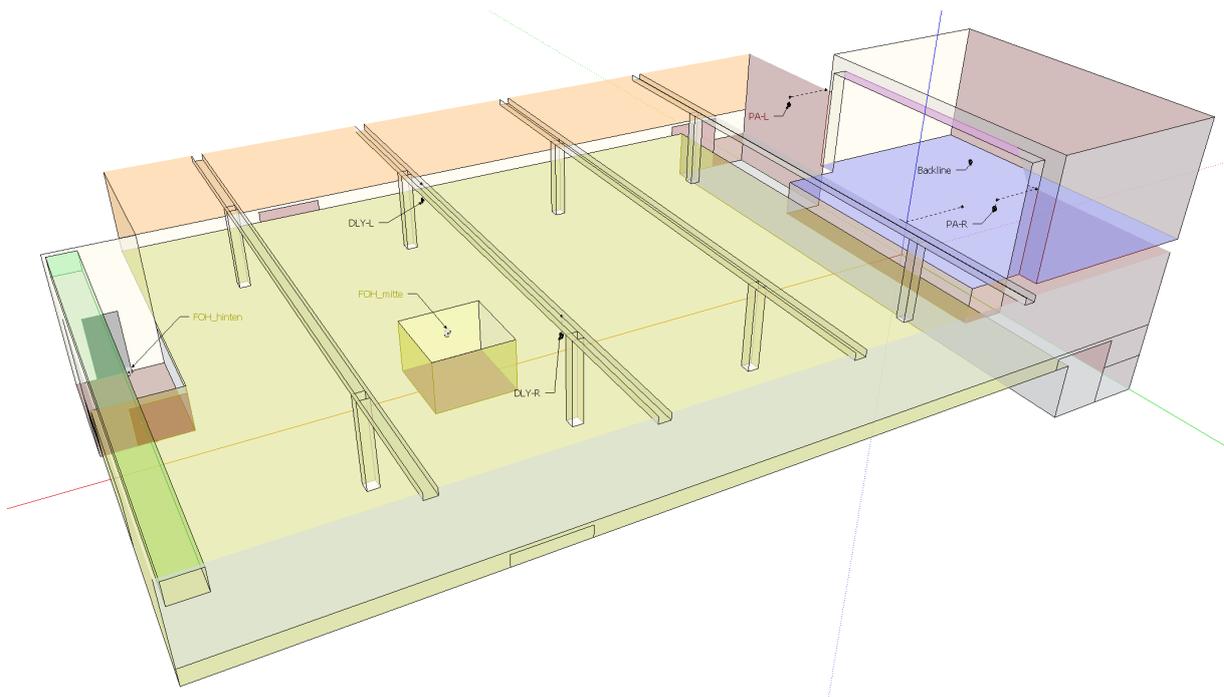


Abb. 11: SketchUp-Modell des Astra Kulturhaus im vollen Zustand

Tabelle 2: Raumparameter des Astra

Status	V [m ³]	A _{ges} [m ²]	α _m	r _H [m]	d _{min} [m]	T _{mean Sabine} [s]
leer	2517,48	1745,3	0,42	3,63	7,25	0,56
voll	1855,2	1677,78	0,81	4,95	9,9	0,22

3.2.4. Materialien

Die Materialien wurden bei der Begehung begutachtet, fotografiert und dokumentiert. Anschließend wurden allen Materialien Absorptionswerte aus der Materialdatenbank für raumakustische Absorptionsgrade der Physikalisch Technische Bundesanstalt (2018) zugewiesen. Dabei sind die Werte der Tabelle jedoch nur sehr grob aufgelöst (Oktavwerte oder schlechter). Die Werte wurden vorab händisch auf die 31 Terzbänder interpoliert, um Nullwerte zu vermeiden. Die Beugungswerte wurden mithilfe eines MATLAB-Skriptes aus der mittleren Frequenz der Absorptionswerte bei 707 Hz berechnet (Embrechts, 2001).

Die gemessenen Impulsantworten aus Abschnitt 3.2.2 wurden in MATLAB importiert. Dort wurden die Mittelwerte aller Messungen jeweils für PA-Links und PA-Rechts für alle Terzbänder von 20 Hz - 20 kHz bestimmt. Diese beiden Mittelwerte wurden weiter zusammengemittelt, um eine gemittelte T30-Nachhallzeit in Terzbändern für das Astra zu erhalten. Diese gemittelte Nachhallzeit kann nun in MATLAB als Zielnachhallzeit (targetReverbTime) in der Funktion

```
RTnew = rpf.adjustAbsorptionToMatchReverbTime(targetReverbTime,
roomID, validationsimulation, materialPrefix, materialAppendix,
materialIndexVector)
```

verwendet werden.

Tabelle 3: Materialübersicht für die im Modell verwendeten Materialien

Materialname	Fläche in m ²		Fläche %		Absorptionsgrade gemittelt auf Oktavbänder										scatt707
	leer	voll	leer	voll	31 Hz	63 Hz	125 Hz	250 Hz	500 Hz	1 kHz	2 kHz	4 kHz	8 kHz	16 kHz	
Acousticwalls	111,67	111,67	6	7	0,53	0,58	0,81	0,94	0,94	0,83	0,37	0,26	0,16	0,32	0,30
Ceiling	417,82	417,82	24	25	0,84	0,88	0,93	0,94	0,94	0,92	0,72	0,53	0,61	0,75	0,03
Curtains	120,39	112,10	7	7	0,70	0,81	0,91	0,94	0,94	0,92	0,96	0,95	0,99	0,88	0,40
Durchgänge	16,34	7,28	1	0	0,84	0,88	0,93	0,94	0,94	0,92	0,95	0,92	0,99	0,88	0,02
Floor	267,46	42,69	15	3	0,05	0,06	0,10	0,08	0,17	0,05	0,03	0,02	0,02	0,04	0,05
Holzvertäfelung	104,53	34,39	6	2	0,21	0,23	0,29	0,11	0,19	0,13	0,10	0,06	0,07	0,13	0,02
Parkett	196,00	6,25	11	0	0,21	0,23	0,29	0,11	0,25	0,14	0,10	0,07	0,08	0,15	0,02
Stageceiling	141,66	141,66	8	8	0,66	0,76	0,71	0,23	0,20	0,07	0,05	0,04	0,05	0,11	0,05
Stagefloor	85,41	85,41	5	5	0,05	0,06	0,09	0,06	0,21	0,33	0,46	0,38	0,44	0,63	0,15
Ventilation	39,45	39,45	2	2	0,84	0,88	0,93	0,52	0,59	0,25	0,23	0,10	0,11	0,21	0,02
Wall	244,57	213,06	14	13	0,05	0,06	0,07	0,03	0,04	0,04	0,03	0,02	0,02	0,04	0,05
Audience		466,01		28	0,18	0,29	0,27	0,48	0,91	0,99	0,99	0,94	0,86	0,94	

Diese passt die vorhandenen Materialien des 3D-Modells so an, dass sie mithilfe von mehreren Durchläufen (hier ca. 30 Iterationen) ihre Absorptionswerte ändern. Die geänderten Werte sind dann in Terzauflösung und die Nachhallzeit im Modell entspricht der gemittelten gemessenen Zielnachhallzeit. Die Anpassung wurde bei 11°C und einer Luftfeuchtigkeit von 60 % entsprechend der realen Impulsmessungen im Astra berechnet. Tabelle 3 zeigt die Absorptionswerte reduziert in Oktavbändern und den der Simulation zugrunde liegenden Beugungswert „scatt707“.

3.2.5. Publikum

Für die Simulation des Publikums sollten in dieser Arbeit die Absorptionskoeffizienten nach Adelman-Larsen et al. (2007) verwendet werden. Allerdings kann der RAVEN Simulator nicht mit Absorptionskoeffizienten größer als 1 umgehen, weshalb alle Werte größer als 1 auf 0,99 limitiert wurden. Bei Adelman-Larsen et al. (siehe Abbildung 4) setzt sich das stehende Publikum außerdem aus 2,7 Personen pro m² zusammen, während laut MVStättVO nur 2 Personen pro m² erlaubt sind (Musterverordnung über den Bau und Betrieb von Versammlungsstätten, 2014). Dadurch müsste der Absorptionskoeffizient laut MVStättVO kleiner sein als bei Adelman-Larsen et al. (2007). Wenn man das Publikum dennoch nach dem Beispiel von Adelman-Larsen et al. simulieren möchte, müsste man eine äquivalente Absorptionsfläche bestimmen. Diese könnte im 3D-Modell bspw. als mehrere Quader oder Keile eingezeichnet werden, deren jeweilige Absorptionswerte nicht größer als 1 sein dürften.

Der Publikumskörper wurde im 3D-Modell zwei Meter von der Bühnenvorderkante anfangen, da dort im realen Betrieb Wellenbrecher-Gitter und Sicherheitspersonal stehen. Ansonsten deckt das Publikum die gesamte Grundfläche, mit Ausnahme des mittleren FOH-Bereichs, des Astra ab. Es hat eine Höhe von 1,6875m, welche der Durchschnittsgröße für Männer und Frauen als Mittelwerte der 50er-Perzentile entspricht (DIN 33402-2:2020-12, 2020). Die Publikumsgrundfläche beträgt 414,51 m². Wenn der für stehendes Publikum übliche Faktor von 2 Personen pro Quadratmeter benutzt wird, halten sich 828 Personen gleichmäßig verteilt im Hauptsaal des Astra auf.

3.2.6. Quellen

Als Quellen für eine möglichst realistische Simulation wurden die Lautsprecher des Astra verwendet. Beim Umbau des Astra im Jahr 2009 hat sich die Firma Complete Audio Berlin für eine Anlage von Martin Audio entschieden. Die Hauptlautsprecher bestehen aus jeweils acht Martin Audio W8LM Line Array Lautsprechern pro Seite (siehe Datenblatt im Anhang C). Als Subwoofer sind pro Seite vier Stück Martin Audio S218 installiert. Diese wurden in dieser Arbeit jedoch nicht simuliert, da die geometrische Akustik nicht die geeignete Simulationsmethode für tiefe Frequenzen ist. Die PA wird über XTA Endstufen und XTA 488 Signalprozessoren verwaltet. Die Winklung der PA ist in Abbildung 12 dargestellt. Die PA ist von oben nach unten mit den folgenden Winkeln eingestellt: 1°, 1°, 1°, 2°, 2°, 4°, 7.5°. Aufgrund der Einschränkungen durch die Coronavirus-Pandemie konnten die Signalprozessoren leider nicht ausgelesen werden. Laut (M. Zaccaria & P. Hamann, persönliche Kommunikation, 10. Februar 2021) sind im Signalprozessor sowohl die EQs als auch die Laufzeiten innerhalb der Boxen (für die unterschiedlichen Treiber) auf die von Martin Audio empfohlenen Werte eingestellt. Die unteren vier der insgesamt acht Lautsprecher haben eine leichte Absenkung in den Höhen und es gibt einen -2 dB Notch-Filter bei 1 kHz.

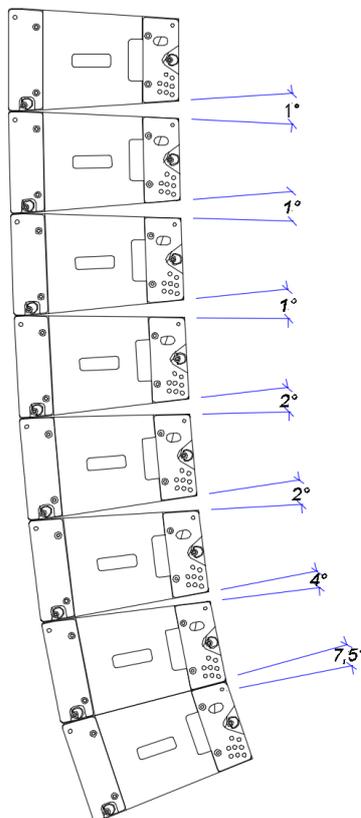


Abb. 12: Winklung der PA (8x Martin Audio W8LM)

Wie die PA des Astra für die Simulation verwendet werden kann, soll im folgenden Abschnitt erklärt werden. Durch die Länge des Publikumsbereichs von 22 m und einer Deckenhöhe von nur 4,2 m wurden noch zwei Delaylautsprecher an der dritten Säulenreihe ca. 15 m von der Bühne entfernt installiert. Hierfür kamen Martin Audio W8VDQ zum Einsatz (siehe Datenblatt im Anhang D), welche eine Kombination aus einem W8LM und einem W8LMD Downfill-Element sind, um eine breitere akustische Abdeckung zu erreichen.

Jeder Lautsprecher hat unterschiedliche akustische Eigenschaften, die das Abstrahlverhalten des Lautsprechers charakterisieren. Hierbei ist für die Simulation die Richtwirkung des Lautsprechers für die jeweiligen Frequenzen besonders wichtig. Für die Simulation dieser Arbeit wurde jedoch nicht jeder Lautsprecher einzeln hinsichtlich seiner Richtcharakteristik verwendet, sondern das gesamte Linearray aus acht Stück Martin Audio W8LM sowie die zwei Delaylautsprecher Martin Audio W8VDQ. Mithilfe der Software EASE SpeakerLab (Ahnert Feistel Media Group, 2020) können von nahezu allen Lautsprecherherstellern die Daten ihrer Lautsprecher eingelesen, bearbeitet und analysiert werden. So konnten auch die Lautsprecher des Astra von der Martin Audio Homepage heruntergeladen werden und in EASE SpeakerLab geöffnet werden. Dort wurde die Winkelung der PA eingestellt und anschließend bspw. als Ballonplot die Richtwirkung des Linearrays über die unterschiedlichen Frequenzen dargestellt. Die Delayline besteht aus zwei W8LM Lautsprechern, die sich gemeinsam in einem speziell angefertigten Gehäuse befinden (S. Purse, persönliche Kommunikation, 13. Januar 2021).

Diese Simulationsergebnisse konnten dann mithilfe von EASE SpeakerLab (Pro-Version) als Compact-Loudspeaker-Format-Datei (.clf) (CLF Group, 2015) exportiert werden. Die Exporteinstellungen sind in Abbildung 13 dargestellt. Anschließend wurde das tabellarische .clf Format mithilfe eines CLF2openDAFF – MATLAB-Skriptes (D. Ackermann, persönliche Kommunikation, 3. September 2020) in das für RAVEN präferierte openDaff-Format (Wefers, 2010) umgewandelt. Durch die doppelte Wandlung von .gll (EASE), welches im 1° Raster arbeitet, in .clf (5° Raster) ging etwas Auflösung verloren. Außerdem ist in Abbildung 13 auf der rechten Seite erkennbar, dass das CLF-Format nur Frequenzen in Terzbändern enthält und keine Informationen zum Phasengang der Quellen.

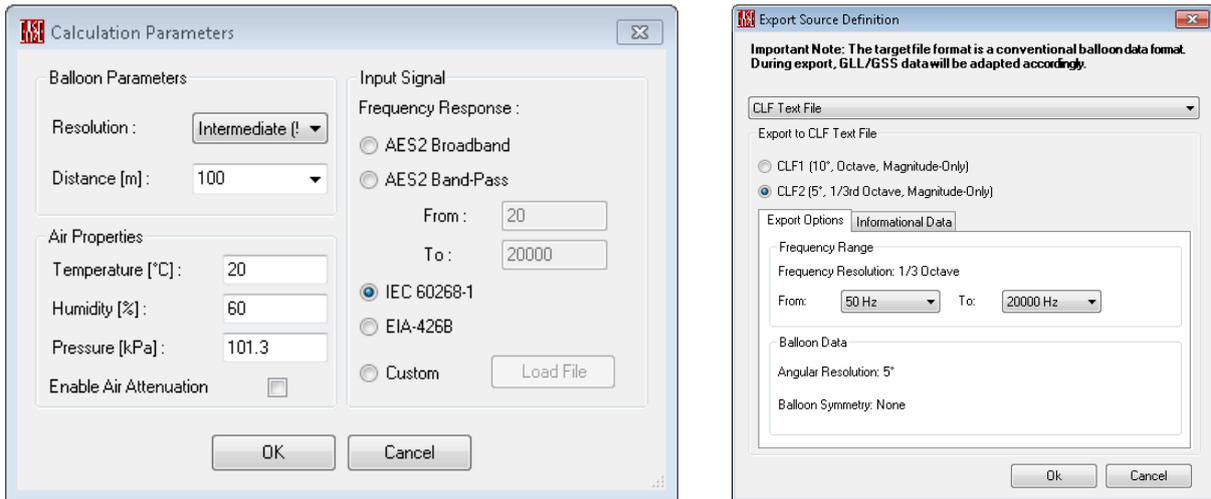


Abb. 13: EASE SpeakerLab Kalkulationsparameter (links) und Exporteinstellungen (rechts)

3.2.7. Empfänger

Das Astra besitzt zwei FOH-Positionen. An beiden Positionen muss im SketchUp-Modell jeweils ein Kunstkopf als RAVEN-Empfänger positioniert werden. Diese befinden sich im 3D-Modell an derselben Stelle, an der sich das Mikrofon bei den Impulsmessungen befand. Der Kunstkopf als Empfänger ermöglicht das direkte Aufzeichnen von binauralen Impulsantworten (BRIR) und wird im folgenden Abschnitt genauer beschrieben.

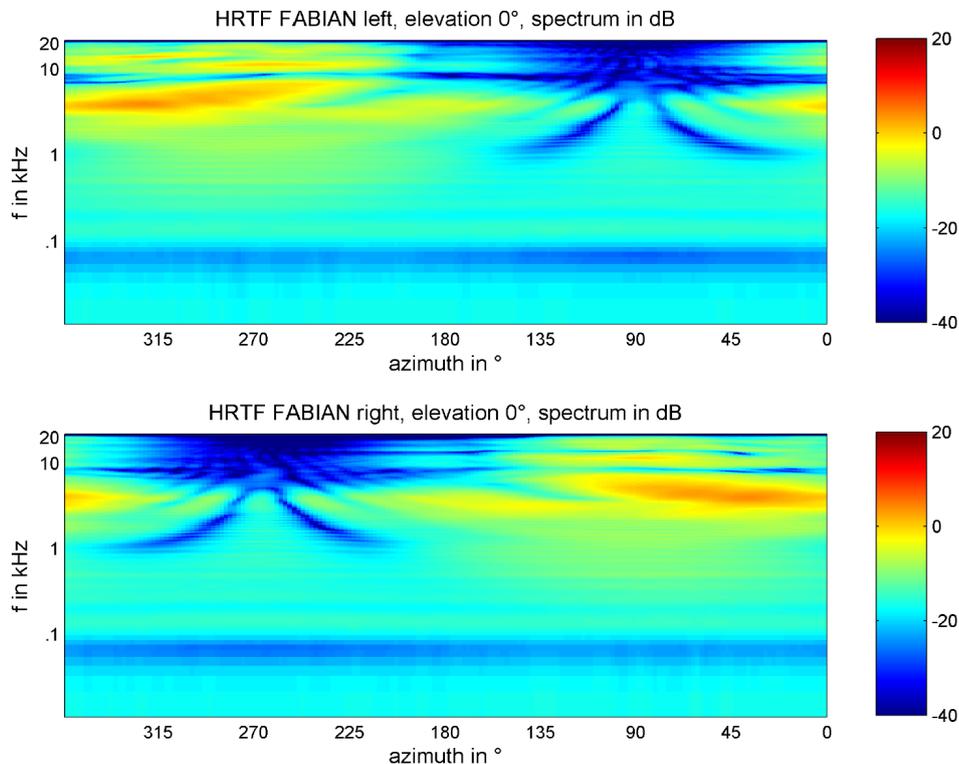


Abb. 14: Spektrum des Kunstkopfes FABIAN für linkes (oben) und rechtes Ohr (unten) für einen Schalleinfallswinkel von 0° Elevation (Ackermann & Ilse, 2015).

Für diese Arbeit wurde die Richtcharakteristik des an der Technischen Universität Berlin entwickelten Kunstkopf-Torso-Simulators „FABIAN“ verwendet (Lindau & Weinzierl, 2007). Die Außenohr-Übertragungsfunktionen (HRTF) sind als freier Datensatz über die Audiokommunikationsgruppe der TU-Berlin verfügbar (Brinkmann, 2017). Für RAVEN wurde der Datensatz am Institut für Technische Akustik der RWTH Aachen in das openDAFF Format umgewandelt und enthält eine Winkelauflösung von 1° horizontal von 0° bis 360° und 1° vertikal von 0° bis 180° (siehe Abbildung 14).

3.3. Simulationsparameter

Neben dem 3D-Modell mitsamt seinen Materialeigenschaften und den Richtcharakteristiken der Quellen und Empfänger, die sich im Modell befinden, bietet RAVEN eine große Auswahl an weiteren Einstellungsparametern, mit welchen die Simulation durchgeführt wird. Im Folgenden werden die einzelnen Parameter aufgelistet und beschrieben. Außerdem werden die für diese Arbeit gewählten Einstellungen der Parameter benannt.

Raumparameter

Die folgenden Werte für Temperatur, Luftfeuchtigkeit und Luftdruck dienen gemeinsam zur Berechnung der Schallgeschwindigkeit und der Luftdämpfung (Schröder, 2011). Die Werte wurden entgegen der Materialanpassung bei 11°C auf die Standardwerte für akustische Simulationen und Berechnungen gesetzt.

- Temperatur

setTemperature() weist der Simulation die Raumtemperatur in Grad Celsius zu. Simulationswert war 20 [°C].

- Luftfeuchtigkeit

setHumidity() weist der Simulation die relative Luftfeuchtigkeit in Prozent zu. Simulationswert war 50 [%].

- Luftdruck

setPressure() weist der Simulation den Luftdruck in Pascal zu. Simulationswert war 1013000 [Pa].

Filtereinstellungen

- Frequenzauflösung

setFilterResolution() gibt an, ob die Simulation entweder in Oktav (Oct) oder Terzbändern (3rd) ausgeführt werden soll. Wegen der höheren Auflösung wurde 3rd ausgewählt.

- Filterlänge

setFilterLength() gibt an, wie lange die aufgezeichneten Impulsantworten in Millisekunden werden. Diese Zeit muss mindestens so lange wie die Nachhallzeit sein. In dieser Arbeit wurde zuerst ein Simulationsdurchlauf mit 15000 ms durchgeführt. Anschließend wurde die Filterlänge auf die doppelte Länge der Nachhallzeit T60 dieser ersten Messung gesetzt und erneut mit der richtigen Länge simuliert. Dadurch erhält die RIR einen durchschnittlichen Signal-Rausch Abstand (SNR) von 120 dB.

- Energieabfall pro Partikel

setEnergyLoss() gibt den maximalen Verlust an Energie in dB an, ab welchem Partikel nicht mehr verfolgt werden. Partikel „verlieren“ Energie durch Luft- und Oberflächenabsorption. Dadurch wird der Dynamikumfang des Nachhalls bestimmt. Als Wert wurde 85 [dB] an die Simulation übergeben.

Algorithmus Parameter

Da RAVEN ein hybrider Simulator ist, wurden sowohl die Spiegelschallquellen setSimulationTypeIS() zur Erzeugung der frühen Reflexionen als auch das Raytracing setSimulationTypeRT() mit dem Parameter „1“ angeschaltet.

- Spiegelschallquellenordnung

setISOrder_PS() gibt die Ordnung der Spiegelschallquellen in der Simulation an. Es sollten Spiegelschallquellen „3“-ter Ordnung simuliert werden.

- Beschleunigungsalgorithmus

setAccelerationType() definiert den Beschleunigungsalgorithmus mithilfe dessen RAVEN das Raytracing durchführt. Es stehen Binary Space Partitioning (BSP), Spatial Hashing (SH) und Brute Force (BF) zur Verfügung.

Als Simulationswert wurde „0 = BSP“ übergeben, da der BSP-Algorithmus im Verhältnis zu BF 1/10 der Simulationszeit benötigt.

- Radius der Empfängerkugel

RAVEN verwandelt den Empfänger in eine Kugel um die Schallstrahlen zu ermitteln. `setRadiusDetectionSphere()` gibt den Radius der Kugel in Meter an. Es wurde 0.5 [m] als Radius gewählt.

- Anzahl der Schallstrahlen

`setNumParticles()` gibt an, wie viele Partikel von der Quelle pro Oktav-/Terzband ausgesendet werden. Laut Schröder (2011) werden mindestens 40000 Partikel benötigt. Um einen gleichmäßigen Energieabfall der RIR mit ausreichend SNR zu bekommen wurden 400000 Strahlen pro Terzband gewählt.

Stochastische Prozesse

- Festsetzen der Poisson-verteilten Sequenz

`setFixPoissionSequence()` kann einen festen Ausschnitt aus einer unendlich langen Poisson-verteilten Sequenz festsetzen. Standardmäßig verwendet RAVEN für jede Simulation einen zufälligen Ausschnitt. Damit die unterschiedlichen Simulationen (mit und ohne Publikum) mit denselben Sequenzen berechnet werden, wurden dieser Parameter auf „1“ gesetzt.

- Auswahl der Startnummer der Poisson-verteilten Sequenz

`setPoissonSequenceNumber()` gibt den Startpunkt der unendlich langen Poisson-verteilten Sequenz an. Als Startwert wurde 1 gewählt.

- Festsetzten der Zufallsprozesse bei der Streuung

`setFixReflectionPattern()` legt fest, ob die Zufallsprozesse der Partikelstreuung einer variablen oder festgesetzten Zufallssequenz folgen sollen. Auch hier wurde der Wert auf 1 für festgesetzte Zufallssequenz gesetzt.

Weitere Parameter legen fest, welche Ergebnisse die Simulation ausgeben soll. So kann bestimmt werden, ob bspw. Impulsantworten, ein Ergebnis für Higher-Order-Ambisonics oder nur das Energiehistogramm (EDC) mit `setExportHistogram()`

generiert werden sollen. Das Histogramm wird benötigt, um später die raumakustischen Parameter berechnen zu können.

3.4. Raumakustische Simulation

Um eine Simulation mit RAVEN durchzuführen, wurde das generierte RAVEN-Project-File (.rpf) in MATLAB importiert. In dieser Datei befindet sich unter anderem die Verlinkung zum 3D-Modell im .ac-Format, die Anzahl und Positionen der Quellen und Empfänger, sowie alle weiteren für die Simulation benötigten Parameter in ihren „Standard-Einstellungen“. Als nächstes wurden die im vorherigen Abschnitt definierten Parameter gesetzt und den Quellen und Empfängern die entsprechenden Richtcharakteristika zugewiesen. In den kommenden Abschnitten wird detaillierter auf die Akquise und Handhabung der BRIRs sowie die aus der EDC generierten raumcharakterisierenden Parameter eingegangen.

3.4.1. Generierung von BRIRs

Mit dem Befehl `rpf.run` wird die Simulation gestartet. Die Simulationsergebnisse werden anschließend in eigene Variablen geschrieben. Diese enthalten dann alle BRIRs der einzelnen Quellen zu jedem Empfänger. Um die BRIRs später für die Auralisation verwenden zu können, müssen diese noch angepasst werden, da sie noch Laufzeiten zwischen der Quelle und dem Empfänger enthalten sowie sehr leise sind.

Die relativen Laufzeiten sind später für die Auralisation wichtig, damit die Quellen untereinander im Verhältnis bleiben. Die absoluten Laufzeiten, die vor den jeweiligen Impulsantworten entstehen, sollen weggeschnitten werden, damit beim Wechsel der Impulsantworten keine Pause entsteht. Hierfür wurden in dieser Arbeit die Delaylautsprecher von der PA und der Backline-Quelle gesondert betrachtet. Die Backline-Quelle bleibt im relativen Verhältnis zur PA bestehen, da diese sich zentral auf der Bühne befindet und somit kurz nach den PA-Lautsprechern an den Empfängern ankommt. Um die Laufzeiten abzuschneiden wird für jede Quellengruppe der früheste Peak des Direktschalls in den Impulsantworten einzeln gesucht. Vor diesem Peak wird eine Sicherheitszeit von 10 ms gesetzt. Diese sorgt bei einer dynamischen Binauralsynthese dafür, dass bei Kopfdrehungen, und dadurch leicht veränderten Laufzeiten, die ITD ausreichend Puffer hat. Nun wurde vor allen Impulsantworten pro Quellengruppe die Zeit bis zur Sicherheitszeit vor dem Direktschall der Impulsantwort mit dem frühesten Peak weggeschnitten.

Eine weitere Funktion berechnet dann noch die Laufzeit, die der Schall von PA zur Delayline benötigt und exportiert diese als Textfile, um diese später in der Auralisation einzusetzen, damit die relativen Laufzeitverhältnisse wieder stimmen. Ein Hinweis auf den Präzedenzeffekt und das zusätzliche addieren von Laufzeit nach Haas (1949) wird ebenfalls in den Textexport geschrieben.

Anschließend wurden die Impulsantworten noch normalisiert. Dafür wird die Impulsantwort mit dem lautesten Peak gesucht und dieser auf 0,99 (1 = 0 dB) normalisiert. Alle weiteren Impulsantworten wurden anschließend im selben Verhältnis normalisiert. Nun sind die BRIRs fertig zum Export als .wav Audiodatei, um später in der Auralisation verwendet werden zu können.

3.4.2. Berechnung der Raumparameter

Für die Berechnung der raumcharakterisierenden Parameter wird die logarithmierte Rückwärtsintegration der quadrierten Impulsantwort (mono) benötigt, welche als Energy-Decay-Curve (EDC) bekannt ist (Schroeder, 1965). Anhand dieser abfallenden Kurve können die wichtigsten Parameter durch unterschiedliche Abschnittsbetrachtungen aus der EDC abgeleitet werden.

In dieser Arbeit wurden die gängigen akustischen Parameter T30, EDT, G, C80, D50 und Ts in Terzbändern und Oktavbändern berechnet. Ebenso wurden diese Parameter mit dem arithmetischen Mittelwert über die Oktaven von 500 Hz bis 1000 Hz nach DIN EN ISO 3382-1 (2009) bestimmt. Zusätzlich wurden die Parameter BR und STI ermittelt sowie die folgenden weiteren Zeitgrenzen und Variationen erhoben: T10 und T20, EDT20, BR10 und BR20, C30 bis C100, D30 bis D100, EDT/T30.

Für die Berechnungen von C, D und Ts musste zunächst die itaRavenProject.m Datei verändert werden, damit eine Auswahl der Quelle möglich war. Außerdem musste eine Funktionserweiterung für C und D nach Ackermann und Ilse (2015) für kleinere Zeitgrenzen eingefügt werden, da diese besonders wichtig in Veranstaltungsorten für Rock- und Popmusik sind (Adelman-Larsen, 2014). Mithilfe des folgenden Funktionsaufrufs berechnet RAVEN die raumcharakterisierenden Parameter unter Berücksichtigung der übergebenen Variablen

```
rpf.getRT(averageOverReceivers, averageOverFrequencies, afterDIN,  
         from_dB, to_dB, sourceID).
```

Mit `averageOverReceivers = 1` kann der Mittelwert über mehrere Empfänger des Modells gebildet werden. Bei `averageOverReceivers = 0` wird das Ergebnis pro Empfänger ausgegeben. Mit der Variable `averageOverFrequencies = 0` wird das Ergebnis von 20 Hz bis 20 kHz ausgegeben, je nach der für die Simulation mit dem Parameter `setFilterResoulution ()` übergebenen Auflösung (Oktav- oder Terzbänder). Setzt man die Variable `averageOverFrequencies = 1`, so berechnet RAVEN den Mittelwert aller übergebenen Frequenzbänder. Mit der Variable `afterDIN` kann die Mittelwertbildung der Frequenzbänder auf den durch die DIN EN ISO 3382-1 (2009) vorgegebenen Frequenzbereich begrenzt werden. Mit den Variablen `from_dB` und `to_dB` können manuell Grenzen in der Abklingkurve festgelegt werden. Über die Variable `sourceID` kann nun die Quelle ausgewählt werden, anhand welcher die Berechnungen durchgeführt werden soll. In dieser Arbeit wurden beide PA-Quellen sowie die Backline-Quelle wegen ihrer Kugelcharakteristik ausgewählt. Später werden diese noch gemittelt.

Alle im Folgenden aufgeführten Parameter wurden jeweils pro Receiver in Terzbändern und gemittelt nach DIN EN ISO 3382-1 (2009) berechnet. Die variierenden Pegel, bzw. Zeitgrenzen werden aufgelistet, sowie ein Beispiel gegeben.

Early Decay Time (EDT_{te}) für te : 10 und 20

```
EDTte = rpf.getRT(0, 0, 1, 0, -te, srcID)
EDTteDIN = rpf.getRT(0, 1, 1, 0, -te, srcID)
```

Nachhallzeit (T_{te}) für te : 10, 20, 30

```
Tte = rpf.getRT(0, 0, 1, -5, (-5-te), srcID)
TteDIN = rpf.getRT(0, 1, 1, -5, (-5-te), srcID)
```

Klarheitsmaß (C_{te}) für te : 30 bis 100

```
Cte = rpf.getClarityEDIT(0, 0, 1, srcID)
CteDIN = rpf.getClarityEDIT(0, 1, 1, srcID)
```

Deutlichkeit (D_{te}) für te : 30 bis 100

```
Dte = rpf.getDefinitionEDIT(0, 0, 1, srcID)
DteDIN = rpf.getDefinitionEDIT(0, 1, 1, srcID)
```

Stärkemaß (G_{te}) für t_e : 100 und 200

$$G_{te} = \text{rpf.getStrengthEDIT}(\theta, \theta, 1, \text{srcID})$$
$$G_{teDIN} = \text{rpf.getStrengthEDIT}(\theta, 1, 1, \text{srcID})$$

Schwerpunktzeit (T_s)

$$T_s = \text{rpf.getCenterTime}(\theta, \theta, 1, \text{srcID})$$
$$T_{sDIN} = \text{rpf.getCenterTime}(\theta, 1, 1, \text{srcID})$$

Bassverhältnis (BR_{te}) für t_e : 10, 20, 30

Berechnung des Bassverhältnisses erfolgt laut Formel (3) aus den jeweils berechneten Werten der Nachhallzeit.

EDT / T30-Verhältnis bei 125Hz

Die EDT/T30-Verhältnisse werden über beide Empfänger gemittelt.

STI

$$STI = \text{ita_speech_transmission_index}(\text{IR})$$

3.5. Auralisation

Mithilfe der generierten BRIRs kann nun der Versuchsaufbau vorgenommen werden und Quellmaterial mit den BRIRs gefaltet auf einem Kopfhörer wiedergegeben werden. Im Folgenden wird zunächst auf die Kopfhörerentzerrung sowie das Quellmaterial eingegangen, welches für die Auralisation dieser Arbeit verwendet wurde, bevor anschließend der Workflow der Auralisation detailliert beschrieben wird.

3.5.1. Kopfhörerentzerrung

Für eine optimale binaurale Auralisation sind in der Regel *free equivalent coupling* (FEC) Kopfhörer zu verwenden. Diese haben den Vorteil, dass der aufgesetzte Kopfhörer dieselbe akustische Impedanz hat wie der Freifeld-Schalleinfall auf das Ohr (Møller, 1992; Møller et al., 1995). Da diese FEC Kopfhörer jedoch sehr speziell und deswegen kaum verbreitet sind, kam Theile (1985) in seinen Studien zu dem Ergebnis, dass es sinnvoller wäre, Kopfhörer, die bis dato freifeld-entzerrt waren, lieber diffus zu entzerren, da dadurch die Abhörsituation eher an eine Lautsprecherabhörsituation im Diffusfeld passt. Mittlerweile gibt es eine große Auswahl an Forschung zum Thema Kopfhörerentzerrung, Kopfhörertransferfunktionen (HpTF) und besonderen Verwendungsarten (Erbes et al., 2012; Fels et al., 2013; Lindau & Brinkmann, 2012; Møller et al., 1995; Wightman & Kistler, 1989).

Für den Hörversuch (siehe Kapitel 3.6 Hörversuch und Fragebogen) dieser Arbeit wurde eine generische Diffusfeld-Kompensation nach Olive et al. (2013) über einen Filter umgesetzt, da die Teilnehmenden unterschiedliche Kopfhörer verwenden. Wenn der Kopfhörer bekannt oder vorgegeben ist, kann für weitere Simulationen eine Kopfhörerentzerrung aus der FABIAN Datenbank ausgewählt werden (Brinkmann, 2017).

3.5.2. Quellmaterial

Normalerweise wird für Auralisationen nachhallfreies Quellmaterial verwendet. Da es in dieser Arbeit jedoch besonders um den Publikumseffekt in Veranstaltungsorten für Rock- und Popmusik und den möglichen späteren Einsatz der generierten Impulsantworten als FOH-Mix Simulator für Livemischer*innen geht, wurde nicht-nachhallfreies Quellmaterial aus Mehrkanalmitschnitten (von Livekonzerten) verwendet. Heutzutage können Mehrkanalaufnahmen sehr einfach und kostengünstig realisiert werden. Bei einer Aufnahme sollte neben den Einzelspuren der Instrumente auch der Mastermix aufgenommen werden. Hierbei gilt darauf zu achten, dass sich dieser vor den Raumanpassungsfiltren befindet. Meist wird der Mastermix auf eine Matrix gesendet, in welcher dann (auf Tour von Tag zu Tag) die raumcharakteristischen Störfrequenzen gefiltert werden. Jeder einzelne Kanal kann unterschiedlich bearbeitet werden und in der Simulation auf unterschiedliche Quellen im Raum gelegt werden. Es besteht natürlich auch die Möglichkeit, die Mehrkanalaufnahmen in ein Mischpult zurückzuspielen, dort den Mastermix zu mischen und diesen anschließend als Live-Input über eine Digitale-Audio-Workstation (DAW) zu auralisieren. Im folgenden Abschnitt soll genauer auf den Ablauf einer solchen Auralisation eingegangen werden.

3.5.3. Workflow der Auralisierung

Der für diese Arbeit entwickelte Workflow setzt sich aus unterschiedlichen Dateien, Programmen und Hardwarekomponenten zusammen. Als DAW für die Auralisation wird REAPER verwendet (Cockos Incorporated, 2020). Abbildung 15 zeigt schematisch das Signalrouting. Auf der linken Seite sind Inputkanäle für Einzelinstrumente und den Mastermix abgebildet. In der Mitte die Verteilung der Signale auf die einzelnen Lautsprecherquellen. Auf der rechten Seite werden alle BRIRs der Quellen summiert und mittels HpTF für den zur Auralisierung verwendeten Kopfhörer entzerrt.

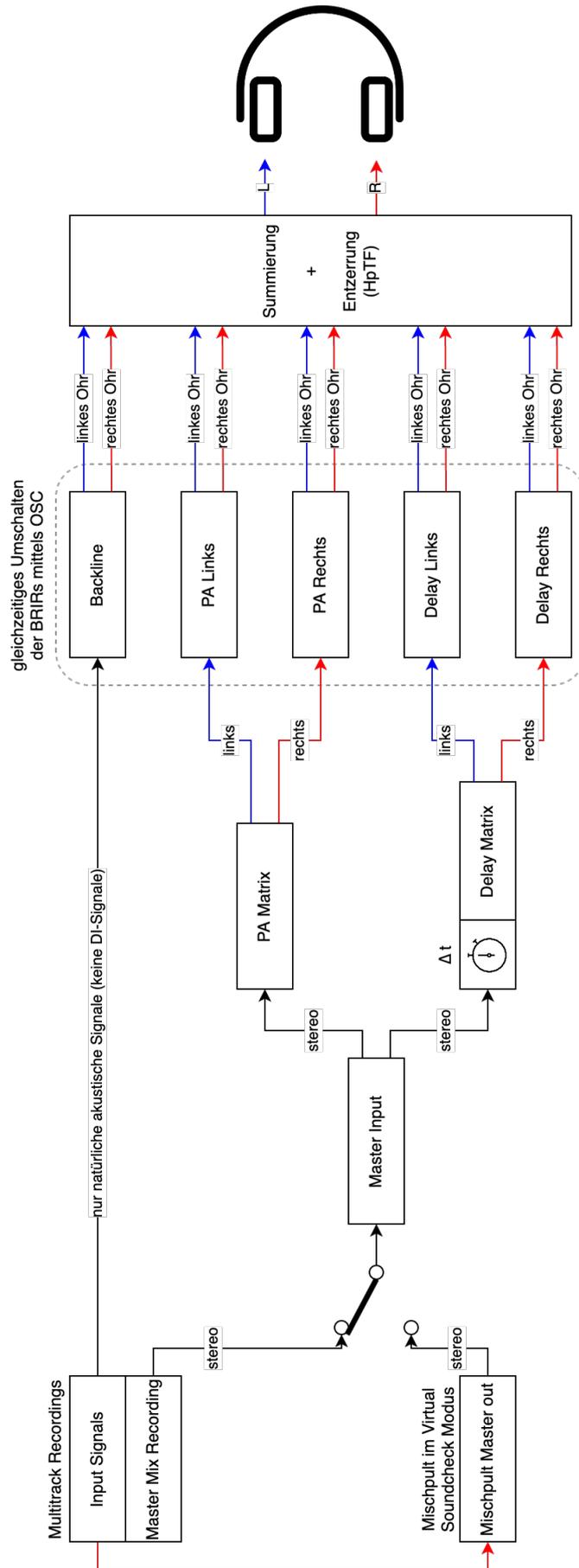


Abb. 15: Signalarouting der Auralisation

In der folgenden Auflistung werden die Signale beschrieben, die auf die entsprechenden Quellen geroutet sind.

Die Backline-Quelle befindet sich in der Simulation als Kugelstrahler in der Mitte der Bühne. Sie bekommt alle unprozessierten natürlichen Einzelkanäle einer Mehrkanalaufnahme. Dies soll dem natürlichen Schall entsprechen, wenn in einer Location keine elektroakustische Verstärkung über die PA stattfindet (Master mute). Die einzelnen Instrumente können je nach Lautstärke auf der Bühne unterschiedlich stark in den Backline-Mix gesendet werden. Beispielsweise wird eine Snare Drum oder ein Gitarrenverstärker lauter zu hören sein als ein Gesangsmikrofon. Wichtig ist, dass hier keine „künstlichen“ Quellen wie DI-Boxen eines E-Bass, Keyboards oder Playbacks hineingemischt werden. In diesem Backline-Mix werden die Einzelkanäle mit den generierten BRIRs der Backline Quelle gefaltet.

Der Mastermix, welcher die gemischten und prozessierten Einzelkanäle enthält, wird wie in einem Mischpult auf eine Matrix verteilt. Diese Matrix existiert auch in diesem Workflow als Mix-Busse für die einzelnen Lautsprecher. Im Fall des Astra sind das ein Stereo Bus PA-Matrix für die PA-Links und PA-Rechts und ein weiterer Stereo Bus Delay-Matrix für die beiden Delay Lautsprecher. In den Delay-Matrix-Kanal wird noch die durch RAVEN berechnete Laufzeit zuzüglich der Haas-Effekt-Zeit zwischen PA-Links und Delay-Links über das REAPER Plug-in „JS Time Adjustment“ eingesetzt, da den BRIRs die absoluten Laufzeiten entfernt wurden.

Nun wird der linke Kanal der PA-Matrix auf den Kanal PA-Links gesendet und der rechte Kanal auf PA-Rechts. Dasselbe für die Delay-Matrix auf die jeweiligen Kanäle Delay-Links und Delay-Rechts. In den jeweiligen Lautsprecherkanälen werden dann die mono Input Signale mit den generierten BRIRs über das mit REAPER mitgelieferte Plug-in „ReaVerb“ (Cockos Incorporated, 2020) gefaltet. Die Lautsprecher Kanäle können dann auf den Kopfhörer-Master geroutet werden. Auf dem Kopfhörer-Master werden nun alle BRIRs (Backline, PA-Links, PA-Rechts, Delay-Links, Delay-Rechts) summiert.

In jedem „Lautsprecher“-Kanal existieren jeweils vier Instanzen des ReaVerb-Plug-ins. Jede Instanz enthält je eine Impulsantwort für die entsprechende FOH-Position und den Status *voll* oder *leer*. Um nun alle Instanzen gleichzeitig umzuschalten werden diese über OSC (Wright, 2005) gesteuert, sodass immer nur eine Impulsantwort das Quellsignal faltet, während alle anderen ReaVerb-Instanzen auf „bypass“ geschaltet sind.

3.6. Hörversuch und Fragebogen

Um die Auralisation zu evaluieren wurde ein einfacher Fragebogen erstellt (siehe Anhang F und G). Dieser wurde zusammen mit Hörbeispielen an Livemischer*innen geschickt, die aufgrund ihrer Berufserfahrung als Fachexperten*innen gelten. Als Quellmaterial wurden Generalprobenaufnahmen aus einem Proberaum des Künstlers „Teesy“ verwendet, da diese keinerlei Publikumsgeräusche enthalten und somit keine Anwesenheit von Publikum im *leeren* Zustand suggerieren. Diese Aufnahmen wurden dann mit allen BRIRs gefaltet und ergeben die folgenden vier Hörbeispiele: FOH-Mitte und FOH-Hinten, jeweils ohne und mit Publikum. Die Backline-Quelle wurde in diesem Fall ebenfalls mit dem Mastermix gespeist. Sie wurde außerdem mit einem Hochpassfilter bei 100 Hz (Güte = 2) gefiltert und fließt nur mit -35 dB dem Kopfhörer-Master zu. Die Delayline ist gegenüber der PA um 4 dB abgesenkt und das Delay beträgt 50,56 ms. Eine Kopfhörerkompensation wurde mit einem parametrischen Equalizer durchgeführt. Da das Quellmaterial als Pop-Mischung bereits einen sehr hohen Anteil an tiefen Frequenzen besitzt, wurde auf die Bassanhebung verzichtet. Aufgrund der vermutlich hohen Diversität an Kopfhörern mit denen die Teilnehmenden die Hörbeispiele anhören, wurde der Filter bei 4 kHz auf -8 dB (Güte = 1) und der Filter bei 10 kHz auf -6 dB (Güte = 1) gesetzt.

Der Hörversuch wurde aufgrund der Pandemielage bei den Teilnehmenden zuhause durchgeführt. Zur Pegelangleichung sollten die Teilnehmenden eine Sprachaufnahme abspielen, die so eingestellt werden sollte, dass der Eindruck entsteht, als ob sich der Sprecher in einem Meter Entfernung befindet. Anschließend sollten die Teilnehmenden die Abhörlautstärke nicht mehr verändern, um die Pegelverhältnisse in den Hörbeispielen wahrzunehmen und bewerten zu können.

Neben demografischen Daten wurden die Erfahrung der Teilnehmenden in der Livemischung von Konzerten erhoben, wobei weniger als zwei gemischte Livekonzerte pro Jahr als Ausschlusskriterium definiert wurde. Die Kriterien und das Vokabular der Fragen wurde an die des Spatial Audio Quality Inventory (SAQI) und Room Acoustical Quality Inventory (RAQI) angelehnt (Lindau, 2014a; Weinzierl et al., 2018). So gibt es fünf-stufige unipolare Skalen, die beispielsweise die Parameter Unterschied von 1 = „gar nicht“ hörbar bis 5 = „sehr“ hörbar oder die Nachhalldauer von 1 = „kürzer“ bis 5 = „länger“ beschreiben. Am Ende des Fragebogens gibt es

noch Kommentarfelder, in welchen die Teilnehmenden direktes Feedback zum simulierten Publikumseffekt und weitere Ideen eintragen können.

Die Stichprobe bestand aus $N = 12$ männlichen Teilnehmern im Alter von 27 bis 55 Jahren ($M = 41,17$ Jahren, $SD = 7,76$ Jahren). Ihre Erfahrung als Livemischer reicht von 5 bis 30 Jahren mit durchschnittlich 63 Shows im Jahr (Min = 3, Max = 150). Ein dreizehnter Teilnehmender musste ausgeschlossen werden, da er das Mindestkriterium von zwei gemischten Livekonzerten pro Jahr nicht erfüllte. Neun der Teilnehmenden hatten bereits an Hörversuchen teilgenommen. Zwei Teilnehmenden sind „feste“ Mischer in Clubs und zehn Teilnehmenden fahren auf Tour. Vier Teilnehmende verwendeten den gleichen Kopfhörertyp „Sennheiser HD25 70 Ohm“, während die anderen jeweils unterschiedliche Kopfhörer benutzten. Im Anhang H sind alle verwendeten Kopfhörertypen aufgelistet.

4. Ergebnisse

Zunächst soll ein kurzer Vergleich zwischen der Vor-Ort-Messung der Impulsantworten mit den aus der Simulation generierten Ergebnissen gezogen werden. Danach wird auf den spektralen Frequenzgang eingegangen, bevor dann die raumcharakterisierenden Parameter dargestellt und zuletzt die Ergebnisse des Fragebogens präsentiert werden. Ab dem Kapitel 4.2 Frequenzspektrum werden alle Ergebnisse als direkter Vergleich zwischen den beiden Zuständen *leer* (in Tabellen/Diagrammen blau) und *voll* (in Tabellen/Diagrammen rot/orange) dargestellt.

4.1. Vergleich der Vor-Ort-Messung mit der Simulation

Tabelle 4 zeigt die berechneten akustischen Parameter aus den Impulsantwort-Messungen im realen Astra im Vergleich zu den Parametern aus den simulierten Impulsantworten in Oktavbändern. Die Werte der Simulation sind in dieser Tabelle aus einer Simulation des *leeren* Astra bei 11°C Raumtemperatur entstanden, damit sie vergleichbar zu den Werten der Vor-Ort-Messung sind. Die Werte sind jeweils über beide FOH-Positionen und beide PA-Lautsprecher gemittelt.

Tabelle 4: Parametervergleich der Vor-Ort-Messungen (grün) mit der Simulation (grau).

	f in Hz	31,5	63	125	250	500	1000	2000	4000	8000	16000
EDT10 [s]	Vor Ort	1,344	0,565	0,544	0,740	0,670	0,487	0,668	0,623	0,510	0,363
	Simulation	0,568	0,513	0,417	0,422	0,439	0,472	0,827	0,900	0,550	0,269
	Differenz	0,777	0,052	0,128	0,318	0,231	0,016	0,159	0,277	0,040	0,095
T30 [s]	Vor Ort	1,082	0,975	0,801	0,838	0,798	0,764	0,866	0,844	0,654	0,408
	Simulation	1,270	1,177	1,089	1,371	1,142	1,267	1,181	0,930	0,624	0,283
	Differenz	0,188	0,203	0,288	0,533	0,344	0,503	0,315	0,086	0,030	0,126
C80 [dB]	Vor Ort	-4,629	9,066	8,656	5,718	9,837	10,588	9,570	9,853	13,578	19,733
	Simulation	8,686	10,670	14,788	13,448	14,591	13,072	8,832	6,507	11,223	23,178
	Differenz	13,315	1,604	6,133	7,730	4,754	2,484	0,738	3,346	2,355	3,445
D50 [dB]	Vor Ort	9,525	66,488	78,586	58,564	81,189	82,375	80,535	83,731	91,235	97,042
	Simulation	0,727	0,774	0,853	0,837	0,867	0,834	0,687	0,667	0,829	0,961
	Differenz	8,798	65,714	77,733	57,728	80,322	81,541	79,848	83,064	90,405	96,081
Ts [ms]	Vor Ort	132,135	46,361	34,789	53,409	26,178	27,089	27,887	24,527	13,640	6,236
	Simulation	39,167	32,869	21,436	23,149	18,632	21,211	41,670	44,542	23,199	7,703
	Differenz	92,968	13,492	13,354	30,261	7,545	5,878	13,783	20,016	9,559	1,467

Die mittlere Differenz der EDT-Werte zwischen der Vor-Ort-Messung und der Simulation beträgt 0,209 s. Dabei ist die größte Abweichung mit 0,777 s im Oktavband 31,5 Hz, da die Vor-Ort-Messung dort einen Wert von 1,34 s hat. Ohne dieses Oktavband beläuft sich der Mittelwert der Differenz auf nur 0,146 s.

Die T30-Werte laufen bis zum Oktavband 125 Hz nahezu parallel. Zwischen 125 Hz und 4000 Hz liegen die T30-Werte der Simulation im Schnitt 0,4 s über den Werten der Vor-Ort-Messung. Ab dem Oktavband 4000 Hz liegen beide Messreihen wieder näher beieinander ($M = 0,081$ s).

Die C80-Werte verlaufen ebenfalls ähnlich. Beide Messreihen haben im Oktavband 250 Hz einen kleinen Dip. Bis 1000 Hz sind die Werte der Simulation größer als die der Vor-Ort-Messung. Zwischen 1000 Hz und 8000 Hz hat die Simulation noch einen weiteren Dip, weshalb ihre Werte unter den Werten der Vor-Ort-Messung liegen. Anschließend steigen die Werte in beiden Reihen gemeinsam an.

Die mittlere Differenz der D50-Messreihen zwischen der Vor-Ort-Messung und der Simulation beträgt 72 dB. Obwohl die Werte so weit auseinander liegen, haben sie eine starke Korrelation von $r = 0,94$ mit ihren jeweiligen C80-Werten. Der große Unterschied in der Differenz ist auf die sehr hohen Werte in der Vor-Ort-Messung zurückzuführen. Die Werte der Simulation verhalten sich wie erwartet.

Die Werte der Schwerpunktzeit fallen in beiden Messreihen gemeinsam bis zum Oktavband 125 Hz. Bei 250 Hz haben beide Messreihen einen Peak, der in der Vor-Ort-Messung wesentlich deutlicher zu erkennen ist als in der Simulation. Von 2000 Hz bis 4000 Hz verdoppelt sich die Schwerpunktzeit der Simulation und ist damit um 16,9 ms länger als die der Vor-Ort-Messung.

4.2. Frequenzspektrum

Abbildung 16 zeigt den Pegelverlauf am Beispiel der Quelle PA-Links für beide FOH-Positionen. Die y-Achse geht von -50 dB bis 0 dB mit horizontalen Hilfslinien im 5 dB Schritten. Die logarithmische x-Achse zeigt das hörbare Spektrum von 20 Hz bis 20 kHz. Alle Pegelverläufe der unterschiedlichen Quellen befinden sich in den Anhängen J bis S. Diese sollen in den folgenden Abschnitten jeweils getrennt für die beiden FOH-Positionen beschrieben werden.

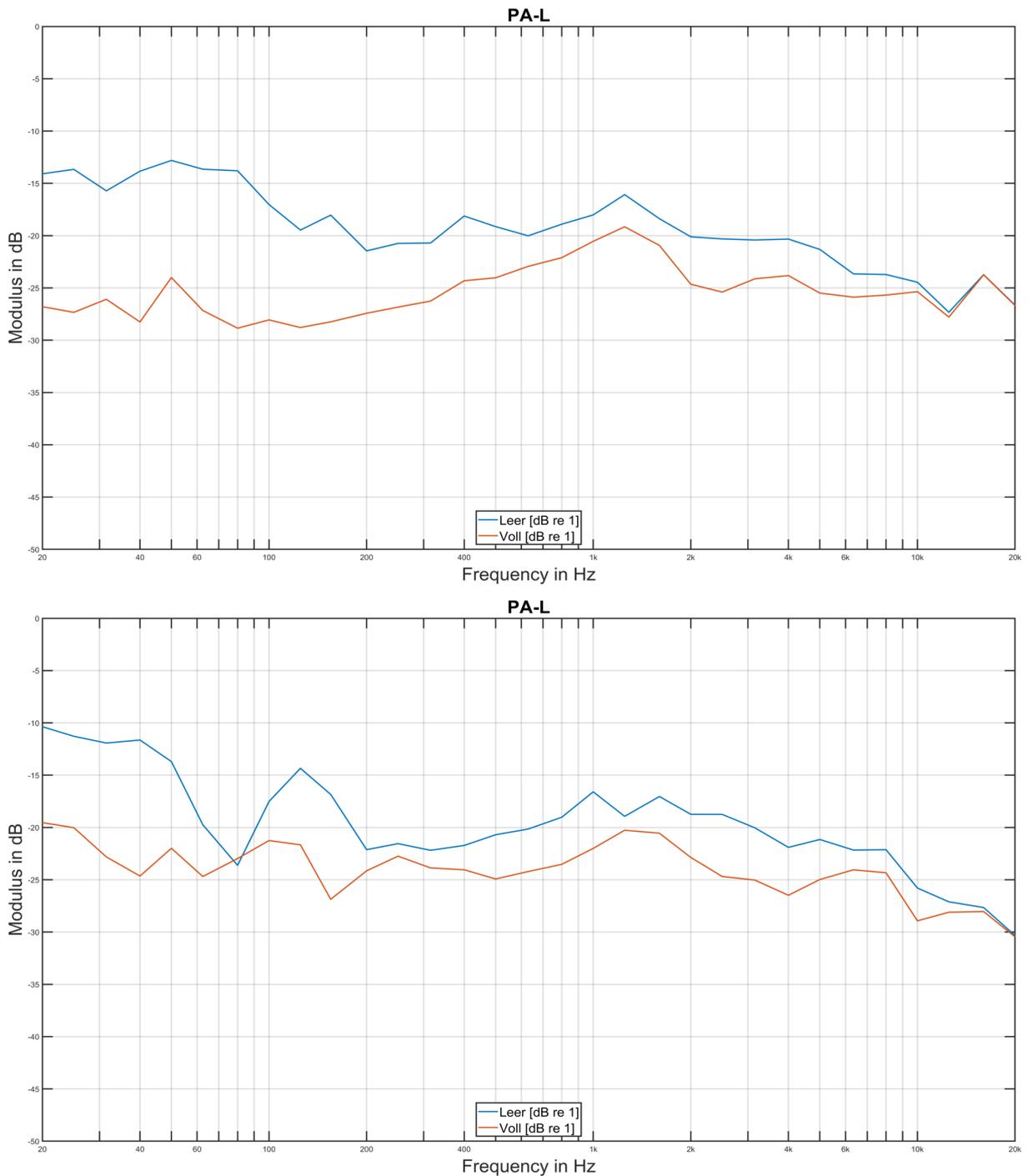


Abb. 16: Vergleich des Frequenzspektrums für die Quelle PA-Links über die beiden Zustände leer (blau) und voll (rot). Oben FOH-Mitte und unten FOH-Hinten.

FOH-Position Mitte

Wenn man sich zuerst die Backline-Quelle (Anhang J) an der mittleren FOH-Position anschaut, dann kann man feststellen, dass sie im *vollen* Zustand nahezu linear (± 3 dB) über das gesamte Spektrum verläuft. Auch im *leeren* Zustand zeigt das spektrale Verhalten keine Unregelmäßigkeiten. Es gibt in den Bässen eine 6 dB Erhöhung zwischen 30 Hz und 60 Hz.

Der Vergleich des Frequenzspektrums für die PA-Links (Anhang L) zeigt, dass die Amplitude des *vollen* Astra über das gesamte Spektrum kleiner ist als die des *leeren*. Bis 630 Hz nähern sich die beiden Kurven von anfangs 10 dB Unterschied auf 2,5 dB Unterschied an. Von 630 Hz bis 1,6 kHz verlaufen beide Kurven nahezu parallel. Zwischen 1,6 kHz und 6 kHz variiert der Unterschied nochmals um ca. 4 dB bevor sich die Kurven ab 10 kHz quasi vollständig überlagern. Auffällig ist, dass beide Kurven bei 1,25 kHz einen Peak haben.

Bei der PA-Rechts (Anhang N) verlaufen beide Spektren relativ parallel. Ab 300 Hz liegen diese circa 2,5 dB auseinander. Von 40 Hz bis 125 Hz liegen die beiden Kurven circa 5 dB auseinander, bevor die *volle* Kurve von 125 Hz bis 300 Hz über der *leeren* Kurve liegt. Beide Kurven haben einen gemeinsamen Dip bei 1,6 kHz und überlagern sich wie bei der PA-Links ab 10 kHz quasi vollständig. Auffällig ist noch, dass sowohl PA-Links als auch PA-Rechts bei 200 Hz ihren niedrigsten Wert unterhalb von 4 kHz haben.

Beide Delayline-Lautsprecher (Anhang P und R) zeigen sowohl im *leeren* als auch im *vollen* Zustand einen nahezu gleichen Frequenzgang. Hier wechseln sich die beiden Zustände bis 2 kHz in ihrem Pegel häufig ab. Von 2 kHz bis 10 kHz verläuft der Abstand von 5 dB zu 2,5 dB gleichmäßig, bevor beide Pegel ab 10 kHz steil abfallen.

FOH-Position Hinten

Die Backline-Quelle (Anhang K) ist hinten im Saal zunächst leiser als an der mittleren FOH-Position. Von 100 Hz aufwärts ist der Pegel des *vollen* Astra im Schnitt 5 dB, bei 2 kHz sogar 10 dB leiser.

Beide PA-Lautsprecher (Anhang M und O) verhalten sich auch zunächst relativ linear ab 200 Hz aufwärts. Bei beiden Spektren ist eine Spitze im *leeren* Zustand bei 125 Hz PA-Links und 160 Hz PA-Rechts zu erkennen. PA-Rechts hat bei 1,6 kHz sowohl im *leeren* als auch im *vollen* Zustand noch einen Dip von circa 5 dB.

Beide Delay-Lautsprecher (Anhang Q und S) zeigen zwei Dips, die sowohl im *vollen* als auch im *leeren* Zustand auftreten. Beim linken Delayline-Lautsprecher existiert ein 6 dB Dip bei 500 Hz und ein 2 dB Dip bei 1,6 kHz, wohingegen beim rechten Delayline-Lautsprecher der 6dB Dip bei 630 Hz ist. Der Dip bei 1,6 kHz existiert auch beim rechten Delayline-Lautsprecher, jedoch mit 4 dB doppelt so stark wie beim linken Delayline-Lautsprecher.

4.3. Raumcharakterisierende Parameter

Im folgenden Abschnitt sollen nun die Ergebnisse beschrieben werden, die aus der EDC der generierten Impulsantworten abgeleitet werden. Dabei wird besonders auf den Vergleich der beiden Zustände Wert gelegt. Zuerst wird auf die Nachhallzeit eingegangen, bevor der Vergleich mit den Parametern laut DIN EN ISO 3382-1 (2009) erfolgt. Anschließend werden noch weitere Zeitgrenzen dargestellt bevor dann die Parameter in Oktavbändern zu einem besseren Vergleich abgebildet werden.

4.3.1. Vergleich Nachhallzeit

In der Abbildung 17 sind die unterschiedlichen Nachhallzeiten T_{30} in Sekunden für alle Terzbänder dargestellt. Dabei können die Werte für die akustische Vor-Ort-Messung (RT Messung), die im Astra über die PA gemessen wurde, mit den beiden Zuständen der Simulation verglichen werden. Die Simulationen sind gemittelt über beide PA-Quellen und beide FOH-Positionen. Erkennbar ist, dass die *leere* Vor-Ort-Messung des Astra deutlich niedriger ist als die des simulierten *leeren* Astra. Die RT Messung hat bei 11°C stattgefunden, wohingegen die Kurven der Simulation bei 20°C berechnet wurden.

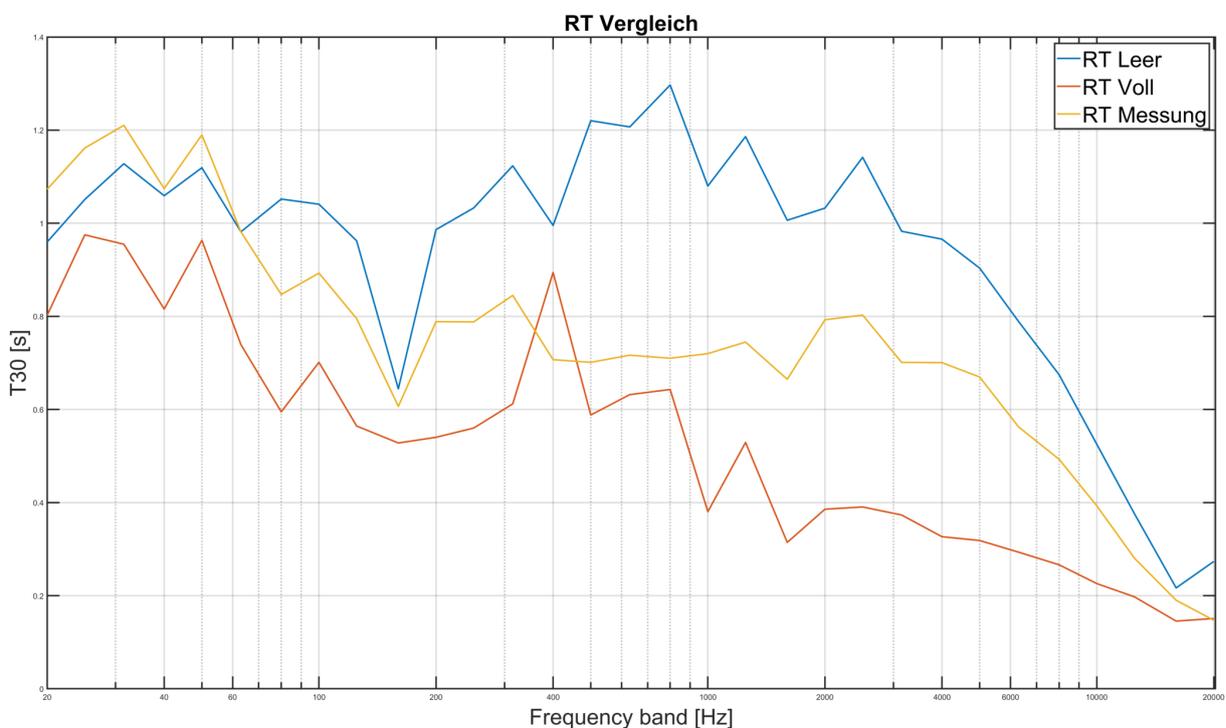


Abb. 17 Vergleich der T_{30} Nachhallzeiten für die akustische Messung vor Ort (gelb), die Simulation im *leeren* Zustand (blau) und die Simulation im *vollen* Zustand (blau).

Besonders gut zu erkennen ist, dass im *vollen* Zustand die Nachhallzeit deutlich geringer ist als im *leeren* Zustand. Bei 400 Hz gibt es einen Ausreißer. Die Nachhallzeit des *vollen* Astra ist von 500 Hz bis 4000 Hz im Mittel 0,6 s geringer als im *leeren* Astra. In den tiefen Frequenzen bis 200 Hz ist die Nachhallzeit des *vollen* Astra ca. 0,2 s geringer. Bei ca. 160 Hz ist der Unterschied zwischen *leer* und *voll* am geringsten, bei 2,5 kHz am größten.

In den Abbildungen 18 und 19 können die T30 Verläufe jeweils einzeln für die beiden FOH-Positionen über die beiden Zustände abgelesen werden. Auch hier sind die beiden Delay-Quellen nicht in den Daten enthalten. Außerdem ist der „Peak“ bei FOH-Mitte im Oktavband 500 Hz zu erkennen, welcher sich aus dem 400 Hz Terzband per Mittelung ableitet. An der mittleren FOH-Position zeigt sich im Oktavband 125 Hz ein deutlicher Tiefpunkt der Nachhallzeit.

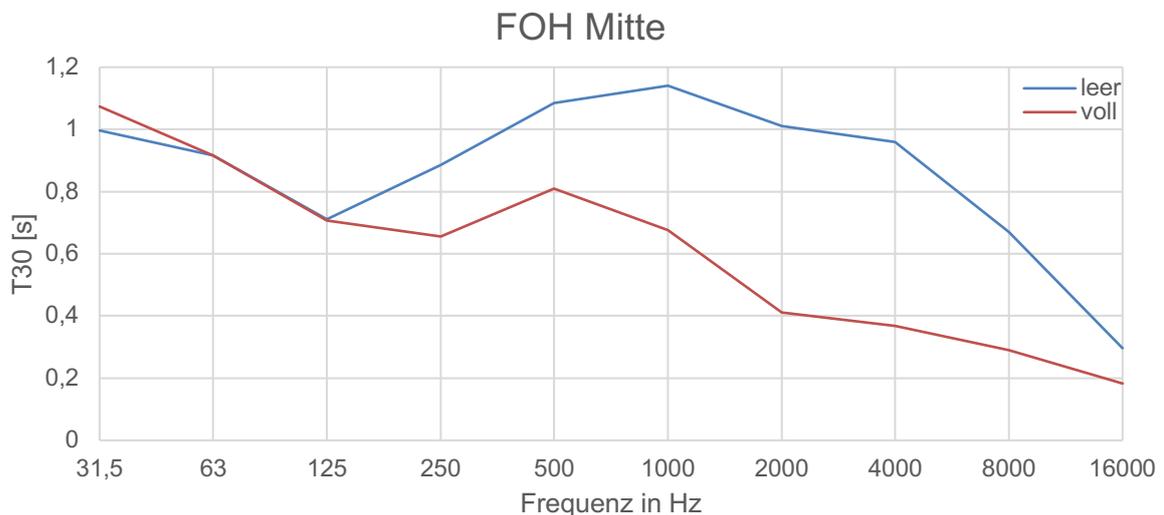


Abb. 18: T30 Vergleich zwischen *leer* und *voll* an der FOH-Position Mitte

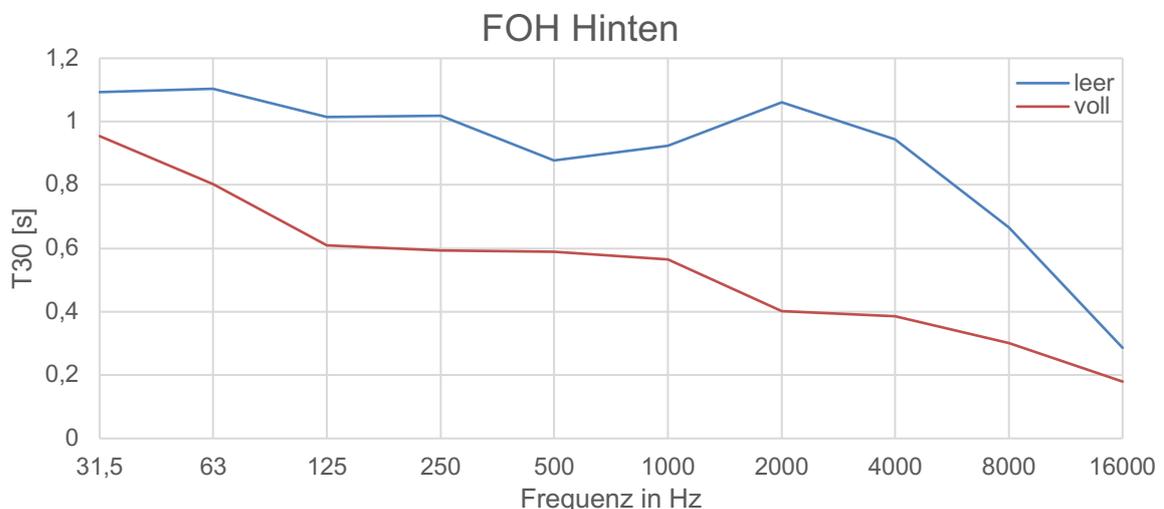


Abb. 19: T30 Vergleich zwischen *leer* und *voll* an der FOH-Position Hinten

4.3.2. Vergleich nach DIN

In der Tabelle 5 sind die berechneten akustischen Parameter nach DIN EN ISO 3382-1 (2009) für die gemittelten Frequenzgrenzen der 500 Hz - 1000 Hz Oktavbänder dargestellt. Sie sind für die unterschiedlichen FOH-Positionen Mitte und Hinten jeweils in die Besetzungszustände *leer* und *voll* aufgeteilt. Die Werte wurden aus den Quellen PA-Links, PA-Rechts und Backline gemittelt. Zusätzlich zu den Parametern der DIN EN ISO 3382-1 (2009) ist in der Tabelle noch das Bassverhältnis nach Beranek (Formel 3) und der STI enthalten. Auffällig sind die großen Unterschiede zwischen der Simulation und den üblichen Werten der DIN EN ISO 3382-1 (2009).

Tabelle 5: Parametervergleich nach DIN 3382-1 + BR & STI

	Mitte			Hinten			DIN 3382-1 übliche Werte
	<i>leer</i>	<i>voll</i>	Differenz	<i>leer</i>	<i>voll</i>	Differenz	
EDT [s]	0,433	0,751	0,318	0,375	0,310	0,065	1,0 ; 3,0
T30 [s]	1,112	0,743	0,369	0,901	0,576	0,324	
C80 [dB]	13,983	22,913	8,930	14,522	22,296	7,774	-5 ; +5
D50 [dB]	0,867	0,856	0,011	0,894	0,981	0,087	0,3 ; 0,7
G [dB]	0,291	-2,812	3,102	0,182	-5,535	5,717	-2 ; +10
Ts [ms]	23,292	2,719	20,573	21,694	4,571	17,123	60 ; 260
BR	0,759	0,914	0,155	1,124	1,051	0,073	
STI	0,688	0,823	0,135	0,752	0,919	0,167	

Die EDT-Zeiten sind wesentlich kleiner als die der DIN. Die EDT-Zeit an der mittleren FOH-Position im *vollen* Zustand ist größer als im *leeren*, während alle anderen Werte der Nachhallzeiten EDT und T30 mit DIN-Mittelung im *vollen* Zustand kleiner ausfallen. Auch die Parameter C80, D50, G und Ts liegen teils weit entfernt von den üblichen Werten der DIN. Diese Parameter werden später im Kapitel 4.3.4 Vergleich in Oktavbändern noch genauer beschrieben. Das Bassverhältnis ist für die hintere FOH-Position etwas größer als an der mittleren FOH-Position. Die STI-Werte liegen im *vollen* Zustand an beiden Positionen im „ausgezeichnet“-Bereich (DIN EN ISO 9921:2004-02, 2004). Auch im *leeren* Zustand ist die hintere Position im „ausgezeichneten“ Bereich, während der mittlere FOH auf einen „sehr gut“-Wert kommt.

4.3.3. Erweiterter Vergleich

Da die Parametergrenzen nach DIN EN ISO 3382-1 (2009) durch ihre Mittelungen der zwei Oktavbänder 500 und 1000 Hz nur wenig über kritische Parameter aussagen, sollen im Folgenden einige Parameter genauer betrachtet und gegenübergestellt werden, die laut Adelman-Larsen (2014) besonders wichtig für Rock- und Popmusikclubs sind. In der untenstehenden Tabelle 6 sind diese Parameter im Vergleich aufgelistet. Diese sind ebenso aus der Mittelung der Quellen PA-Links, PA-Rechts und Backline errechnet.

Tabelle 6: Erweiterter Parametervergleich für Veranstaltungsorte für Rock- und Popmusik

	FOH-Mitte			FOH-Hinten		
	<i>leer</i>	<i>voll</i>	Differenz	<i>leer</i>	<i>voll</i>	Differenz
T30 125Hz [s]	0,710	0,707	0,003	1,015	0,609	0,406
T30 63-1kHz [s]	0,947	0,753	0,194	0,988	0,631	0,356
T30 125-2kHz [s]	0,966	0,652	0,314	0,979	0,551	0,428
EDT/T30 125Hz	0,670	0,878	0,208	0,269	0,692	0,423
EDT/T30 125-2kHz	0,551	1,003	0,452	0,442	0,641	0,199
BR 63-250/500-1kHz	0,753	1,023	0,270	1,161	1,159	0,002

So können, im Vergleich zu Parametern der klassischen Musik, in der Rock- und Popmusik besonders tiefe Frequenzen 20-30 dB lauter sein als die Mitten (Dibble, 1995), weshalb die BR zwischen den Oktavbändern von 63-250 Hz zu 500-1000 Hz ein geeigneteres Verhältnis darstellt. Außerdem ist das Verhältnis von EDT zu T30 angegeben, welches Auskunft darüber gibt, wie der Nachhall empfunden wird. Die Einzelwerte der jeweiligen Oktavbänder können den Tabellen im folgenden Kapitel entnommen werden.

4.3.4. Vergleich in Oktavbändern

In den folgenden Tabellen 7 bis 10 sind die Werte EDT10, T30, C80, D50, G und Ts in Oktavbändern im Vergleich zwischen den beiden Zuständen *leer* und *voll* dargestellt. Die Tabellen sind jeweils pro FOH-Position und separat für die gemittelte PA und die Backline-Quelle. Dies ermöglicht die direkte Gegenüberstellung der Parameter und somit eine genaue Änderung durch das Publikum an der jeweiligen FOH-Position. Der Frequenzbereich der PA-Lautsprecher deckt das 31,5 Hz Oktavband nicht ab (siehe Anhang C) und wird deshalb in den Ergebnissen für die PA nicht betrachtet.

Tabelle 7: Oktavbandvergleich an FOH-Position: Mitte, Quelle: PA (gemittelt)

	f in Hz	31,5	63	125	250	500	1000	2000	4000	8000	16000
EDT10 [s]	leer	0,581	0,548	0,497	0,425	0,408	0,516	0,919	0,986	0,724	0,396
	voll	0,681	0,599	0,650	0,474	0,928	0,822	0,776	0,449	0,436	0,393
	Differenz	0,099	0,051	0,153	0,049	0,520	0,306	0,143	0,537	0,288	0,003
T30 [s]	leer	1,072	0,995	0,738	1,045	1,350	1,357	1,047	0,963	0,665	0,293
	voll	0,907	0,766	0,603	0,605	0,841	0,510	0,358	0,338	0,260	0,167
	Differenz	0,165	0,229	0,136	0,440	0,509	0,847	0,689	0,625	0,405	0,126
C80 [dB]	leer	8,856	11,124	16,161	14,815	16,573	12,932	6,320	4,962	8,526	22,477
	voll	8,133	10,938	18,213	22,993	27,972	26,864	19,669	18,840	22,474	34,735
	Differenz	0,723	0,187	2,052	8,178	11,399	13,932	13,349	13,878	13,948	12,258
D50 [dB]	leer	0,687	0,734	0,822	0,846	0,888	0,832	0,596	0,572	0,736	0,942
	voll	0,681	0,764	0,848	0,888	0,896	0,884	0,790	0,885	0,942	0,980
	Differenz	0,006	0,030	0,026	0,043	0,008	0,053	0,194	0,313	0,206	0,038
G [dB]	leer	6,037	4,796	2,410	1,355	-0,644	0,887	-1,186	-1,078	-4,566	-11,338
	voll	0,680	-0,755	-2,541	-3,501	-3,135	-1,220	-5,039	-4,455	-6,743	-12,024
	Differenz	5,357	5,551	4,951	4,856	2,491	2,107	3,853	3,376	2,178	0,686
Ts [ms]	leer	45,057	37,028	23,551	24,458	18,788	28,645	71,537	59,021	32,554	7,311
	voll	34,855	23,387	9,733	2,909	1,777	2,503	8,106	8,439	6,060	2,068
	Differenz	10,202	13,641	13,818	21,549	17,011	26,142	63,430	50,582	26,494	5,243

Tabelle 8: Oktavbandvergleich an FOH-Position Hinten, Quelle: PA (gemittelt)

	f in Hz	31,5	63	125	250	500	1000	2000	4000	8000	16000
EDT10 [s]	leer	0,509	0,438	0,265	0,348	0,349	0,395	0,788	0,854	0,471	0,136
	voll	0,718	0,622	0,464	0,412	0,285	0,225	0,233	0,215	0,159	0,097
	Differenz	0,209	0,184	0,199	0,064	0,064	0,171	0,555	0,639	0,312	0,040
T30 [s]	leer	1,086	1,107	1,027	1,050	0,931	1,019	1,073	0,939	0,661	0,285
	voll	0,923	0,766	0,593	0,536	0,568	0,525	0,369	0,341	0,263	0,162
	Differenz	0,163	0,341	0,434	0,514	0,363	0,493	0,704	0,598	0,397	0,123
C80 [dB]	leer	9,660	11,746	17,008	14,278	15,264	13,497	9,708	8,033	12,123	25,057
	voll	8,568	10,717	16,969	20,487	22,766	27,019	23,476	23,219	27,078	38,407
	Differenz	1,092	1,029	0,039	6,208	7,502	13,523	13,767	15,186	14,955	13,350
D50 [dB]	leer	0,798	0,843	0,924	0,904	0,927	0,915	0,826	0,787	0,885	0,981
	voll	0,799	0,854	0,946	0,985	0,990	0,993	0,986	0,982	0,990	0,998
	Differenz	0,001	0,011	0,022	0,080	0,063	0,078	0,160	0,196	0,105	0,018
G [dB]	leer	4,429	3,270	1,157	0,632	-1,162	0,876	-0,403	-1,437	-4,722	-14,111
	voll	-0,140	-1,702	-3,766	-5,261	-5,857	-3,414	-4,914	-5,618	-8,105	-16,233
	Differenz	4,568	4,973	4,922	5,893	4,696	4,291	4,511	4,181	3,383	2,123
Ts [ms]	leer	47,900	39,055	22,804	26,017	20,515	25,145	43,594	36,446	20,433	8,470
	voll	33,020	25,549	10,878	3,579	2,923	3,677	7,428	6,990	5,420	3,460
	Differenz	14,880	13,507	11,926	22,437	17,592	21,468	36,166	29,456	15,012	5,010

Tabelle 9: Oktavbandvergleich an FOH-Position Mitte, Quelle: Backline

	f in Hz	31,5	63	125	250	500	1000	2000	4000	8000	16000
EDT10 [s]	leer	0,640	0,604	0,433	0,310	0,288	0,461	0,961	1,037	0,750	0,349
	voll	0,840	0,724	0,562	0,443	0,534	0,471	0,504	0,502	0,415	0,267
	Differenz	0,200	0,120	0,129	0,134	0,246	0,010	0,457	0,535	0,335	0,082
T30 [s]	leer	0,843	0,761	0,654	0,565	0,551	0,708	0,936	0,955	0,679	0,303
	voll	1,407	1,218	0,915	0,758	0,748	1,007	0,517	0,431	0,352	0,214
	Differenz	0,564	0,457	0,261	0,193	0,197	0,299	0,419	0,524	0,327	0,089
C80 [dB]	leer	7,413	9,596	15,152	14,373	14,718	10,171	3,697	1,709	4,768	14,949
	voll	4,243	6,339	10,255	13,186	15,374	12,430	11,479	9,820	12,800	22,687
	Differenz	3,170	3,257	4,897	1,187	0,655	2,260	7,781	8,110	8,032	7,738
D50 [dB]	leer	0,685	0,745	0,854	0,883	0,901	0,801	0,544	0,429	0,571	0,871
	voll	0,553	0,646	0,733	0,763	0,799	0,762	0,741	0,745	0,842	0,957
	Differenz	0,132	0,099	0,121	0,120	0,102	0,039	0,197	0,316	0,271	0,085
G [dB]	leer	1,215	0,427	-0,614	0,857	0,139	1,119	2,299	2,149	-1,461	-9,966
	voll	-0,523	-1,702	-3,259	-3,991	-4,289	-3,872	-3,142	-2,724	-4,852	-11,382
	Differenz	1,738	2,129	2,646	4,848	4,428	4,992	5,441	4,873	3,392	1,416
Ts [ms]	leer	135,480	99,463	50,598	27,694	15,703	29,186	29,136	27,949	15,360	3,872
	voll	46,483	30,195	11,096	3,108	2,010	5,744	4,577	5,547	3,744	1,386
	Differenz	88,998	69,268	39,503	24,586	13,693	23,441	24,559	22,403	11,616	2,486

Tabelle 10: Oktavbandvergleich an FOH-Position Hinten, Quelle: Backline

	f in Hz	31,5	63	125	250	500	1000	2000	4000	8000	16000
EDT10 [s]	leer	0,455	0,378	0,288	0,337	0,349	0,411	0,810	0,971	0,661	0,305
	voll	0,592	0,528	0,335	0,350	0,388	0,453	0,537	0,461	0,351	0,192
	Differenz	0,137	0,150	0,047	0,013	0,039	0,043	0,273	0,510	0,310	0,113
T30 [s]	leer	1,108	1,097	0,992	0,957	0,771	0,733	1,036	0,955	0,677	0,289
	voll	1,016	0,877	0,641	0,707	0,629	0,643	0,469	0,477	0,374	0,214
	Differenz	0,092	0,221	0,351	0,250	0,142	0,090	0,567	0,478	0,304	0,075
C80 [dB]	leer	10,110	11,663	17,299	15,441	17,036	12,573	5,792	2,940	5,912	16,154
	voll	8,902	11,176	15,462	17,038	17,572	16,633	12,799	12,105	14,883	24,972
	Differenz	1,209	0,487	1,837	1,597	0,536	4,060	7,007	9,165	8,971	8,818
D50 [dB]	leer	0,824	0,865	0,919	0,866	0,864	0,792	0,595	0,490	0,605	0,872
	voll	0,743	0,792	0,897	0,940	0,955	0,921	0,882	0,850	0,897	0,971
	Differenz	0,081	0,073	0,023	0,074	0,091	0,129	0,287	0,360	0,293	0,099
G [dB]	leer	1,578	1,003	0,048	1,486	0,473	1,188	1,415	0,198	-3,752	-14,339
	voll	-0,461	-1,926	-3,661	-5,316	-7,301	-7,365	-6,625	-6,288	-9,009	-17,295
	Differenz	2,039	2,929	3,708	6,803	7,774	8,553	8,040	6,486	5,257	2,957
Ts [ms]	leer	88,642	64,963	30,262	20,956	14,028	24,816	24,650	24,955	16,482	8,339
	voll	35,158	26,872	10,476	3,629	3,715	10,511	7,778	8,198	6,789	4,068
	Differenz	53,484	38,091	19,787	17,327	10,313	14,306	16,873	16,756	9,693	4,271

Die Differenz der EDT wechselt außer bei der PA an der hinteren FOH-Position zwischen 1000 Hz und 2000 Hz ihr Vorzeichen. Bei 4000 Hz ist dann die Differenz zwischen *leerem* und *vollem* Zustand an beiden Positionen und sowohl für die PA als auch die omnidirektionale Backline-Quelle am größten. An der mittleren FOH-Position ist der Unterschied im 500 Hz Oktavband bei der PA genau so groß wie im 4 kHz Oktavband, jedoch mit umgekehrtem Vorzeichen.

Bei D50 sind die Unterschiede zwischen *vollem* und *leerem* Zustand relativ klein ($M = 0,01$ dB). Auffällig ist auch wieder das 4 kHz Oktavband, was den größten Unterschied ($M = 0,3$ dB) zwischen *leerem* und *vollem* Zustand hat. Beim Klarheitsmaß C80 sieht es ähnlich aus, nur dass in dem Fall die Unterschiede zwischen *leer* und *voll* wesentlich größer sind, was sich durch die längere Zeitbetrachtung erklären lässt. So ist der Mittelwert bei 4 kHz bei 11,6 dB, wobei der Unterschied zwischen PA ($M = 14,5$ dB) und Backline-Quelle ($M = 8,6$ dB) wesentlich weiter auseinander liegt als zwischen den Quellen bei D50. Sowohl bei C80, als auch D50 liegt im *leeren* Zustand der kleinste Wert im 4 kHz Oktavband. Die Backline-Quelle hat im *leeren* Zustand den größten C80-Wert im Oktavband 125 Hz.

Darüber hinaus ist auffällig, dass im *vollen* Zustand sowohl bei C80, als auch D50 für beide FOHs und Quellen der niedrigste Wert im Oktavband 31,5 Hz (Backline) liegt, gefolgt vom nächst kleineren bei 63 Hz (Backline und PA). Der C80-Mittelwert im Oktavband 63 Hz liegt bei 9,8 dB und für D50 bei 0,76 dB, was jeweils deutlich unter den Mittelwerten aller Oktavbänder im *vollen* Zustand der beiden Parameter liegt. Der jeweils höchste Wert im *vollen* Zustand ist für beide Parameter 16 kHz Oktavband.

Das Stärkemaß G hat im *vollen* Zustand, an beiden FOH-Positionen und für beide Quellen, für alle Oktavbänder ein negatives Vorzeichen (außer FOH-Mitte, PA für 31,5 Hz). Eine Gegenüberstellung der Unterschiede zwischen *voll* und *leer* zeigt, dass für die PA der Unterschied in den Bässen (63-250 Hz) am größten ist, wohingegen bei der omnidirektionalen Backline-Quelle an beiden FOH-Positionen der größte Unterschied in den (höheren) Mitten (500-4000 Hz) liegt.

Auch die Schwerpunktzeit zeigt über alle Oktavbänder eine positive Differenz zwischen *leerem* und *vollem* Zustand. Auffällig ist wieder das 500 Hz Oktavband. Auch die Schwerpunktzeit hat hier einen Tiefpunkt, wenn auch der kleinste Wert im 16 kHz Oktavband liegt. Die Differenzen zwischen *leer* und *voll* sind für die PA-Quelle im Oktavband 2 kHz mit FOH-Mitte 63,43 ms und FOH-Hinten 26,17 ms am

größten. Das Oktavband 2 kHz fällt auch in allen *leeren* Messreihen mit einer deutlichen Spitze auf. Im *vollen* Zustand ist der Verlauf ähnlich, jedoch deutlich abgeschwächt.

4.4. Fragebogen

Abbildung 20 zeigt auf einer fünfstufigen Skala von 1 = „gar nicht“ bis 5 = „sehr“ wie vertraut sich die Teilnehmenden mit der Akustik des Astra einschätzen.

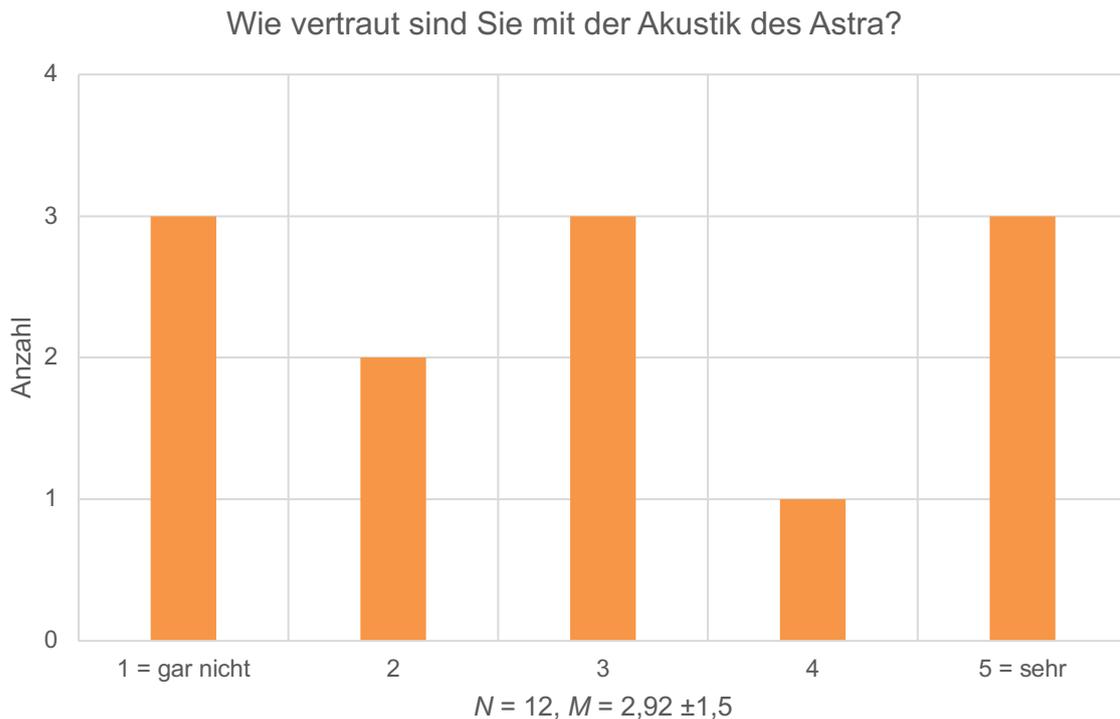


Abb. 20: Fragebogen: Vertrautheit der Teilnehmenden mit der Akustik des Astra

In Abbildung 21 sind die wahrgenommenen Unterschiede zwischen den vier Hörbeispielen dargestellt. Die Teilnehmenden haben Unterschiede zwischen allen Hörbeispielen mit $M = 4,6 \pm 0,56$ beantworten können. Die meisten Teilnehmenden antworteten, dass sie einen sehr deutlichen Unterschied wahrgenommen haben (Modus = 5).

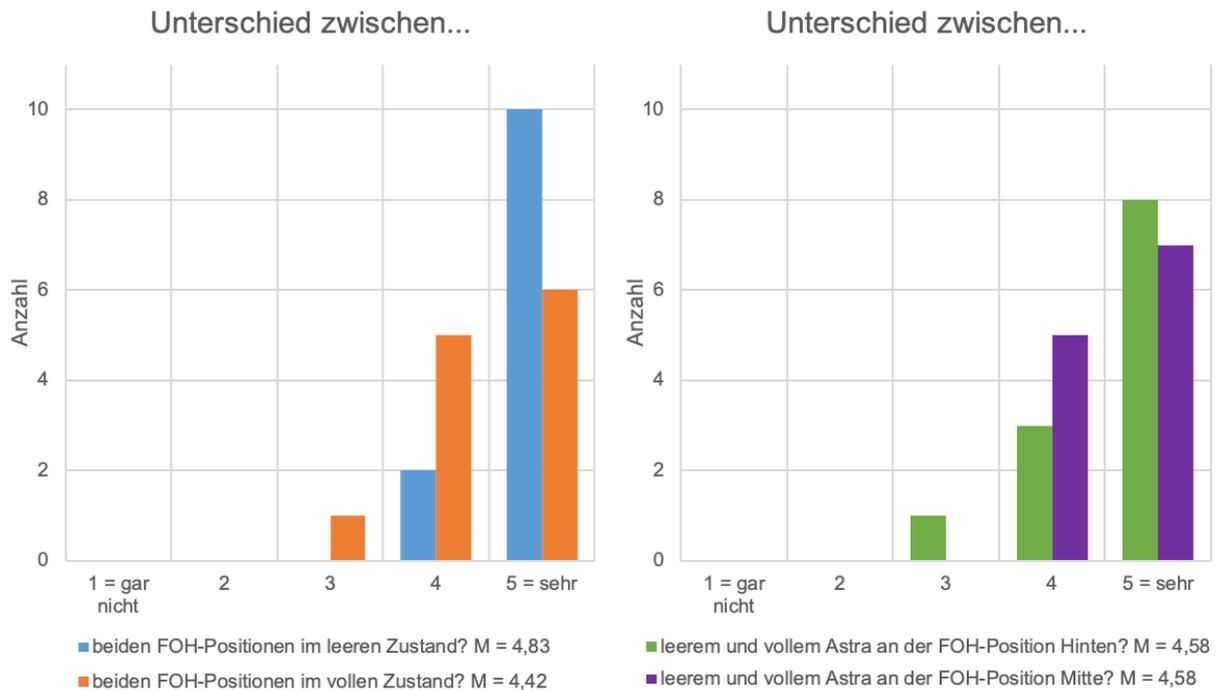


Abb. 21: Fragebogen: Hörbare Unterschiede zwischen den Hörbeispielen. Abbildung links: Unterschiede zwischen den FOH-Positionen *leer* vs. *voll*; Abbildung rechts: Unterschiede an der jeweiligen FOH-Position zwischen *leer* und *voll*.

In der Tabelle im Anhang I sind die Antworten der Abschnitte 3 und 4 des Fragebogens dargestellt, die sich auf die raumcharakterisierenden Parameter beziehen. Dabei wurde ebenfalls zwischen den beiden FOH-Positionen und den beiden Zuständen unterschieden. Aus den Werten wurden zur Vergleichbarkeit jeweils der Modus, sowie der Mittelwert und die Standardabweichung gebildet. Aufgrund der kleinen, nicht-repräsentativen Stichprobengröße wurde auf weitere Test-Statistiken verzichtet.

In den folgenden Absätzen werden die Unterschiede zwischen *leerem* und *vollem* Astra für die einzelnen Parameter aus Tabelle im Anhang I knapp beschrieben. Die Teilnehmenden nahmen die Raumgröße an der hinteren FOH-Position im *vollen* Zustand ($M = 2,18 \pm 1,08$, Modus = 1) als kleiner gegenüber dem *leeren* Zustand ($M = 2,5 \pm 0,53$, Modus = 3) wahr.

Bei der Unterscheidung der Lautheit entsprechend der Hörposition wird die mittlere FOH-Position in beiden Zuständen als minimal lauter bewertet ($M_{leer} = 3,3 \pm 0,82$, $M_{voll} = 3,25 \pm 0,75$, $Modus_{leer} = 4$, $Modus_{voll} = 4$). Der Unterschied an der hinteren FOH-Position wurde generell leiser bewertet ($M_{leer} = 2,7 \pm 0,48$, $M_{voll} = 2 \pm 0,43$, $Modus_{leer} = 3$, $Modus_{voll} = 2$).

Die Nachhalldauer scheint im *leeren* Zustand an der mittleren FOH-Position mit $M = 3,08 \pm 0,79$ der von den Teilnehmenden erwarteten Nachhalldauer zu entsprechen. Im *vollen* Zustand liegen die Bewertungen mit einer Standardabweichung von $SD = 1,12$ ein gutes Stück auseinander (Min = 1, Max = 4). Das spiegelt sich auch zwischen Modalwert 4 und Mittelwert 2,64 wider. An der hinteren Position sind sich alle Teilnehmenden jedoch einig, dass die Nachhalldauer in beiden Zuständen, im Vergleich zur erwarteten Nachhalldauer, etwas zu kurz abgebildet wird.

Auch beim nächsten Parameter, der Halligkeit, scheinen die Hörbeispiele mit der Wahrnehmung der Teilnehmenden übereinzustimmen. So sind die Werte zur Bewertung des *vollen* Astra an beiden FOH-Positionen sowohl im Modus, als auch im Mittelwert um 1 kleiner als die Werte des *leeren* Astra.

Die Spannweite aller Antworten zur Höhen-Tiefen-Balance war mit Min = 1 und Max = 5 für diesen Parameter sehr groß ($M_{\text{gemittelt}} = 2,73 \pm 1,02$). Mögliche Gründe dafür werden im folgenden Diskussionsteil erläutert.

Mit dem Parameter der Natürlichkeit bewerten die Teilnehmenden, wie stark ein Signal mit der Erwartung an ein solches Signal übereinstimmt. Auch wenn an der mittleren FOH-Position im *leeren* Zustand der Modalwert bei 2 liegt, verändert sich dieser im *vollen* Zustand auf eine 4. Auch an der hinteren FOH-Position verbessert sich dieser Wert, jedoch nur auf 3.

Obwohl die Standardabweichung bei den Fragen zur Präsenz im Durchschnitt bei $SD = 1,03$ liegt, gibt es keine Unterschiede zwischen dem Modus und dem Mittelwert für die jeweilige FOH-Position. Die Teilnehmenden haben dabei an der mittleren FOH-Position in beiden Zuständen das „sich in der Szene fühlen“ als höher (Modus = 4) bewertet als an der hinteren FOH-Position (Modus = 2).

Als letzten Parameter haben die Teilnehmenden das „Gefallen“ der Hörbeispiele bewertet. Dabei ist interessant, dass ihnen die hintere FOH-Position im *leeren* Zustand (Modus = 4) besser gefällt als im *vollen* (Modus = 2). An der mittleren FOH-Position liegt der Modalwert des *vollen* Astra (Modus = 4) hingegen über dem des *leeren* (Modus = 2). Auch sind die Bewertungen dieser Kategorie mit einer gemittelten Standardabweichung über alle Messreihen von $SD = 1,07$ relativ weit gestreut.

Außerdem konnten fünf Teilnehmende Artefakte hören. Vier davon haben Verzerrungsartefakte an der mittleren FOH-Position in beiden Zuständen wahrnehmen können. Zwei Teilnehmende konnten ebenfalls an der mittleren Position „Knacksen“ wahrnehmen. Ein Teilnehmender nahm in der hinteren Position Verzerrungen wahr. Derselbe Teilnehmende gab auch noch „Sonstige“ Artefakte für beide FOH-Positionen und für beide Zustände an.

In Abbildung 22 ist die Übereinstimmung des simulierten Publikumseffektes mit den Erfahrungen der Teilnehmenden dargestellt ($M = 3,92 \pm 0,79$). Acht von zwölf Teilnehmenden haben diese Frage mit 4 beantwortet. Dabei wurde in der Frage „aus anderen Clubs“ hinzugefügt, damit auch Teilnehmende, die nicht sehr vertraut mit dem Astra sind, diese bewerten können.

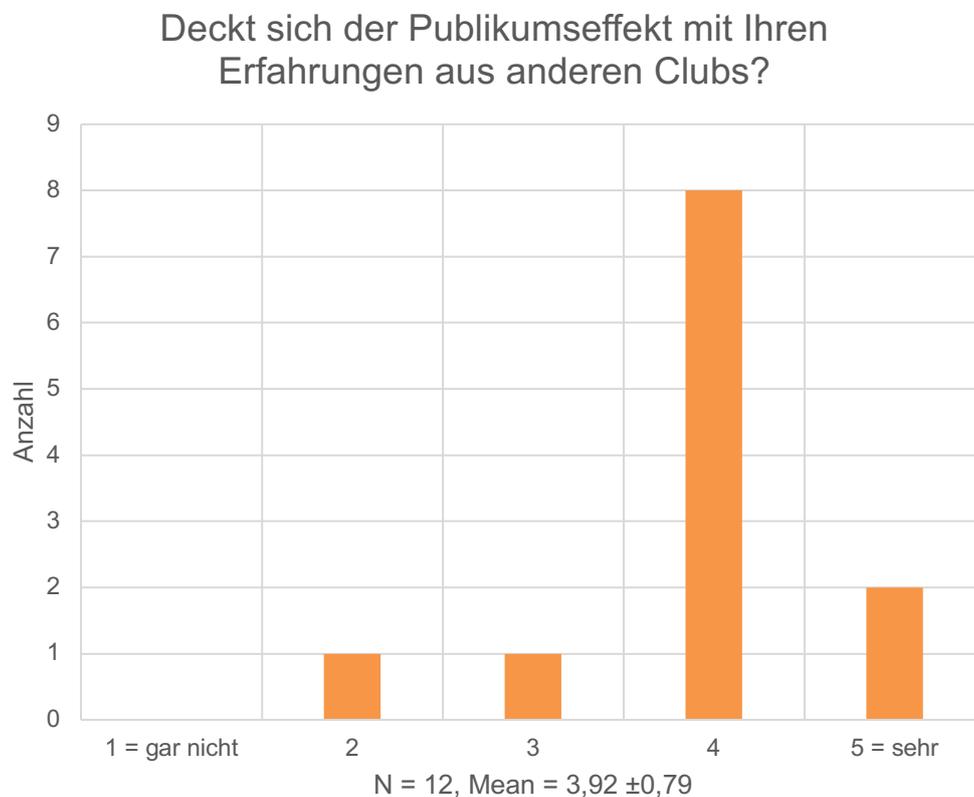


Abb. 22: Fragebogen: Übereinstimmung des Publikumseffekts mit Erfahrungen aus anderen Clubs

In den folgenden Absätzen soll eine Zusammenfassung der Kommentarfelder gegeben werden. Dabei hat ein Teilnehmender keine Kommentare gegeben. Einige der Kommentare zielten auf den vorgegebenen Mix ab, der jedoch zur Vergleichbarkeit der Ergebnisse wichtig ist.

Auf die Frage, wie sich der simulierte Effekt von den Erinnerungen aus dem Konzertalltag unterscheidet, wurde unter anderem das „Fehlen des scheppernden Lüftungskanals“ und mehrfach die „fehlende Körperschall-Erfahrung der Bässe“ genannt. Drei der Teilnehmenden, die sehr gut mit der Akustik des Astra vertraut sind, gaben an, dass der Effekt relativ nah am Original ist.

Für die Frage, was die Simulation des Raumes noch realistischer machen würde, gaben einige der Teilnehmenden an, dass Sie an der hinteren FOH-Position mehr Diffusschall erwarten würden, als an der mittleren FOH-Position. Sieben von zwölf Teilnehmenden gaben an, dass zur besseren Simulation des Publikums die Geräuschkulisse (Singen, Klatschen, Reden, Rascheln der Kleidung usw.) des Publikums fehlt.

Ob die Teilnehmenden sich vorstellen könnten, eine Publikums-Simulation für die eigene Vorbereitung ihrer Shows zu verwenden, gaben sieben von zwölf Teilnehmenden „nein“ an und vier „ja“. Dabei wurde durch weitere Kommentare verdeutlicht, dass die Verwendung eigener Mixe für die Simulation bevorzugt werden würde. Vor allem wurde die Möglichkeit gewünscht, den Klang des Mixes ohne Rauminformationen hören zu können. Diejenigen Teilnehmenden, die sich nicht vorstellen können, eine Publikums-Simulation zu verwenden, gaben alle langjährige Erfahrung an, auf die sie sich verlassen.

5. Diskussion

Ziel dieser Arbeit ist die Untersuchung des Publikumseffekts auf den FOH-Mix. Dazu wurde der Publikumseffekt in einer virtuellen Simulation am Beispiel des Astra Kulturhaus in Berlin untersucht und durch Expert*innen mittels Hörbeispielen und Fragebogens evaluiert. Die Mehrheit der Befragten gab an, dass der simulierte Effekt mit ihren Erfahrungen aus der Realität übereinstimmt. In diesem Kapitel sollen die Ergebnisse hinsichtlich dieses Unterschieds zwischen *leer* und *voll* diskutiert und eingeordnet werden. Anschließend wird auf Beschränkungen eingegangen und wie diese in weiteren Arbeiten in Zukunft verbessert werden können.

Wie schon im Ergebnisteil wird auch hier kurz auf den Vergleich der akustischen Vor-Ort-Messung mit der Simulation eingegangen. Danach wird auf die spektralen Verläufe der unterschiedlichen RIRs eingegangen bevor anschließend die raumakustischen Parameter diskutiert werden. Zum Schluss wird anhand der Ergebnisse des Fragebogens der durch virtuelle Akustik simulierte Publikumseffekt bewertet.

5.1. Interpretation der Ergebnisse

5.1.1. Vergleich der Vor-Ort-Messung mit der Simulation

Auch wenn der Fokus dieser Arbeit nicht darauf liegt, wie realistisch die Simulation mit dem realen Gebäude übereinstimmt, so dient der Vergleich der Parameter doch als Plausibilitätsüberprüfung. Der Parametervergleich in Tabelle 4 zeigt, dass alle Werte, außer den D50-Werten der Vor-Ort-Messung, in ihren Dimensionen übereinstimmen. Da die Vor-Ort-Messung hauptsächlich zur Anpassung der Materialien mit ihren T30-Zeiten verwendet wurde, ist die Abweichung der D50-Werte nicht relevant und kann vernachlässigt werden. Trotzdem korrelieren die Werte der C80- und D50-Messreihen innerhalb der Vor-Ort-Messung und der Simulation stark ($r = 0,94$).

5.1.2. Frequenzspektrum

Bei allen RIRs an beiden FOH-Positionen im Astra ist der *volle* Zustand leiser als der *leere*, was auf die Absorption des Publikums zurückzuführen ist. Die Frequenzspektren der monauralen Impulsantworten wurden für beide FOH-Positionen einzeln dargestellt, da der Referenzpunkt der Mischer*innen in der Realität auch statisch, und zwar direkt am Mischpult, ist. Dort nimmt er*sie auch den

Publikumseffekt am direktesten wahr und steuert diesem zu Beginn des Konzerts entgegen. Aus diesem Grund wird empfohlen schon beim Soundcheck den Schalldruckpegel zu messen und entsprechend zu berücksichtigen. Mischer*innen können während des Konzerts durch Erhöhen des Summenpegels der Abnahme des Schalldruckpegels durch das Publikum entgegenwirken, solange sie im länderspezifischen rechtlichen Rahmen bleiben (in Deutschland geregelt durch die DIN 15905-5:2007-11, 2007).

FOH-Position Mitte

Der nahezu lineare Frequenzgang der Backline-Quelle an der mittleren FOH-Position im *vollen* Zustand ist bemerkenswert, da dies in der Realität selten zu beobachten ist und erst durch Filterung erreicht wird. Die Erhöhung in den Bässen im *leeren* Zustand entsteht wahrscheinlich durch Moden innerhalb des Bühnenhauses. Diese Verstärkung ist im *vollen* Zustand nicht mehr erkenntlich, da sie durch das Publikum absorbiert wurde.

Die Frequenzgänge der beiden PA-Lautsprecher bestätigen im Mittel, dass der Schalldruckpegel im *vollen* Zustand geringer ist als im *leeren*. Interessant ist, dass beide Zustände bei der PA-Links einen Peak bei 1,25 kHz haben, während bei der PA-Rechts ein deutlicher Dip bei 1,6 kHz ist. Der Peak bei 1,25 kHz kann auf eine Deckenreflexion zurückgeführt werden. Der Unterschied zwischen Direktschallweg und Deckenreflexionsweg beträgt 27 cm, was 1,27 kHz bei normaler Schallgeschwindigkeit von 343 m/s entspricht. Bei der bei PA-Rechts ist ein kleiner Peak bei 1,25 kHz erkennbar, der jedoch durch den deutlichen Dip bei 1,6 kHz verschwindet (siehe Anhang N). Da die mittlere FOH-Position symmetrisch zwischen beiden PA-Seiten liegt, sollten die Peaks bei beiden PA-Seiten gleich sein. Wodurch der Dip bei der PA-Rechts entsteht erfordert weitere Untersuchung, da dieser auch in beiden Zuständen *voll* und *leer* vorkommt.

Beide Delayline-Lautsprechern hängen seitlich neben den Säulen; dabei ist der Abstand zur Bühne der gleiche wie zwischen Bühne und der mittleren FOH-Position. Die Bündelung hoher Frequenzen ist bei beiden Lautsprechern gut zu erkennen, da der Pegel über das gesamte Spektrum von tiefen zu hohen Frequenzen kontinuierlich abfällt.

FOH-Position Hinten

Der geringere Pegel der Backline-Quelle an der hinteren FOH-Position im Vergleich zur mittleren Position zeigt, dass die Abstandsgesetze in die Simulation mit eingeflossen sind.

Bei den PA-Lautsprecher können sich die Spitzen der beiden Spektren im *leeren* Zustand bei 125 Hz PA-Links und 160 Hz PA-Rechts durch Reflexionen an der Rückwand erklären lassen. Der Empfänger steht 1,23 m von der Rückwand entfernt. Der FOH ist unsymmetrisch zu beiden PA-Lautsprechern installiert, was zur Folge hat, dass die Peaks bei der PA-Links bei niedrigeren Frequenzen sind, da der Abstand vom FOH zur PA-Links kürzer ist als der Abstand zur PA-Rechts.

Bei den Delay-Lautsprechern sind ähnliche Auffälligkeiten zu finden wie bei den PA-Lautsprechern. Durch den noch größeren Abstandsunterschied zwischen linker und rechter Delayline zur hinteren FOH-Position liegen die Artefakte weiter auseinander.

In ihren Studien zur Auswirkung von Publikum auf den Frequenzgang eines Lautsprechersystems im Tieftonbereich haben Mouterde et al. (2020) ebenfalls eine Verschiebung von Dips und Peaks gefunden, die sie auf Publikum zurückführen konnten. Als Beispiel kann hierzu noch das Spektrum der PA-Links an der hinteren FOH-Position (Anhang M) dienen. Obwohl in dieser vorliegenden Arbeit anders als bei Mouterde et al. keine Subwoofer mitsimuliert wurden, ist der Effekt im Bereich 60 Hz bis 200 Hz gut zu erkennen.

5.1.3. Raumcharakterisierende Parameter

Als nächstes sollen die raumcharakterisierenden Parameter verglichen und interpretiert werden. Auch hier wird zunächst mit der Nachhallzeit als wichtigstem Parameter angefangen bevor es dann, wie bei den Ergebnissen, zu den Parametern nach DIN EN ISO 3382-1 (2009), den erweiterten Zeitgrenzen und zuletzt zu einer genaueren Betrachtung der Parameter in Oktavbändern geht.

Nachhallzeit T30

Der Kurvenverlauf in Abbildung 17 zeigt, dass das *leere*, simulierte Astra bei 20°C, besonders zwischen 200 Hz und 4 kHz, höhere Nachhallzeiten als die Vor-Ort-Messung (RT Messung) hat, obwohl die Schallgeschwindigkeit durch die höhere Temperatur schneller ist, dadurch die Absorption durch die Luft größer wird und die Nachhallzeit dadurch sinken müsste.

Positiv fällt hingegen der große Unterschied zwischen dem *leeren* und dem *vollen* Astra auf. Das stehende Publikum senkt durch seinen bis zu sechs Mal größeren Absorptionskoeffizienten in mittleren bis hohen Frequenzen (Adelman-Larsen, 2015) die Nachhallzeit des *vollen* Astra um 0,6 s. Besonders auffallend ist noch der Peak bei 400 Hz im *vollen* Zustand, welcher nur bei den Messungen der PA-Links und PA-Rechts an der FOH-Position Mitte auftritt. Dieser Peak kann durch den quaderförmigen Ausschnitt aus dem Publikum entstanden sein, welcher den Bereich des FOHs darstellt. In der Realität ist dies ein mit Gittern verstellter Bereich innerhalb des Publikums. Dieser ist im Modell 2,5 m tief und 2,5 m breit, die Wellenlänge bei 400 Hz beträgt 85 cm. Somit passt die Wellenlänge mit $3 \times 85 \text{ cm} = 2,55 \text{ m}$ in jeder Richtung genau in diesen Quader. Da sich in der Simulation in diesem Quader außer dem RAVEN Kunstkopf nichts befindet, entstehen womöglich diese Reflexionen, die eine längere Nachhallzeit erzeugen. In der Realität ist jedoch das Mischpult auf einem Tisch, Rucksäcke unter dem Tisch und weiteres Equipment in dem Bereich aufgestellt, sodass davon ausgegangen werden kann, dass dieses Equipment die Reflexionen verhindert.

Adelman-Larsen (2015) beschreibt das Oktavband 125 Hz für Veranstaltungsorte für Rock- und Popmusik als das „single most critical“-Oktavband. Als Begründung dafür nennt er, dass die tiefen Mitten der PA durch ihre geringe Richtwirkung bei 125 Hz besonders stark auf die Bühne zu den Musiker*innen einstrahlen. Abbildung 18 zeigt für die mittlere FOH-Position den T30-Wert mit einem deutlichen Dip im Oktavband 125 Hz. An der hinteren FOH-Position ist der 125 Hz Wert deutlich höher, jedoch stimmt die Kurve immer noch gut mit der Kurve der von Adelman-Larsen et al. (2010) am bestbewerteten Hallen für Rock- und Popmusik überein.

Parameter nach DIN

Der große Unterschied zwischen den simulierten Werten dieser Arbeit und den DIN-Werten liegt daran, dass sich die DIN-Werte auf Räume beziehen, in welchen in der Regel klassische, unverstärkte Musik dargeboten wird. Die kleineren EDT-Zeiten sind besonders für elektroakustisch verstärkte Musik besser. Die größere EDT-Zeit an der FOH-Position Mitte im *vollen* Zustand kann ebenfalls auf den FOH-Quaderausschnitt zurückgeführt werden. Die Werte in Tabelle 7 (PA-Quellen) und Tabelle 9 (Backline-Quelle) an der mittleren FOH-Position zeigen ebenfalls, dass im Oktavband 500 Hz der größte Unterschied zwischen *leerem* und *vollem* Zustand ist

(PA-Quellen: 520 ms, Backline-Quelle 246 ms). Auch die Parameter C80, D50, G und Ts werden später genauer behandelt, da sie als Mittelwert über 500 Hz - 1000 Hz nur wenig aussagekräftig sind. Der Grund, warum das Bassverhältnis nach Beranek (1962) an der hinteren FOH-Position etwas größer als an der mittleren FOH-Position ist, hat vermutlich mit der Platzierung des hinteren FOH direkt an der Rückwand zu tun. Ein Verhältnis von 1-1,3 wird für Musik angestrebt und ist an beiden Positionen im *vollen* Zustand nahezu erreicht.

Sehr erfreulich sind die hohen STI-Werte, da besonders in der Rock- und Popmusik eine schnelle Artikulation stattfindet, die einen hohen Anspruch an die Sprachverständlichkeit stellt.

Erweiterter Vergleich

Die weiteren Verhältnisse in Tabelle 6 bilden das Astra akustisch weiter realitätsnah ab. So ist beispielsweise die T30-Zeit für das Oktavband 125 Hz gemittelt über beide FOH-Positionen im *leeren* Zustand (0,86 s) kleiner als die von Adelman-Larsen et al. (2010) empfohlene T30-Zeit (0,9 s) für das entsprechende Raumvolumen des Astra.

Das EDT/T30-Verhältnis gilt als wichtige Größe, da es Auskunft darüber gibt, wie das Verhältnis zwischen dem von Menschen wahrgenommenen Nachhall EDT zum messtechnisch erfassten Nachhall T30 steht. Wenn das Verhältnis 1 ist, stimmen beide überein. Wenn das Verhältnis kleiner als 1 ist, bedeutet es, dass der wahrgenommene Nachhall kleiner ist, als der gemessene T30-Wert und es als weniger „hallig“ wahrgenommen wird. Im *leeren* Zustand ist die EDT (gemittelt über die Quellen PA-Links, PA-Rechts und Backline) kleiner als im *vollen* Zustand. Bei T30 ist es genau umgekehrt. Trotzdem sind die Verhältnisse kleiner als 1 bzw. an der FOH-Position Mitte im *vollen* Zustand in den gemittelten Oktavbändern 125 Hz bis 2 kHz genau 1. Nach Adelman-Larsen und Dammerud (2011) kann ein Verhältnis kleiner 1 ebenfalls Vorteile haben, da dadurch frühe, starke Reflexionen der PA nicht so stark und direkt zum*zur Hörer*in gerichtet werden.

Das Bassverhältnis ist besonders für Rock- und Popmusik ein wichtiges Bewertungskriterium aufgrund der sehr hohen Energie, die in den tiefen Frequenzen vorhanden ist (Dibble, 1995). Da die Konzerte im Astra jedoch keine klassischen Konzerte sind, müssen die Oktavbänder gemäß Beranek (1962) nach unten erweitert werden. In der Tabelle 6 ist das Bassverhältnis um das Oktavband 63 Hz erweitert. Die Werte verbessern sich im *leeren* Zustand an beiden FOH-Positionen um 0,034

und im *vollen* Zustand um 0,11. Das Verhältnis von tiefen zu mittleren Frequenzen ist im Astra somit als durchaus gut zu bewerten.

Vergleich in Oktavbändern

In den folgenden Absätzen soll auf die Unterschiede und Auffälligkeiten der Oktavbandvergleiche der Parameter EDT, C80, D50, G und Ts eingegangen werden, die in den Tabellen 7 bis 10 zu sehen sind. Die Nachhallzeit T30 wurde bereits behandelt.

Das umgekehrte Vorzeichen bei der Differenz der EDT an der mittleren FOH-Position im *vollen* Zustand im Oktavband 500 Hz lässt sich erneut mit dem geometrischen Quader um die FOH-Position Mitte erklären.

Das Klarheitsmaß C80 und das Deutlichkeitsmaß D50 korrelieren laut Adelman-Larsen et al. (2007) mit einem Faktor von $r = 0,96$ stark miteinander. In dieser Arbeit liegt der mittlere Korrelationskoeffizient zwischen diesen Parametern bei $r = 0,92$. Die Backline-Quelle hat im *leeren* Zustand den größten C80-Wert im Oktavband 125 Hz, was bedeutet, dass im von Adelman-Larsen (2015) definierten „single-most-critical“-Oktavband der Nachhallzeit die beste Klarheit existiert. Auch die PA schneidet in dem Oktavband nicht schlecht ab. Das der jeweils höchste Wert im *vollen* Zustand für C80 und D50 das 16 kHz Oktavband ist, liegt sehr sicher daran, dass hohe Frequenzen in der Luft stärker absorbiert werden.

Die Betrachtung des Stärkemaß G ist für diese Arbeit von untergeordneter Bedeutung. Im *leeren* Zustand sind die Werte des Stärkemaß jedoch auch weit von den von Beranek (1996) empfohlenen 4-5,5 dB entfernt. Die negativen Vorzeichen im *vollen* Zustand bedeuten, dass die Abnahme des Schalldruckpegels der Quellen im Raum größer ist als dies im Freifeld der Fall wäre. Das wiederum bestätigt die Absorption durch das Publikum. All das hat jedoch keinerlei negative Auswirkung, da die Beschallungsanlage die Verstärkung im Raum übernimmt.

Die positive Differenz der Schwerpunktzeit bedeutet, dass der Schwerpunkt der Impulsantwort im *vollen* Zustand früher ist als im *leeren* Zustand. Die Werte im *leeren* Zustand ($M = 34,77$ ms) liegen jedoch auch schon deutlich unter den gängigen Richtwerten von 70-150 ms (vgl. Ahnert & Tennhardt, 2008; Fasold & Veres, 2003). Die Schwerpunktzeit gilt als die wahrgenommene Balance zwischen Klarheit und Nachhall, wobei kleinere Schwerpunktzeiten eine höhere Klarheit bedeuten. Daraus folgt, dass die Werte der Simulation für das Astra für eine gute Klarheit und Sprachverständlichkeit bei Rock- und Popmusik im Astra sorgen.

5.1.4. Hörversuch und Fragebogen

Die Mehrheit der Befragten gab an, dass der simulierte Publikumseffekt mit ihren Erfahrungen aus der Realität übereinstimmt. Die Stichprobenanzahl mit $N = 13$ Teilnehmenden reicht jedoch nur zur Aussage einer Tendenz und keineswegs für eine generelle statistische Relevanz. Vor diesem Hintergrund sollen nun die Parameter der geringen Stichprobe analysiert und diskutiert werden.

Zunächst lässt sich aus den wahrgenommenen Unterschieden (Abbildung 21) deuten, dass die Simulation sowohl die unterschiedlichen FOH-Positionen, als auch die unterschiedlichen Zustände wirklichkeitsnah abbilden kann. Es gilt jedoch zu beachten, dass die Teilnehmenden wussten, hinter welchem Hörbeispiel sich welche FOH-Position und welcher Zustand befindet. Abbildung 23 lässt den Vergleich des simulierten Publikumseffekt mit den Erfahrungen der Teilnehmenden (auch aus anderen Clubs) als gelungen deuten.

Die Wahrnehmung der Raumgröße und die Unterscheidung der Lautheit könnten besonders an der hinteren FOH-Position durch Justierung und Optimierung der Delayline verbessert werden. Die geringere Wahrnehmung der Raumgröße an der hinteren FOH-Position könnte möglicherweise auch mit der gleichmäßigen Verteilung des simulierten Publikums und der dadurch bedingten „ebenenmäßigen“ Reflexion verbunden sein. Die jeweils um 1 kleineren Modal- und Mittelwerte der Halligkeit im *vollen* Zustand an beiden FOH-Positionen deuten ebenfalls auf eine gelungene Simulation des Publikumseffekt hin.

Durch das den Teilnehmenden nicht bekannte vorgegebene Hörbeispiel war die Höhen-Tiefen-Balance die Frage mit der größten Varianz zwischen den Antworten. Darüber hinaus nutzten die Teilnehmenden unterschiedliche Kopfhörer, wodurch alle eine etwas andere Wiedergabequalität hatten. Wahrscheinlich kann dieser Parameter besser bewertet werden, wenn die Teilnehmenden eigene Aufnahmen mit den BRIRs falten können.

Die am Ende des Fragebogens angegebenen Kommentare der Teilnehmenden lassen darauf schließen, dass sich der Parameter der Natürlichkeit mit Publikumsgeräuschen in der Publikumssimulation hin zu einer höheren Natürlichkeit verbessern könnte.

Obwohl sich die Teilnehmenden an der mittleren FOH-Position schon gut „in-der-Szene“ fühlten, kann dieser Parameter mit einer dynamischen Binauralsynthese weiter verbessert werden. Es besteht die Möglichkeit, dass durch alle bereits

genannten Verbesserungen auch der Wert an der hinteren FOH-Position verbessert werden kann.

Beim Parameter „Gefallen“ zeigt sich ein interessanter Kontrast in den Bewertungen. An der hinteren FOH-Position, anders als an der mittleren FOH-Position, wird der *volle* Zustand schlechter bewertet als der *leere* Zustand. Normalerweise präferieren Mischer*innen eher trockenere Umgebungen (Adelman-Larsen, 2014). Da das Publikum in der Regel der größte Absorptionsfaktor ist, wäre zu erwarten gewesen, dass an beiden FOH-Positionen der *volle* Zustand präferiert wird. Hier sind weitere Anpassungen der Simulation nötig.

5.1.5. Publikumseffekt

Der gemessene Publikumseffekt aus den für diese Arbeit erhobenen Parametern kann nun wie folgt beschrieben werden: Die Nachhallzeit T30 nimmt besonders bei mittleren und höheren Frequenzen zwischen dem *vollen* und *leeren* Zustand deutlich ab. Die EDT ist bei Frequenzen bis ca. 1000 Hz im *vollen* Zustand länger als im *leeren*. Oberhalb von 1000 Hz wechselt das Verhältnis stark. Die Klarheitsmaße C80, D50 und Ts verändern sich im *vollen* Zustand positiv gegenüber dem *leeren* Zustand.

Besonders bei den tiefen Frequenzen gilt es jedoch vorsichtig zu sein. So ist das Publikum in dieser Arbeit ein Quader, welcher Schall absorbiert und reflektiert. Übereinstimmend mit Hammond et al. (2018b) ist dies zwar eine Lösung für eine Simulation, entspricht allerdings nicht einem realen Publikum. In einer anderen Studie hat er mit seinen Kollegen festgestellt, dass unterschiedliche geometrische Formen zur Abbildung von Publikum einen wesentlichen Einfluss auf die Nachhallzeiten haben (Hammond et al., 2018a). Sie rufen dazu auf, Absorptionskoeffizienten für Publikum besser zu definieren, indem je nach Frequenzbereich dafür vorgesehene geeignetere Methoden verwendet werden.

Adelman-Larsen beschreibt das Verhältnis der Absorptionskoeffizienten von stehendem Publikum zwischen mittleren und höheren Frequenzen zu tiefen Frequenzen mit dem Faktor sechs höher (Adelman-Larsen, 2015). Weiter ist die Bündelung der Beschallungsanlage zu hohen Frequenzen hin besser gerichtet, weshalb diese durch das Publikum beeinflusst werden. Trotzdem ist eine niedrige T30-Nachhallzeit in den Bässen ein Kriterium, welches nach Adelman-Larsen (2015) signifikant die als „gut“ bewerteten von den „weniger gut“ bewerteten Veranstaltungsorten unterscheidet. Höhere Nachhallzeiten ermöglichen es

außerdem, Musiker*innen auf der Bühne ein besseres Verbundenheitsgefühl zum Publikum zu geben (Adelman-Larsen, 2015).

5.2. Einschränkungen

Wie jede Studie hat auch die Arbeit Einschränkungen und Ungenauigkeiten. In den folgenden Absätzen soll auf diese Einschränkungen eingegangen werden bevor im folgenden Kapitel Verbesserungsvorschläge daraus abgeleitet werden.

Generell gilt, dass alle Messungen und die daraus generierten Parameter, die über die PA gemacht werden, nicht konform zur DIN EN ISO 3382-1 (2009) sind. Messungen und Parameter der Backline-Quelle hingegen schon, da diese als Richtcharakteristik eine Kugelquelle ist.

In der Tabelle 12 soll zur Einordnung noch ein Vergleich der Werte T30, EDT, C80 und BR Verhältnisse mit denen aus Adelman-Larsen (2014) gegenübergestellt werden.

Tabelle 11: Parametervergleich zwischen Adelman-Larsen (2014) und dieser Arbeit

	T30, 125-2 kHz	EDT, 125-2 kHz	C80, 125-2 kHz	BR, 63 vs 0.5-1 kHz	BR, 125 vs. 0.5-1 kHz
Adelman-Larsen	0,89	0,81	5,78	1,03	0,99
diese Arbeit	0,79	0,47	12,63	1,33	1,18

Adelman-Larsen hat mit einem Dodekaeder auf der Bühnenmitte-Position gemessen, ungefähr an derselben Stelle, an welcher auch die Backline-Quelle positioniert ist. Anschließend hat er an fünf Positionen im Publikumsbereich gemessen und die Werte gemittelt. Die Werte aus dieser Arbeit stammen von der Backline-Quelle und sind über beide Empfängerpositionen gemittelt. Beide Messreihen sind im *leeren* Zustand entstanden. Drei der fünf Positionen von Adelman-Larsen befanden sich in der vorderen Hälfte des Raumes (näher an der Bühne). Die zwei Messungen hinten im Raum sind weiter auf der Stage-Right Seite des Raumes entstanden. Die EDT-Werte und C80-Werte liegen am weitesten auseinander. Eine Überprüfung zur Minimierung der Differenz könnte ein Nachbauen der genauen Messpositionen von Adelman-Larsen sein. Außerdem gibt Adelman-Larsen nur an, dass seine Messreihe im *leeren* Astra stattgefunden hat und nicht bei welcher Temperatur und Luftfeuchtigkeit.

Zunächst konnten die von Adelman-Larsen et al. (2007) empfohlenen Absorptionskoeffizienten in RAVEN nicht direkt realisiert werden, da RAVEN diese mit 1-alpha berechnet. Weiter wurde das Publikum vereinfacht als Quader gezeichnet. Damit geht man davon aus, dass die Personen im Publikum gleichmäßig verteilt sind, was bei Stehkonzerten selten der Fall ist. Dabei kann die Verteilung des Publikums bei Stehkonzerten in den vorderen Bereichen je nach Musikart und Zielpublikum zwischen vier und acht Personen auf den Quadratmeter betragen (Oberhagemann, 2012). Dieses Phänomen der unterschiedlichen Dichte von Publikum und deren Auswirkung auf tiefe Frequenzen wurde auch von Shabalina (2013) untersucht.

Um die tiefen Frequenzen in der Simulation bewerten zu können, müssten eigentlich auch die Subwoofer mitsimuliert werden. Diese wurden bewusst rausgelassen, da eine Simulation mithilfe von geometrischer Akustik für tiefe Frequenzen ungeeignet ist. Die PA hat laut Datenblatt (siehe Anhang C) einen Frequenzgang von 60 Hz bis 18 kHz mit einer Abweichung von 3 dB. Da im Astra jedoch Subwoofer verbaut sind, kann die Trennfrequenz zwischen Subwoofern und Tops höher sein.

In dieser Arbeit wurden sowohl der *leere* als auch der *volle* Zustand bei 20°C und bei 50 % relativer Luftfeuchtigkeit simuliert. Wie im Beispiel in Kapitel 2.1.7 Einfluss des Publikums berechnet, kann allein die relative Luftfeuchtigkeit während eines zweistündigen Konzerts um 43,7 % steigen. Neben der Luftfeuchtigkeit steigt auch die Temperatur. Beide Größen sind jedoch stark von der physischen Aktivität des Publikums abhängig. Außerdem gilt zu beachten, dass diese Steigungen nicht sprunghaft sondern eher linear passieren.

Der Fragebogen hat einige Schwachstellen. Beispielsweise wurde ein Hörbeispiel vorgegeben, welches den meisten Teilnehmenden unbekannt war. Einen besseren Effekt hätte man sicherlich erzielen können, wenn jede*r Teilnehmende seinen*ihren eigenen Mix hätte verwenden können, den er*sie gut kennt. Die Hörbeispiele waren so bezeichnet, dass alle Teilnehmenden relativ sicher die richtigen Hörbeispiele für die jeweilige FOH-Position und den jeweiligen Zustand verwendeten. Dies hat jedoch den Nachteil, dass die Teilnehmenden dadurch voreingenommen gegenüber den unterschiedlichen Zuständen sind. Weiter gab es nur eine generische Diffusfeldkompensation für die Kopfhörer und keine angepassten Filter für jeden Typ, da jeder Teilnehmende den Fragebogen mit

eigenem Equipment in seiner eigenen Umgebung durchführen musste. Außerdem konnte der Mix nicht von den Teilnehmenden stummgeschaltet werden, um den Nachhalleffekt im Raum zu hören, stattdessen wurde ein Song als Audiobeispiel gewählt, der in der Bridge einen deutlichen Abschlag hat.

Eine weitere Einschränkung stellt die akustische Simulation dar. Durch das Einsetzen eines Kunstkopfes und der dadurch bedingten nicht-individuellen Binauralsynthese können weitere Fehler wie bspw. Verzerrungen entstehen (Møller, 1992).

5.3. Empfehlungen und Ausblick

Obwohl die Simulation dieser Arbeit den Publikumseffekt gut beschreibt, gibt es in der Ausführung noch viele weitere Optimierungen, die für eine bessere und/oder realistischere Untersuchung des Publikumseffekts getroffen werden können. Zunächst könnte man die statische Binauralsynthese als dynamische Binauralsynthese durch Einsetzen eines Headtrackers an einem Kopfhörer realisieren. Laut Hendrickx et al. (2017) und Stitt et al. (2016) können dadurch besonders Quellen aus vorderer und rückwärtiger Richtung besser zugeordnet werden. Besonders Konzertveranstaltungen haben durch die Bühnenposition am Ende des Raumes eine starke Richtwirkung und dadurch frontalen Schalleinfall.

Um den Publikumseffekt weiter zu untersuchen wären unterschiedliche Publikumskapazitäten in einem Raum interessant. Wie in dieser Arbeit beschrieben, hat das Publikum einen deutlichen Einfluss auf die Raumakustik. Wie verändert sich diese Raumakustik, wenn beispielsweise zur Vorband erst die Hälfte des Publikums im Saal ist? Weiter sollten Temperatur und Luftfeuchtigkeit über den Zeitverlauf des Konzerts simuliert werden.

Um das Publikum besser zu simulieren wurde von der Mehrheit der Teilnehmenden angemerkt, dass die Geräusche des Publikums im „voll“-simulierten Zustand fehlen. Das könnte man durch ein binaurales Recording an einem FOH realisieren, welches dann parallel zum Mix eingespielt wird. Ebenso fehlt der empfundene „Druck“, die Vibration der tiefen Frequenzen, die besonders in der Rock- und Popmusik stark vertreten sind. Dies ist jedoch ein allgemeines Problem über Kopfhörer abgehörter Livekonzerte. Dennoch könnte man die Simulation beispielsweise mit dem „Feelbelt“ (Feelbelt GmbH, 2021) ergänzen, welcher tiefe Frequenzen in haptisches Feedback umwandelt und über einen Gürtel an den Körper abgibt.

Für weitere Lernzwecke könnte man einen Systemkontroller einschleifen, um die unterschiedlichen Quellen unterschiedlich bearbeiten zu können. Man könnte andere Lautsprechertypen mit anderen Richtcharakteristika in das Modell installieren. Sollte man versuchen den Phasengang durch die Simulation hindurch zu messen, ist jedoch Achtung geboten, da die Impulsantworten zusammengesetzt sind. RAVEN ist für komplexe Real-Time Auralisation entwickelt worden und verarbeitet standardmäßig keine Phasenganginformationen von Richtcharakteristika der Quellen (Lentz et al., 2007; Masiero & Pelzer, 2010). Außerdem gehen beim Export aus EASE SpeakerLab in das CLF-Format die Phaseninformationen verloren. Da das menschliche Ohr jedoch nicht sehr sensibel für den Phasengang ist, können für Auralisationen auch zusammengesetzte Impulsantworten verwendet werden.

In kleineren Clubs hat die Backline und deren Schalldruckpegel im Vergleich zu größeren Clubs einen wesentlich größeren Einfluss auf die Raumakustik und somit auch auf den FOH-Mix. Wenn man beispielsweise die Richtcharakteristiken eines Schlagzeugs und Gitarrenverstärkers verwendet, können auch kleinere Räume gut simuliert werden. Man stelle sich eine niedrige Bühne vor, auf welcher der Gitarrenverstärker direkt in Richtung des Publikums ausgerichtet ist. Während des Soundchecks wird dieser sich im *leeren* Raum in den Mix eingliedern und höchstwahrscheinlich kaum auf dem FOH-Mix zu hören sein. Sobald das Publikum jedoch die Quelle verschattet, wird sich dies vermutlich ändern.

Auch eine Hörposition auf der Bühne wäre interessant zu untersuchen sein. Dadurch könnte man den Publikumseffekt aus der Position/Perspektive eines*iner Künstlers*in betrachten. Adelman-Larsen et al. (2010) hat in seinen Umfragen die Veranstaltungsorte sowohl von Tontechniker*innen als auch von Musiker*innen bewerten lassen.

Durch die große Anzahl an kleinen und mittelgroßen Veranstaltungsorten, nicht nur in Deutschland, und die Einfachheit, mithilfe von SketchUp die Orte zu zeichnen und anschließend mit RAVEN zu simulieren, könnte man eine große Datenbank an Clubs entwerfen. Nachwuchstontechniker*innen könnten dann die Simulation in Kombination mit einem Mischpult als Training verwenden. Sie könnten nicht nur lernen, wie sie einen FOH-Mix an einem Mischpult zusammensetzen, sondern vor allem wie sich ihr Mix über die PA eines Veranstaltungsortes anhört und wie sich unterschiedliche FOH-Positionen im Raum sowie die An- und Abwesenheit von Publikum auf ihren Mix auswirken.

6. Fazit

Zusammenfassend kann am Beispiel des Astra Kulturhaus Berlin der Publikumseffekt durch Veränderungen der in dieser Arbeit untersuchten Parameter im Vergleich zum *leeren* Raum erstmalig erfolgreich beschrieben werden. Mit Publikum kommt es zu einer Absenkung der hohen Mitten und Höhen um ca. 3 dB und einer Verkürzung der Nachhallzeit gemittelt über beide FOH-Positionen für die PA um 61 % für die Oktavbänder 125 Hz - 500 Hz, um 38 % für die Oktavbänder 1000 Hz - 4000 Hz und um 45 % für die Oktavbänder 8 kHz - 16 kHz. Des Weiteren nimmt die Sprachverständlichkeit zu, wie es der STI-Wert beschreibt und bringt es für das Astra an beiden FOH-Positionen auf einen „ausgezeichneten“-Wert. Die Parameter des Klarheitsmaßes bestätigen dies weiter.

Die Gegenüberstellung der Parameter und des Frequenzgangs ermöglichen nun einen direkten Vergleich, inwieweit das Publikum Einfluss auf die Raumakustik, und somit den FOH-Mix hat. Durch Einbeziehung der originalen PA – im Vergleich zu der sonst aus der Akustik bekannten Messquelle eines Dodekaeders – können besonders Räume, in denen überwiegend Musik über elektroakustische Beschallungsanlagen gemacht wird, besser bewertet werden.

Die in dieser Arbeit erhobenen Werte beziehen sich nur auf das Astra Kulturhaus Berlin und sind nur bedingt auf anderen Veranstaltungsorte übertragbar. Mithilfe der in dieser Arbeit entwickelten MATLAB-Skripte können jedoch weitere Veranstaltungsorte simuliert und mit den Ergebnissen dieser Arbeit verglichen werden. Ebenfalls ist eine Weiterentwicklung mit dynamischer Binauralsynthese, einer Erweiterung für haptisches Feedback tiefer Frequenzen sowie unterschiedlicher Publikumskapazitäten möglich. Auch eine bessere Implementierung von eng stehendem Publikum, die Absorptionskoeffizienten größer als 1 über Flächenvergrößerung zulässt, würde den Publikumseffekt nochmals präzisieren.

7. Literaturverzeichnis

- Ackermann, D. (2020, September 3). *Umwandlung von CLF ins DAFF Dateiformat* [Persönliche Kommunikation].
- Ackermann, D., & Ilse, M. (2015). *The Simulation of Monaural and Binaural Transfer Functions for a Ground Truth for Room Acoustical Analysis and Perception (GRAP)* [Masterarbeit]. TU Berlin.
- Adelman-Larsen, N. W. (2014). *Rock and pop venues: Accoustic and architectural design*. Springer.
- Adelman-Larsen, N. W. (2015). Possible Acoustic Design Goals in very large Venues hosting Live Music Concerts. *Proceedings of the Institute of Acoustics*, 37.
- Adelman-Larsen, N. W., & Dammerud, J. J. (2011). A survey of reverberation times in 50 European venues presenting pop & rock concerts. *Proceedings of Forum Acusticum*, 6.
- Adelman-Larsen, N. W., Thompson, E. R., & Gade, A. C. (2007). *Acoustics in rock and pop music halls*. 7.
- Adelman-Larsen, N. W., Thompson, E. R., & Gade, A. C. (2010). Suitable reverberation times for halls for rock and pop music. *The Journal of the Acoustical Society of America*, 127, 247–255. <https://doi.org/10.1121/1.3263611>
- Ahnert Feistel Media Group. (2020). *EASE SpeakerLab Pro (1.1.33.188)* [X64]. AFMG Technologies GmbH.
- Ahnert, W., Feistel, S., Finder, E., & Miron, R. A. (2006, Oktober 1). *Software Based Live Sound Measurements*. Audio Engineering Society Convention 121, San Francisco, CA.
- Ahnert, W., & Tennhardt, H.-P. (2008). Raumakustik. In S. Weinzierl (Hrsg.), *Handbuch der Audiotechnik* (S. 181–266). Springer. https://doi.org/10.1007/978-3-540-34301-1_5
- Allen, J., & Berkley, D. (1979). Image method for efficiently simulating small-room acoustics. *The Journal of the Acoustical Society of America*, 65, 943–950. <https://doi.org/10.1121/1.382599>
- Asadolahzadeh, J. (2009, April 30). Astra-Kulturhaus und Suicide Circus haben eröffnet. *tip berlin*. Abgerufen am 12.12.2020 von <https://www.tip-berlin.de/astra-kulturhaus-und-suicide-circus-haben-eroffnet/>

- Aspöck, L., Pelzer, S., Wefers, F., & Vorländer, M. (2014, April 3). A real-time auralization plugin for architectural design and education. *Proceedings of the EAA Joint Symposium on Auralization and Ambisonics*. <https://doi.org/10.14279/depositonce-26>
- Barron, M. (2010). *Auditorium acoustics and architectural design* (2. Aufl.). Spon Press, Taylor & Francis.
- Becker, A. (2011). *Lüftungsanlagen* (2. Aufl.). Vogel-Buchverlag.
- Beraneck, L. L. (2004). *Concert Halls and Opera Houses*. Springer. <https://doi.org/10.1007/978-0-387-21636-2>
- Beraneck, L. L. (1962). *Music, Acoustics and Architecture*. John Wiley & Sons.
- Beraneck, L. L. (1996). Concert & Opera Halls: How They Sound. *The Journal of the Acoustical Society of America*, 99(5), 2637–2637. <https://doi.org/10.1121/1.414882>
- Beraneck, L. L., & Hidaka, T. (1998). Sound absorption in concert halls by seats, occupied and unoccupied, and by the hall's interior surfaces. *The Journal of the Acoustical Society of America*, 104(6), 3169–3177. <https://doi.org/10.1121/1.423957>
- Blauert, J. (1997). *Spatial Hearing: The Psychophysics of Human Sound Localization*. MIT Press.
- Blauert, J., & Braasch, J. (2008). Räumliches Hören. In S. Weinzierl (Hrsg.), *Handbuch der Audiotechnik* (S. 87–121). Springer Berlin Heidelberg. https://doi.org/10.1007/978-3-540-34301-1_3
- Bomhardt, R., Berzborn, M., Klein, J., Richter, J.-G., & Vorländer, M. (2017, März). *The ITA-Toolbox: An Open Source MATLAB Toolbox for Acoustic Measurements and Signal Processing*.
- Bradley, J. S. (1996). Optimizing the Decay Range in Room Acoustics Measurements Using Maximum-Length-Sequence Techniques. *Journal of the Audio Engineering Society*, 44(4), 266–273.
- Brinkmann, F. (2017). *The FABIAN head-related transfer function data base*. <https://doi.org/10.14279/depositonce-5718>
- CLF Group. (2015). <http://www.clfgroup.org/>
- Cockos Incorporated. (2020). *REAPER* (Version 6) [X64]. Cockos Incorporated.
- Corteel, E., Sugden, S., & Montignies, F. (2017, August 21). *Large Scale Open Air Sound Reinforcement in Extreme Atmospheric Conditions (Engineering Brief)*.

- Audio Engineering Society Conference: 2017 AES International Conference on Sound Reinforcement – Open Air Venues, Struer, Denmark.
- Dibble, K. (1995). Hearing Loss & Music. *Journal of the Audio Engineering Society*, 43(4), 251–266.
- DIN 15905-5:2007-11, Veranstaltungstechnik—Tontechnik—Teil 5: Maßnahmen zum Vermeiden einer Gehörgefährdung des Publikums durch hohe Schallemissionen elektroakustischer Beschallungstechnik. (2007). Beuth Verlag GmbH.
- DIN 33402-2:2020-12, Ergonomie – Körpermaße des Menschen – Teil 2: Werte. (2020). Beuth Verlag GmbH.
- DIN EN 60268-16:2012-05, Elektroakustische Geräte—Teil 16: Objektive Bewertung der Sprachverständlichkeit durch den Sprachübertragungsindex (IEC 60268-16:2011). Beuth Verlag GmbH.
- DIN EN ISO 354:2003-12, Messung der Schallabsorption in Hallräumen (ISO 354:2003). Beuth Verlag GmbH.
- DIN EN ISO 3382-1:2009-10, Akustik - Messung von Parametern der Raumakustik – Teil 1: Aufführungsräume (ISO_3382-1:2009). Beuth Verlag GmbH.
- DIN EN ISO 9921:2004-02, Ergonomie—Beurteilung der Sprachkommunikation. (ISO 9921:2003). Beuth Verlag GmbH.
- DIN EN ISO 18233:2006-08, Akustik - Anwendung neuer Messverfahren in der Bau- und Raumakustik (ISO 18233:2006). Beuth Verlag GmbH.
- DIN ISO 9613-2:1999-10 Akustik - Dämpfung des Schalls bei der Ausbreitung im Freien—Teil 2: Allgemeines Berechnungsverfahren (ISO 9613-2:1996). Beuth Verlag GmbH.
- Embrechts, J.-J. (2001). *Determination of the scattering coefficient of statistical rough surfaces*.
- Erbes, V., Schultz, F., Lindau, A., & Weinzierl, S. (2012). *An extraaural headphone system for optimized binaural reproduction*. 313–314.
- Musterverordnung über den Bau und Betrieb von Versammlungsstätten*, Fachkommission Bauaufsicht der Bauministerkonferenz (2014).
- Farina, A. (2000, Februar 1). *Simultaneous Measurement of Impulse Response and Distortion with a Swept-Sine Technique*. Audio Engineering Society Convention 108, Paris, Frankreich.

- Fasold, W., & Veres, E. (2003). *Schallschutz und Raumakustik in der Praxis: Planungsbeispiele und konstruktive Lösungen* (2. Aufl.). Huss-Medien.
- Feelbelt GmbH. (2021). *Feelbelt*. <https://www.feelbelt.de>
- Fels, J., Oberem, J., & Masiero, B. (2013). Experiments on authenticity and naturalness of binaural reproduction via headphones. *The Journal of the Acoustical Society of America*, 133(5), 3329–3329. <https://doi.org/10.1121/1.4805581>
- Haas, H. (1949). *Über den Einfluß eines Einfachechos auf die Hörsamkeit von Sprache* [Dissertation]. Technische Hochschule Braunschweig.
- Hammond, R., Hill, A. J., & Mapp, P. (2018a). Discrepancies between audience modelling methods in performance venues. *Proceedings of the Institute of Acoustics*, 40(4).
- Hammond, R., Hill, A. J., & Mapp, P. (2018b, Oktober 7). *On the Accuracy of Audience Implementations in Acoustic Computer Modelling*. Audio Engineering Society Convention 145.
- Harris, C. M. (1966). Absorption of Sound in Air versus Humidity and Temperature. *The Journal of the Acoustical Society of America*, 40(1), 148–159. <https://doi.org/10.1121/1.1910031>
- Hartmann, W., & Wittenberg, A. (1996). On the externalization of sound images. *The Journal of the Acoustical Society of America*, 99(6), 3678–3688. <https://doi.org/10.1121/1.414965>
- Hendrickx, E., Stitt, P., Messonnier, J.-C., Lyzwa, J.-M., Katz, B. F., & de Boishéraud, C. (2017). Influence of head tracking on the externalization of speech stimuli for non-individualized binaural synthesis. *The Journal of the Acoustical Society of America*, 141(3), 2011–2023. <https://doi.org/10.1121/1.4978612>
- Herlufsen, H. (1984). *Dual Channel FFT Analysis* (Technical Review No. 2). Hottinger Brüel & Kjær A/S.
- Houtgast, T., & Steeneken, H. J. M. (1973). The Modulation Transfer Function in Room Acoustics as a Predictor of Speech Intelligibility. *The Journal of the Acoustical Society of America*, 54(2), 557–557. <https://doi.org/10.1121/1.1913632>
- Jeong, C.-H., Marie, P., Brunskog, J., & Møller Petersen, C. (2012). Audience noise in concert halls during musical performances. *The Journal of the Acoustical Society of America*, 131(4), 2753–2761. <https://doi.org/10.1121/1.3689558>

- Kath, U., & Kuhl, W. (1964). Messungen zur Schallabsorption von Personen auf ungepolsterten Stühlen. *Acta Acustica United with Acustica*, 14(1), 50–55.
- Kleiner, M., Dalenbäck, B.-I., & Svensson, P. (1993). Auralization-An Overview. *Journal of the Audio Engineering Society*, 41(11), 861–875.
- Kohlrausch, A., Braasch, J., Kolossa, D., & Blauert, J. (2013). An Introduction to Binaural Processing. In J. Blauert (Hrsg.), *The Technology of Binaural Listening* (S. 1–32). Springer. https://doi.org/10.1007/978-3-642-37762-4_1
- Kürer, R. (1972). *Untersuchungen zur Auswertung von Impulsmessungen in der Raumakustik* [Dissertation]. TU Berlin.
- Kuttruff, H. (2000). *Room acoustics* (4. Aufl.). Spon Press.
- La Roda, J. (2020, Mai 28). *Barrier Effect at Open-air Concerts, Part 1*. Audio Engineering Society Convention 148.
- Lentz, T., Schröder, D., Vorländer, M., & Assenmacher, I. (2007). Virtual Reality System with Integrated Sound Field Simulation and Reproduction. *EURASIP Journal on Advances in Signal Processing*, 2007. <https://doi.org/10.1155/2007/70540>
- Lerch, R., Sessler, G., & Wolf, D. (2009). *Technische Akustik*. Springer. <https://doi.org/10.1007/978-3-540-49833-9>
- Lindau, A. (2014a). *Spatial Audio Quality Inventory (SAQI). Test Manual*. <https://doi.org/10.14279/depositonce-1.2>
- Lindau, A. (2014b). *Binaural Resynthesis of Acoustical Environments. Technology and Perceptual Evaluation* [Dissertation]. TU Berlin.
- Lindau, A., & Brinkmann, F. (2012). Perceptual Evaluation of Headphone Compensation in Binaural Synthesis Based on Non-Individual Recordings. *Journal of the Audio Engineering Society*, 60(1/2), 54–62.
- Lindau, A., Hohn, T., & Weinzierl, S. (2007). *Binaural resynthesis for comparative studies of acoustical environments*. Audio Engineering Society Convention 122, Wien, Österreich.
- Lindau, A., & Weinzierl, S. (2007). *FABIAN - Schnelle Erfassung binauraler Raumimpulsantworten in mehreren Freiheitsgraden*.
- Lindau, A., & Weinzierl, S. (2012). Assessing the Plausibility of Virtual Acoustic Environments. *Acta Acustica United with Acustica*, 98(5), 804–810. <https://doi.org/10.3813/AAA.918562>

- Martellotta, F., D'Alba, M., & Crociata, S. D. (2011). Laboratory measurement of sound absorption of occupied pews and standing audiences. *Applied Acoustics*, 72(6), 341–349. <https://doi.org/10.1016/j.apacoust.2010.12.008>
- Masiero, B., & Pelzer, S. (2010). Study of Phase Reconstruction Methods Employed at Room Acoustic Simulation. *Fortschritte der Akustik (DAGA 2010)*, 707–708.
- MATLAB. (2020). *R2020a v.9.8.0* (Version R2020a) [Computer software]. The MathWorks Inc.
- McCarthy, B. (2016). *Sound Systems: Design and Optimization: Modern Techniques and Tools for Sound System Design and Alignment* (3. Aufl.). Focal Press.
- Meyer, G., & Schiffner, E. (1986). *Technische Thermodynamik*. Verlag Chemie.
- Meyer, J. (1992, Mai 1). *Precision Transfer Function Measurements Using Program Material as the Excitation Signal*. Audio Engineering Society Conference: 11th International Conference: Test & Measurement.
- Moldrzyk, C., Ahnert, W., Feistel, S., Lentz, T., & Weinzierl, S. (2004, Oktober 28). *Head-Trackted Auralization of Acoustical Simulation*. Audio Engineering Society 117, San Francisco, CA.
- Moldrzyk, C., Lentz, T., & Weinzierl, S. (2005). Perzeptive Evaluation binauraler Auralisationen. *Fortschritte der Akustik (DAGA 2005)*, 545–546.
- Møller, H. (1992). Fundamentals of binaural technology. *Applied Acoustics*, 36(3–4), 171–218. [https://doi.org/10.1016/0003-682X\(92\)90046-U](https://doi.org/10.1016/0003-682X(92)90046-U)
- Møller, H., Hammershøi, D., Jensen, C. B., & Sørensen, M. F. (1995). Transfer Characteristics of Headphones Measured on Human Ears. *Journal of the Audio Engineering Society*, 43(4), 203–217.
- Möser, M. (2005). *Technische Akustik* (6. Aufl.). Springer.
- Mouterde, T., Corteel, E., & Melon, M. (2020, Oktober 22). *Audience effect on the response of a loudspeaker system in the low frequency range, part 1: Magnitude*. Audio Engineering Society Convention 149, Online.
- Müller, S. (2008). Messtechnik. In S. Weinzierl (Hrsg.), *Handbuch der Audiotechnik* (S. 1087–1169). Springer. https://doi.org/10.1007/978-3-540-34301-1_21
- Müller, S., & Massarani, P. (2001). Transfer-Function Measurement with Sweeps. *Journal of the Audio Engineering Society*, 49(6), 443–471.
- Oberhagemann, D. (2012). *Statische und dynamische Personendichten bei Großveranstaltungen* (Technischer Bericht TB 13-01). Technisch-

- Wissenschaftlicher Beirat (TWB) der Vereinigung zur Förderung des Deutschen Brandschutzes e.V.
- Olive, S., Welti, T., & McMullin, E. (2013, Oktober 16). *Listener Preferences for In-Room Loudspeaker and Headphone Target Responses*. Audio Engineering Society Convention 135.
- Physikalisch Technische Bundesanstalt. (2018, Juli 23). *Absorption Coefficient Database*. <https://www.ptb.de/cms/ptb/fachabteilungen/abt1/fb-16/ag-163/absorption-coefficient-database.html>
- Purse, S. (2021, Januar 13). *MartinAudio-W8VDQ* [Persönliche Kommunikation].
- Rational Acoustics. (2020). *Smaart v8 (8.4.3.0)* [OSX El-Captian]. Rational Acoustics LLC.
- Sabine, W. C. (1923). *Collected papers on acoustics*. Cambridge : Harvard University Press, 302.
- Schröder, D. (2011). *Physically Based Real-Time Auralization of Interactive Virtual Environments* [Dissertation]. Rheinisch-Westfälische Technische Hochschule Aachen.
- Schröder, D., & Vorländer, M. (2011). RAVEN: A Real-Time Framework for the Auralization of Interactive Virtual Environments. *Proceedings of Forum Acusticum*, 1541–1546.
- Schroeder, M. R. (1965). New Method of Measuring Reverberation Time. *The Journal of the Acoustical Society of America*, 37(3), 409–412. <https://doi.org/10.1121/1.1909343>
- Shabalina, E. (2013). *The propagation of low frequency sound through an audience* (M. Vorländer, Hrsg.). Logos Verlag Berlin GmbH.
- Stitt, P., Hendrickx, E., Messonnier, J.-C., & Katz, B. F. (2016). *The Role of Head Tracking in Binaural Rendering*. 350–355.
- Theile, G. (1985, März 1). *On the Standardization of the Frequency Response of High Quality Studio Headphones*. Audio Engineering Society Convention 77.
- Trimble Inc. (2016). *SketchUp Make 2016 (16.1.1449)* [Windows x64]. Trimble Inc.
- Vorländer, M. (2008). *Auralization*. Springer. <https://doi.org/10.1007/978-3-540-48830-9>
- Vorländer, M., & Mommertz, E. (2000). Definition and measurement of random-incidence scattering coefficients. *Applied Acoustics*, 60(2), 187–199. [https://doi.org/10.1016/S0003-682X\(99\)00056-0](https://doi.org/10.1016/S0003-682X(99)00056-0)

- Wefers, F. (2010). OpenDAFF - A free, open-source software package for directional audio data. *Fortschritte Der Akustik (DAGA 2010)*.
- Weinzierl, S., Lepa, S., & Ackermann, D. (2018). A measuring instrument for the auditory perception of rooms: The Room Acoustical Quality Inventory (RAQI). *The Journal of the Acoustical Society of America*, *144*(3), 1245–1257. <https://doi.org/10.1121/1.5051453>
- Wightman, F. L., & Kistler, D. J. (1989). Headphone simulation of free-field listening. II: Psychophysical validation. *Journal of the Acoustical Society of America*, *85*(2), 868–878. <https://doi.org/10.1121/1.397558>
- Wright, M. (2005). Open Sound Control: An enabling technology for musical networking. *Organised Sound*, *10*(3), 193–200. <https://doi.org/10.1017/S1355771805000932>
- Zaccaria, M., & Hamann, P. (2021, Februar 10). *Einstellungen des Systemcontrollers im Astra* [Persönliche Kommunikation].

8. Anhang

A. Datenblatt Audix TM1-Plus

TM1 Test & Measurement Microphone

OVERVIEW

The TM1 is a 6 mm pre-polarized condenser microphone used for test and measurement applications. The TM1 is known for its linearity, accurate response, consistency, ease of use and affordability.

Characterized with a uniformly controlled omni-directional polar pattern, the TM1 is designed to capture acoustic measurements for room analysis software programs, real time analyzers and other sound control devices. With a flat frequency range of 20 Hz – 25 kHz, the TM1 is an excellent tool for sound engineers, sound companies and recording enthusiasts.

Requiring 18 - 52 Volts phantom power for operation, the TM1 features a precision machined 4-stage brass body and capsule housing, nickel plate finish, Switchcraft® or Audix XLR, shock absorbent O-rings and heavy duty snap to fit mic clip.

SUPPLIED ACCESSORIES

DCLIP - Heavy duty tension fit mic clip

P1 - Carrying pouch

OPTIONAL ACCESSORIES

CBL20 - 20' XLR-XLR quad conductor mic cable

SMT19 - Shock mount clip

SMT25 - Shock mount system

TM1CA4231 - Calibration adapter

TRIPOD - Tripod mic stand

WSTM1 - Threaded windscreens



FEATURES

- 6mm pre-polarized condenser capsule
- Hi SPL response
- Precision machined brass housings
- Low noise electronics
- Replaceable electronics and capsule
- 3 year warranty

APPLICATIONS

- Test and measurement
- Real time analyzers
- Room analysis software programs
- Ambient room miking



DCLIP

P1

CBL20

SMT19

SMT25

TM1CA4231

TRIPOD

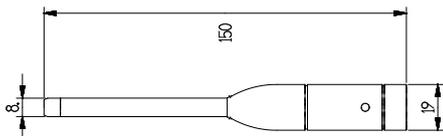
WSTM1

TM1

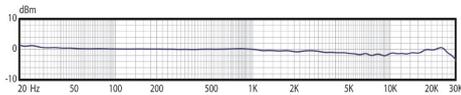
SPECIFICATIONS

Transducer Type	Pre-polarized Condenser
Frequency Response	20 Hz - 25 kHz +/-2 dB
Polar Pattern	Omni
Output Impedance	200 ohms
Sensitivity	6 mV / Pa @ 1k
Maximum SPL	130 dB with distortion <1%
	140 dB Max
Signal to Noise Ratio	66 dB
Equivalent Noise Level	28 dB (A weighted)
Dynamic Range	112 dB
Connector	male XLR
Power Requirements	18-52 V phantom
Polarity	Positive pressure on diaphragm produces positive voltage on pin 2 relative to pin 3 of output XLR connector
Materials / Finish	4 piece precision machined brass / Nickel Finish
Weight	132 g / 4.7 oz
Length	150 mm / 5.9 in

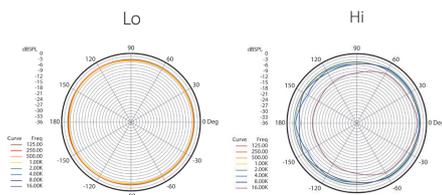
DIMENSIONS (mm)



FREQUENCY RESPONSE



POLAR PATTERNS



PRODUCT REGISTRATION: Please register your product online at www.audixusa.com/docs_12/about/product_registration.shtml.
SERVICE AND WARRANTY: This microphone is under warranty for a period of 3 years to be free of defects in material and workmanship. In the event of a product failure due to materials or workmanship, Audix will repair or replace said product at no charge with proof of purchase. Audix does not pay or reimburse shipping costs for warranty repairs or returns. The warranty excludes any causes other than manufacturing defects, such as normal wear, abuse, environmental damage, shipping damage or failure to use or maintain the product per the supplied instructions. No Implied Warranties: All implied warranties, including but not limited to implied warranties of merchantability and fitness for a particular purpose are hereby excluded. The liability of Audix, if any, for damages relating to allegedly defective products shall be limited to the actual price paid by Dealer for such products and shall in no event include incidental or consequential damages of any kind. Should your microphone fail in any way, please contact the Audix Service department at 503.682.6933. A Return Authorization is required before returning any product. OTHER THAN THIS WARRANTY, AUDIX MAKES NO WARRANTIES, EXPRESS OR IMPLIED, WITH RESPECT TO THE PRODUCTS, THE USE OF THE PRODUCTS, THE PERFORMANCE OF THE PRODUCTS. AUDIX SHALL NOT BE LIABLE FOR SPECIAL INCIDENTAL, CONSEQUENTIAL, INDIRECT OR SIMILAR DAMAGES ARISING FROM OR BASED ON THE SALE, USE, STORAGE OR DISPOSAL OF THE PRODUCTS, AUDIX'S SERVICE WORK, BREACH OF WARRANTY, BREACH OF CONTRACT. NEGLIGENCE, OR ANY OTHER THEORY OF LIABILITY, EVEN IF AUDIX HAS BEEN ADVISED OF THE POSSIBILITY OF SUCH DAMAGES.

ALL SPECIFICATIONS SUBJECT TO CHANGE WITHOUT NOTICE.

ARCHITECT AND ENGINEER SPECIFICATIONS

The microphone shall be a back plate pre-polarized condenser with an omni-directional polar pattern. The microphone shall operate on 18 - 52 Volts phantom power and the nominal output impedance shall be equal to 200 ohms at 1 kHz. The microphone shall have a sensitivity of 6 mV ± 3 dB / Pa at 1 kHz. The microphone shall have a maximum SPL level of 130 dB with a THD of 1%. The microphone shall be machined from brass with dimensions of 19 mm diameter at the base, 7.7 mm diameter at the top and 150 mm in length. The microphone shall be the Audix TM1.

OPERATION AND MAINTENANCE

The TM1 is a low impedance microphone and should be plugged into a "mic level" input on your console, mixer or recording device. The TM1 will NOT operate without phantom power voltage (18 Volts minimum) which is available on most professional mic preamps and mixing devices. If phantom power is not available on your equipment, you will have to purchase a phantom power supply (such as the Audix APS2). Avoid plugging or unplugging the microphone into a PA system unless the channel is muted or the volume of the system is turned down. Failure to do so may result in a loud "popping" noise which could seriously damage the speakers in the PA system.

USER TIPS

Measurement: The TM1 is an excellent choice for room analysis programs and real time analyzers. Just be sure that you are plugging the microphone into a low impedance input and that phantom power is available.

Ambient room application: The TM1 may be used to capture the "room sound" for in ear monitors. Typically, you would set up one microphone on each side of the stage in a mic stand facing the audience.

Recording: The TM1 is extremely flat and accurate and has an excellent sound. Because of its small profile, it can be used in conjunction with portable recording devices for live stereo miking. The TM1 is also excellent for miking acoustic instruments and room ambience.

Further miking techniques may be found at www.audixusa.com.

www.audixusa.com
 503.682.6933 Fax: 503.682.7114
 Audix Corporation 9400 SW Barber St. Wilsonville, OR 97070

AUDIX

ver 3.0.05-16

Specifications

UA-25EX:USB Audio Interface

Number of Audio Record/ Playback Channels	Record: 1 pair of stereo Playback: 1 pair of stereo DIGITAL IN SWITCH = OFF: Full duplex (except for 96 kHz setting) DIGITAL IN SWITCH = ON: Recording only
Signal Processing	PC interface: 24 bits (ADVANCED DRIVER switch=ON) 16 bits (ADVANCED DRIVER switch=OFF) AD/DA Conversion: 24 bits (linear)
Sampling Frequency	Digital output: 44.1/48/96 kHz Digital input: 44.1/48/96 kHz AD/DA Conversion: 44.1/48/96 kHz * ADVANCED DRIVER switch=OFF: 44.1 kHz only
Frequency Response	96.0 kHz: 20 Hz to 40 kHz (+0 dB/-2 dB) 48.0 kHz: 20 Hz to 22 kHz (+0 dB/-1 dB) 44.1 kHz: 20 Hz to 20 kHz (+0 dB/-1 dB)
Nominal Input Level	Input Jack L, R (XLR type): -60 to -20 dBu Input Jack L, R (1/4 inch TRS phone type): -36 to +4 dBu * Maximum input level: Nominal Input Level + 12 dB
Nominal Output Level	Output Jack L, R (1/4 inch TRS phone type): +4 dBu (balanced) Output Jack L, R (RCA phono type): -2 dBu * Maximum output level: Nominal Output Level + 12 dB
Residual Noise Level	Output Jack: -96 dBu (S/N ratio: 105 dB typ.) * Input terminated with 1 k ohms, OUTPUT VOLUME: max., INPUT MONITOR: min., IHF-A, typ.
Microphone Pre-Amp	Phantom power 48 V / 8 mA max. Analog Limiter or compressor
Interface	USB Digital input/output (Optical type) Conforms to IEC60958 consumer format. MIDI input/output

Connectors	<p><Front Panel> Input Jack L, R XLR type (balanced, phantom power +48 V) 1/4 inch TRS phone type (balanced) * Input Jack R: high impedance is supported. Headphones Jack Stereo 1/4 inch phone type</p> <p><Rear Panel> Digital Input Connector (Optical type) Digital Output Connector (Optical type) Output Jack L, R 1/4 inch TRS phone type (balanced) RCA phono type MIDI Connectors (IN, OUT) USB Connector (B type)</p>
Power Supply	USB Bus Power
Current Draw	480 mA
Dimensions	164 (W) x 133 (D) x 46 (H) mm 6-1/2 (W) x 5-1/4 (D) x 1-13/16 (H) inches
Weight	565 g/ 1 lb. 4 oz.
Accessories	Owner's Manual, USB cable, UA-25EX Driver CD-ROM, Cakewalk Production Plus Pack CD-ROM

* 0 dBu = 0.775 Vrms

* In the interest of product improvement, the specifications, appearance of this unit and/or contents of this package are subject to change without prior notice.

C. Datenblatt Martin Audio W8LM

W8LM Mini Line Array

Mini, high performance three-way line array enclosure

technical specifications (single enclosure)

TYPE	Three-way, active/passive, mini line array element
FREQUENCY RESPONSE (5)	60Hz-18kHz \pm 3dB
DRIVERS: LF + MF Section	8" (200mm)/2" (50mm) voice coil, reflex-loaded direct radiator
DRIVERS: HF Section	8" (200mm)/2" (50mm) voice coil, neodymium driver, front horn loaded, rear reflex loaded
RATED POWER (2)	LF + MF: 400W AES, 1600W peak HF: 75W AES, 300W peak Passive: 400W AES, 1600W peak
RECOMMENDED AMPLIFIER	iK81
SENSITIVITY (6)	LF + MF: 100dB HF: 106dB FR: 99dB rising to 105dB at HF
MAXIMUM SPL (calculated @ 1m)	LF + MF: 126dB continuous, 132dB peak HF: 125dB continuous, 131dB peak Passive: 125dB continuous, 131dB peak
NOMINAL IMPEDANCE	LF + MF: 12 ohms HF: 12 ohms FR: 12 ohms
DISPERSION (-6dB)	100° horizontal (down to 800Hz), 7.5° vertical 120° horizontal (down to 700Hz) @ -10dB
CROSSOVER	300Hz passive, 2.2kHz active or passive
ENCLOSURE	Vertical trapezoid with 3.75° wall angle, multi-laminate birch ply construction
FINISH	Textured black paint
PROTECTIVE GRILLE	Black perforated steel
CONNECTORS	2 x Neutrik NL4
DIMENSIONS	(W) 620mm x (H) 243mm x (D) 400mm (W) 24.4ins x (H) 9.6ins x (D) 15.8ins
WEIGHT (including rigging hardware)	29kg (64lbs)

accessories

ASF20001	Flying frame
ASF20002	Lifting bar
HAM09002	Groundstack bar
HTK175	Flying pin

Notes

- (1) Measured on-axis in half space at 2 metres, then referred to 1 metre.
- (2) AES Standard ANSI S4.26-1984.
- (3) Measured in half space at 2 metres with 1 watt input, using band limited pink noise, then referred to 1 metre.
- (4) Measured in half space at 2 metres using band limited pink noise, then referred to 1 metre.
- (5) Measured on-axis in open (4 π) space at 2 metres, then referred to 1 metre.
- (6) Measured in open (4 π) space at 2 metres with 1 watt input, using band limited pink noise, then referred to 1 metre.
- (7) Measured in open (4 π) space at 2 metres using band limited pink noise, then referred to 1 metre.

Trade Descriptions Act

Due to Martin Audio's policy of continuing improvement, we reserve the right to alter these specifications without prior notice. Martin Audio is committed to refining state of the art sound reinforcement, combining in-depth product and field applications research with advanced manufacturing techniques. Every Martin Audio product is built to the highest manufacturing standards and rigorously tested to ensure that it meets the performance criteria specified in the design.

architectural and engineering specifications

The loudspeaker system shall be of the three-way horizontally formatted line array type, switchable passive/bi-amp. The low and mid frequency sections shall consist of two 8" (200mm) cone transducers, one direct radiating and reflex loaded and one front loaded by a constant directivity mid-horn using a toroidal phase plug and reflex loaded, with both sharing the same enclosure. The drivers shall operate in tandem to produce low frequencies up to 300Hz. Above 300Hz, the direct radiator driver shall be rolled off by an internal passive network and the horn loaded driver reproduce mid frequencies up to 2.2kHz. The high frequency section shall consist of two 1" (25mm) horn elements vertically mounted to produce a low-curvature vertical wavefront. The enclosure shall be constructed of heavily braced multi-laminate plywood with all flying hardware integral and captive. Bi-amp or passive operation shall be selected by a switch at the rear of the enclosure. In bi-amp mode the loudspeaker shall be operated with a separate electronic controller providing a 2.2kHz crossover between mid and high frequencies. In passive mode the mid and high frequency sections shall be integrated by an internal 2.2kHz crossover network.

Performance of the loudspeaker system with its electronic controller shall meet or exceed the following criteria:

- Frequency response measured 1 metre on axis shall be 60Hz-18kHz \pm 3dB.
- High frequency dispersion at -6dB points shall be 100°H x 7.5°V.
- Power handling shall be 400W AES, 1600W peak FR/(LF + MF), 75W AES, 300W peak HF.
- Rated impedance shall be 12 ohms FR/(LF + MF), 12ohms HF.
- Maximum SPL measured at 1 metre on axis shall be 125dB continuous, 131dB peak.
- Dimensions (W) 620mm x (H) 243mm x (D) 400mm (24.4ins x 9.6ins x 15.8ins).
- Weight 29kg (64lbs).

The loudspeaker system shall be the Martin Audio W8LM.

Century Point, Halifax Road, Cressex Business Park,
High Wycombe, Buckinghamshire HP12 3SL, England.
Telephone: +44 (0)1494 535312 Facsimile: +44 (0)1494 438669
E-mail: info@martin-audio.com
All information is Copyright © 2011 Martin Audio Ltd.



www.martin-audio.com

D. Datenblatt Martin Audio W8VDQ

W8VDQ

Compact, three-way, differential directivity system

features

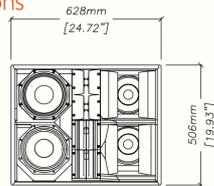
- ▶ Compact, three-way, differential directivity system
- ▶ Hybrid® quad 8" (200mm) LF + MF configuration
- ▶ LF + MF - 102dB @ 2.83V, 1m (single cabinet)
- ▶ Quad 1" (25mm) HF, all horn loaded - 106dB @ 2.83V, 1m
- ▶ Max 131dB continuous, 137dB peak output
- ▶ Consistent 100° long throw, 120° short throw (-6dB) horizontal mid and HF pattern control
- ▶ 30° vertical differential directivity, VDQ
- ▶ Passive or bi-amp operation
- ▶ Optional yoke/spigot mount adaptor
- ▶ Compatible with WMX, WS18X and WS218X sub-woofers

applications

- ▶ Live sound reinforcement
- ▶ Corporate events
- ▶ Theatre sound reinforcement
- ▶ Fixed installations

The Martin Audio W8VDQ combines line array and differential dispersion technologies to provide an advanced solution to the requirement of even coverage over wide angles and throw distances. Short throw horizontal dispersion is 120°, narrowing to 100° as throw increases. The vertical differential directivity, VDQ, creates progressively more HF output as throw distance increases. The resultant dispersion pattern is ideally suited to covering audiences located on flat or gradually sloping surfaces.

overall dimensions



W8VDQ



technical specifications

TYPE	Three-way passive/biamp
FREQUENCY RESPONSE (5)	60Hz-18kHz ± 3dB
DRIVERS	2 x 8" (200mm), 2" (50mm) voice coil, reflex-loaded direct radiators 2 x 8" (200mm), 2" (50mm) voice coil, neodymium magnet, front horn loaded, rear reflex loaded drivers 4 x 1" (25mm) exit HF compression drivers, horn loaded
RATED POWER (2)	LF+MF: 800W AES, 3200W peak HF: 150W AES, 600W peak Passive: 800W AES, 3200W peak
RECOMMENDED AMPLIFIER	iK81/42 / VIA5002/5004
SENSITIVITY (6)	LF+MF: 102dB HF: 106dB Passive: 101dB, rising to 105dB at HF
MAXIMUM SPL (calculated @ 1m)	131dB continuous, 137dB peak
NOMINAL IMPEDANCE	LF+MF: 6 ohms HF: 6 ohms Passive: 6 ohms
DISPERSION (-6dB)	100-120° horizontal, 30° vertical (VDQ)
CROSSOVER	300Hz passive, 2.2kHz active or passive
ENCLOSURE	70 litre, multi-laminate birch ply
FINISH	Textured black paint
PROTECTIVE GRILLE	Black perforated steel
CONNECTORS	2 x Neutrik NL4
PIN CONNECTIONS	LF+MF: 1+, 1- HF: 2+, 2- Passive: 1+, 1-
FITTINGS	9 x M10 inserts Pole mount socket 2 x bar handles
DIMENSIONS	(W) 628mm x (H) 506mm x (D) 369mm (W) 24.7ins x (H) 19.9ins x (D) 14.6ins
WEIGHT	47kg (103.5lbs)

Century Point, Halifax Road, Cressex Business Park,
High Wycombe, Buckinghamshire HP12 3SL, England.
Telephone: +44 (0)1494 535312 Facsimile: +44 (0)1494 438669
E-mail: info@martin-audio.com

All information is Copyright © 2011 Martin Audio Ltd.
Due to Martin Audio's policy of continuing improvement, we reserve the right to alter these specifications without prior notice.



www.martin-audio.com

touring and theatre

E. Astra Technical Rider



Venue Specs 2017

Kreuzberg Musik Produktion GmbH

Office: Cuvrystraße 9, 10997 Berlin
Venue: Revaler Str. 99, 10245 Berlin

www: astra-berlin.de

For: +49 30 - 69 56 68 40
Fax: +49 30 - 69 56 68 42

Sound: sound@astra-berlin.de
Light: light@astra-berlin.de
Venue: info@astra-berlin.de
Booking: booking@astra-berlin.de

PA **Limit 100db (A)**

Front PA

High / Mid:
16 x Martin Audio
W 8 LM / 2 x 8" / 2 x 1" / 100°
(8 flown on each side)

Sub:
8 x Martin Audio S 218
2 x 18" (4 on each side)

Amping:
Crest Pro Serie 8200/9200
3 way aktive 30 kW

Crossover:
1 x XTA DP 448 System Controller

Delayline

2 x Martin Audio W8VDQ

Amping Delayline:
2 x Crest Pro 8200

Crossover Delayline:
1 x XTA DP448

Monitor

Monitor Desk:
DiGiCo SD 8
60 Mono or Stereo Input channels
16 x Monitor Line Outputs
8 x AES IN/OUT
Dual Madi I/O

Wedges:
10 x Martin Audio LE 1500
(1 x 15" / 1 x 1,5")

Drum Sub:
1 x Martin Audio WS18X

Monitor Amping:
5 x Crest CC 4000

Side Fills:
Meyer Sound MSL 3
(2 x 12" / 1 x 2")

Side Fill Amping:
QSC EX Serie
2 way aktive 3,5 kW

FOH

FOH Desk:
DiGiCo SD 8
60 Mono or Stereo Input channels
6 x analogue ISR
8 x AES ISR
Dual Madi I/O

1 x CD Player: CDJ 100s

Stagerack/Multicore:
DiGiCo SD 8 RACK
Stage MADI Rack
2 MADI, Dual
PSU - 48 Mic/Line In

analog multicore FOH to STAGE:
8 x XLR male/female

FoH Position:
rear of house

FoH Distance from stage:
20 m

1 **Sound**

Kreuzberg Musik Produktion GmbH

Office: Cuvrystraße 9, 10997 Berlin
 Venue: Revaler Str. 99, 10245 Berlin

www: astra-berlin.de

Phone: +49 30 - 69 56 68 40
 Fax: +49 30 - 69 56 68 42

Sound: sound@astra-berlin.de
 Light: light@astra-berlin.de
 Venue: info@astra-berlin.de
 Booking: booking@astra-berlin.de

Location plan



F. Anleitung zum Fragebogen

Liebe Fragebogen-Teilnehmende,

im Rahmen meiner Masterarbeit untersuche ich den Effekt des Publikums auf den FOH-Mix, am Beispiel des Astra Kulturhauses in Berlin. Der ursprüngliche Plan sah vor, reale Raum-Impulsantworten bei Konzerten zu messen, einmal beim Soundcheck und einmal während des Konzerts mit anwesendem Publikum, um diese anschließend miteinander zu vergleichen. Da aufgrund der Corona-Einschränkungen Messungen vor Ort nicht mehr möglich waren, habe ich mein Vorhaben in ein Simulationsmodell übertragen, welches die Untersuchung der akustischen Eigenschaften virtuell ermöglicht. Dazu habe ich das Astra Kulturhaus als 3D-Modell nachgebaut, die originale PA inkl. seiner Richtcharakteristik in das Modell eingesetzt und mithilfe des RAVEN-Simulationsprogramms binaurale Impulsantworten generiert. Bitte beachten Sie, dass es hier nicht um eine Bewertung des Mixes geht, der freundlicherweise von Teesy zur Verfügung gestellt wurde, sondern um die Evaluation der räumlichen Simulation und des Publikumseffekts. Ihr Feedback dient außerdem dazu die Simulation in der Zukunft zu verbessern.

Bearbeitungsdauer: ca. 15-20 Minuten

Benötigtes Equipment: Computer mit einer DAW, Kopfhörer

Unter dem folgenden Link (XXXXXXXX) können Sie alle benötigten Dateien als Zip-Archiv herunterladen. Das Archiv enthält neben dieser Anleitung die folgenden Dateien:

- Fragebogen als Excel-Datei

Der Fragebogen besteht aus drei Teilen (Allgemeine Fragen, Hörbeispiel „leer“ und Hörbeispiel „voll“). Diese Teile werden durch eine orange gefärbte Zeile eingeleitet und enthalten organisatorische Infos für die Bearbeitung des Fragebogens sowie in welcher Reihenfolge und zu welchem Zeitpunkt die Hörbeispiele angehört werden sollten. Ihre Antworten geben Sie bitte in die gelb gefärbten Zellen ein. Für Skalen bitte ein „x“ an der jeweiligen Stelle setzen. Sollten Sie eine Frage nicht beantworten können, schreiben Sie bitte in eine der gelben Zellen „keine Angabe“.

Der Fragebogen enthält Gruppierungen, die seitlich über das „+“ ausgeklappt werden müssen. Bitte erst ausklappen, sobald Sie an der entsprechenden Stelle angekommen sind.

- Screenshot des 3D-Modells

Im Screenshot können Sie das Astra Kulturhaus als 3D-Modell sehen. Gut zu erkennen sind die zwei FOH-Positionen FOH-mitte und FOH-hinten. FOH-mitte ist die Position, an welcher die meisten Gast-Produktionen mit eigenem Mischpult im Astra ihren Platz einrichten. FOH-hinten ist der festinstallierte FOH im Astra, welcher sich auf einer 25cm Erhöhung an der Hallenrückwand befindet.

- Ordner mit Hörbeispielen

Bitte die Hörbeispiele erst in Zusammenhang mit dem Fragebogen anhören und **nicht vorher durchhören**. Zur Anpassung der Abhörlautstärke auf den Kopfhörern ist die Datei „Abhörlautstärke-einstellen.wav“ zu verwenden. Bitte lassen Sie anschließend die Abhörlautstärke genau so eingestellt, um die Effekte im Verhältnis hören und bewerten zu können.

Als Workflow empfehle ich, die Hörbeispiele in eine DAW Ihrer Wahl jeweils auf einzelne Spuren zu legen, damit direkte A/B Vergleiche möglich sind. Zuerst bitte die Datei „Abhörlautstärke-einstellen.wav“ auf die erste Spur legen, diese abspielen und die Lautstärke auf dem Kopfhörer so einstellen, dass es sich anhört, als ob die sprechende Person 1 Meter vor Ihnen stehen würde. Anschließend diese Spur stummschalten und den ersten Teil des Fragebogens bearbeiten. Sobald die nächsten Hörbeispiele kommen, diese bitte jeweils auf weitere Einzelspuren legen. Nun können Sie mithilfe der „Solo-in-Place“-Funktion zwischen den Hörbeispielen hin und herspringen.

Mit Rücksendung des Fragebogens willigen Sie in die pseudonymisierte Verarbeitung und Speicherung der Daten im Rahmen meiner Masterarbeit ein. Die Veröffentlichung der Forschungsergebnisse in Publikationen oder auf Tagungen erfolgt ausschließlich in anonymisierter Form so, dass Sie als Person nicht identifizierbar sind.

Wenn Sie alle Fragen beantwortet haben, senden Sie ihren Fragebogen bitte als Excel-Datei an lucas.meyer@web.de zurück.

Bei Fragen können Sie mich gerne unter lucas.meyer@web.de erreichen.

Vielen Dank und nun viel Spaß wünscht Lucas Meyer

G. Fragebogen

Fragebogen zur Masterarbeit von Lucas Meyer

gelbe Felder bitte ausfüllen, bei den Ratings bitte ein "x" als Wertung eintragen

Herzliche Willkommen zum Fragebogen zur Untersuchung des Publikumseffekts auf den FOH-Mix mit Methoden der virtuellen Akustik.

Bitte öffnen Sie nun Ihre DAW und importieren die Datei "Abhörlautstärke-einstellen.wav". Stellen Sie nun ihre Abhörlautstärke auf ihrem Kopfhörer so ein, dass Sie den Sprecher so wahrnehmen, als ob er 1m vor Ihnen stehen würde. Lassen Sie die Abhörlautstärke bitte nun genau so eingestellt und stellen Sie die Spur auf Stumm.

Denken Sie bitte bei den Hörbeispielen daran, dass es nicht um den Mix als solchen geht, sondern wie dieser im Raum erklingt.

1. Allgemeines:
- 1.1 Alter: (Zahl)
 - 1.2 Geschlecht: (m/w/d)
 - 1.3 Kopfhörer: (Typenbezeichnung, bspw. Sennheiser HD25-II 70 Ohm)

2. Erfahrung:
- 2.1 Seit wie vielen Jahren mischen Sie Konzerte? (Anzahl in Jahren)
 - 2.2 Wie viele Shows mischen Sie durchschnittlich im Jahr (vor Corona)? (Anzahl)
 - 2.3 Haben Sie schon einmal an einem Hörversuch teilgenommen? (ja/nein)
 - 2.4 Sind Sie "fester" Mischer in einem Club?
Und falls ja, in welchem? (ja/nein)
 (Text)
 - 2.5 Fahren Sie auf Touren als Mischer? (ja/nein)

3. Astra
- 3.0 Wie vertraut sind Sie mit der Akustik des Astras? gar nicht sehr

Importieren Sie nun die Hörbeispiele des LEEREN (ohne Publikum) Astras in Ihre DAW. Spielen Sie diese nun im Wechsel über die "Solo-in-place" Funktion als direkten A/B-Vergleich ab und fahren mit dann mit der weiteren Bearbeitung fort.
Für eine unabhängige Bewertung der beiden FOH-Positionen steht jeweils ein (m) für FOH-Mitte und ein (h) für FOH-Hinten.

<- hier aufklappen

- 3.1 Unterschied Existiert ein wahrnehmbarer Unterschied zwischen den beiden FOH-Positionen? gar nicht sehr
- 3.2 Wahrnehmung der Raumgröße Hört sich der Raum kleiner oder größer als das "reale" Astra an? (m) kleiner größer (h) kleiner größer
- 3.3 Lautheit Unterscheidet sich die Lautheit entsprechend der Hörpositionen? (m) leiser lauter (h) leiser lauter
- 3.4 Nachhalldauer Dauer des Nachhall-Ausgangsvorgangs. Vor allem am Ende und Pausen hörbar. (m) kürzer länger (h) kürzer länger
- 3.5 Halligkeit (m) schwach ausgeprägt stark ausgeprägt (h) schwach ausgeprägt stark ausgeprägt
- 3.6 Höhen-Tiefen-Balance Klangeindruck, der durch das Verhältnis von Höhen zu Tiefen entsteht. (m) unausgewogen ausgewogen (h) unausgewogen ausgewogen
- 3.7 Hörbarkeit von Artefakten Können Sie Artefakte hören, wenn ja, welche? Rauschen | Knacksen | Piepton | Verzerrung | Sonstiges (m) (h)
- 3.8 Natürlichkeit Eindruck, dass ein Signal der Erwartung/Erfahrung an ein solches Signal entspricht. (m) unnatürlicher natürlicher (h) unnatürlicher natürlicher
- 3.9 Präsenz 'In-der-Szene-Sein' im Sinne räumlicher Präsenz. Eindruck, in einer präsentierten Szene vor Ort / in die Szene räumlich integriert zu sein. (m) geringer höher (h) geringer höher
- 3.10 Gefallen Unterschied bzgl. Angenehmheit/Unangenehmheit (m) gefällt weniger gefällt mehr (h) gefällt weniger gefällt mehr

Importieren Sie nun die Hörbeispiele des VOLLEN (inkl. Publikum) Astras in Ihre DAW. Spielen Sie diese nun über die "Solo-in-place" Funktion im Wechsel ab. Hier macht jedoch besonders der Wechsel zwischen Voll und Leer an der jeweiligen FOH-Position Sinn. Anschließend fahren Sie mit der weiteren Bearbeitung fort. Bitte bewerten Sie die unterschiedlichen FOH-Positionen wie zuvor mit (m) und (h) unabhängig jeweils für das volle Astra.

<- hier aufklappen

4. Publikum						
4.1 Unterschied						
Existiert ein wahrnehmbarer Unterschied zwischen leerem und vollem Astra an der FOH-Position mitte?						
gar nicht					sehr	
Existiert ein wahrnehmbarer Unterschied zwischen leerem und vollem Astra an der FOH-Position hinten?						
gar nicht					sehr	
Existiert ein wahrnehmbarer Unterschied zwischen den beiden FOH-Positionen im vollen Zustand?						
gar nicht					sehr	
4.2 Wahrnehmung der Raumgröße	(m) kleiner				größer	
Hört sich der Raum kleiner oder größer (als das "reale" Astra) an?						
(h) kleiner					größer	
4.3 Lautheit	(m) leiser				lauter	
Unterscheidet sich die Lautheit entsprechend der Hörpositionen?						
(h) leiser					lauter	
4.4 Nachhalldauer	(m) kürzer				länger	
Dauer des Nachhall-Ausklangvorgangs. Vor allem am Ende und Pausen hörbar.						
(h) kürzer					länger	
4.5 Halligkeit	(m) schwach ausgeprägt				stark ausgeprägt	
Halligkeit						
(h) schwach ausgeprägt					stark ausgeprägt	
4.6 Höhen-Tiefen-Balance	(m) unausgewogen				ausgewogen	
Klangeindruck, der durch das Verhältnis von Höhen zu Tiefen entsteht.						
(h) unausgewogen					ausgewogen	
4.7 Hörbarkeit von Artefakten		Rauschen	Knacksen	Piepton	Verzerrung	Sonstiges
Können Sie Artefakte hören? Wenn ja, welche?						
(m)						
(h)						
4.8 Natürlichkeit	(m) unnatürlicher				natürlicher	
Eindruck, dass ein Signal der Erwartung/Erfahrung an ein solches Signal entspricht.						
(h) unnatürlicher					natürlicher	
4.9 Präsenz	(m) geringer				höher	
'In-der-Szene-Sein' im Sinne räumlicher Präsenz. Eindruck, in einer präsentierten Szene vor Ort / in die Szene räumlich integriert zu sein.						
(h) geringer					höher	
4.10 Gefallen	(m) gefällt weniger				gefällt mehr	
Unterschied bzgl. Angenehmheit/Unangenehmheit						
(h) gefällt weniger					gefällt mehr	
5. Simulation vs. Realität						
5.1 Deckt sich der Publikumseffekt mit Ihren Erfahrungen aus anderen Clubs?	gar nicht				sehr	
5.2 Wie unterscheidet sich der simulierte Effekt zu Ihren Erinnerungen aus dem realen Konzertalltag?					(Textfeld)	
5.3 Was fehlt, damit die Simulation des Raumes realistischer wird?					(Textfeld)	
5.4 Was fehlt, damit die Simulation des Publikums besser wird?					(Textfeld)	
5.5 Könnten Sie sich vorstellen, eine Publikums-Simulation für die Vorbereitung einer Show mit Multitracks zu nutzen, und falls ja inwieweit?					(ja/nein) (Textfeld)	
5.6 Weitere Kommentare und/oder Anregungen					(Textfeld)	

Herzlichen Dank! Bitte schicken Sie den ausgefüllten Fragebogen als Excel bis zum 5.2.2021 per Mail an lucas.meyer@web.de zurück.

H. Fragebogen: Kopfhörer der Teilnehmenden

Teilnehmenden-Nr.	Kopfhörertyp
1	Sony MDR-7506
2	Audio Technica ATH M50x
3	HD 25 II 70
4	Sennheiser HD650
5	Stax SR-Lambda an SRM-Monitor, diffusfeldentzerrt
6	Beyerdynamic DT-990 Pro 250 Ohm
7	Sennheiser HD800 300 Ohm
8	Shure SRH940
9	Sennheiser HD 25 70Ohm
10	Sennheiser HD25-II 70 Ohm
11	Samsung AKG EO-IG955
12	Sennheiser HD 25-1 / 70 Ohm

I. Fragebogen: Ergebnisse der detaillierten Bewertung der Hörbeispiele

Raumgröße		N	k.A	Min	Max	Modus	Mittelwert	SD
Mitte	leer	11	1	2	4	3	3,18	0,75
	voll	11	1	1	4	3	2,73	0,9
Hinten	leer	10	2	2	3	3	2,5	0,53
	voll	11	1	1	4	1	2,18	1,08

Lautheit		N	k.A	Min	Max	Modus	Mittelwert	SD
Mitte	leer	10	2	2	4	4	3,3	0,82
	voll	12	0	2	4	4	3,25	0,75
Hinten	leer	10	2	2	3	3	2,7	0,48
	voll	12	0	1	3	2	2	0,43

Nachhalldauer		N	k.A	Min	Max	Modus	Mittelwert	SD
Mitte	leer	12	0	2	4	3	3,08	0,79
	voll	11	1	1	4	4	2,64	1,12
Hinten	leer	12	0	2	4	2	2,58	0,67
	voll	11	1	1	4	2	2,18	0,98

Halligkeit		N	k.A	Min	Max	Modus	Mittelwert	SD
Mitte	leer	12	0	2	5	3	3,33	0,78
	voll	12	0	1	4	2	2,33	0,89
Hinten	leer	12	0	2	4	2	2,83	0,83
	voll	12	0	1	3	1	1,75	0,75

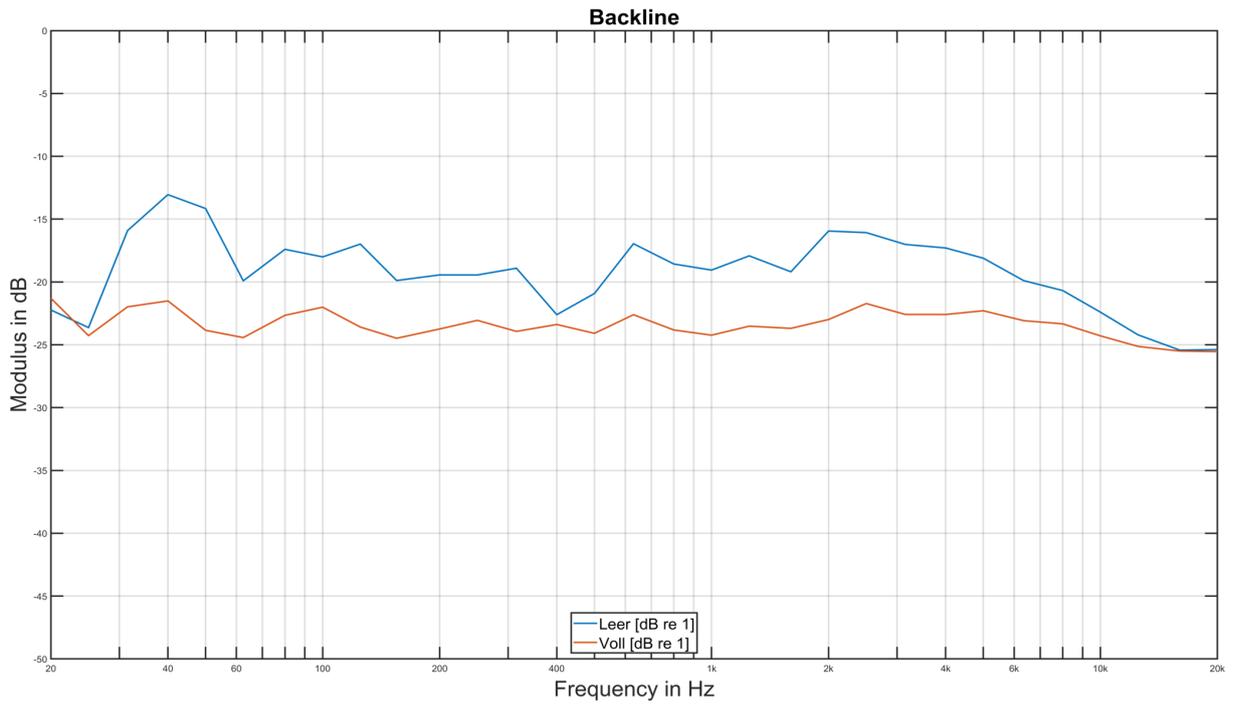
Höhen-Tiefen-Balance		N	k.A	Min	Max	Modus	Mittelwert	SD
Mitte	leer	11	1	1	4	4	2,64	1,12
	voll	11	1	1	4	3	2,91	0,94
Hinten	leer	11	1	1	4	3	2,73	0,9
	voll	11	1	1	5	2	2,64	1,12

Natürlichkeit		N	k.A	Min	Max	Modus	Mittelwert	SD
Mitte	leer	12	0	2	4	2	2,83	0,94
	voll	12	0	2	4	4	3,17	0,83
Hinten	leer	11	1	2	4	2	3	0,89
	voll	12	0	1	4	3	2,67	0,89

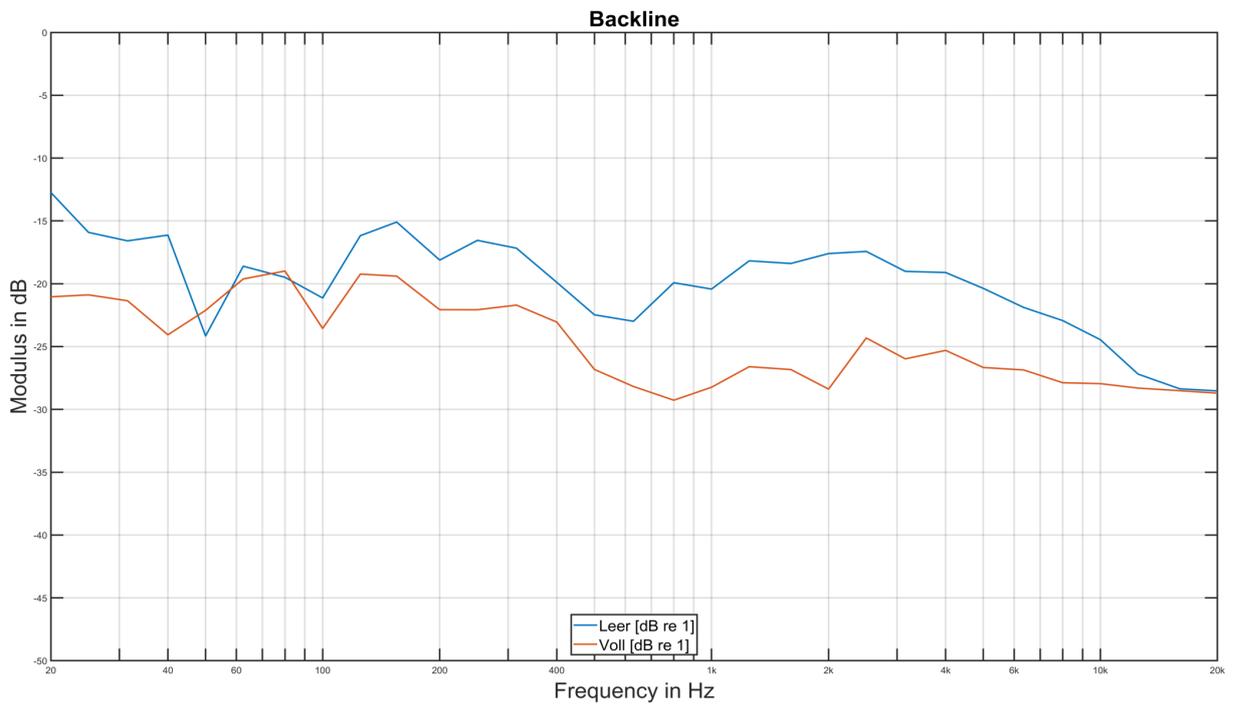
Präsenz		N	k.A	Min	Max	Modus	Mittelwert	SD
Mitte	leer	12	0	2	5	4	3,25	1,06
	voll	12	0	2	4	4	3,33	0,98
Hinten	leer	12	0	1	4	2	2,83	1,11
	voll	12	0	2	4	2	2,83	0,94

Gefallen		N	k.A	Min	Max	Modus	Mittelwert	SD
Mitte	<i>leer</i>	12	0	1	5	2	2,58	1,16
	<i>voll</i>	12	0	2	4	4	3,25	0,97
Hinten	<i>leer</i>	12	0	1	5	4	3,33	1,15
	<i>voll</i>	12	0	1	4	2	2,67	0,98

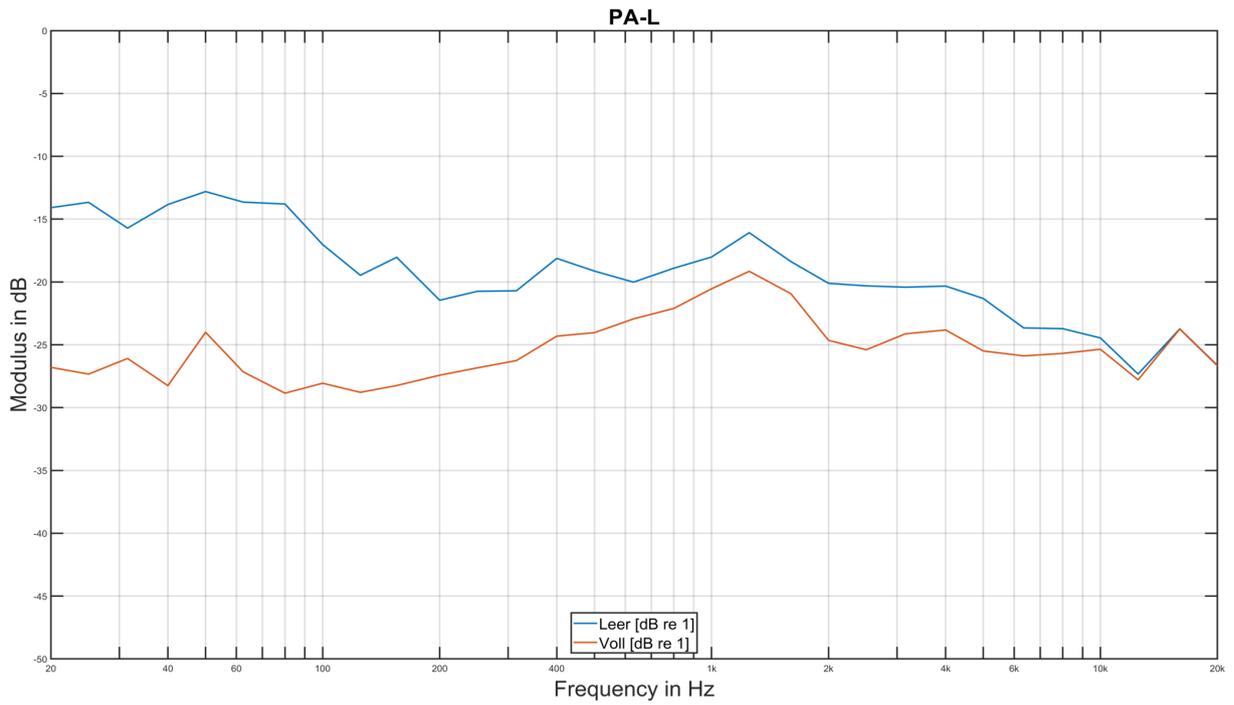
J. Spektrum: Backline-Quelle, FOH-Position Mitte



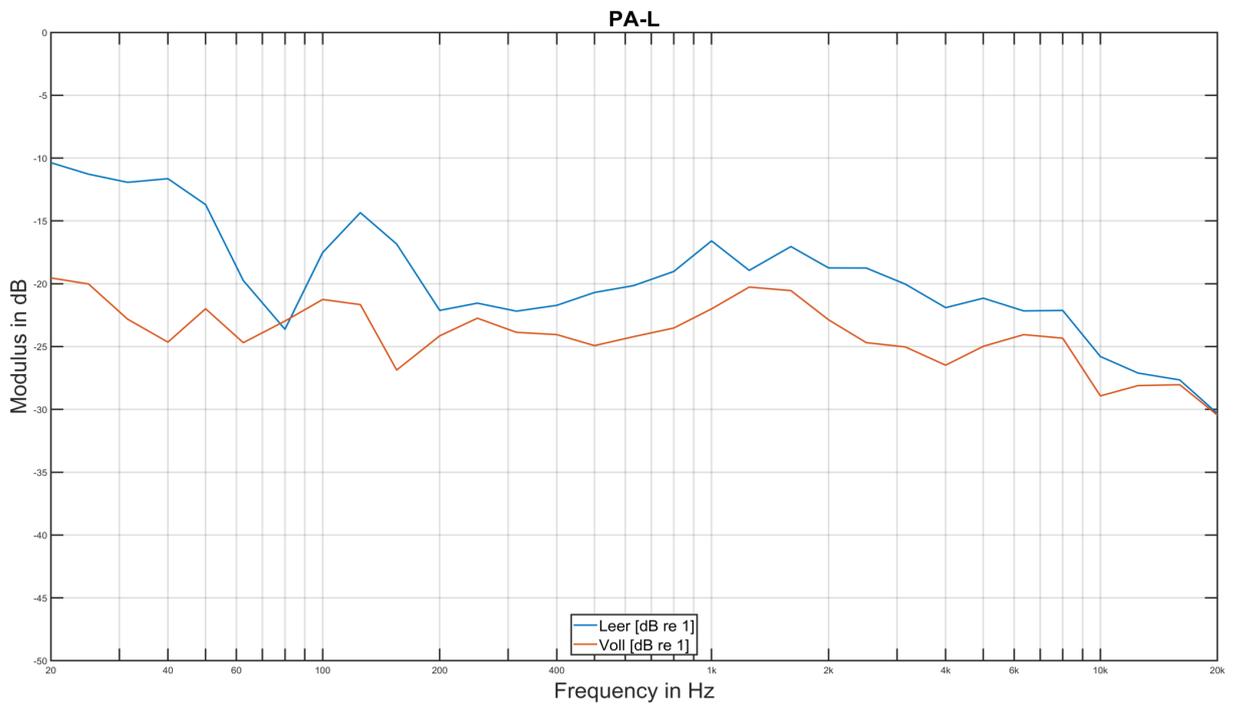
K. Spektrum: Backline-Quelle, FOH-Position Hinten



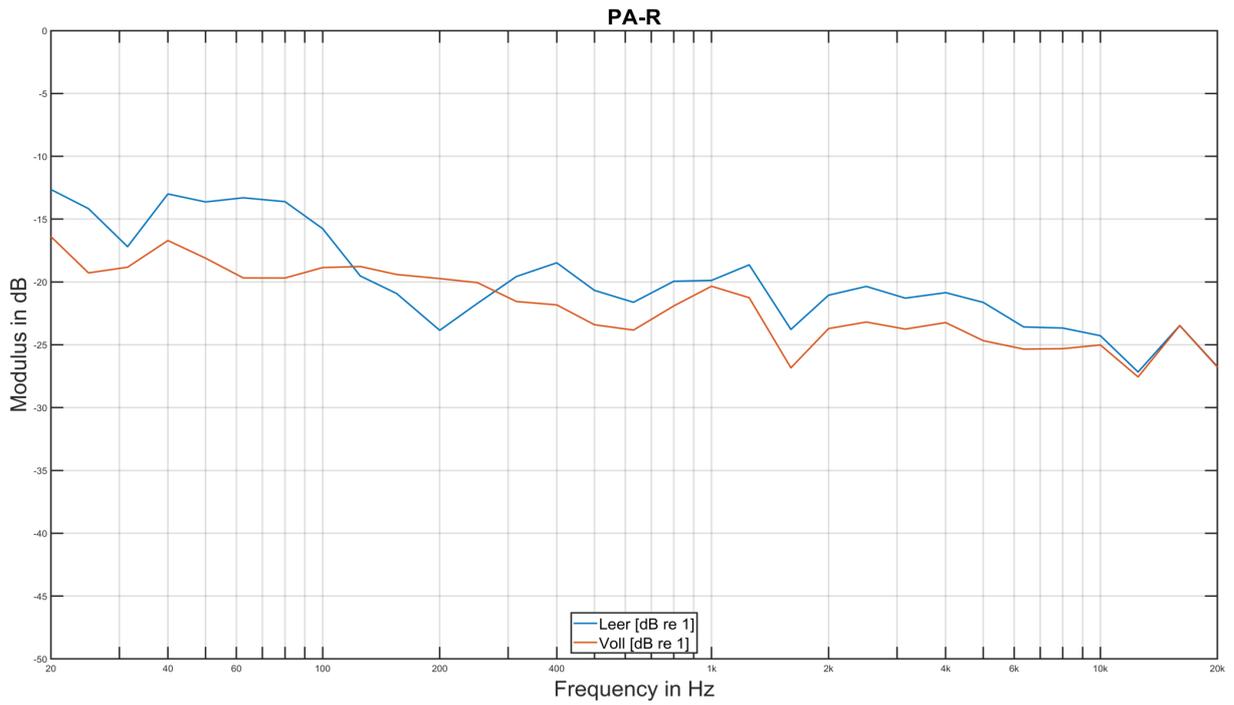
L. Spektrum: PA-Links, FOH-Position Mitte



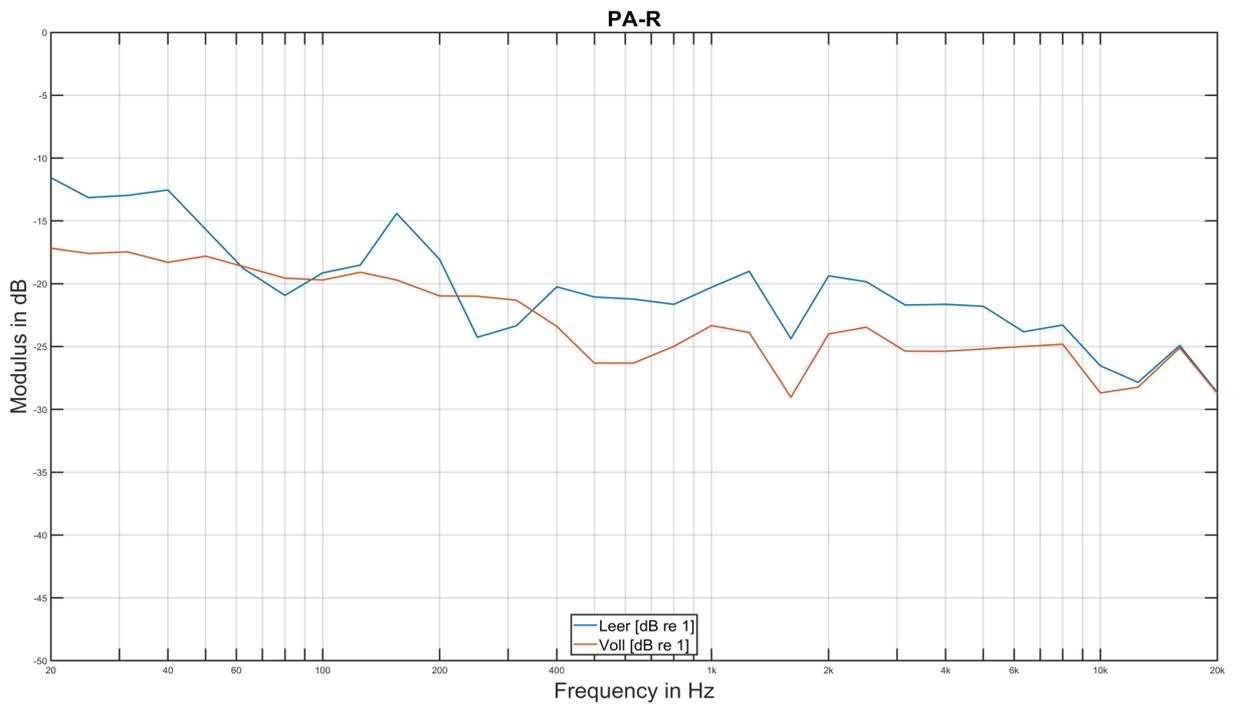
M. Spektrum: PA-Links, FOH-Position Hinten



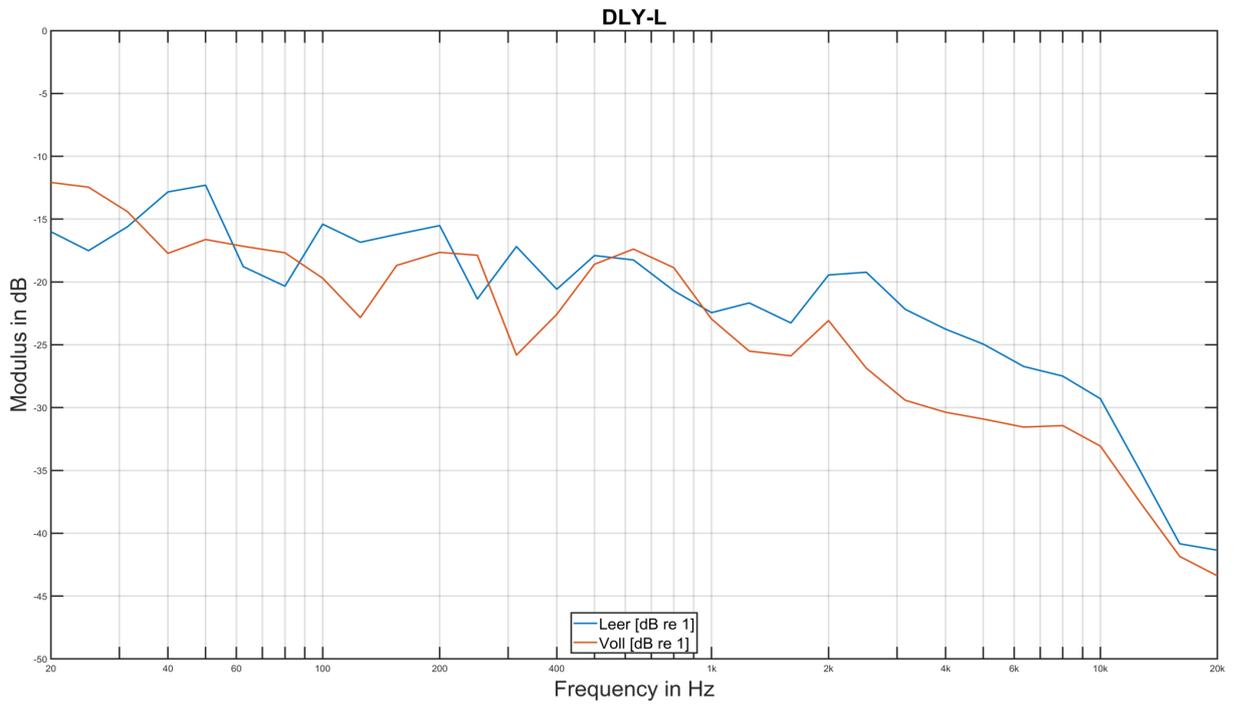
N. Spektrum: PA-Rechts, FOH-Position Mitte



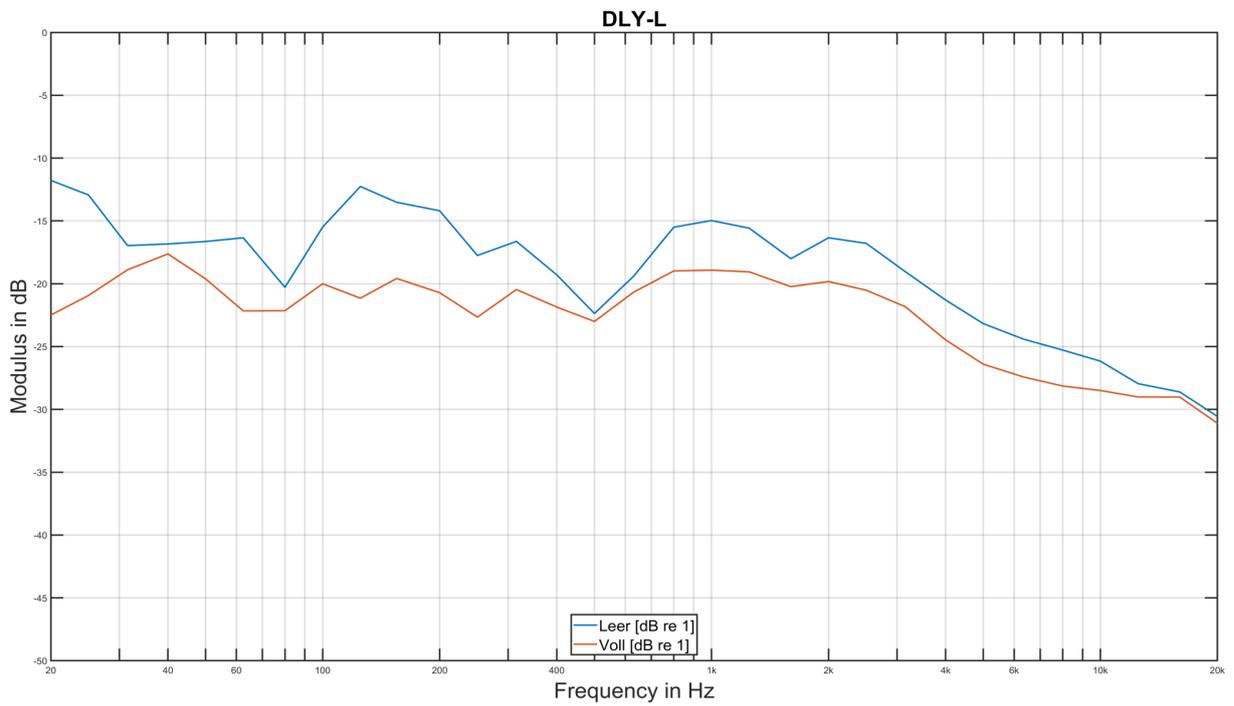
O. Spektrum: PA-Rechts, FOH-Position Hinten



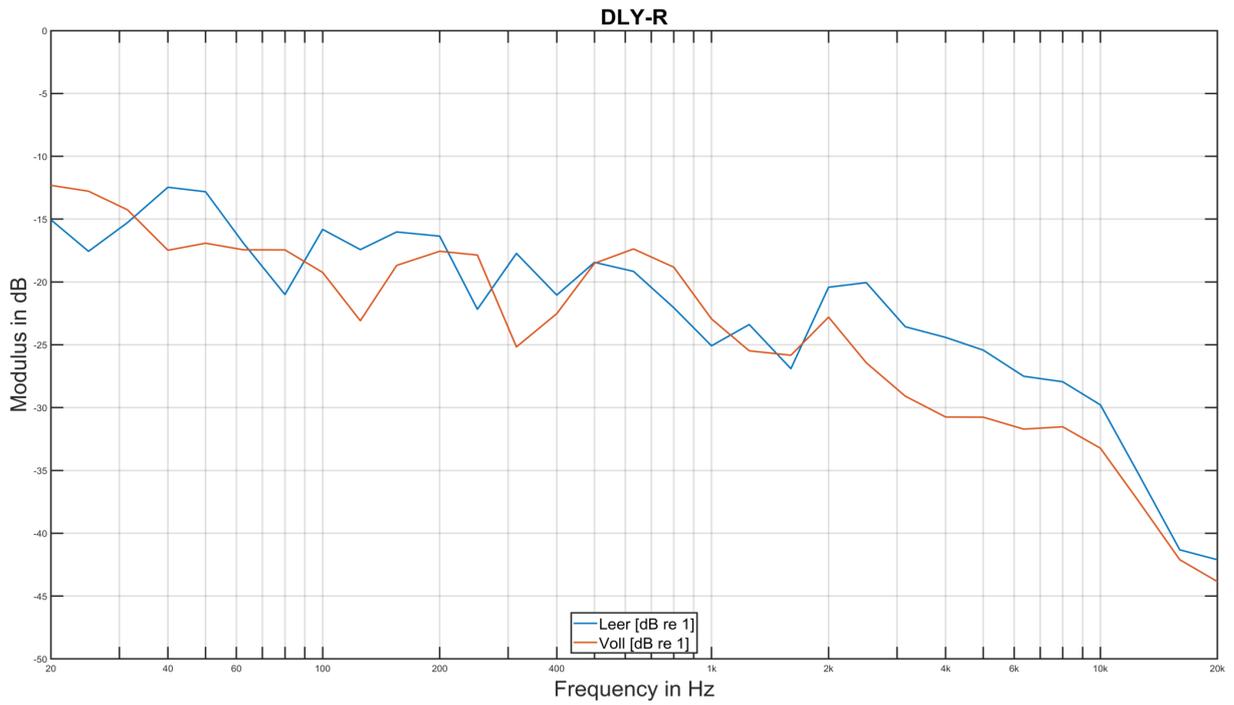
P. Spektrum: Delay-Links, FOH-Position Mitte



Q. Spektrum: Delay-Links, FOH-Position Hinten



R. Spektrum: Delay-Rechts, FOH-Position Mitte



S. Spektrum: Delay-Rechts, FOH-Position Hinten

