



Bachelorarbeit

im Studiengang Audiovisuelle Medien

mit dem Titel

Vergleich von Beschallungsmöglichkeiten für geschlossene Räume verschiedener Dimensionen

vorgelegt von

Nina Schaffer

Matrikel-Nr. 37417

an der Hochschule der Medien Stuttgart am 27.06.2022

zur Erlangung des akademischen Grades eines Bachelor of Engineering (B. Eng.)

Erst-Prüfer: Prof. Oliver Curdt

Zweit-Prüfer: Prof. Dr. Frank Melchior

Ehrenwörtliche Erklärung

„Hiermit versichere ich, Nina Schaffer, ehrenwörtlich, dass ich die vorliegende Bachelorarbeit mit dem Titel: „Vergleich von Beschaffungsmöglichkeiten für geschlossene Räume verschiedener Dimensionen“ selbstständig und ohne fremde Hilfe verfasst und keine anderen als die angegebenen Hilfsmittel benutzt habe. Die Stellen der Arbeit, die dem Wortlaut oder dem Sinn nach anderen Werken entnommen wurden, sind in jedem Fall unter Angabe der Quelle kenntlich gemacht. Die Arbeit ist noch nicht veröffentlicht oder in anderer Form als Prüfungsleistung vorgelegt worden.

Ich habe die Bedeutung der ehrenwörtlichen Versicherung und die prüfungsrechtlichen Folgen (§26 Abs. 2 Bachelor-SPO (6 Semester), § 24 Abs. 2 Bachelor-SPO (7 Semester), § 23 Abs. 2 Master-SPO (3 Semester) bzw. § 19 Abs. 2 Master-SPO (4 Semester und berufsbegleitend) der HdM) einer unrichtigen oder unvollständigen ehrenwörtlichen Versicherung zur Kenntnis genommen.“

Ort, Datum

Unterschrift

Kurzfassung

In der vorliegenden Arbeit wird ein Vergleich von Beschallungsmöglichkeiten in geschlossenen Räumen unterschiedlicher Größe angestellt. Um ein Verständnis für die verschiedenen Konzepte und deren Einflussfaktoren zu entwickeln, werden zu Beginn akustische Grundlagen erläutert. Der Fokus liegt dabei auf zentral (gestützten) Beschallungen, die durch P.A.-Anlagen realisiert werden. Anhand einer Simulation wird die Wichtigkeit der Lautsprecherwahl und -anordnung dreier Frontalbeschallungen aufgezeigt.

Ziel dieser Arbeit ist es, die unterschiedlichen Anforderungen für Beschallungen abhängig von der Raumakustik sowie der Raumgröße herauszuarbeiten.

Abstract

This thesis deals with a comparison of sound systems in enclosed rooms of different sizes. In order to develop an understanding of the different concepts and their influencing factors, acoustic basics are explained at the beginning. The focus is on centralized (supported) sound systems, which are realized by P.A. systems. Using a simulation, the importance of the choice and arrangement of three frontal sound systems is demonstrated.

The aim of this work is to show the different requirements for sound systems depending on room acoustics and room size.

Inhaltsverzeichnis

EHRENWÖRTLICHE ERKLÄRUNG	II
KURZFASSUNG	III
ABSTRACT	III
INHALTSVERZEICHNIS	IV
ABBILDUNGSVERZEICHNIS	VI
ABKÜRZUNGSVERZEICHNIS	VIII
GENDERHINWEIS	VIII
1. EINLEITUNG	1
2. AKUSTISCHE GRUNDLAGEN	2
2.1 SCHALLFELD	2
2.2 NAHFELD & FERNFELD	3
2.3 AKUSTISCHE KOPPLUNG	4
3. MENSCHLICHE WAHRNEHMUNG	5
3.1 FREQUENZABHÄNGIGKEIT DES GEHÖRS	5
3.2 RÄUMLICHES HÖREN	6
3.2.1 Eine Schallquelle	6
3.2.2 Mehrere Schallquellen	7
4. RAUMAKUSTIK	8
4.1 ZEITLICHER AUFBAU DES SCHALLFELDS	8
4.2 REFLEXION & ABSORPTION	9
4.3 NACHHALL & HALLRADIUS	10
4.4 DEUTLICHKEITSMAB UND KLARHEITSMAB	11
4.5 ABSORPTIONSGRAD PUBLIKUM	11
5. PROBLEMFAKTOREN FÜR DIE BESCHALLUNG	12
5.1 PHASENVERSCHIEBUNG	12
5.2 KAMMFILTER	13
5.3 STEHENDE WELLEN & RAUMRESONANZEN	14
5.4 FOKUSSIERUNG	15
5.5 ECHOS	16
5.6 RÜCKKOPPLUNG	16

6. BESCHALLUNG	17
6.1 ANFORDERUNGEN UND ZIELE EINER BESCHALLUNGSANLAGE.....	18
6.2 KOMPONENTENÜBERSICHT	19
6.3 LAUTSPRECHER.....	21
6.3.1 Linienzeile.....	21
6.3.2 Line Arrays.....	22
6.3.3 Subwoofer.....	23
6.4 AUFBAUKONZEPTE.....	24
6.4.1 Zentrale Beschallung	25
6.4.2 Zentrale gestützte Beschallung	26
6.4.3 Dezentrale Beschallung.....	27
6.5 LAUTSPRECHERPOSITIONEN BEI FRONTALBESCHALLUNG	28
6.5.1 Horizontale Position & vertikale Position.....	28
6.5.2 Delay-Line & Fills.....	29
6.5.3 Positionierung Subwoofer	31
6.6 BESCHALLUNGSSYSTEME	32
6.6.1 Klein-P.A.s.....	32
6.6.2 Groß-P.A.s.....	33
6.6.3 100 V-Technik.....	34
7. SIMULATION	35
7.1 VERWENDETE SOFTWARE.....	36
7.2 VERSUCHSAUFBAU	37
7.2.1 Raum 1: Café, Lokal, Proberaum.....	37
7.2.2 Raum 2: Kleine Konzerthalle	41
7.2.3 Raum 3: Mehrzweckarena	46
7.3 EVALUATION.....	53
8. FAZIT	54
LITERATURVERZEICHNIS	VIII
INTERNETQUELLEN	X
ANHANG.....	XI

Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1: Vergleich einer Kugelwelle, ebenen Welle und Zylinderwelle	3
Abbildung 2: Kurven gleicher Lautheit.....	5
Abbildung 3: Kopfbezogenes Koordinatensystem.....	6
Abbildung 4: Zeitlicher Aufbau des Schallfelds	9
Abbildung 5: Formel zur Nachhallzeitberechnung.....	10
Abbildung 6: Linearer Frequenzgang (links), Kammfilterstruktur (rechts)	14
Abbildung 7: Fokussierung an einer gewölbten Oberfläche	16
Abbildung 8: Aufbau eines Line Arrays ohne und mit Curving	23
Abbildung 9: Zentrale Beschallung mit einem mittigen Centercluster	26
Abbildung 10: Formel zur Berechnung der Laufzeitanpassung.....	27
Abbildung 11: Möglicher Aufbau einer dezentralen Beschallung	28
Abbildung 12: Lautsprecheranordnung in der horizontalen und vertikalen Ebene	29
Abbildung 13: Positionen von Fülllautsprechern und der Delay-Line	30
Abbildung 14: Raummodell Café/Lokal/Proberaum	38
Abbildung 15: Schallpegelverteilung der Top-Lautsprecher.....	39
Abbildung 16: Schallpegelverteilung mit zwei zusätzlichen Subwoofern und gefilterten Top-Lautsprechern	39
Abbildung 17: Laufzeitanpassung - Verzögerung der Subwoofer auf das Hauptsystem (rechts)	40
Abbildung 18: Schallverteilung der Top-Lautsprecher und Subwoofer neben der Bühne	40
Abbildung 19: Lautsprecher mit kleineren Treibern und 90x50 Abstrahlcharakteristik (ohne Subwoofer).....	41
Abbildung 20: Raummodell kleine Konzerthalle	42
Abbildung 21: Aufbau der Line-Array-Hauptbeschallung	42
Abbildung 22: Schallpegelverteilung der Frontfills (links) und Centerlautsprecher (rechts)	43
Abbildung 23: Abstrahlung der Subwoofer bei 50 Hz am Boden (links) und im Line Array (rechts) mit jeweils vier Subwoofern	44
Abbildung 24: Array-Processing der Line Arrays.....	45
Abbildung 25: Angepasste Verzögerungszeiten der einzelnen Systeme	46
Abbildung 26: Mögliche Beschallung mit zwei geflogenen Subwoofern.....	46
Abbildung 27: Raummodell Mehrzweckarena	47
Abbildung 28: Schallpegelverteilung der Line Arrays, der Hauptbeschallungsanlage	48
Abbildung 29: Abstrahlbereiche der Frontfills (links) und Outfills (rechts).....	48

Abbildung 30: Vergleich zehn Subwoofer auf dem Boden (links) und als Sub-Arrays mit sechs Elementen (rechts).....	50
Abbildung 31: Schallpegelverteilung der Delay-Line alleine (links) und mit den Fullrange-Systemen (rechts) (ohne Subwoofer)	51
Abbildung 32: Angepasste Laufzeitverzögerung der bodennahen Subwoofer.....	51
Abbildung 33: Beschallungsentwurf der Mehrzweckarena mit geflogenen Sub-Arrays	52

Abkürzungsverzeichnis

C50	Deutlichkeitsmaß
C80	Klarheitsmaß
CAD	Computer-Aided-Design-Dateien
DSP	Digitaler Signalprozessor
ELA	Elektroakustische Anlage
FoH	Front of House
L/R	Links/Rechts
P.A.	Public Address
U-Musik	Unterhaltungsmusik

Genderhinweis

In dieser Arbeit wird aus Gründen der besseren Lesbarkeit das generische Maskulinum verwendet. Es sind dabei alle Geschlechteridentitäten ausdrücklich stets eingeschlossen.

1. Einleitung

Nur wenige Menschen nehmen sie bewusst wahr, doch ohne sie ist es ziemlich still: Beschallungsanlagen. Egal, ob bei Konzerten, Festivals, Poetry Slams oder auch ganz alltäglich an Bahnhöfen, Flughäfen und in Konferenzsälen – Beschallungsanlagen werden vielseitig eingesetzt.

Sie sind nötig, um Menschen über eine weite Fläche oder über mehrere Räume mit derselben Schallinformation zu versorgen sowie um leise Schallquellen zu verstärken (Wirsum, 1991). Je nach dem welche Beschallungsanlage verwendet wird, unterscheidet sie sich in ihrer Form und technischer Umsetzung. Die Technik hat sich über die Jahre stets weiterentwickelt, sodass es für jeden Anwendungszweck passende Systeme gibt, zum Beispiel ELA-Anlagen bei Festinstallationen und (mobile) P.A.-Anlagen bei Veranstaltungen (Pieper, 2011).

Ziel einer jeden Beschallung ist die gleichmäßige Schall- und Klangverteilung in einer dafür vorgesehenen Räumlichkeit. Im Mittelpunkt steht das Publikum, das an jedem Hörerplatz ein möglichst gutes und gleiches Klangerlebnis erfahren soll. Jede Beschallung wird auf die raumakustischen Begebenheiten und die gewünschte Nutzung angepasst. Sie muss im Voraus für eine effiziente Installation geplant werden (Schullan, Zuleeg, & Hoeg, 2014).

In dieser Arbeit werden lediglich Beschallungen in Innenräumen betrachtet. Open-Air-Beschallungen unterliegen anderen Einflüssen und werden gezielt darauf angepasst. Der Fokus liegt auf den zentralen Frontalbeschallungen, dezentrale Systeme werden zur Vollständigkeit erklärt. Die Ausführungen und Varianten von zu beschallenden Innenräumen sind vielseitig. Sie reichen von akustisch aufbereiteten Konzertsälen über große Mehrzweckarenen bis zu kleinen ausgebauten Räumen, die für Beschallungen genutzt werden. Die beiden zuletzt genannten Räumlichkeiten werden schwerpunktmäßig in der vorliegenden Arbeit behandelt.

Um die Unterschiede zwischen Beschallungssituationen aufzuzeigen, werden im zweiten Kapitel akustische Grundlagen, wie die Ausbreitungsformen von Schallfeldern und die akustische Kopplung, erklärt. Daraufhin folgt eine kurze Einordnung der menschlichen Frequenzwahrnehmung sowie des räumlichen Hörens in Bezug auf die Schallquellen. In Kapitel vier werden zentrale Aspekte der Raumakustik vorgestellt, Kapitel fünf schließt mit möglichen Problemfaktoren bei Beschallungen an. Folgend werden im sechsten Kapitel die Anforderungen und Ziele einer Beschallung definiert und auf deren Komponenten, besonders auf die verwendeten Lautsprecher, eingegangen. Weiterhin werden in diesem Kapitel Aufbaukonzepte dargelegt, anschließend Lautsprecheranordnungen erklärt sowie drei Beschallungssysteme vorgestellt. In der nachfolgenden Simulation, in Kapitel sieben, werden Beschallungssituationen anhand des zuvor beschriebenen umgesetzt und visuell dargestellt. Ein zusammenfassendes Fazit schließt die Arbeit ab.

2. Akustische Grundlagen

Um die in der Arbeit beschriebenen Sachverhalte und Zusammenhänge zu verstehen, werden ausgewählte akustische Grundlagen in diesem Kapitel vorgestellt. Zuerst werden verschiedene Formen von Schallfeldern aufgezeigt, gefolgt von einer kurzen Darlegung des Nah- und Fernfelds sowie der akustischen Kopplung.

2.1 Schallfeld

Prinzipiell entsteht ein Schallfeld durch Anregung der Luft mittels einer Schallquelle, bei der die Luftteilchen zum Schwingen gebracht werden (Weinzierl, 2008a). Je nach Verwendung und Positionierung der Schallstrahler können verschiedene Schallfelder entstehen. In der Realität sind dies nie ideale Schallfelder, sondern Annäherungen an zwei geläufige Modelle: Ist die Wellenlänge im Verhältnis zum Lautsprecher klein, wird eine ebene Welle abgestrahlt, ist sie groß gegenüber den Abmessungen des Strahlers entsteht eine Kugelwelle. Zusätzlich wird noch die Zylinderwelle unterschieden. Diese stellt einen Spezialfall dar und ist elementarer Bestandteil für Beschallungen (Görne, 2015).

Kugelwelle

Bei einer Kugelwelle breitet sich der Schall ungerichtet in alle Richtungen aus. Zur Veranschaulichung dazu dienen konzentrische Kugelschalen, wobei auf einer Schale jeweils die „Punkte gleicher Phasen“ liegen (Dickreiter, 2014a, S. 12). Schalldruck und Schallschnelle sind im Nahfeld phasenverschoben. Dies ändert sich im Fernfeld, da dort die Krümmung der Kugelwelle vernachlässigbar wird und sie sich der ebenen Welle angleicht (Weinzierl, 2008a). Mit zunehmender Entfernung vom Ursprung der Schallquelle werden die Kugelschalen und damit die mit Schallenergie zu versorgende Fläche größer. Bei einer Kugelwelle nimmt der Schalldruckpegel laut Abstandsgesetz um 6 Dezibel (dB) pro Entfernungsverdopplung ab. Damit nimmt auch die Schallintensität ab, da sie proportional zum Quadrat des Schalldrucks ist (Görne, 2015). Ein gängiges Modell zur Erzeugung einer Kugelwelle ist die atmende Kugel. In der Praxis sind dies Volumenquellen und findet bei Lautsprechern vor allem im Bereich der tiefen Frequenzen statt, da der Schall aufgrund der kleinen Lautsprecherabmessungen im Verhältnis zur Wellenlänge um das Gehäuse gebeugt wird (Weinzierl, 2008a).

Ebene Welle

Bei einer idealisierten ebenen Welle hingegen ist die Schallabstrahlung stark gerichtet. Der Schall strahlt eindimensional in dessen Ausbreitungsrichtung ab, wobei Schalldruck und Schallschnelle stets phasengleich sind (Weinzierl, 2008a). Die Schallintensität einer ebenen Welle ist in der Theorie unabhängig von der Entfernung zur Schallquelle und kann durch eine unendlich ausgedehnte Schallwand realisiert werden (Görne, 2015). In der Praxis treten ebene

Wellen näherungsweise entweder in direkter Nähe von großen Schallquellen oder in deren weiter Entfernung auf, da mit wachsendem Abstand die Krümmung der Kugelwelle zunehmend eben wird (Weinzierl, 2008a).

Zylinderwelle

Eine Zylinderwelle besitzt eine zweidimensionale Schallausbreitung und strahlt ebene Wellen senkrecht zur Achse des Strahlers in Form eines Zylinders ab (Friehecke, 2014). Diese Art der Wellenausbreitung können in Schallzeilen und Line Arrays realisiert werden. Dabei bestimmen die Länge des Arrays sowie die höchste abstrahlende Frequenz des Signals die Grenzfrequenz bis zu welcher zylinderförmig abgestrahlt wird. Danach erfolgt ein Übergang zur Kugelwelle (Grzesinski, 2020).

Eine wesentliche Eigenschaft von Zylinderwellen ist, dass sich die Schalleistung bei der Entfernungsverdopplung zur Schallquelle aufgrund ihrer Geometrie nicht auf die vierfache Fläche wie bei Kugelstrahlern, sondern nur auf die doppelte Fläche verteilt. Dadurch sinkt der Schalldruckpegel lediglich um 3 dB pro Entfernungsverdopplung ab. Dieses Merkmal hat sich vor allem in Beschallungssystemen durchgesetzt, da mit Zylinderstrahlern die Reichweite bei gleich lauter Beschallung deutlich erhöht wird (Schullan et al., 2014). Ein Vergleich der drei Schallausbreitungsformen wird in Abbildung (Abb.) 1 dargestellt.

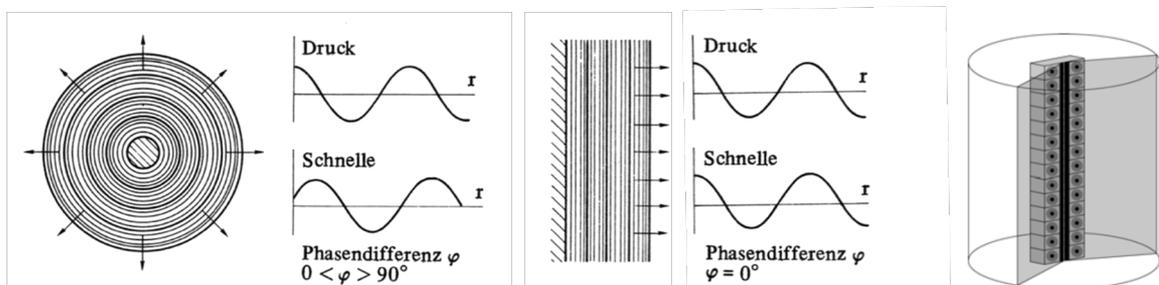


Abbildung 1: Vergleich einer Kugelwelle, ebenen Welle und Zylinderwelle

(Dickreiter, 2014a, S.13; Schullan et al., 2014, S.596)

2.2 Nahfeld & Fernfeld

Bei der Beschreibung von Schallfeldern ist es wichtig, zwischen Nah- und Fernfeld einer Quelle zu differenzieren. Manche Größen, wie beispielsweise die Richtcharakteristik von Lautsprechern lassen sich nur durch das Fernfeld definieren, während andere wie beispielsweise der Nahbesprechungseffekt durch das Nahfeld bestimmt werden (Weinzierl, 2008a).

Der Übergang zwischen Nah- und Fernfeld ist nicht eindeutig definiert, da sich dieser je nach Anwendung unterscheiden kann. Es gibt drei Kriterien, die dabei helfen, die Grenze des Nahfelds zum Fernfeld objektiv und reproduktiv zu erfassen (Weinzierl, 2008a):

1. „Das erste Kriterium beruht auf der Annahme, dass alle Teilbereiche eines ausgedehnten Strahlers, etwa einer Lautsprechermembran oder eines Lautsprecherarrays, zum Betrachter die gleiche entfernungsbedingte Amplitudenabnahme aufweisen. [...]
2. Das zweite Kriterium beruht auf der Annahme, dass sich die Phasenunterschiede, mit denen sich die Beiträge verschiedener Bereiche des Strahlers beim Betrachter überlagern, als Funktion des Winkels beschreiben lassen, unter dem sich der Betrachter vom Mittelpunkt des Strahlers aus gesehen befindet. [...]
3. Das dritte Kriterium beruht auf der Forderung, dass im Fernfeld die Phasenunterschiede zwischen Schalldruck und Schallschnelle vernachlässigbar sind.“
(Weinzierl, 2008a, S. 36-37)

Eine einfachere Anschauung von Görne (2015) besagt, dass sich der Übergang durch die Wellenlänge beschreiben lässt: „Bei einer Entfernung von weniger als einer Wellenlänge zur Schallquelle ($r < \lambda$) spricht man vom Nahfeld, bei größeren Entfernungen ($r \geq \lambda$) vom Fernfeld“ (S. 38).

2.3 Akustische Kopplung

Bei Beschallungen werden meist aufgrund der großen Zuhörerzahl mehrere Lautsprecher benötigt. Werden mehrere Strahler neben- oder übereinander positioniert, entstehen abhängig von der Frequenz und der Lautsprecherabstände Interferenzen zwischen den überlappenden Abstrahlbereichen der Lautsprecher (Grzesinski, 2020). Das Klangerlebnis des Zuhörers wird dadurch enorm beeinträchtigt, weswegen dieses Problem mit der akustischen Kopplung umgangen wird (Grzesinski, 2020). Bei dieser werden die Membranen mehrerer Lautsprecher, die zu einem Array verbaut sind, zu einer großen zusammenhängenden Membran miteinander verbunden. Dadurch bleibt ein besseres Impulsverhalten bestehen, als bei einer einzigen Membran, ebenso wie eine komplexe Richtcharakteristik (Frießecke, 2014). Die Kopplung funktioniert nur zwischen der unteren und oberen Grenzfrequenz des Line Arrays. Das bedeutet, der Abstand der einzelnen Membranen - von deren Mittelpunkt gemessen aus - darf nicht größer sein, als die abzustrahlende Wellenlänge. Während bei tieferen Frequenzen die Kopplung gut umsetzbar ist, entstehen bei hohen Frequenzen Probleme, da die Wellenlängen zunehmend kleiner werden bis eine physikalische Grenze beim Bau der Lautsprecher erreicht wird (Grzesinski, 2020). Somit ist die akustische Kopplung eine Voraussetzung für den Bau von Lautsprecherzeilen sowie von Line Arrays und ist damit ein elementarer Bestandteil von Beschallungslautsprechersystemen (Grzesinski, 2020).

3. Menschliche Wahrnehmung

Menschen nehmen Schallereignisse subjektiv wahr, wodurch ein Hörereignis entsteht (Maschke & Fastl, 2015). Ein Hauptmerkmal ist dabei die wahrgenommene Lautstärke, die sich aus dem Schalldruckpegel, der Dauer, der Bandbreite sowie der Frequenz zusammensetzt. Die Hörempfindung hingegen wird hauptsächlich durch die Frequenz des Signals bestimmt (Maschke & Fastl, 2015). Aus diesem Grund wird im folgenden Kapitel die Frequenzabhängigkeit des Gehörs dargestellt. Zudem wird im Hinblick auf Beschallung die Fähigkeit des räumlichen Hörens aufgezeigt. Es wird unterschieden zwischen der Lokalisation einer Schallquelle sowie Mehrschallquellsituationen.

3.1 Frequenzabhängigkeit des Gehörs

Menschen sind in der Lage Schall von einer Frequenz von 16 Hertz (Hz) bis 20 Kilohertz (kHz) auditiv wahrzunehmen. Unterhalb von 16 Hz ist dieser nur noch als Vibration spürbar (Ellermeier & Hellbrück, 2008). Die Empfindlichkeit des Gehörs ist innerhalb der Wahrnehmungsgrenzen frequenzabhängig. Um dies zu veranschaulichen eignen sich die in Abb. 2 dargestellten Kurven gleicher Lautheit (Dickreiter, 2014b).

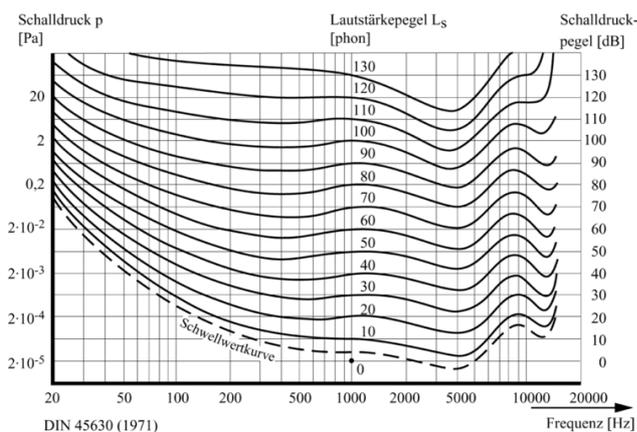


Abbildung 2: Kurven gleicher Lautheit

(Dickreiter, 2014b, S.121)

Aus diesen wird ersichtlich, dass bei verschiedenen Frequenzen unterschiedliche Schalldrücke erforderlich sind, um den gleichen Lautstärkeindruck hervorzurufen. Bei ca. 4 kHz ist die Empfindlichkeit des Gehörs am größten. Zu hohen und tiefen Frequenzen hin fällt sie ab, wodurch höhere Pegel zur gleichen Lautstärkewahrnehmung erforderlich sind (Dickreiter, 2014b). Mit steigendem Schalldruckpegel wird die Empfindlichkeit über den gesamten hörbaren Frequenzbereich ausgeglichener (Pieper, 2011). Dem Schalldruckpegel sind abhängig von der Frequenz ebenfalls Grenzen gesetzt: Bei 1 kHz liegt die Wahrnehmung zwischen der Hörschwelle von 0 dB sowie der Schmerzgrenze von 120 dB (Wirsum, 1991). In der Beschallung müssen diese Schalldruckgrenzen stets eingehalten werden, wobei

gleichzeitig eine korrekte Frequenzdarstellung gewährleistet werden muss (Ahnert & Goertz, 2008).

3.2 Räumliches Hören

Die Richtungswahrnehmung des Menschen umfasst drei Dimensionen: die Horizontalebene, die Medianebene und die Frontalebene (Dickreiter, 2014b). Dafür „sind hauptsächlich interaurale Laufzeit- und Pegeldifferenzen, also Differenzen zwischen den beiden Ohrsignalen“ (Görne, 2015, S. 126) verantwortlich. Das kopfbezogene Koordinatensystem (vgl. Abb. 3) veranschaulicht die drei Ebenen und hilft dabei, die Lokalisation der Hörereignisorte zu beschreiben (Blauert & Braasch, 2008). In der Praxis gibt es selten reflexionsarme Räume, dennoch wird zur vereinfachten Erklärung von einem freien Schallfeld ausgegangen (Blauert & Braasch, 2008).

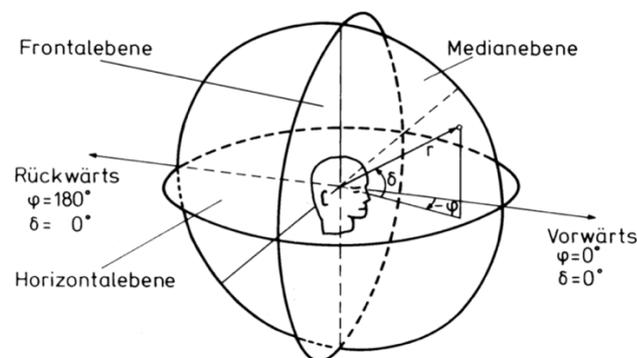


Abbildung 3: Kopfbezogenes Koordinatensystem

(Blauert & Braasch, 2008, S.88)

3.2.1 Eine Schallquelle

Ohren, Kopf und Rumpf bilden eine bewegliche Antenne mit einer „richtungs-, entfernungs- und frequenzabhängige[n] Richtcharakteristik“ (Blauert & Braasch, 2008, S. 89). Sobald Schallsignale auf den Kopf treffen, werden diese spezifisch von der Position der Schallquelle relativ zu den Ohren linear verzerrt (Blauert & Braasch, 2008).

In der Horizontal- und Frontalebene führt das dazu, dass interaurale Ohrsignalmerkmale entstehen, die wesentliche Informationen zur Lokalisation des Signals liefern (Dickreiter, 2014b). Bei Frequenzen, deren Wellenlänge in der Größenordnung des Kopfes liegen, werden diese Merkmale verstärkt. So entsteht bei seitlichem Schalleinfall ein Druckstau an dem zur Quelle zugewandten Ohr, während das andere im Schallschatten liegt. Tiefere Frequenzen hingegen werden um den Kopf gebeugt, sodass der Pegelunterschied deutlich geringer ist (Blauert & Braasch, 2008). Das menschliche Ohr reagiert bei frontalem Schalleinfall am empfindlichsten. Dort können bereits Unterschiede von $\pm 1^\circ$ wahrgenommen werden. In der

Horizontalebene liegt die Empfindlichkeit je nach Schalleinfallrichtung bei $\pm 4^\circ$ bis $\pm 10^\circ$ (Blauert & Braasch, 2008).

Aus vertikalem Schalleinfall in der Medianebene kann das Ohr keine Pegel- oder Laufzeitunterschiede filtern. Lediglich spektrale Klangfarbenänderungen unterscheiden die beiden Ohrsignale (Dickreiter, 2014b). Daher ist die Ortung in dieser Ebene schwieriger und ungenauer. Um dem entgegenzuwirken werden unbewusst mit dem Kopf kleine Dreh- und Kippbewegungen ausgeführt, um das Signal besser lokalisieren zu können (Fasold & Veres, 2003).

3.2.2 Mehrere Schallquellen

Sobald mehrere Schallquellen vorhanden sind, ändert sich die räumliche Wahrnehmung. Es können sowohl mehrere Lautsprecher zum Einsatz kommen, als auch einzelne Quellen, die in geschlossenen Räumen aufgrund von Reflexionen Spiegelschallquellen erzeugen (Blauert & Braasch, 2008). Prinzipiell wird davon ausgegangen, dass die Schallquellen das gleiche Signal abstrahlen und lediglich in Pegel sowie Laufzeit verändert werden.

Laut Blauert & Braasch, (2008) entstehen dadurch drei Varianten, die den Ort des Hörereignisses beeinflussen:

1. Summenlokalisierung: Das Hörereignis hängt von den Positionen beider Schallquellen und deren Signale ab,
2. Präzedenzeffekt: Die zuerst ertönende Schallquelle bestimmt den Ort des Hörereignisses,
3. Echo: Primärschall und Echo werden als zwei getrennte Hörereignisse wahrgenommen.

Zusammenfassend kann das Ohr Signalen durch Laufzeitstereofonie, Pegelstereofonie sowie der Kombination beider, der sogenannten Äquivalenzstereofonie, Richtungsinformationen entnehmen (Scholz, 2015).

Präzedenzeffekt

Durch den Präzedenzeffekt ist es möglich, Schallsignale in geschlossenen Räumen trotz Reflexionen und Diffusschall zu lokalisieren (Blauert & Braasch, 2008). Der Präzedenzeffekt oder auch das Gesetz der ersten Wellenfront besagt, dass ein Hörereignis immer aus „der Richtung der zuerst beim Zuhörer eintreffenden Wellenfront“ (Blauert & Braasch, 2008, S. 103) wahrgenommen wird. Dabei kann der Schalldruckpegel der zeitlich zwischen 0,6 bis 30 Millisekunden (ms) verzögerten Wellenfront um bis zu 10 dB höher als der des Primärschalls sein, ohne dass sich die Richtungswahrnehmung dadurch verändert (Görne, 2015). Dieser Effekt wird Haas-Effekt genannt und wird in der Beschallungstechnik zum Beispiel beim Einsatz von Delay-Lines genutzt (Görne, 2015).

Dieser Effekt funktioniert nur innerhalb der Grenzwerte für die maximale Verzögerungszeit und Pegelunterschiede der folgenden Wellenfront. Werden diese überschritten, trennt sich das Hörereignis, sodass ein Echo hin zur verzögerten Wellenfront hörbar wird (Blauert & Braasch, 2008). Die Echschwelle wird dabei durch keinen allgemeingültigen Verzögerungswert beschrieben, sondern ist je nach Pegel und Art des Signals variabel (Blauert & Braasch, 2008). Ausführlicher wird das Echo in Kapitel fünf beschrieben.

Summenlokalisierung

Bei der Summenlokalisierung wird die wahrgenommene Herkunftsrichtung einer Schallquelle beeinflusst. Steht ein Zuhörer mit identischem Abstand vor zwei Lautsprechern, die kohärente Schallsignale abstrahlen, dann nimmt dieser den Schall nicht mehr leicht seitlich aus den Lautsprechern wahr, sondern ortet das Signal mittig (Fasold & Veres, 2003). Folglich bewirkt die Summenlokalisierung, dass sich die realen Schallquellen hin zu einem einzigen Schallereignis auf der Winkelhalbierenden der beiden Lautsprecher verschiebt (Fasold & Veres, 2003). Voraussetzung dafür ist, dass die Zeitverzögerung der Signale unter 0,6 ms liegen, sodass der Effekt wirksam wird. Nur dann können die Signale miteinander verschmelzen und so eine fiktive Schallquelle erzeugen (Görne, 2015).

Neben der Realisierung des Effekts durch Laufzeitunterschiede kann man diesen auch durch unterschiedliche Pegelstellungen der Lautsprecher erzeugen und die Phantomschallquelle an jedem Punkt zwischen den beiden Lautsprechern platzieren (Frieesecke, 2014).

4. Raumakustik

„Die Raumakustik befasst sich mit den akustischen Erscheinungen in geschlossenen Räumen“ (Dickreiter, 2014a, S. 29). Dabei steht die Herausforderung der gleichmäßigen Verteilung des Nutzschalls im Vordergrund (Wirsum, 1991), aber auch die Berücksichtigung der subjektiven Wahrnehmung der Hörereignisse ist ein wichtiger Bestandteil (Dickreiter, 2014a). Ein Begriff, der in diesem Zusammenhang genannt werden sollte, ist die Hörsamkeit. Sie beschreibt, inwiefern sich ein Raum für eine gewisse akustische Darbietung eignet (Ahnert & Tennhardt, 2008). Es gibt akustische Kriterien, welchen je nach Nutzung der Räumlichkeiten unterschiedliche Bezugswerte zugeordnet sind und angestrebt werden (Ahnert & Tennhardt, 2008). Eine Auswahl dieser wird im Folgenden vorgestellt.

4.1 Zeitlicher Aufbau des Schallfelds

Wird eine Schallquelle angesteuert, sodass ein Impuls in den Raum abgestrahlt wird, baut sich innerhalb kürzester Zeit ein Schallfeld auf (vgl. Abb. 4). Dabei werden mehrere Phasen durchlaufen, welche nachfolgend dargelegt werden. Grundvoraussetzung ist, dass die abgestrahlten Schallwellen von den Raumbegrenzungsflächen sowie vom Mobiliar je nach

Form, Größe und Materialeigenschaften absorbiert, reflektiert, gebündelt oder gestreut werden (Dickreiter, 2014a).

Den Ausgangspunkt bildet der Direktschall. Bei der Abstrahlung von Schall in einen Raum trifft dieser zuerst auf direktem Weg den Zuhörer. Der Direktschall ist entscheidend für eine gute Hörsamkeit sowie ein transparentes Klangbild und muss über dem Diffusschallanteil liegen (Dickreiter, 2014a). Auf den Direktschall folgen die ersten Reflexionen. Ihnen wird eine große Bedeutung zugesprochen, da sie das Hörereignis in ihrer Lautstärke erhöhen und die Deutlichkeit, Einfallsrichtung und wahrgenommene Raumgröße beeinflussen. Dabei entscheiden jeweils die Laufzeitdifferenzen, mit welchen sie beim Hörer eintreffen, über die Wirkung der Reflexionen (Grzesinski, 2020). „Das menschliche Ohr kann Schallreflexionen mit einer Laufzeitdifferenz von $<50\text{ms}$ vom Direktschall nicht unterscheiden“ (Wirsum, 1991, S. 42). Anschließend folgt eine große Anzahl an Reflexionen höherer Ordnung. Diese resultieren zum Nachhall, der zum Direktschall zeitlich versetzt ist (Dickreiter, 2014a). Das Diffusfeld entsteht demzufolge durch alle reflektierten Schallwellen, wobei die Stärke der Streuung sowie die Bandbreite des Signals die Gleichmäßigkeit des Diffusschallfelds bestimmen. In kleinen Räumen baut es sich schneller auf als in großen Räumen, da innerhalb der gleichen Zeitspanne deutlich mehr Reflexionen stattfinden (Dickreiter, 2014a).

Bei anhaltenden Signalen wie beispielsweise Musik kommt die Besonderheit hinzu, dass beim Einsatz der Schallquelle das Diffusfeld auf einen bestimmten Wert ansteigt und einen Anhall erzeugt, der je nach dessen Länge den Klangeinsatz beeinflusst (Dickreiter, 2014a).

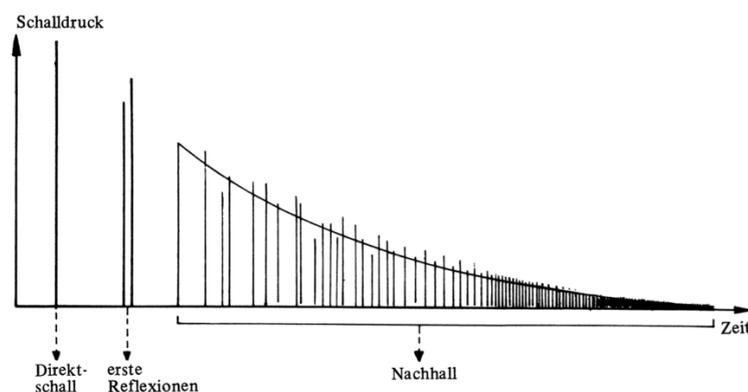


Abbildung 4: Zeitlicher Aufbau des Schallfelds

(Dickreiter, 2014a, S.30)

4.2 Reflexion & Absorption

Sobald sich Schallwellen in einem Raum ausbreiten entsteht Schallabsorption sowie dessen Reflexion. Das Wissen zu Absorbertypen und Reflektoren wird vorausgesetzt, ebenso die unterschiedlichen Reflexionswirkungen. Ausführliche Informationen können in der „Audio Enzyklopädie“ von Andreas Friesecke (2014) nachgelesen werden. In diesem Kapitel werden lediglich die für Beschallungen relevanten Faktoren kurz erwähnt.

Bei der Schallausbreitung in Räumen finden unvermeidbare Absorptionen statt, die berücksichtigt werden müssen (Fasold & Veres, 2003). Zum einen ist das die Schallabsorption durch das Publikum, die in Räumlichkeiten ohne Bestuhlung nur anhand von bestehenden Mittelwerten berechnet werden kann. Zum anderen werden hohe Frequenzen auch durch die Luft absorbiert, wobei dies abhängig von der Raumtemperatur und Luftfeuchtigkeit ist und sich nur in sehr großen Räumen merkbar auswirkt (Fasold & Veres, 2003). Die Raumbegrenzungsflächen absorbieren ebenfalls Schall und müssen aufgrund ihrer großen Abmessungen berücksichtigt werden. In jedem Fall werden Innenwände und Decken mit technischen Absorbern oder Diffusoren akustisch aufbereitet, um eine möglichst gleichmäßige Schallverteilung zu erreichen und störende Anteile zu beseitigen (Fasold & Veres, 2003).

4.3 Nachhall & Hallradius

Die Nachhallzeit ist eine der wichtigsten Kriterien, um die Akustik eines Raums zu charakterisieren (Ahnert & Tennhardt, 2008). Sie ist eine frequenzabhängige Größe und an allen Stellen des Raums näherungsweise gleich (Ahnert & Reichardt, 1981). „Die Nachhallzeit T ist als die Zeit definiert, in der die mittlere Energiedichte $w(t)$ des Raumes, von einer starken, den Raum gleichmäßig erfüllenden Schallerregung ausgehend, um 60 dB abnimmt“ (Ahnert & Reichardt, 1981, S. 52). Da in der Praxis Messungen für einen Pegelabfall von 60 dB nur schwer umsetzbar sind, wird lediglich bis zu einem Pegelabfall von 30 dB gemessen und der Wert anschließend umgerechnet (Ahnert & Tennhardt, 2008). Das Volumen sowie die gesamte Schallabsorption und -reflektion eines Raumes bestimmen die Länge der Nachhallzeit. Das Publikum, die Raumausstattung sowie zusätzlich angebrachte Absorber verkürzen die Nachhallzeit (Wirsum, 1991), während Reflektoren, schallharte große Oberflächen und Resonatoren eine frequenzabhängige Verlängerung bewirken (Schullan et al., 2014). Die Nachhallzeit kann durch die vom Physiker Sabine entwickelte Formel berechnet werden:

$T = 0,163 \frac{V}{A_{\text{ges}} + 4mV}$	<p>V = Raumvolumen A_{ges} = Schallabsorptionsfläche m = Luftdämpfung</p>
--	---

Abbildung 5: Formel zur Nachhallzeitberechnung

(Ahnert & Tennhardt, 2008, S.191)

Der Hallradius oder Hallabstand bezeichnet den Punkt im Raum, an dem die Pegel des Direkt- und Diffusschalls den gleichen Wert aufweisen (Schullan et al., 2014). Während der Direktschallpegel dem Abstandsgesetz zufolge mit zunehmender Entfernung zur Schallquelle kleiner wird, bleibt der Diffusschall an allen Positionen im Raum gleich. Somit überwiegt der Direktschall in Lautsprechernähe und der Diffusschall in deren Entfernung (Görne, 2015). Für die Beschallung sollten sich die Zuhörer möglichst innerhalb des Hallradius befinden, da im

Diffusfeld die Lokalisierung der Schallquelle nicht mehr möglich ist. Der Höreindruck soll aber zur optischen Darbietung passen (Dickreiter, 2014a).

4.4 Deutlichkeitsmaß und Klarheitsmaß

Das Deutlichkeitsmaß und das Klarheitsmaß sind zwei wichtige Kriterien, um die raumakustische Güte entsprechend der Darbietung zu beurteilen (Ahnert & Feistel, 2018). Das Deutlichkeitsmaß C_{50} wird zur Beurteilung der Verständlichkeit von Sprachdarbietungen angewandt. Es beschreibt „das Verhältnis der bis 50 ms nach dem Direktschall am Ort des Zuhörers eintreffenden Schallenergie zur Restschallenergie“ (Grzesinski, 2020, S. 47). Das heißt, die Reflexionen, die innerhalb der ersten 50 ms nach dem Direktschall beim Hörer ankommen fördern die Durchhörbarkeit und erhöhen die Silbenverständlichkeit. Gemessen wird der Frequenzbereich der menschlichen Stimme, wobei C_{50} bei einem Wert größer als 0 dB liegen sollte, sodass eine gute Sprachverständlichkeit gewährleistet werden kann (Fuchs, 2017).

Das Klarheitsmaß C_{80} hingegen richtet sich nach der Register- und Zeitdurchsichtigkeit musikalischer Darbietungen. Die Beurteilung erfolgt hier wie beim Deutlichkeitsmaß nur mit dem Unterschied, dass die Schallenergie der ersten 80 ms in das Verhältnis zur Restschallenergie gesetzt wird (Fuchs, 2017). Dies ist der längeren Ansprechzeit von Instrumenten geschuldet (Grzesinski, 2020). Auch bei C_{80} sollte der Wert über 0 dB liegen, wobei auch Werte leicht unterhalb akzeptiert werden (Fuchs, 2017).

4.5 Absorptionsgrad Publikum

Die Schallabsorption durch das Publikum hat einen großen Einfluss auf die Akustik des Raums und sollte bei der Planung einer Beschallung berücksichtigt werden. Prinzipiell gilt, dass durch diese Absorption die Nachhallzeit verkürzt wird, wodurch möglicherweise zuvor verdeckte störende Reflexionen hörbar werden, welche korrigiert werden müssen (Görne, 2015).

Das Publikum absorbiert Schallenergie vor allem durch die getragene Kleidung, da diese wie poröse Schallabsorber wirken. Die Besetzungsdichte der Räumlichkeit hat in diesem Zusammenhang ebenso einen Einfluss (Fasold & Veres, 2003). Folglich kann der Absorptionsgrad im Voraus nicht exakt bestimmt, sondern lediglich angenähert werden. Es gibt jedoch die Möglichkeit, den Einfluss des Publikums zu steuern (Görne, 2015). Abhängig von der Bestuhlung und der Bodenbeschaffenheit ist dieser stärker oder geringer ausgeprägt: Ist der Raum weder bestuhlt noch der Boden mit einem Teppich ausgelegt, ist der Unterschied zwischen leerem und besetztem Zustand enorm. Je mehr Absorptionsmaterialien auf der Publikumsfläche verbaut sind, desto schwächer wirkt sich die Absorption durch das Publikum aus (Görne, 2015). Sofern eine Räumlichkeit bestuhlt wird, spielt die Art der Bestuhlung eine wichtige Rolle. In Konzertsälen zum Beispiel besteht diese oft aus Polstergestühl, das aus

schallabsorbierendem Material gefertigt ist. Damit ändert sich die Absorptionsfläche und -wirkung nur geringfügig, wenn die Zuhörer ihre Plätze einnehmen. Mit dieser Methode ist es möglich, eine annähernd konstante Nachhallzeit unabhängig vom Publikum zu erhalten (Fasold & Veres, 2003).

Gerade bei Beschallungen hilft es, den Publikumsabsorptionsgrad bereits bei der Planung zu berechnen und zu berücksichtigen, da die Einrichtung der Anlage vor der Veranstaltung ohne Publikum stattfindet, später aber andere Absorptionsverhältnisse gelten (Görne, 2015).

5. Problemfaktoren für die Beschallung

Bei der Realisierung einer Beschallung können verschiedene akustische Probleme auftreten, die für eine qualitativ hochwertige Tonwiedergabe und Schallwahrnehmung behoben werden müssen. Dabei können die Probleme von der Raumakustik über die Verwendung der Lautsprecher bis hin zum Signal selbst reichen. Zuerst wird aufgezeigt, welche Auswirkungen Phasenverschiebungen auf die Wiedergabe des Signals haben. Im Anschluss werden raumbezogene Probleme, wie stehende Wellen, Fokussierung und Echos näher erläutert. Abschließend wird auf die Rückkopplung bzw. akustische Mitkopplung eingegangen, welche in jedem Fall vermieden werden muss.

5.1 Phasenverschiebung

Probleme mit der Phasenlage von Signalen treten oft auf, sobald mehrere Lautsprecher parallel eingesetzt werden. Der Grund dafür ist, dass die Lautsprecher bei Abstrahlung des gleichen Signals an verschiedenen Positionen im Raum platziert sind (Pieper, 2011). Die Schallwellen eines Lautsprechers breiten sich im Raum aus und überlagern sich mit denen anderer Strahler. „Bei der Überlagerung in der Luft entsteht eine Resultierende, deren Auslenkung sich aus der Addition der Einzelamplituden aller beteiligten Wellen ergibt“ (Pieper, 2011, S. 28). Die Form der Resultierenden kann variieren: Im Optimalfall sind die Lautsprecher so positioniert, dass die einzelnen Schallwellen phasengleich sind. Die Auslenkungen der Wellen liegen exakt übereinander, sodass eine Kopplung dieser in Zeit und Richtung stattfindet. Folglich wird die Resultierende in dieser Frequenz durch die Überlagerung in ihrer Amplitude verdoppelt und ist zu den Einzelwellen phasengleich (Pieper, 2011).

Im zweiten Fall sind die Signale phasenverschoben. Bei Laufzeitdifferenzen von Schallwellen entsteht ein Verzug, der in Grad angegeben wird. So entsprechen 90° dem Versatz einer halben Auslenkung, 180° einer Auslenkung bzw. einer Halbwelle, bis hin zu 360° , was dem Verzug einer Periode entspricht (Pieper, 2011). Bei der Überlagerung phasenverschobener Schallwellen „addieren sich zu positiven Einzelamplituden zwangsläufig auch negative Auslenkungen“ (Pieper, 2011, S. 29). Folglich ist die Amplitude der Resultierenden geringer und besitzt eine eigene Phasenlage, welche sich aus den Einzelwellen zusammensetzt

(Pieper, 2011). Die akustischen Folgen sind weitreichend, denn neben Lautstärkeschwankungen entstehen zusätzlich durch Frequenzauslöschungen Klangverfärbungen (Pieper, 2011). Verursacht wird die Phasenungleichheit zum einen durch versetzte Lautsprecher sowie durch Reflexion der Schallwellen, zum anderen aber auch durch die überlappenden Abstrahlbereiche von Lautsprecherclustern. Aus diesem Grund müssen die Boxen so zueinander justiert werden, dass dieser Bereich möglichst klein ist (Pieper, 2011). Extremere noch zeigt sich dieser Effekt in der Wellenauslöschung. Wenn sich zwei Schallwellen gleicher Frequenz überlagern und dabei in ihrer Phase um 180° verschoben sind, heben sich die entgegengesetzten Auslenkungen der Wellen in der Luft gegenseitig auf. Folglich kann keine Resultierende entstehen (Pieper, 2011). In der Praxis tritt dieser Effekt beispielsweise beim gegenphasigen Betrieb parallel geschalteter Lautsprecherboxen auf und ist vor allem im Bassbereich anhand fehlender Kraft und Druck deutlich zu hören (Pieper, 2011).

5.2 Kammfilter

Beim Kammfiltereffekt handelt es sich laut Pieper (2011) „um periodisch wiederkehrende Frequenzauslöschungen, die aus der Überlagerung gleicher Schallwellen mit unterschiedlichen Phasenlagen [...] resultieren“ (S. 32). Der Begriff selbst resultiert aus dem optischen Verlauf des Frequenzgangs, der den Zinken eines Kamms ähnelt, und ist in Abb. 6 dargestellt (Pieper, 2011).

Wie zuvor erläutert, kommt es aufgrund von Laufzeitdifferenzen der Signale zu Phasenungleichheit, sodass die Resultierende reduziert wird. Das Besondere an einem Kammfilter ist, dass die Auslöschungen in konstanten Abständen und zwar bei allen ungeraden Vielfachen der Grundfrequenz auftreten. Denn „[e]xakt an diesen Stellen ergibt sich für die überlagerten Schwingungen nämlich erneut 180° Phasenverschiebung“ (Pieper, 2011, S. 34). Wie zuvor sind die Folgen ebenfalls deutlich anhand von Lautstärkeminderungen bei den Frequenzeinbrüchen sowie Klangverfärbungen hörbar (Pieper, 2011).

Die Ursachen für einen Kammfilter können vielfältig sein. In der Beschallung entsteht dieser hauptsächlich durch ungewolltes Übersprechen von Schallquellen in benachbarte Mikrofone. Bei nah aneinander positionierten Mikrofonen, die dasselbe Schallereignis aufnehmen, sind die Signale aufgrund der unterschiedlichen Laufzeiten phasenverschoben und erzeugen anschließend bei der monophonen Mischung ein kammfilterhaltiges Produkt (Grzesinski, 2020). Sehr frühe pegelstarke Reflexionen begünstigen ebenfalls Kammfiltereffekte, zum Beispiel, wenn ein Notenpult direkt hinter dem Mikrofon positioniert ist (Grzesinski, 2020). Aber auch falsch eingestellte Zeitverzögerungen in Controllern (Pieper, 2011) sowie elektronische Effektgeräte können ebenfalls Kammfilter verursachen (Grzesinski, 2020).

Da Kammfilter das Klangbild immer verschlechtern, sollten diese weitestmöglich reduziert werden, sodass nur unvermeidbare aufgrund der Raumakustik bestehende Kammfilter vorhanden sind (Pieper, 2011).

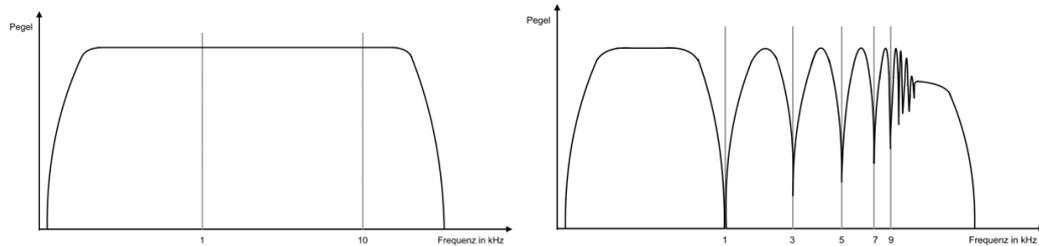


Abbildung 6: Linearer Frequenzgang (links), Kammfilterstruktur (rechts)

In Anlehnung an (Pieper, 2011, S.35)

5.3 Stehende Wellen & Raumresonanzen

Sobald Schall über Lautsprecher in einen geschlossenen Raum abgestrahlt wird, werden einfallende Schallwellen von den an Wänden und Decken reflektierten Schallwellen überlagert (Görne, 2015). Diese Überlagerung bildet zusammen mit parallel ausgerichteten Raumflächen zwei wichtige Grundvoraussetzungen für stehende Wellen.

Stehende Wellen entstehen, wenn die Wellenlänge genau zwischen die Abmessung der Raumflächen passt. Folglich bestimmt der Abstand zwischen den Raumflächen die Frequenz der stehenden Welle. Zusätzlich entstehen sie auch für das Vielfache dieser Hauptfrequenz (Schullan et al., 2014). Tieffrequente stehende Wellen treten einzeln auf und gelten daher als störend. Wenn sie dicht genug aneinander folgen, können sie durchaus als Nachhall des Raumes empfunden werden (Friehecke, 2014).

Wie in Kapitel 5.1 erklärt, erhöht sich aufgrund der abweichenden Phasenlagen der einfallenden und reflektierten Schallwelle an den Schwingungsbäuchen der Schalldruck. An den Knoten hingegen löscht sich die Amplitude vollständig aus (Wirsum, 1991). Die Frequenz der stehenden Welle spielt ebenfalls eine Rolle: Je höher diese ist, desto enger erfolgen Schwingungsauslenkungen und Knoten aufeinander, da deren Wellenlänge zunehmend kleiner wird (Wirsum, 1991). Für tiefe Frequenzen gilt das genau umgekehrt. Somit bilden „[s]tehende Wellen [...] im Raum ein Muster aus Schalldruckminima und -maxima, die ortsabhängig zur Überhöhung oder zur Auslöschung von Resonanzfrequenzen und damit zu positionsabhängigen Klangfarbenveränderungen führen“ (Grzesinski, 2020, S. 36). Ein ebenfalls geläufiger Begriff für stehende Wellen ist die Raummode. Abhängig von der Anzahl der Begrenzungsflächen zwischen welchen eine Mode entsteht, wird zwischen drei Arten unterschieden: den axialen, tangentialen und obliquen Moden (Schullan et al., 2014).

Stehende Wellen tiefer Frequenzen werden als Raumresonanzen bezeichnet (Wirsum, 1991). Sie beeinflussen die Klangfarbe des Raums im Frequenzbereich der Raumabmessungen und

bewirken aufgrund der Schalldruckschwankungen von 0 dB bis 6 dB einen unausgewogenen Bassbereich (Görne, 2015). Die Raumgröße ist dabei ein relevanter Faktor für die Störanfälligkeit für Raumresonanzen. Je kleiner der Raum ist, desto negativer ist die Auswirkung dieser. Mit zunehmender Größe der Räumlichkeiten wird der Einfluss von Raumresonanzen geringer, da sie sich aufgrund der Abmessungen in einen tieffrequenteren Bereich verschieben und bei sehr großen Hallen sogar vernachlässigbar werden (Görne, 2015). Die Energiebilanz eines Raumes wird aufgrund der langen Ausschwingzeit von stehenden Wellen und Raumresonanzen beeinflusst. Bei einer Beschallung wird jedoch eine konstante Klangverteilung über die gesamte Abhörfläche gefordert (Schullan et al., 2014). Daher sollte grundsätzlich die Raumgeometrie stehenden Wellen entgegenwirken (Frießecke, 2014). Wenn dies in der Raumarchitektur nicht berücksichtigt wurde, müssen stehende Wellen anderweitig behoben werden. Dazu werden zuerst die Frequenzen berechnet, die für die störenden Resonanzen verantwortlich sind. Daraufhin können diese gezielt mit geeigneten Resonatoren (mit guter eigener Dämpfung), der Anpassung der Lautsprecherpositionen möglichst außerhalb des Druckmaximas und weiteren Absorptionsmaßnahmen behoben werden (Frießecke, 2014).

5.4 Fokussierung

Die Qualität einer Beschallung wird in großem Maße durch die Raumgeometrie bestimmt. Damit sind besonders die Flächenformen und -krümmungen der Wände und Decken gemeint. Bei ebenen Flächen wird der einfallende Schall entsprechend der zutreffenden Reflexionswirkung beispielsweise im gleichen Winkel reflektiert (Schullan et al., 2014). Im Gegensatz dazu treten an konkav gewölbten Flächen abhängig vom Abstand der Quelle zur Raumfläche Streuung und Fokussierung auf (Grzesinski, 2020). Bei der Fokussierung entsteht mittig vor der gewölbten Fläche ähnlich wie bei einem Kreisbogen, ein Punkt, an dem alle eintreffenden Schallwellen fokussiert und gebündelt werden (vgl. Abb. 7). Folglich konzentriert sich die Schallenergie an diesem Punkt und nimmt außerhalb stark ab (Schullan et al., 2014). Bei Beschallungen darf aus diesem Grund das Mikrofon nicht an einem solchen Punkt positioniert werden. Bei der Signalverstärkung nehmen die Pegel von Nutzsignal und fokussierter Energie schnell den gleichen Wert an, sodass es zur Rückkopplung kommt und daher nur eine geringfügige Verstärkung erlaubt ist (Schullan et al., 2014). Wenn Fokuspunkte an den Positionen der Mikrofone oder der Zuhörer nicht vermieden werden können, darf keine Schallenergie in den gewölbten Bogen strahlen, sodass es zu keiner Bündelung kommt (Schullan et al., 2014). Je runder bzw. mehr gewölbte Flächen in einem Raum verbaut sind, desto schwieriger wird es die Beschallung ohne Fokussierungen umzusetzen (Schullan et al., 2014).

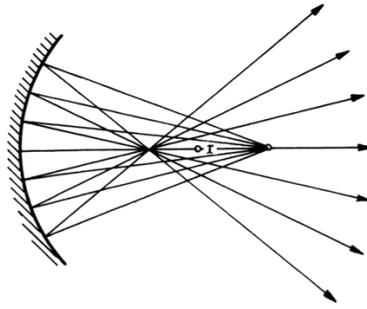


Abbildung 7: Fokussierung an einer gewölbten Oberfläche

(Dickreiter, 2014a, S.21)

5.5 Echos

Bei einem Echo werden Primärschall und Sekundärschall als getrennte Hörereignisse wahrgenommen. Dabei wird der später eintreffende Schall als Wiederholung empfunden (Ahnert & Goertz, 2008). Wie bereits zuvor erwähnt entstehen Echos, wenn bestimmte Grenzwerte bezüglich des Pegels und der Verzögerungszeit der nachfolgenden Wellenfront(en) überschritten werden (Blauert & Braasch, 2008). Aber auch die zeitliche Verzögerung von Direktschall und Reflexionen können Echos hervorrufen (Ahnert & Goertz, 2008). Die Echoschwelle, ab welcher das Echo hörbar wird, ist abhängig von der Art des Signals und kann innerhalb einer Spanne von 1 ms bis mehreren 100 ms liegen. Wenn der Rückwurfpegel schwächer als der Primärschall ist, kann bei Sprache allgemein mit einem Wert von 50 ms, bei Musik von 80 ms gerechnet werden (Blauert & Braasch, 2008). Laut Friesecke (2014) können Echos ab einer Verzögerungszeit von über 30 ms wahrgenommen werden, wobei die Dauer des Schallereignisses deren Hörbarkeit beeinflusst. Einzelreflexionen, die sich im Pegel deutlich hervorheben, können ab einer Verzögerung über 50 ms unangenehm als Echo wahrgenommen werden (Dickreiter, 2014a). Grundsätzlich beeinträchtigt die Existenz von Echos die Sprachverständlichkeit ebenso wie die Lokalisation der Schallquelle (Wirsum, 1991). Um störende Echos durch Reflexionen zu beheben, bieten sich akustische Mittel wie Absorber, Reflektoren und Diffusoren an (Görne, 2015).

Eine besondere Form der Echos sind die Flatterechos, die laut Ahnert & Goertz (2008) als „periodische Folge von Echos“ (S. 502) bezeichnet werden. Diese laufen zwischen zwei parallelen schallharten Flächen hin und her und sollten durch eine angepasste Lautsprecherausrüstung oder mit den genannten raumakustischen Werkzeugen behoben werden (Wirsum, 1991).

5.6 Rückkopplung

Eine Rückkopplung entsteht dann, wenn sich der Ausgang eines elektrischen Kanals auf dessen Eingang rückwirkt und so in Selbsterregung gerät (Ahnert & Goertz, 2008).

Im Falle einer Beschallung besteht ein hohes Rückkopplungsrisiko, da sich die Lautsprecher und Mikrofone in demselben Raum befinden. Wird ein Signal, das durch das Mikrofon aufgenommen, anschließend verstärkt und über die Lautsprecher in den Raum abgestrahlt wird, erneut vom Mikrofon aufgenommen entsteht eine Schleifenbildung (Wirsum, 1991). Dieser Vorgang wiederholt sich, bis „das gegenseitige Aufschaukeln zu einer Oszillation führt, die zu einem unangenehmen Heul- oder Pfeifton wird“ (Wirsum, 1991, S. 59). Länger anhaltende Rückkopplungen sind nicht nur für das menschliche Ohr schädlich, sondern aufgrund der entstehenden Überlast ebenso für die Übertragungsanlage (Wirsum, 1991). Die Herausforderung besteht darin, den geforderten Schallpegel zu erreichen, aber dennoch ausreichend Abstand, ca. 6 dB, zur Rückkopplungsgrenze zu erhalten (Ahnert & Goertz, 2008).

Es gibt verschiedene Ansätze, die helfen den Rückkopplungseinsatz abzusenken. Äußerst wichtig ist die Anordnung zwischen Mikrofon und Lautsprecher. Der Abstand zwischen den Mikrofonen und Lautsprechern sollte ausreichend groß sein, wobei die Mikrofone immer hinter den Lautsprechern positioniert werden (Wirsum, 1991). Rückkopplungsverstärkende Reflexionen von Wänden etc., die auf das Mikrofon treffen, müssen vermieden werden, ebenso wie die Überschneidung des Mikrofon-Aufnahmebereichs mit dem Strahlungsbereich der Lautsprecher (Wirsum, 1991). Zudem ist die Verwendung von gerichteten Lautsprechern und Mikrofonen nützlich, da einerseits der Abstrahlbereich der Lautsprecher besser auf das Publikum gerichtet wird. Andererseits nimmt das Mikrofon dadurch Störschall reduziert auf und kann im Schallschatten bzw. mit einer unempfindlichen Seite zum Lautsprecher hin positioniert werden (Wirsum, 1991).

Wenn diese Maßnahmen nicht ausreichen, besteht zusätzlich die Möglichkeit variable Bandsperren, Entzerrer und Shifter einzuschleifen, um gezielt Frequenzen abzusenken (Wirsum, 1991).

6. Beschallung

„Beschallung wird immer dann eingesetzt, wenn ein akustisches Nutzsignal zu leise ist und deshalb für größeres Publikum lauter gemacht werden soll“ (Schullan et al., 2014, S. 565). Diese Aussage scheint im ersten Moment allgemein und unpräzise, doch bei genauer Betrachtung ist sie sehr zutreffend. Der Einsatz von Beschallungen ist vielfältig und reicht von Konzertbeschallungen über reine Sprachübertragungen bis hin zu fest installierten Anlagen in Firmengebäuden oder an Bahnhöfen (Wirsum, 1991). Aus diesem Grund gibt es eine Vielzahl an Anlagen, die sich je nach Anforderung in ihren technischen Komponenten und Erscheinungsbildern unterscheiden (Frisch, 1995). Laut Frisch (1995) können sie entweder Verstärkungsanlagen, Unterstützungsanlagen oder „Anlagen zur Simulation raumakustischer Gegebenheiten“ (S. 646) zugeordnet werden.

In der vorliegenden Arbeit wird vorrangig auf die Verstärkung und Wiedergabe von Sprache und Musik eingegangen, die mit Hilfe von P.A.-Anlagen übertragen werden. Grundsätzlich gilt dabei, dass sich die zu verstärkenden Schallquellen in der gleichen akustischen Umgebung, in diesem Fall in geschlossenen Räumen, befinden wie die abstrahlenden Lautsprecher (Schullan et al., 2014). Im Folgenden werden zuerst die Anforderungen und Ziele einer Beschallungsanlage aufgezeigt. Im Anschluss an eine Komponentenübersicht einer Beschallung wird genauer auf die verwendeten Lautsprecher eingegangen. Im Kapitel 6.4 werden wichtige Aufbaukonzepte vorgestellt, wobei nachfolgend die Lautsprecherpositionen bei Frontalbeschallungen ergänzt werden. Abschließend werden in diesem Kapitel drei Beschallungskonzepte dargestellt.

6.1 Anforderungen und Ziele einer Beschallungsanlage

Die Hauptaufgabe einer Beschallungsanlage ist die Wiedergabe von Musik, Sprache und weiterer Signale für eine große Anzahl über die Publikumsfläche verteilter Zuhörer (Ahnert & Goertz, 2008). Da in diesem Fall ausschließlich Beschallungen in geschlossenen Räumen betrachtet werden, muss der durch Reflexionen entstehende Diffusschall stets in die Planung und Umsetzung einer Beschallung miteinbezogen werden (Frieesecke, 2014).

Elementare Ziele einer Beschallung sind, die Zuschauer möglichst nur mit Direktschall zu versorgen und die Diffusschallanteile sehr gering zu halten. Durch den Einsatz von gerichteten Lautsprechern kann der Hallradius künstlich vergrößert, und damit der mit Direktschall versorgte Bereich ausgeweitet werden (Schullan et al., 2014). Zudem sollten der Schalldruckpegel und die Frequenzverteilung über die Hörerpositionen im Raum hinweg gleichmäßig sein (Schullan et al., 2014). Weitere Ziele sind die Vermeidung von Rückkopplungen trotz ausreichend hoher Lautstärke sowie gute Sprachverständlichkeit und Durchsichtigkeit (Frieesecke, 2014). Der Anteil an Störgeräuschen sollte gering gehalten werden und mindestens 6-10 dB unter dem Nutzpegel liegen. Für die Zuhörer ist es wichtig, dass die Ortung der Schallquellen mit der optischen Wahrnehmung übereinstimmt (Ahnert & Reichardt, 1981).

Die Anforderungen an den Schalldruckpegel können je nach Art der Darbietung variieren. Gerade bei Musikwiedergaben sind die Unterschiede gravierend. Während bei klassischen Konzerten die elektroakustische Anlage, wenn überhaupt, nur geringfügig eingesetzt wird, damit eine natürliche Lautstärke bestehen bleibt, wird bei U-Musik ein dem Genre angemessener Schalldruckpegel angestrebt. Dieser ist deutlich höher, sodass beispielsweise bei Rockkonzerten das Publikum durchaus von Gehörschutz Gebrauch macht (Ahnert & Goertz, 2008).

Laut Schullan et al. (2014) findet eine Beschallung nie unter optimalen Konditionen statt, da:

- „die Orte, in denen Beschallung funktionieren muss, meist akustisch nicht ausgewogen sind,
- die Beschallung nicht für einen idealen Abhörpunkt optimiert wird, sondern auf einer größeren Fläche funktionieren muss,
- nur die wenigsten Zuhörer sich genau in der Mitte von zwei stereofon betriebenen Lautsprechern befinden,
- die Zuhörer unterschiedliche Abstände zu den Lautsprechern haben und sich meist außerhalb des Hallradius befinden,
- die aufnehmenden Mikrofone für die Beschallungsanlage am gleichen Veranstaltungsort angeordnet sind wie die Lautsprecher selbst“ (S. 569-570).

Diese Herausforderungen und Randbedingungen müssen zusammen mit den Anforderungen in Einklang gebracht werden, um ein funktionierendes sowie hochwertiges Beschallungskonzept entwerfen zu können (Schullan et al., 2014). Bei der technischen Umsetzung wird daher versucht ausschließlich die Zuhörerfläche mit Schallleistung zu versorgen, sodass akustisch störende Erscheinungen wie Echos vermieden werden (Ahnert & Goertz, 2008). Teilweise reicht der alleinige Einsatz einer Beschallungsanlage nicht für ein zufriedenstellendes Ergebnis aus. In diesem Fall sollte abgewogen werden, ob durch Anpassungen an die Raumakustik eine Verbesserung zu erzielen ist (Ahnert & Goertz, 2008). Erschwerend kommt hinzu, dass die Beurteilung einer Beschallungsanlage hauptsächlich nach subjektiven Empfindungen erfolgt und nicht verallgemeinert werden kann. Während eine Person mit Klang und Lautstärke zufrieden ist, findet eine andere Person die Beschallung zu laut und zu spitz (Schullan et al., 2014). Beim Auftreten von Rückkopplungen besteht jedoch Einigkeit: Sie werden negativ gewertet und können als objektives Kriterium herangezogen werden. Weiterhin besteht Konsens über eine qualitativ hochwertige Beschallung, wenn diese unterstützend agiert und nicht zwangsläufig als solche wahrgenommen wird (Schullan et al., 2014). Letztlich ergeben sich dadurch gewisse Ansprüche, die bei jeder Beschallung erreicht werden müssen, aber auch Anforderungen, die je nach Darbietung variieren.

6.2 Komponentenübersicht

Eine Beschallungsanlage besteht aus mehreren Komponenten, die zur Vollständigkeit in einem Überblick dargestellt werden. Ausführliche Informationen können in Weinzierls (2008b) „Handbuch der Audiotechnik“ oder in „das P.A. Handbuch“ von Frank Pieper (2011) nachgelesen werden. Laut Ahnert & Goertz (2008) lassen sich die Komponenten in folgende Bereiche unterteilen: „Signalquellen, Signalbearbeitung, Signalübertragung, Leistungsverstärker, Lautsprecher, Peripherie“ (S. 494). Den Signalquellen werden alle Elemente zugeordnet, die ein Audiosignal aufnehmen. Dazu zählen „Mikrofone, Tonabnehmer

an Instrumenten, elektronische Instrumente, [aber auch] Tonträger“ (Ahnert & Goertz, 2008, S. 494). Nach der Aufnahme folgt die Signalverarbeitung. Damit das Signal über alle Zwischenstationen hin zu den Lautsprechern gelangt, bedarf es der Signalübertragung. Bei der Endstufe angelangt, wird es durch den Leistungsverstärker entsprechend für die Wiedergabe verstärkt. Dabei werden die Leistungsverstärker zunehmend direkt in die Beschallungslautsprecher integriert, die letztendlich das bearbeitete Signal wiedergeben (Ahnert & Goertz, 2008). Die Peripherie umfasst die Komponenten, die nicht direkt mit dem Audiosignal verbunden sind, wie zum Beispiel Kontroll- und Steuerfunktionen (Ahnert & Goertz, 2008).

Das Mischpult, in dem ein großer Teil der Signalverarbeitung stattfindet sowie das Monitoring bilden zwei zentrale Elemente der Beschallung und werden deshalb separat hervorgehoben. Mischpulte, die für Live-Beschallungen verwendet werden, unterscheiden sich nur geringfügig von denen, die in Tonstudios eingesetzt werden (Schullan et al., 2014). Auch hier werden die einzelnen Signale gemischt, klanglich bearbeitet und in ihrer Lautstärke angepasst. Bei der Beschallung wird die Mischung meist in Mono angefertigt, da eine korrekte Stereoabbildung über einen großen Zuhörerbereich schwierig umzusetzen ist (Pieper, 2011). Je nach Komplexität der Beschallung gibt es Modelle verschiedener Ausstattungen (Pieper, 2011). Das Pult befindet sich vor der Bühne im Zuschauerbereich und wird deswegen FoH Pult genannt. Von dort aus fertigt der Beschallungstonmeister die Saalmischung an. Bei größeren Produktionen wird das Monitoring nicht vom FoH Pult aus gesteuert, sondern vom Bühnentonmeister, der in Bühnennähe mit einem separaten Mischpult ausgestattet ist (Schullan et al., 2014).

Neben den Zuhörern benötigen die Musiker zur Orientierung und Zusammenspiel auf sich abgestimmte Mischungen. Das Monitoring kann entweder über Bühnenbeschallung oder über In-Ear-Monitoring realisiert werden. „Der am häufigsten verwendete Lautsprecher für das Monitoring ist das Monitor Wedge. Das ist ein Beschallungslautsprecher der, durch seine keilförmige Gehäuseform auf dem Boden liegend, den Musiker mit dessen gewünschter Mischung versorgt“ (Schullan et al., 2014, S. 597). Bei großen Bühnen wird die Monitorbeschallung durch seitlich an der Bühne angebrachte Sidefills erweitert (Schullan et al., 2014). Der große Vorteil des In-Ear-Monitorings ist, dass der Schalldruck aufgrund des Wegfalls der Monitorlautsprecher auf der Bühne gesenkt und störender Schall in die ersten Publikumsreihen vermieden wird (Pieper, 2011). In-Ear-Monitore liefern die gewünschten Monitormischungen direkt an das Trommelfell der Musiker und dämpfen gleichzeitig den Lautstärkepegel von der Bühne. Sie werden für das Ohr individuell angefertigt und schützen das Gehör der Künstler (Schullan et al., 2014).

6.3 Lautsprecher

Bei Beschallungen agieren Lautsprecher als Schallquellen, wobei deren Ausführungen von Punktstrahlern über Arrays bis hin zu zusammengesetzten Anordnungen reichen (Ahnert & Goertz, 2008). Wichtige Eigenschaften der Lautsprecher sind eine definierte Richtwirkung, hohe Schalldruckpegel und ein maximaler Wirkungsgrad (Görne, 2015). Die Abstrahlcharakteristik steht im direkten Zusammenhang mit dem beim Zuhörer ankommenden Schalldruckpegel. Grund hierfür ist, dass mit zunehmendem Abstrahlwinkel die Schalleistung auf eine größere Fläche verteilt und folglich der Pegel beim Hörer geringer wird (Goertz, 2008). Bei Beschallungen wird ein hoher Schalldruckpegel vorausgesetzt, weswegen Systeme mit gerichteten, schmalen Abstrahlverhalten verwendet werden. Diese können zusammen zu einem Array verbaut werden (Goertz, 2008). Strahlergruppen bündeln den Schall, sodass sich dieser gleichmäßig über den Gesamtraum verteilt und sich der Lautheitseindruck über die Fläche nicht verändert (Bernstein, 2019). Zudem sollte die Klangcharakteristik und der Frequenzgang eines Lautsprechers in sowie neben seiner Hauptstrahlachse über alle Frequenzbereiche für eine hochwertige Beschallung möglichst ausgeglichen sein (Schullian et al., 2014).

Im Folgenden werden zwei unterschiedliche Ausführungen genauer beschrieben: Das Line Array und die Linienzeile. Der Schwerpunkt liegt auf den Line Arrays, da sie in der Beschallung eine Vorreiterrolle einnehmen (Goertz, 2008). Neben den Fullrange-Systemen werden die für den Tieftonbereich zuständigen Subwoofer betrachtet.

6.3.1 Linienzeile

Bei Linienzeilen werden mehrere gleiche Breitbandlautsprecher in engem Abstand in einer Reihe montiert. Werden dabei die Gesetze der Strahlungskopplung befolgt, fungieren die einzelnen Membranen bei paralleler Ansteuerung wie eine große Membran (Pieper, 2011). Damit strahlt sie eine Zylinderwelle mit allen für die Beschallung nützlichen Eigenschaften ab (Pieper, 2011). Diese Wirkung von Linienstrahlern besteht nur zwischen den Grenzfrequenzen, die durch die Abstände der Lautsprecherchassis bestimmt werden (Pieper, 2011). Laut Goertz (2008) lässt sich für eine Linienzeile „aus gleichphasig und mit gleichem Pegel arbeitenden diskreten Quellen [...] ableiten, dass der Abstand zwischen den Quellen nicht größer als eine Wellenlänge sein darf, wenn keine neuen seitlichen Hauptmaxima“ (S. 445) entstehen sollen. Zur Unterbindung von Nebenmaxima werden Abstände bis zu einer halben Wellenlänge erforderlich (Goertz, 2008). Die Länge einer Linienzeile spielt ebenfalls eine zentrale Rolle für die Richtwirkung der Schallabstrahlung. Mit zunehmender Anzahl an Lautsprechern wird eine höhere Richtwirkung bei tiefen Frequenzen erreicht, während gleichzeitig hohe Frequenzen stark gebündelt werden, sodass Nebenmaxima entstehen (Friesecke, 2014). Um diesem Problem entgegenzuwirken, kann durch Filtertechniken die

Abstrahlung der Linienzeile positiv beeinflusst werden. Während bei tieferen Frequenzen alle Lautsprecher Schall abstrahlen, werden zu hohen Frequenzen hin allmählich die äußeren Lautsprecher mittels Tiefpassfilter ausgeblendet (Eargle, 2003).

Linienstrahler werden vor allem in der ELA-Technik sowie zunehmend auch für bestimmte Anwendungen mit Klein-P.A.-Anlagen verwendet (Pieper, 2011). Sie eignen sich aufgrund des begrenzten Übertragungsbereichs weniger für musikalische Zwecke und kommen vermehrt bei Sprachwiedergaben zum Einsatz (Pieper, 2011).

6.3.2 Line Arrays

Line Arrays ermöglichen es auch akustisch schwierige Räume gezielt zu beschallen. Seit den 1990er Jahren dominieren diese Systeme den Bereich der Großbeschallungen und werden für Konzerte verwendet (Pieper, 2011). Im Gegensatz zu Linienstrahlern kann bei Line Arrays eine Zylinderwelle über den gesamten Frequenzbereich des Audiosignals abgestrahlt werden (Pieper, 2011). Möglich wird dies durch das Stacking der einzelnen Lautsprecher. „Jedes Einzelmodul besteht aus einem meist horngeladenen Zwei- oder Dreiwegelautsprecher, welches horizontal untereinander mit den anderen Modulen betrieben wird“ (Schullan et al., S. 595). Dabei sind „[d]ie Hornöffnungen [...] derart konstruiert, dass die abgestrahlte Welle jedes Einzellautsprechers sich phasenrichtig mit der Welle des Nachbarlautsprechers darüber und darunter verbindet“ (Schullan et al., S. 595). Werden nun die Abstände zwischen den Elementen kleinstmöglich gehalten, kommt es zur akustischen Kopplung. Zusammen mit der hornähnlichen Schallführung bewirken sie die Vereinigung der einzelnen Schallabstrahlungen der Lautsprecherboxen zu einer kohärenten Zylinderwelle (Pieper, 2011; Friesecke, 2014). Ziel ist, dass eine möglichst ebene Wellenfront für jeden Frequenzbereich entsteht, die die Publikumsfläche mit Schall abdeckt (Goertz, 2008). Mit einer Zylinderwelle kann zwischen zu beschallenden und auszublendenden Bereichen differenziert werden (Goertz, 2008). Bezüglich der Reichweite sind Beschallungen über größere Distanzen aufgrund der Pegelabnahme von 3 dB pro Entfernungsverdopplung bei Zylinderstrahlern wesentlich besser umsetzbar als bei Punktstrahlern (Goertz, 2008).

Doch auch bei Line Arrays gibt es Grenzen für die Zylinderwellenabstrahlung. Diese liegen in der Länge des Arrays im Verhältnis zu den abzustrahlenden Frequenzen (Schullan et al., 2014). Ist die Wellenlänge kleiner als die Abmessungen des Arrays, wird der Schall in der gewünschten Form einer Zylinderwelle abgestrahlt. Man befindet sich im Nahfeld des Arrays. Mit zunehmender Entfernung findet ein kontinuierlicher Übergang in das Fernfeld statt, wo sich der Schall nun kugelförmig ausbreitet. Die Ausdehnung des Nahfelds des Arrays und ein späterer Übergang in das Fernfeld kann abhängig vom Audiosignal durch Verlängerung des Arrays erreicht werden (Pieper, 2011).

In der Praxis werden bei geflogenen Line Arrays die einzelnen Elemente nicht gerade untereinander angeordnet, sondern zueinander gewinkelt. Das sogenannte Curving ermöglicht die Anpassung der vertikalen Abstrahlcharakteristik und ist in Abb. 8 dargestellt (Goertz, 2008). Dabei steht der Winkel zwischen den Array-Elementen „im umgekehrten Verhältnis zur gewünschten Reichweite“ (Goertz, 2008, S. 452). Das bedeutet, je kleiner der Winkel ist, desto größer werden Reichweite und Intensität und umgekehrt (Goertz, 2008). Im Line Array zeigt sich dies durch gerade angeordnete obere Elemente, die den Schall gebündelt bis in die hinteren Raumbereiche abstrahlen. Nach unten zum Line Array hin werden sie stärker gewinkelt, wodurch die Bündelung abnimmt, dafür aber Schall in die ersten Publikumsreihen gestrahlt wird (Grzesinski, 2020). Aufgrund der gekrümmten Form wird ein angewinkeltes Line Array auch gerne als Banane bezeichnet (Pieper, 2011).

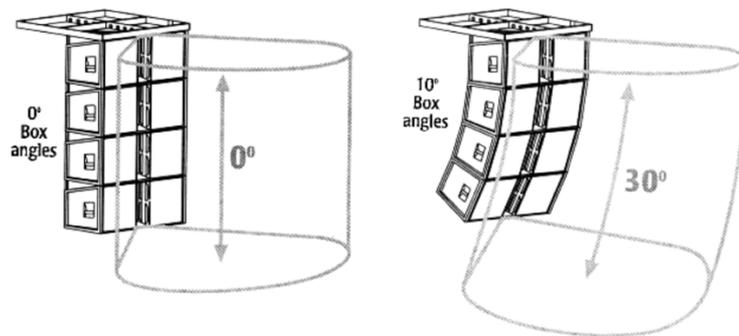


Abbildung 8: Aufbau eines Line Arrays ohne und mit Curving

(Goertz, 2008, S.453)

Somit kann durch die scharf begrenzte Schallabstrahlung der Zylinderwelle und dem Curving die Beschallung an die jeweilige Räumlichkeit der Veranstaltung angepasst werden. Zudem kann damit auch das Direkt- und Diffusschallverhältnis entsprechend der Anwendung für Sprache oder Musik positiv beeinflusst werden (Schullan et al., 2014). Die präzise Positionierung und Montage der Line Arrays ist dabei entscheidend (Schullan et al., 2014). Geflogene Systeme werden den auf dem Boden aufgebauten Stacks deutlich bevorzugt, da sie eine gleichmäßigere Pegelverteilung über die Gesamtfläche erlauben (Pieper, 2011). Für den Aufbau muss sichergestellt werden, dass die statischen Voraussetzungen an den Flugpunkten zum Anbringen eines Traversensystems erfüllt sind (Pieper, 2011).

6.3.3 Subwoofer

Eine Beschallung nur mit den eben beschriebenen Line Arrays wird meist nicht zu einem zufriedenstellenden Ergebnis führen. Tiefe Frequenzen werden nur unzureichend abgebildet, weswegen für den Bassbereich weitere spezielle Lautsprecher notwendig sind - die Subwoofer. Subwoofer sind Kugelstrahler, die den Schall ungerichtet in alle Richtungen abstrahlen. Der Grund dafür sind die kleinen Abmessungen im Verhältnis zur abgestrahlten

Wellenlänge (Schullan et al., 2014). Bei Beschallungen wird jedoch die gerichtete Schallabstrahlung der Subwoofer gefordert, denn bei hohem Basspegel wird dieser auf der Bühne deutlich zu laut, sodass Feedbacks auftreten können. Zudem bewirkt der lange Nachhall tiefer Frequenzen ein unangenehmes Dröhnen im Zuschauerbereich (Goertz, 2008). Um die gewünschte Richtwirkung bei den Subwoofern zu erzielen, werden sie „in kleinen Einheiten von 2 – 4 Systemen mit Abständen von 2 m zueinander quer vor der gesamten Bühne [...] platzier[t]“ (Goertz, 2008, S. 453). Durch passende DSP-Ansteuerung ergibt sich über die Breite der Boxen hinweg eine Linienquelle mit Richtkeulencharakteristik. Bei dieser Methode ist die gleichmäßige Pegelverteilung über die Publikumsfläche hinweg vorteilhaft, auch wenn Randbereiche nicht immer ausreichend ausgeblendet werden (Goertz, 2008). Um die gleichen Effekte zu erzielen können alternativ die Subwoofer zu einem Bass-Array gestapelt und wie die Line Arrays nicht auf dem Boden positioniert, sondern geflogen werden (Goertz, 2008). Teilweise werden die Bassboxen auch mit in das Line Array integriert (Pieper, 2011).

Bei kleineren Bühnen kann das eben beschriebene Konzept nicht umgesetzt werden. Hierfür gibt es eine weitere Möglichkeit, nämlich den Einsatz von Cardioid Subwoofern. Bei dieser Herangehensweise werden Schallwellen mittels Interferenzen zu bestimmten Raumbereichen hin ausgelöscht (Goertz, 2008). Durch die exakte Positionierung der Subwoofer kann dieses Prinzip umgesetzt werden, denn es „basiert auf zwei in einem definierten Abstand hintereinander angeordneten Quellen, von denen die hintere verpolt und mit einem Delay belegt ist. Die Delayzeit entspricht dabei der Laufzeit für den Abstand zwischen den beiden Quellen“ (Goertz, 2008, S. 454). Wird nun Schall von beiden Subwoofern ungerichtet abgestrahlt, kommt es zur Überlagerung der Wellen. Die nach hinten strahlenden Wellen werden ausgelöscht, wobei sich die nach vorne gerichteten Schallwellen addieren und zu einem leichten Pegelanstieg führen (Goertz, 2008). Somit haben Cardioid Subwoofer den Vorteil, dass sie eine starke Richtwirkung aufweisen und gleichzeitig störenden rückwärtigen Schall auslöschen.

6.4 Aufbaukonzepte

Bei Beschallungen muss über eine definierte Fläche ein ausreichend hoher, gleichmäßig verteilter Schalldruckpegel erzeugt werden. Ein einzelner Lautsprecher reicht dafür nur sehr selten aus, sodass mehrere miteinander kombiniert werden (Grzesinski, 2020). Es gibt dabei drei verschiedene Konzepte, nach welchen eine Beschallung aufgebaut werden kann: die zentrale Beschallung, die zentrale gestützte und die dezentrale Beschallung. Im folgenden Kapitel werden die Eigenschaften der verschiedenen Konzepte aufgezeigt.

6.4.1 Zentrale Beschallung

Bei der zentralen Beschallung wird die Zuhörerfläche von einzelnen oder mehreren zu einer Einheit zusammengefassten Lautsprechern mit Schall versorgt. Solche Komplexe werden als Gruppenstrahler, Cluster oder Schallampel bezeichnet und sind in der Lage von einer Position aus die gesamte Publikumsfläche zu beschallen (Kuttruff, 1995). Sie werden am Ort des Geschehens meistens oberhalb der Bühnenkante aufgebaut (vgl. Abb. 9). Dabei kann bei der zentralen Beschallung ein großer Monokomplex in der Bühnenmitte oder auch zwei Teilgruppen rechts und links seitlich an den Bühnenrändern angeordnet werden (Grzesinski, 2020). Die zuletzt genannte Möglichkeit resultiert zu der in der Praxis häufig vorzufindenden L/R-Hauptbeschallung. Sie ermöglicht in der Theorie eine stereophone Beschallung, was allerdings meist nur für Effekte wie künstlichen Hall angewandt wird. Grund dafür ist, dass das korrekte Stereobild nur für einen kleinen Bereich auf der Publikumsfläche funktioniert und für den Rest eine fehlerhafte Abbildung und Lokalisation auftritt (Grzesinski, 2020). Damit eine gleichmäßige Beschallung erzielt werden kann, müssen die Gruppenstrahler eine ausreichende Länge und Schalldruck aufweisen. Die Raumakustik bestimmt dabei maßgeblich die exakte Position und Ausrichtung der Lautsprecher (Wirsum, 1991). Die korrekte Anbringung hilft bei der gezielten Versorgung der Publikumsfläche mit Direktschall und ermöglicht die Reduktion von Schallreflexionen. Der Unterschied zwischen der Verwendung einzelner Lautsprecher oder Gruppenstrahler ist für die Beschallung erheblich. Ein Lautsprecher versorgt den vorderen Publikumsbereich stärker und fällt zu den hinteren Raumabschnitten durch Absorption ab (Wirsum, 1991). Mit Gruppenstrahlern rechts und links neben der Bühne hingegen können größere Flächen gleichmäßig beschallt werden. Der Abstand zwischen den Gruppenstrahlern darf einen bestimmten Wert nicht überschreiten, da sonst die Schallquellen von beiden Strahlern unabhängig voneinander wahrgenommen werden (Wirsum, 1991). Ein Argument für den Einsatz nur eines Lautsprechers ist die, aufgrund der geringeren Anzahl der sich dort überlagernden Schallwellen, niedrigere Schallpegeldichte im Diffusfeld (Schullan et al., 2014).

Voraussetzung für die zentrale Beschallung ist die Versorgung aller Zuhörer mit ungefähr gleichem Direktschallanteil sowie einem einheitlichen Abstand von den Lautsprechern zu jeder Zuhörerposition. Beim Einsatz von Arrays kann die gewünschte Abstrahlung entsprechend eingestellt werden (Schullan et al., 2014). Die Lautsprecher werden hängend oberhalb der Bühne montiert, weswegen die zentrale Beschallung nur in Räumen mit ausreichender Deckenhöhe möglich ist (Schullan et al., 2014). Weiterhin ist sie „in Räumen bis zu ca. 800...1000 m³ und geringer Nachhallzeit von <1 Sekunde [...] mit Gruppenstrahlern mit mittleren Bündelungsgraden (T 4...7) meistens problemlos durchführbar“ (Wirsum, 1991, S. 210).

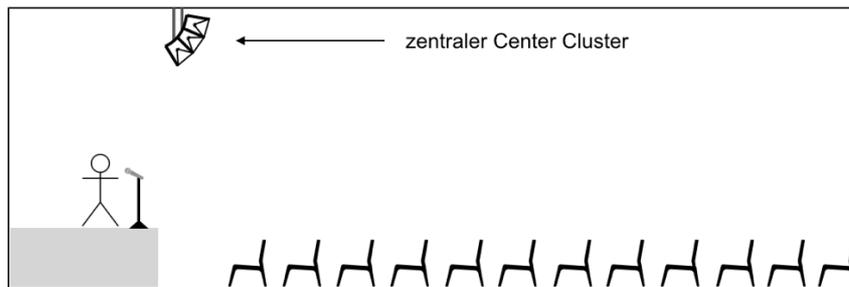


Abbildung 9: Zentrale Beschallung mit einem mittigen Centercluster

In Anlehnung an (Grzesinski, 2020, S.381)

Vorteilhaft ist der einfache Aufbau und die zügige Inbetriebnahme eines zentralen Systems, da die Lautsprechertechnik nur auf einen oder zwei Punkte konzentriert ist (Schullan et al., 2014). Der Richtungsbezug und die gute Ortbarkeit der Schallsignale, vor allem in Bühnennähe, ist ebenfalls positiv zu bewerten (Grzesinski, 2020). Gleichzeitig müssen auch die Nachteile einer rein zentralen Beschallung berücksichtigt werden, denn „[t]rotz der einzigen Welle wird das Diffusschallfeld wegen der großen Beschallungsdistanzen und der damit einhergehenden ungenauen Schallpegelverteilung, überproportional stark angeregt“ (Schullan et al., 2014 S. 570). Zudem ist sie nur in Räumen mit kurzer Nachhallzeit möglich. Zentrale Beschallungen werden oft bei Konzerten im Bereich Rock-Pop verwendet, wobei unterteilte Lautsprecherkomplexe rechts und links an der Bühne angeordnet werden (Kuttruff, 1995). Bei Großbeschallungen wie beispielsweise in Stadien werden zentrale Gruppenstrahlerampeln, die aus vielen kreisförmig angeordneten Schallzeilen bestehen, montiert (Wirsum, 1991). Dieses Beschallungskonzept kommt an seine Grenzen, wenn die zu beschallende Fläche sehr ausgedehnt ist und so der Abstand zwischen Lautsprecher und einzelnen Hörerplätzen zu groß wird. Auch bei Räumlichkeiten mit zu langen Nachhallzeiten wird die Umsetzung einer zentralen Beschallung schwierig, ebenso wenn die Architektur des Raumes eine ausreichende Dimensionierung des Lautsprechersystems nicht zulässt (Frisch, 1995).

6.4.2 Zentrale gestützte Beschallung

Das zweite Aufbaukonzept ist die zentrale gestützte Beschallung und wird dann angewandt, wenn die zentrale Beschallung an ihre Grenzen stößt. Diese nimmt die eben beschriebene Variante als Basis und wird durch Stützlautsprecher ergänzt (Grzesinski, 2020).

Diese zusätzlichen Lautsprecher sind dort notwendig, wo Hörerplätze im Publikum nicht durch die Hauptlautsprecher mit ausreichend Direktschall versorgt werden können oder Hindernisse die Schallausbreitung blockieren. Hauptsächlich betrifft dies Plätze, die weit von der Aktionsfläche bzw. Bühne entfernt sind oder die außerhalb des Abstrahlbereichs der Lautsprecher liegen. Dementsprechend gibt es verschiedene Positionen, an welchen solche Lautsprecher eingesetzt werden können (Grzesinski, 2020). Wichtige Stützlautsprecher sind

zum einen die Delay-Line, zum anderen aber auch verschiedene Fills, auf die in Kapitel 6.5 eingegangen wird.

Wichtig ist, dass die Laufzeiten der zusätzlichen Lautsprecher auf die der Hauptlautsprecheranlage angepasst werden, um Echos zu vermeiden und um den Richtungsbezug und die korrekte Ortung der Schallquelle beizubehalten (Grzesinski, 2020). Somit wird hier mit dem Gesetz der ersten Wellenfront gearbeitet, da zuerst die Schallwellen der Hauptlautsprecheranlage auf die Zuhörer treffen müssen. Die Versorgungslautsprecher dürfen anschließend, nach dem Haas-Gesetz, einen 5-10 dB höheren Pegel als der ankommende Direktschall vorweisen (Schullan et al., 2014). Der Verzögerungswert für die Laufzeitanpassung muss vor der Installation berechnet werden, was laut Frisch (1995) mit folgender Formel möglich ist:

$\Delta T = (SE - LE) \cdot 3 + 10\text{ms}$	SE = Abstand zwischen Hauptschallquelle und Empfänger (in m) LE = Abstand zwischen verzögertem Lautsprecher und Empfänger (in m) ΔT = Laufzeitverzögerung (in ms)
--	---

Abbildung 10: Formel zur Berechnung der Laufzeitanpassung

(Frisch, 1995, S.647)

6.4.3 Dezentrale Beschallung

Das gegensätzliche Aufbaukonzept zu den bisherigen Varianten bildet die dezentrale Beschallung. Bei dieser wird das Publikum durch viele Lautsprecher beschallt. Im Gegensatz zur zentralen Beschallung wird nicht auf eine einheitliche Wellenfront geachtet, sondern auf die Schallversorgung definierter Bereiche (Schullan et al., 2014). Es werden daher viele kleine, eher leistungsschwache Lautsprecher im Raum verteilt installiert (vgl. Abb. 11). Die Zuhörer sitzen dabei stets in direkter Nähe eines Lautsprechers und werden dadurch mit viel Direktschall versorgt (Grzesinski, 2020). Dabei können je nach Räumlichkeit auch Deckenlautsprecher oder dezentrale Schallsäulen zum Einsatz kommen. Die Verwendung leistungsschwächerer Lautsprecher hilft, die entstehenden Schallreflexionen besser zu kontrollieren und gegebenenfalls zu reduzieren (Wirsum, 1991). Je mehr Lautsprecher installiert werden, desto kleiner werden die zu versorgenden Flächen (Schullan et al., 2014). Ist der Abstand zwischen den Lautsprechern zu gering, kann es zu ungewollten Überlappungen zwischen den Abstrahlbereichen der Lautsprecher kommen (Wirsum, 1991). Dezentrale Beschallungen sind meist bei schwierigeren Verhältnissen erforderlich, das heißt „bei großen Räumen mit niedrigem Deckenabstand oder akustischen Hindernissen, welche Schallschatten verursachen“ (Wirsum, 1991, S. 209). Sie werden in der Regel nicht für die Verstärkung musikalischer Darbietungen wie beispielsweise Konzerte verwendet, sondern finden viel mehr Anwendung in Räumlichkeiten mit langem Nachhall wie Kirchen, an Bahnhöfen sowie in Konferenzsälen und Mehrzweckräumen (Kuttruff, 1995; Grzesinski, 2020).

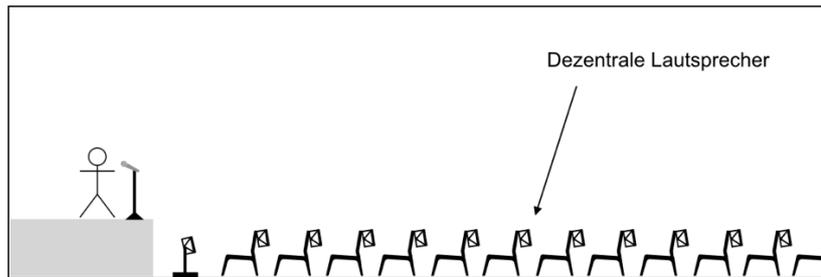


Abbildung 11: Möglicher Aufbau einer dezentralen Beschallung

In Anlehnung an (Grzesinski, 2020, S.382)

Ein großer Vorteil ist, dass akustisch schwierige Räume mit diesem Konzept beschallt werden können. Grund hierfür ist, dass die einzelnen Lautsprecher lediglich begrenzte Flächen mit Schallenergie versorgen, sodass der Gesamtraum weniger angeregt wird (Schullan et al., 2014). Weiterhin sind solche Anlagen optisch deutlich weniger auffallend als bei der zentralen Beschallung (Kuttruff, 1995). Nachteilig bei dezentralen Systemen ist der hohe Installationsaufwand. Es wird eine Vielzahl an Lautsprechern benötigt, die angeschlossen und aufeinander verzögert werden müssen (Grzesinski, 2020). Zusätzlich sind oft für die Montage der Lautsprecher weitere Bauelemente wie beispielsweise Abhängungen oder Stative nötig (Schullan et al., 2014). Auch für den Zuhörer ist das Hörereignis nicht immer optimal, da die akustische Richtungsverbindung zum optischen Geschehen fehlt und so eine gewisse Distanz und Abkapselung zwischen Zuhörer und Aktion aufkommt (Schullan et al., 2014).

Insgesamt sind aufgrund des hohen Aufwands rein dezentrale Beschallungen ökonomisch häufig nicht umsetzbar. Daher wird in der Praxis häufig auf eine Kombination der zentralen und dezentralen Beschallung zurückgegriffen, die sowohl akustisch als auch kostenbezogen zufriedenstellende Ergebnisse liefert (Schullan et al., 2014).

6.5 Lautsprecherpositionen bei Frontalbeschallung

Bei einer Frontalbeschallung liegt im Grunde eine unterteilte zentrale L/R-Hauptbeschallung vor. Es gibt mehrere Möglichkeiten wie eine solche Anlage gestaltet bzw. im Raum umgesetzt werden kann. Wie bereits erwähnt reichen die Hauptlautsprecher oft nicht aus, um den gesamten Publikumsbereich abzudecken, weswegen verschiedene Fills zum Einsatz kommen. Für eine gute Übertragung des Tieftonbereichs ist die korrekte Positionierung der Subwoofer entscheidend. Im Folgenden werden diese Aspekte genauer beleuchtet.

6.5.1 Horizontale Position & vertikale Position

„Der häufigste Fall eines frontalen Beschallungsaufbaues sind die stereofonen Lautsprecherpositionen links und rechts der Bühne“ (Schullan et al., 2014, S. 574). Wird dieser Aufbau wirklich zur Stereowiedergabe genutzt, dann nimmt nur ein kleiner Anteil der Zuhörer in der Sweet Area die Mischung korrekt wahr. Bei Beschallungen sollte daher hauptsächlich

monofon übertragen werden, sodass die Zuhörer den Schall von der Bühne aus wahrnehmen und die gleiche Mischung hören. Lediglich generierte Effekte werden in stereo wiedergegeben (Schullan et al., 2014).

Werden die Lautsprecher auf der Bühne positioniert ist der Einfallswinkel des Schalls in die Zuhörerschicht flach (vgl. Abb. 12). Dadurch kommt es zu Beugungseffekten sowie zur Ablenkung des Schalls durch Temperaturgradienten. Die Folge ist die Dämpfung der hohen sowie der mittleren Frequenzbereiche (Schullan et al., 2014). Zudem wirkt das Abstandsgesetz: In direkter Bühnennähe ist der Direktschallpegel hoch, der mit zunehmender Entfernung zur Schallquelle stetig abnimmt. Ist die Lautstärke in den ersten Reihen angemessen, wird sie weiter hinten als zu leise wahrgenommen. Wird der Schalldruckpegel für die hinteren Bereiche passend eingestellt, ist er vorne deutlich zu laut (Schullan et al., 2014). Insgesamt kann das Publikum daher nicht gleichmäßig mit Direktschall versorgt werden. Ein zusätzlicher Nachteil der Lautsprecheranordnung in der horizontalen Ebene ist die erhöhte Rückkopplungsgefahr aufgrund des geringen Abstands zwischen Mikrofon und Lautsprecher (Schullan et al., 2014).

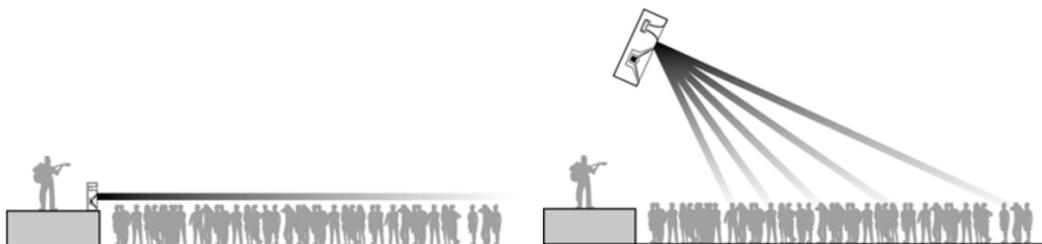


Abbildung 12: Lautsprecheranordnung in der horizontalen und vertikalen Ebene

(Schullan et al., 2014, S.575-576)

Werden die Positionen der Lautsprecher in der horizontalen Ebene beibehalten und lediglich in der vertikalen Position nach oben verschoben, kann eine wesentlich gleichmäßigere Schallpegelverteilung erreicht werden (Schullan et al., 2014). Durch diese Verschiebung gleichen sich die Abstände der Lautsprecher zu den Hörerpositionen an: zu den ersten Publikumsreihen wird der Abstand deutlich größer, während er zu den hinteren Reihen in Relation konstant bleibt (vgl. Abb. 12). Folglich kann durch die doppelte Höhe der Lautsprecher bereits der Schalldruckpegel in den vorderen Reihen um 6 dB gesenkt werden (Schullan et al., 2014). Weiterhin verbessert sich der Abstrahlwinkel der Lautsprecher über den Zuhörerbereich. Durch die erhöhte Position wird der Schall ungehindert über das Publikum bis in die hinteren Reihen abgestrahlt (Schullan et al., 2014). Traversen oder Stative bieten sich an, um die Lautsprecher in der Vertikalebene anzupassen (Schullan et al., 2014).

6.5.2 Delay-Line & Fills

In langen Räumen befindet sich der hintere Bereich trotz stark gerichteter Hauptlautsprecher oft außerhalb des Hallradius, sodass der bei den Zuhörern ankommende Direktschallanteil zu

niedrig ist (Schullan et al., 2014). Um dem entgegenzuwirken, wird für diesen Bereich eine weitere Beschallungsebene hinzugefügt, die Delay-Line. Sie ist so positioniert, dass die Abstrahlbereiche der Hauptlautsprecher und der Delay-Line möglichst voneinander getrennt sind. Die Delay-Line deckt nur den vorgesehenen begrenzten Bereich ab, während der Pegel der Hauptanlage etwas reduziert wird (Schullan et al., 2014). Auch bei Sitzplätzen unterhalb von Rängen ist der Einsatz einer Delay-Line sinnvoll, da es bei diesen Plätzen oft zu einer Abschattung des Direktschalls kommt (Grzesinski, 2020). Somit ist die Hauptaufgabe einer Delay-Line „den abfallenden Schalldruckpegel der Hauptbeschallung auszugleichen, und weiterhin [...] durch eine zusätzliche Höhenanhebung die Dämpfung der hohen Frequenzen durch die Luft aus[zugleichen]“ (Grzesinski, 2020, S. 385). Die Lautsprecher werden in einem zuvor berechneten Abstand zur Bühne aufgebaut. Je nach Raumgröße kann eine Delay-Line ausreichen, es können aber auch mehrere zum Einsatz kommen (Grzesinski, 2020).

Wie bereits in Kapitel 6.4.2 angeführt, muss das Signal jeglicher Stützlautsprecher, sowohl von Delay-Lines als auch Fills, auf das der Hauptbeschallung verzögert werden. Die erste Wellenfront muss für den Erhalt des Richtungsbezugs immer von der Bühne kommen. Die eigentliche Beschallung übernehmen die Stützlautsprecher (Ahnert & Goertz, 2008). Diese Variante der Delay-Einstellung folgt dem Gesetz der ersten Wellenfront. Alle Lautsprecher richten sich dabei nach dem von der Bühne abstrahlenden Primärschall. Die Verzögerungszeiten aller zusätzlichen Lautsprecher werden entsprechend dieser Urquelle angepasst. Der große Vorteil ist der bestehende Richtungsbezug, nachteilig sind die Reduktion der Sprachverständlichkeit und ein verwaschenes Diffusfeld (Schullan et al., 2014). Theoretisch ist auch eine impulsgenaue Delay-Einstellung möglich. Bei dieser wird „die Wiedergabe der zweiten Beschallungsebene um genau den Wert verzögert [...], bei dem sich die beiden Impulse im Diffusfeld überlagern, so wirkt durch Auslöschung das Diffusfeld weniger räumlich und somit besser durchhörbar“ (Schullan et al., 2014, S. 577). Dabei geht jedoch der Lokalisationsbezug verloren, was hinderlich für Beschallungen ist (Schullan et al., 2014).

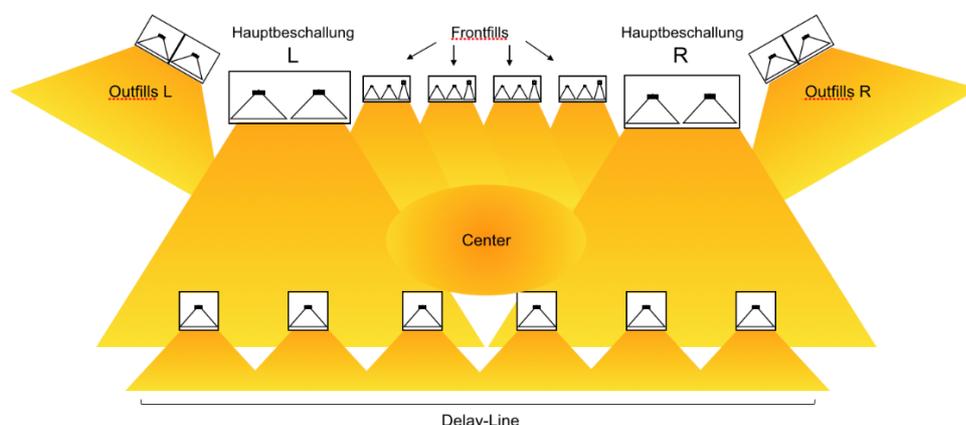


Abbildung 13: Positionen von Fülllautsprechern und der Delay-Line

In Anlehnung an (Grzesinski, 2020, S.385)

Neben den durch Delay-Lines kompensierten rückwärtigen Reihen, gibt es weitere unterversorgte Bereiche, die durch Stützlautsprecher aufgefüllt werden müssen. Dies geschieht durch verschieden positionierte Fills. In Abb. 13 ist eine Übersicht zu den Positionen der Delay-Line und möglichen Fülllautsprechern aufgezeigt.

Durch die vertikale Verschiebung der Hauptlautsprecher befinden sich die Hörerplätze direkt vor der Bühne außerhalb des Abstrahlbereichs. Der Richtungsbezug zur Bühne geht verloren bzw. verschiebt sich mittig oder seitlich nach oben. Mit sogenannten Frontfills, kleinen Lautsprechern direkt an der Bühnenvorderkante, kann das Problem umgangen werden (Schullan et al., 2014). Der Schall der Frontfills erreicht die Zuhörer vor den Arrays, womit das Gesetz der ersten Wellenfront greift. Aufgrund der Positionierung der Frontfills auf Ohrenhöhe reicht deren Wirkung nur für die ersten Reihen, bevor die Hauptanlage wieder übernimmt (Grzesinski, 2020).

Die zweite wichtige Ausführung sind die Outfills. Sie „beschallen die Randbereiche außerhalb der Hauptlautsprecher“ (Grzesinski, 2020, S. 385) und werden vor allem bei kleinen Bühnen oder in breiten Hallen eingesetzt.

Darüber hinaus gibt es die sogenannten Sidefills. Sie unterstützen die Monitorbeschallung der Künstler und werden rechts und links an der Bühne angeordnet. Sie sind meistens nur auf sehr großen Bühnen notwendig und müssen bei der Planung einer Beschallung berücksichtigt werden (Schullan et al., 2014). Grund hierfür sind die Pegel der leistungsstarken Monitorsysteme, die auch in die vorderen Zuhörerbereiche strahlen (Schullan et al., 2014).

Auf sehr großen Bühnen reicht die L/R-Hauptbeschallungsanlage nicht mehr aus, sodass ein unterversorgter Bereich in der Mitte der Zuhörerfläche entsteht. In diesem Fall kann die Lücke auch nicht durch Fills behoben werden. Es bedarf eines Centerclusters, eines weiteren Line Arrays, das in der Mitte der Bühne geflogen wird (Schullan et al., 2014). Meistens deckt der Centercluster nur den vorderen bis mittleren Publikumsbereich ab, um nicht unnötig das Diffusfeld anzuregen. Dadurch wird der Bereich ausreichend mit Direktschall versorgt und festigt gleichzeitig besonders in großen Sälen die Lokalisation der Schallquelle auf die Bühnenmitte (Schullan et al., 2014).

6.5.3 Positionierung Subwoofer

Während sich die geflogenen Line Arrays um die Hauptbeschallung kümmern, sind Subwoofer für die Wiedergabe tiefer Frequenzen von ca. 30 bis 120 Hz verantwortlich (Grzesinski, 2020). Vor allem bei Konzerten werden hohe Schalldruckpegel im Tieftonbereich gefordert (Schullan et al., 2014). Anders als bei den Line Arrays, werden Subwoofer meist auf dem Boden platziert, wodurch die akustische Ankopplung an den Raum genutzt werden kann (Schullan et al., 2014). Dadurch „erhöht sich der wirksame Pegel durch die phasengerechte Reflexion an der Bodenfläche um 6 dB. Werden zwei Subwoofer direkt nebeneinander betrieben, so erhöht sich der Schalldruckpegel um weitere 6 dB“ (Schullan et al., 2014, S. 579). Der Schall der

Subwoofer wird wegen der großen Wellenlängen von ca. 3 bis 11 m nur geringfügig vom Publikum absorbiert. Viel mehr treten Interferenzen aufgrund der Schallreflektion zwischen Publikum und Luft auf. „Prinzipiell wird die Pegelverteilung durch die Interferenz unruhiger, im Mittel aber gleichmäßiger als bei ungestörter Ausbreitung. In den meisten Fällen kann deshalb auf Subwoofer in abgesetzten Lautsprecherpositionen verzichtet werden“ (Schullan et al., 2014, S. 579).

Bei dieser Positionierung werden die einzelnen Subwoofer geradlinig in gleichmäßigen Abständen vor der Bühne angeordnet, wobei die Abstrahlcharakteristik durch individuell eingestellte Verzögerungszeiten der Subwoofer erzielt wird (Schullan et al., 2014). Laut Goertz (2008) können für eine ausgeglichene Bassverteilung alternativ die Subwoofer untereinander in ein eigenes Array verbaut und neben der Hauptbeschallung geflogen werden.

6.6 Beschallungssysteme

Zwei verschiedene Beschallungssysteme werden im Kontext dieser Arbeit betrachtet: P.A.s und ELAs. ELAs werden für Sprachübertragungen verwendet und sind meist dauerhaft vor Ort installiert. „Sie dienen der Beschallung von Fußballstadien, Kongresszentren, Veranstaltungshallen, Industrieanlagen, Kirchen und sonstigen Gebäuden“ (Pieper, 2011, S. 37). Soll nun Musik übertragen werden, bedarf es eines weiteren Systems, einer P.A.-Anlage. Sie eignen sich dazu, „akustische Ereignisse durch geeignete technische Ausrüstung einer größeren Menschenmenge hörbar zu machen“ (Pieper, 2011, S. 37). Diese Systeme finden vor allem in der Konzertbeschallung Anwendung, da sie leistungsstark sind und die Komponenten speziell für solche Zwecke entwickelt wurden (Pieper, 2011). P.A.-Anlagen sind fast nie fest installiert, sondern werden als mobiles System über einen begrenzten Zeitraum für eine spezifische Veranstaltung aufgebaut (Pieper, 2011). Die Ausführung einer P.A. kann dabei je nach Anwendung stark variieren. Sie kann „[v]on der Kleinanlage im Jugendzentrum mit 200 Zuhörern bis zur riesigen Open-Air-Beschallung für über 100 000 Festivalbesucher“ (Grzesinski, 2020, S. 382) eingesetzt werden. Im folgenden Kapitel werden Klein-P.A.s, Groß-P.A.s sowie die 100 Volt (V)-Technik genauer erläutert.

6.6.1 Klein-P.A.s

Der einfachste Aufbau einer Klein-P.A. besteht aus zwei Stativboxen für die Wiedergabe und einem Powermischer zum Verstärken und Mischen der Signale. Sie wird gerne als klassische Gesangsanlage bezeichnet, da mit diesem Aufbau neben akustischen Instrumenten und Keyboards hauptsächlich Gesang übertragen wird. Anwendung findet dieser Aufbau nur in kleinen Räumen und wird teilweise auch in Proberäumen genutzt (Pieper, 2011).

Vorteilig bei diesem System ist, dass es leicht zu transportieren sowie auf- und abzubauen ist. Auch die kostengünstige Realisierung ist ein großer Vorteil. Da die Mischung auf der Bühne

angefertigt wird, ist es schwierig den Klang im Raum abzuschätzen, was viel Erfahrung erfordert (Pieper, 2011).

Bei diesem P.A.-System können die tiefen Frequenzen nur schwach über die vorhandenen Lautsprecher abgebildet werden. Um dies zu ändern, laufen basshaltige Instrumente wie zum Beispiel der E-Bass nicht über die P.A., sondern über den Instrumentenverstärker (Pieper, 2011). Durch das Hinzufügen von Subwoofern, ausgehend von der klassischen Gesangsanlage, kann dem ebenfalls entgegengewirkt werden, wodurch sich zwei weitere Varianten der Klein-P.A. ergeben.

Die erste Möglichkeit ist die Klein-P.A. mit passiven Subwoofern. Wie die Bezeichnung besagt, werden hier ein oder zwei Subwoofer zu der bestehenden Anlage hinzugefügt. Es bietet sich an, die Subwoofer auf den Boden zu stellen und die bestehenden Lautsprecher auf diesen zu montieren. Das Signal wird über die Subwoofer in die oberen Lautsprecher durchgeschleift, wobei innerhalb der Bassboxen „passive Frequenzweichen (Tiefpässe) vorgeschaltet [sind], die ab ca. 100 Hz alle höheren Frequenzen bedämpfen“ (Pieper, 2011, S. 48). Der Einsatz von passiven Subwoofern ist mit verschiedenen Nachteilen verbunden. So ist die Flankensteilheit der passiven Filter unzureichend und es wird Leistung in Wärme innerhalb der Weichen umgewandelt (Pieper, 2011). Zudem „[funktioniert] die Angleichung der Lautstärken von Subwoofer und Ständerboxen [...] nur bedingt mit Vorwiderständen, was weitere Leistungsverluste und auch Verschiebungen der Weichen-Trennfrequenzen verursacht“ (Pieper, 2011, S. 49).

Bei der Verwendung einer Klein-P.A mit aktiven Subwoofern können diese Nachteile umgangen werden. Bei dieser Variante werden die Subwoofer und Top-Lautsprecher durch die aktive Frequenzweiche voneinander getrennt angesteuert. Sie teilt das Signal in einen Hoch- und Tieftonweg auf, wobei die Flankensteilheit der Filter innerhalb der Weiche die Schärfe der Trennung definiert und bei 24 dB/Oktave liegen sollte (Pieper, 2011). Die Subwoofer übertragen in der Regel Monosignale, da sich sonst die einzelnen Basssignale auslöschen würden (Pieper, 2011).

6.6.2 Groß-P.A.s

Bei größeren Veranstaltungen in Sälen oder Hallen reicht die Leistung einer Klein-P.A. nicht mehr für die Beschallung aus und muss größer dimensioniert werden. Dabei gibt es verschiedene Möglichkeiten eine Groß-P.A. abhängig von der Raumgröße und des benötigten Leistungsbedarfs aus verschiedenen Komponenten aufzubauen (Pieper, 2011).

Groß-P.A.s sind die typischen Beschallungsanlagen, die bei Konzerten in großen Hallen und im Open-Air-Bereich zu finden sind. Gerade bei den zuletzt genannten Veranstaltungen kann der Leistungsbedarf in Bereiche von hunderttausend Watt steigen (Pieper, 2011). Dabei wird im Durchschnitt nur eine wesentlich niedrigere Leistung in Anspruch genommen. Lediglich für die fehlerfreie Übertragung auftretender Pegelspitzen sind die hohen Leistungswerte

notwendig (Pieper, 2011). „Die stets praktizierte Überdimensionierung einer P.A. hat also lediglich die Aufgabe, genügend Headroom, sprich Aussteuerungsreserve, bereitzustellen“ (Pieper, 2011, S. 55). Allgemein teilt sich die Gesamtleistung einer P.A. ungleich auf die Frequenzbereiche auf. Während tiefe Frequenzen 70% der Endstufenarbeit beanspruchen, gelangen 20-25% an die Mittentöner und nur 5-10% an die Hochtöner (Pieper, 2011).

Bei Groß-P.A.s können neben dem Gesang alle Instrumente problemlos über die Anlage verstärkt werden. Konsequenterweise ist ein Powermischer unzureichend und muss durch ein separates Pult ersetzt werden (Pieper, 2011). Das FoH-Pult wird mittig in der Publikumsfläche positioniert und verarbeitet die Bühnensignale weiter. Die Summe wird über die Endstufen an die Lautsprecher zur Wiedergabe weitergeleitet (Pieper, 2011). Im Gegensatz zu Klein-P.A.s werden hier deutlich mehr Lautsprecher für die Beschallung benötigt. Üblicherweise werden Line Arrays dazu verwendet. Die Lautsprecherpositionen orientieren sich an den in Kapitel 6.5 aufgezeigten Anordnungen: Zwei an den Bühnenseiten geflogene Line Arrays zusammen mit einem möglichen Centercluster als Hauptbeschallung und je nach Raumgröße und -architektur weiteren Stützlautsprechern. Der zu übertragende Frequenzbereich wird durch aktive Frequenzweichen meist in drei Wege aufgetrennt, die anschließend einzeln verstärkt und über die passenden Lautsprecherkomponente, beispielsweise den Mitteltöner, wiedergegeben wird (Pieper, 2011).

Der Auf- und Abbau einer Groß-P.A. ist deutlich aufwändiger und die Umsetzung insgesamt kostenintensiver. Dies sind Gründe, weswegen sie erst ab einer gewissen Größe für Veranstaltungen und Konzerte eingesetzt wird (Pieper, 2011).

6.6.3 100 V-Technik

Bei ELA Anlagen wird mit der sogenannten 100 V-Technik gearbeitet. Diese Technik spielt in der vorliegenden Arbeit eine untergeordnete Rolle, wird aber zur Vollständigkeit kurz erläutert. Prinzipiell ist „[d]as Konzept von 100 V-Systemen [...], mit Hilfe von Übertragern oder Transformatoren alle Quellen (hier die Verstärker) und alle Empfänger (hier die Lautsprecher) so anzupassen, dass sie bei einer Spannung von genau 100 V ihre Nennleistung abgeben bzw. aufnehmen“ (Goertz, 2008, S. 466). Die ELA-Technik folgt demnach dem Prinzip eine hohe Spannung anzulegen, wodurch geringerer Strom fließt. Dies bringt den Vorteil, dass Kabel mit einem kleinen Leitungsquerschnitt verwendet werden können und die Leitungsverluste gering bleiben (Schullan et al., 2014). In der Regel haben diese Kabel einen Durchmesser von nur 0,5 Quadratmillimetern (mm²). Sie werden an die Lautsprecher angeschlossen, die „am Eingang wiederum einen kleinen Übertrager haben, an dem die Maximalspannung von 100 V für den Lautsprecher abwärts transformiert wird. Die Impedanz des Übertragers, abgeschlossen mit der üblichen Lautsprecherimpedanz von 4 bzw. 8 Ohm bestimmt die Leistungsaufnahme durch den Lautsprecher“ (Schullan et al., 2014, S. 609). Dabei werden so viele Lautsprecher geringerer Leistung an einem Verstärker betrieben, bis

die Summe ihrer Nennleistungen den Wert der maximalen Verstärkerleistung erreicht (Goertz, 2008). Zur Reduktion der Gesamtimpedanz werden die Überträgerimpedanzen parallel geschaltet (Schullan et al., 2014). So liegt beispielsweise die minimale Impedanz eines 100 W-Verstärkers bei 100 Ohm. „Dies entspricht 16 Lautsprecher mit 6 W Leistungsanpassung oder, wenn alle Lautsprecher nur mit halber Leistung betrieben werden, der doppelten Menge“ (Schullan et al., 2014, S. 609). Insgesamt bedeutet das, sobald der Spannungswert von 100 V erreicht ist, liegt die maximale Ausgangsleistung an, wovon sich auch die Bezeichnung dieser Technik ableitet (Friesecke, 2014).

Die Stärke der 100 V-Technik zeigt sich besonders dann, „wenn viele kleine Lautsprecher von einer zentralen Stelle aus über große Entfernungen versorgt werden müssen“ (Goertz, 2008, S. 468). So sind Kabellängen von mehreren hundert Metern zwischen den Lautsprechern und dem eigentlichen Sprechplatz nicht unüblich (Pieper, 2011). Die Nachteile liegen in den Verzerrungen, Sättigungseffekten und dem unzureichendem Dämpfungsfaktor der Übertrager, die sich je nach deren Dimensionierung entsprechend auswirken (Goertz, 2008).

Bei ELA-Anlagen handelt es sich meist um Festinstallationen, wobei deren Einsatz vielseitig ist (Goertz, 2008). So können einzelne Räume bis hin zu kompletten Gebäuden oder ganze Gelände dezentral beschallt werden (Pieper, 2011). Beispiele hierfür sind Schulen, Einkaufszentren, aber auch Bahnhöfe oder Flughäfen (Friesecke, 2014). Laut Schullan et al. (2014) sind sie auch in Opernhäusern, Theatern und Konferenzzentren zu finden.

7. Simulation

Beschallungen müssen im Vorfeld sorgfältig geplant werden, da vor Ort nur wenig Zeit für den Aufbau sowie für eventuelle Anpassungen zur Verfügung steht. Für eine effiziente Vorbereitung und Umsetzung müssen alle Komponenten der Beschallungsanlage definiert sein sowie ein eindeutiger Aufbauplan vorliegen (Schullan et al., 2014).

Raumakustische Simulationssoftwares sind hilfreiche Werkzeuge bei der Planung einer Beschallung (Ahnert & Tennhardt, 2008). Sie können raumgeometrische Daten so verarbeiten, dass „der zu beschallende Raum in all seinen akustisch wirksamen Einzelflächen abgebildet [wird]“ (Schullan et al., 2014, S. 610). Aus umfangreichen Datenbanken können Raumflächen mit realistischen Absorptionswerten der Sekundärstruktur wie Wandmaterialien versehen und für die Simulation verwendet werden. Daraus lassen sich anschließend weitere Parameter wie beispielsweise die Nachhallzeit berechnen (Ahnert & Tennhardt, 2008). Weiterhin können verschiedene Lautsprecher aus einer weiteren Datenbank gewählt und im Modell positioniert werden. Seit einigen Jahren sind in den Softwares exakte Lautsprecherdaten hinterlegt, wobei zusätzliche Aspekte wie die Luftdämpfung für die Simulation berücksichtigt werden. Dies ermöglicht die Entwicklung einer virtuellen, aber dennoch realistischen Beschallungssituation (Schullan et al., 2014). Zentrale Erkenntnisse, die aus Simulationen hervorgehen, sind die

Direktschallverteilung in den einzelnen Frequenzbereichen sowie die Hallradien und das Diffusfeld innerhalb des zu beschallenden Raumes. Diese helfen, die bisherige Lautsprecherpositionierung und Auswahl zu optimieren. Je nach Software ist es möglich, in die virtuell erstellte Beschallung reinzuhören (Schullan et al., 2014).

Neben den Simulationssoftwares gibt es die Methode der Auralisation. Damit ist es möglich in die am Computer erstellten Modelle reinzuhören. Gerade bei der Planung und dem Bau eines Gebäudes oder Raums ist die Auralisation hilfreich. So können die Auswirkungen der Primär- und Sekundärstruktur vorgehört und entsprechend angepasst werden (Fasold & Veres, 2003).

7.1 Verwendete Software

In dieser Arbeit wird mit der kostenlosen Software ArrayCalc von d&b Audiotechnik gearbeitet. d&b Audiotechnik ist eine deutsche Firma mit Standort in der Nähe von Stuttgart, die Audio-Systeme herstellt und entwickelt. Im Bereich Beschallung setzt d&b Audiotechnik mit seinen hochwertigen Lautsprechersystemen einen angesehenen Standard (*Über d&b*, o. D.). Mit der Software ArrayCalc lassen sich Beschallungsszenarien präzise simulieren, wobei durch integrierte Funktionen komplexe Aufbauten umgesetzt werden können (*ArrayCalc*, o. D.). Neben der Erstellung individueller Räume können aus einer Datenbank Modelle oder vorhandene CAD-Dateien in die Software importiert werden (*ArrayCalc*, o. D.).

Die Benutzeroberfläche von ArrayCalc unterteilt sich in verschiedene Bereiche, wobei sich auf der Startoberfläche ein Überblick zu den möglichen Operationen befindet. In dieser Simulation werden Erkenntnisse vor allem aus den Bereichen „Venue“, „Sources“, „Alignment“ und „3D Plot“ gewonnen. Im Bereich Venue kann ein Raummodell aus verschiedenen geometrischen Elementen gebaut werden. Dabei wird die Eigenschaft der Fläche als Hörfläche, Struktur oder Hindernis definiert. Das Modell wird in zwei Fenstern, in einer Profilansicht und einer Aufsicht dargestellt. Unter dem Reiter Sources befinden sich alle Einstellungen zur Wahl und Ausrichtung der Lautsprecher. Es können Arrays, Punktquellen, Sub-Arrays und Gruppen hinzugefügt werden. Graphisch werden der horizontale und vertikale Abstrahlwinkel sowie der Schallpegelverlauf über den modellierten Raum bei 200 Hz und 4000 Hz der ausgewählten Quelle dargestellt. Zusätzlich kann die Richtcharakteristik des Lautsprechers angezeigt werden. Unter diesem Reiter befindet sich zudem die Array-Processing Funktion, dessen Ergebnis ebenfalls graphisch einsehbar ist. Die Alignment-Sektion zeigt die Laufzeitunterschiede zwischen den verschiedenen Lautsprechersystemen sowie dem Subwoofersystem an. Diese können durch Hinzufügen passender, individueller Verzögerungszeiten behoben werden. Im 3D-Plot wird die Schallpegelverteilung verschiedener Frequenzen innerhalb des Modells dargestellt. Bis zu vier verschiedene Pegelverteilungen können zwischengespeichert und miteinander verglichen werden.

Bedingt durch die Software können ausschließlich Lautsprechermodelle von d&b Audiotechnik verwendet werden. Grundsätzlich kann bei ArrayCalc die Zuhörerhöhe definiert werden. Bei einem sitzenden Publikum wird von einer Höhe von 1,20 Meter (m), bei stehenden Zuhörern von 1,70 m ausgegangen.

7.2 Versuchsaufbau

Im folgenden Kapitel werden drei Räume mittels der beschriebenen Software modelliert und virtuell mit einer P.A.-Anlage zur Übertragung von Live-Musik beschallt. Dabei sollen die unterschiedlichen Herangehensweisen der Wahl der P.A.-Anlage mit deren Lautsprechern herausgearbeitet und verglichen werden. Für einen aussagekräftigen Vergleich der Beschallungsmöglichkeiten wurden die Räume nicht frei erfunden, sondern an existierende Veranstaltungsorte angelehnt. Zuerst werden die Räume modelliert und anschließend mit Lautsprechern ausgestattet. Dabei wird die Schallpegelverteilung stets bei den Frequenzen 50, 250, 1000 und 4000 Hz an verschiedenen Positionierungen verglichen.

In der Software kann kein Einfluss auf die Sekundärstruktur genommen werden. Für eine vollständige Planung müsste diese jedoch miteinbezogen werden, denn die Sekundärstruktur beschreibt die Oberflächenstrukturen des Rauminnen und beeinflusst damit die Schallausbreitung (Ahnert & Tennhardt, 2008). Die Primärstruktur hingegen beschreibt die Geometrie, die Zuschauerfläche und das Volumen eines Raumes (Ahnert & Tennhardt, 2008) und wird in der Simulation dargestellt. Je weiter losgelöst die Architektur und damit die Primärstruktur eines Raumes für den Anwendungszweck ist, desto umfangreicher wird der Einsatz von sekundären Mitteln, um den Raum akustisch aufzubereiten (Fasold & Veres, 2003). Aus den vorherigen Kapiteln ist deutlich geworden, dass bei Beschallungen eine gleichmäßige Schallpegelverteilung angestrebt wird. Bisher wurden aber keine Zahlenwerte für den Pegel genannt. Der Grund dafür ist, dass je nach Genre unterschiedliche Lautstärken erwartet werden. Während bei Jazz 80-85 dB ausreichen, steigt der Lautstärkepegel im Technobereich bis an die 100-105 dB, wohingegen bei Hardrock noch höhere Pegel möglich sind (Ahnert & Goertz, 2008). Zudem gilt, „dass bei Störpegeln über 85 dB [...] und/oder Nachhallzeiten von mehr als 3 s mit Schwierigkeiten zu rechnen ist, sowohl eine gute Sprachverständlichkeit zu erreichen, wie auch eine anspruchsvolle Konzertbeschallung für Populärmusik zu ermöglichen“ (Ahnert & Goertz, 2008, S. 498).

7.2.1 Raum 1: Café, Lokal, Proberaum

Für die erste Beschallungssituation wurde ein Veranstaltungsort mit geringer Kapazität gewählt. Diese Räumlichkeiten sind entweder kleine Proberäume oder wurden ursprünglich nicht für Beschallungen konstruiert und unterliegen einer anderweitigen Hauptnutzung wie beispielsweise in Cafés oder Lokalen mit kleiner Bühne und Live-Musik-Darbietungen (Pieper, 2011). Für dieses Modell wurde exemplarisch ein mehreckiger Raum mit knapp 93

Quadratmetern (m^2) zu beschallender Fläche gewählt. Die 2,5 m lange Bühne ist an der linken Raumkante angeordnet und im Vergleich zur Zuhörerfläche um 50 Zentimeter (cm) erhöht (vgl. Abb. 14). Es wird zudem von einem im Raum verteilten sitzenden Publikum ausgegangen. Der Anwendungszweck in Kombination mit der Raumgröße ermöglicht die Umsetzung dieser Beschallung mit einer Klein-P.A.-Anlage.

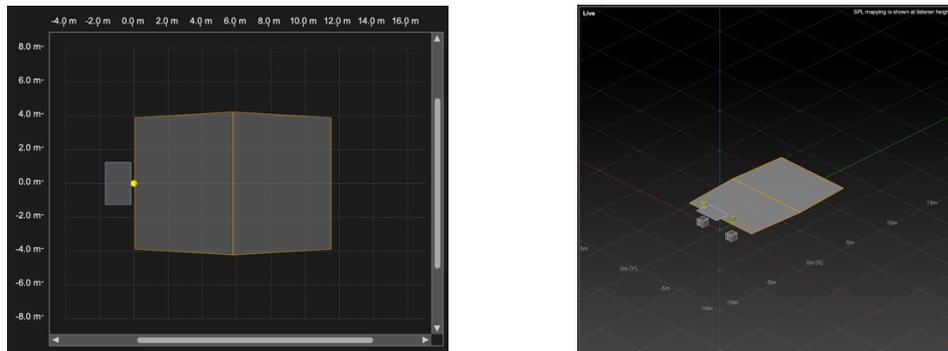


Abbildung 14: Raummodell Café/Lokal/Proberaum
eigene Darstellung in ArrayCalc (ArrayCalc V10, 2022)

Laut Pieper (2011) eignen sich für Klein-P.A.s 12/2er oder 15/2er Boxen. Die 12/2er mit 12“ Tieftontreiber und 1“ Hochtontreiber stellen einen guten Kompromiss zwischen Transportvolumen und guter Wiedergabequalität dar und können „auf relativ kurze Entfernungen ein breites Schallfeld erzeugen – ideal für kleine Räumlichkeiten“ (Pieper, 2011, S. 46). Qualitativ hochwertige Zweiwegelautsprecher mit 15“ Tieftöner ermöglichen im Vergleich eine bessere Basswiedergabe und besitzen gleichzeitig eine tiefere Trennfrequenz durch den 2“ Hochtontreiber (Pieper, 2011). Aus diesem Grund werden für die Simulation Zweiwegelautsprecher der d&b E-Series mit 12“ Tiefton- und 1.3“ Hochtontreibern mit einem Abstrahlwinkel von $110^\circ \times 50^\circ$ verwendet (*E12-D Lautsprecher aus unserer E-Serie*, o. D.). Das Ziel dieser Beschallungssimulation ist, die gesamte Zuhörerfläche möglichst gleichmäßig mit zwei Punktquellen und eventuell zusätzlichen Subwoofern zu beschallen. Der Schalldruckpegel auf der Bühne sollte dabei nicht zu hoch sein, um unter anderem das Rückkopplungsrisiko zu reduzieren. Es werden zwei verschiedene Lautsprecherpositionen miteinander verglichen. Beim ersten Aufbau werden die Lautsprecher rechts und links an der Bühnenvorderkante auf Stativen aufgestellt. Im Anschluss werden die Lautsprecher ausgerichtet, bis der Schalldruckpegel über einen möglichst großen Frequenzbereich gleichmäßig über die Raumfläche verteilt wird. In der Simulation sind sie in einem Abstand von 1,8 m voneinander aufgestellt und strahlen aus einer Höhe von 2,5 m ab. Sie werden ohne horizontale und vertikale Winkelung geradlinig auf die Publikumsfläche gerichtet. Die Abb. 15 zeigt die Schallpegelverteilung bei 50, 250, 1000 und 4000 Hz. Im Bereich der unteren Mitten ist der Pegel in direkter Bühnennähe am höchsten und nimmt mit zunehmender Entfernung

ab. Bei 4 kHz ist dieser Bereich mit am geringsten versorgt. Zu den Raumecken hin sinkt der Pegel ebenfalls. Im Bereich von 250 Hz ist der Schalldruckpegel auf der Bühne am lautesten.

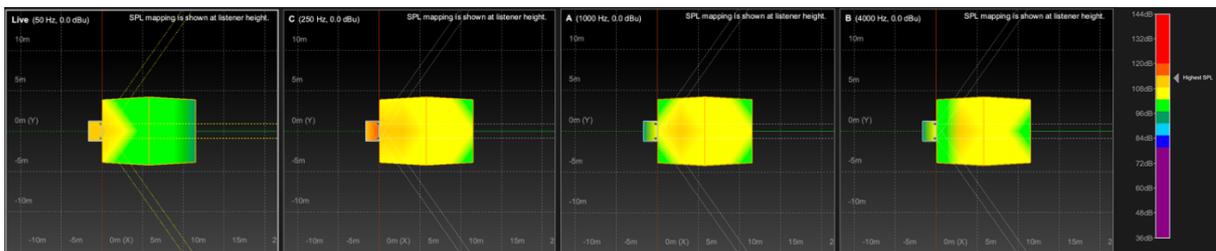


Abbildung 15: Schallpegelverteilung der Top-Lautsprecher
eigene Darstellung in ArrayCalc (ArrayCalc V10, 2022)

Tiefe Frequenzen werden unzureichend und nur in Bühnennähe abgebildet. Daher wird jeweils ein Subwoofer unterhalb der Punktquellen auf dem Bühnenboden angeordnet. In diesem Fall wurde ein aktiver kardioider Subwoofer der V-Serie (V-SUB) mit nach vorne strahlendem 18“ Treiber und einem entgegengerichteten 12“ Treiber verwendet (*V Subwoofer mit hoher Leistungsstärke*, o. D.). Der passende Subwoofer der E-Serie (B4-SUB) konnte für die Simulation nicht verwendet werden, da keine Daten für diesen in der Software vorliegen. Die Abbildung der tiefen Frequenzen verbessert sich deutlich durch das Hinzufügen der Subwoofer (vgl. Abb. 16). Der vordere Zuhörerbereich wird nun im Vergleich zum hinteren mit wesentlich mehr Schallenergie versorgt. Um den Schalldruckpegel wieder gleichmäßiger zu verteilen wird die Abstrahlung der tiefen Frequenzen bei den Top-Lautsprechern gefiltert und reduziert.

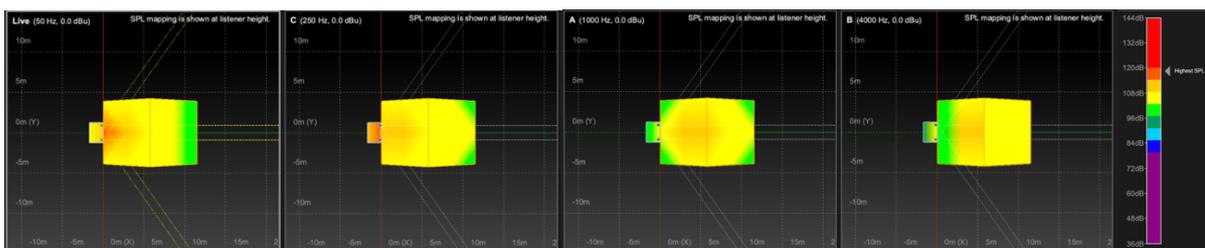


Abbildung 16: Schallpegelverteilung mit zwei zusätzlichen Subwoofern und gefilterten Top-Lautsprechern
eigene Darstellung in ArrayCalc (ArrayCalc V10, 2022)

Die Schallwellen der Top-Lautsprecher und Subwoofer treffen zu unterschiedlichen Zeitpunkten bei den Zuhörern ein und müssen deshalb aufeinander angepasst werden. Die Signale der Subwoofer treffen zuerst auf den Hörer und werden deshalb auf die Top-Lautsprecher verzögert. In ArrayCalc können Testpunkte in der gesamten Zuhörerfläche gewählt und auf Laufzeitunterschiede kontrolliert werden. Die Abb. 17 zeigt die unangepassten sowie die korrigierten, zeitgleich ankommenden Schallwellen der Systeme.

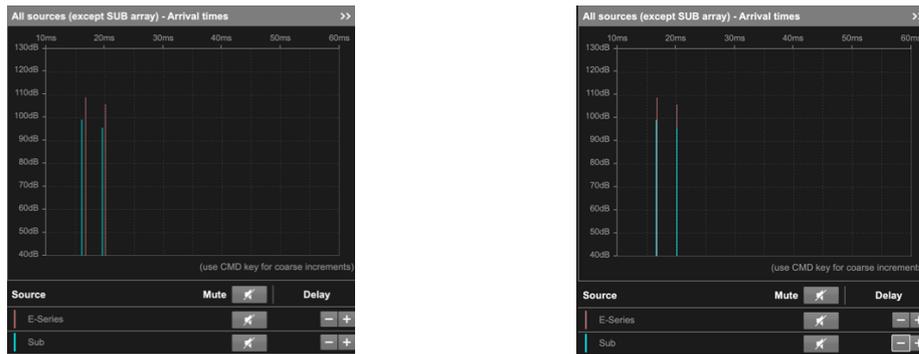


Abbildung 17: Laufzeitanpassung - Verzögerung der Subwoofer auf das Hauptsystem (rechts)
eigene Darstellung in ArrayCalc (ArrayCalc V10, 2022)

Bei der zweiten Aufbauvariante werden die Lautsprecher nicht auf, sondern direkt neben der Bühne positioniert. Sie stehen auf dem Boden und befinden sich auf einer Höhe von 2 m. Der Abstand zwischen den Lautsprechern hat sich verdoppelt und beträgt 3,6 m. Zur besseren Vergleichbarkeit wurden auch hier die Lautsprecher weder vertikal noch horizontal gewinkelt. Der wesentliche Unterschied liegt in der gleichmäßigeren Schallpegelverteilung über die verschiedenen Frequenzbereiche auf die Zuhörerfläche. Die Punktquellen verteilen den Schall über die Raumbreite gleichmäßiger, was vor allem in den Frequenzen ab 4 kHz gut erkennbar ist. Zu den Raumecken sinkt auch hier der Pegel leicht ab. Auch die Schallenergie der Subwoofer ist deutlich ausgeglichener im Raum verteilt und erzeugt keine auffälligen Hörerpunkte mit deutlich höheren Schallpegeln direkt vor der Bühne (vgl. Abb.18). Bei dieser Positionierung ist die Filterung der Punktquellen durch die CUT-Funktion nicht zwingend notwendig. Vor der Bühne erhöht sich der Schallpegel etwas, jedoch wird der hintere Bereich besser ausgeleuchtet. Ein weiterer Vorteil dieser Anordnung liegt in dem vergrößerten Abstand zwischen den Mikrofonen und Lautsprechern. Dieser hilft, den Rückkopplungseinsatz abzusenken. Für den Pegel auf der Bühne macht die veränderte Positionierung nur einen geringfügigen Unterschied. Dennoch ist diese Lautsprecheraufstellung aufgrund der gleichmäßigeren Verteilung der vorherigen zu bevorzugen.

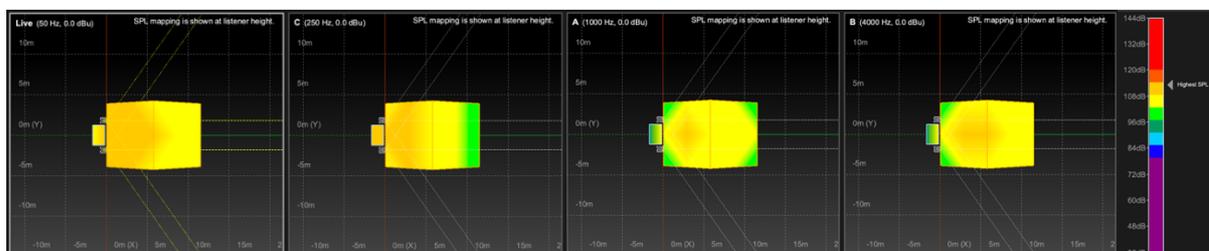


Abbildung 18: Schallverteilung der Top-Lautsprecher und Subwoofer neben der Bühne
eigene Darstellung in ArrayCalc (ArrayCalc V10, 2022)

Um die Wichtigkeit der Wahl der Punktquellen hervorzuheben, wird im Vergleich zu den vorherigen Aufbauten der Unterschied zu einem Lautsprechersetup mit kleinerem Treiber und

schmalere Abstrahlverhalten von $90^\circ \times 50^\circ$ aufgezeigt. Die Positionierungen auf und neben der Bühne liefern ähnliche Ergebnisse. Der Pegel ist im Mittel 10 dB niedriger als bei den zuvor verwendeten Lautsprechern, wobei der Publikumsbereich mittig vor der Bühne mit der meisten Schallenergie versorgt wird. Tiefe Frequenzen werden durch diese Punktquellen kaum abgebildet (vgl. Abb. 19). Der Einsatz von Subwoofern ist daher unumgänglich und bewirkt eine deutliche Verbesserung im unteren Frequenzbereich. Insgesamt eignen sich die alternativen Punktquellen jedoch nicht für die Beschallung des Raumes.

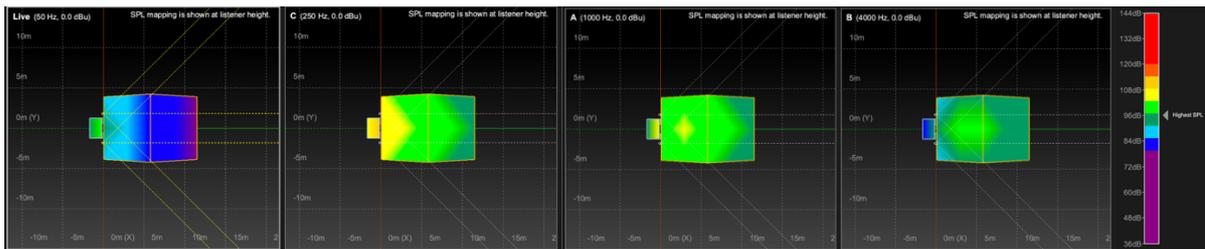


Abbildung 19: Lautsprecher mit kleineren Treibern und 90×50 Abstrahlcharakteristik (ohne Subwoofer)
eigene Darstellung in ArrayCalc (ArrayCalc V10, 2022)

7.2.2 Raum 2: Kleine Konzerthalle

Für das zweite zu beschallende Raummodell wurde ein größerer Veranstaltungsort gewählt. Hier beträgt die Kapazität zwischen 1000 bis 2000 Zuschauer. Diese Veranstaltungsgröße ist oft bei Konzerten von weniger bekannten Künstlern vorzufinden. Venues wie die Alte Feuerwache in Mannheim oder das LKA Longhorn in Stuttgart wurden für die Raumabmessungen als Vorlage herangezogen. Oft befindet sich im hinteren oder seitlichen Bereich der Konzerthalle eine Bar mit eventueller Sitzmöglichkeit. In der Mitte der Zuhörerfläche wird nun ein kleiner Bereich abgesperrt, in dem das FoH-Pult aufgebaut wird (*Technical Rider*, 2021; gGmbH, 2016).

Wie in der Simulation zuvor werden auch hier die gleichen Anforderungen gestellt und Ziele verfolgt. Dieser Raum ist mit fast 650 m^2 Zuhörerfläche deutlich größer. Er ist in Form eines langen, schmalen Trichters aufgebaut, der zur hinteren Raumkante breiter wird. Es wird von einem stehenden Publikum ausgegangen, sodass die Schalldruckpegelverteilung auf 1,7 m Höhe betrachtet wird. Die Bühne ist gegenüber der Bodenfläche um einen Meter erhöht, 13 m lang und 4,5 m tief (vgl. Abb. 20).

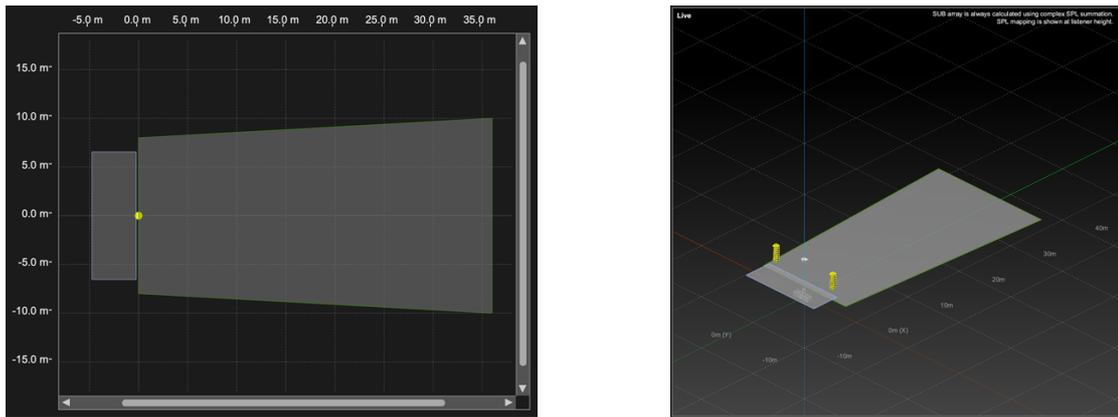


Abbildung 20: Raummodell kleine Konzerthalle
eigene Darstellung in ArrayCalc (ArrayCalc V10, 2022)

Für die Beschallung wird nun eine Groß-P.A. mit Line-Array-Systemen und Subwoofern verwendet. Die zentrale unterteilte L/R-Hauptbeschallung wird durch zwei Line Arrays, bestehend aus V8 Lautsprechern der V-Serie, realisiert. Die Lautsprecher beinhalten ein passives Dreiwegesystem mit zwei 10“ Tieftontreibern, einem horngeladenen 8“ Mitteltöner und zwei 1,4“ Hochtontreibern. Der Abstrahlwinkel beträgt 80° (V8 Lautsprecher aus unserer V-Serie, o. D.). Für die Subwoofer wird dasselbe kardioide Modell, V-SUB mit 18“ und 12“ Treibern, wie in der Simulation zuvor verwendet. Die Line Arrays bestehen aus acht Elementen und werden symmetrisch zur Bühnenmitte in einem Abstand von 11 m und in einer Höhe von 6 m geflogen. Sie befinden sich 30 cm vor der Bühnenkante, sodass sich die Abstrahl- und Aufnahmebereiche der Lautsprecher und Mikrofone nicht überschneiden. Die Arrays werden nicht in ihrer horizontalen Ausrichtung gewinkelt. Die vertikale Winkelung zwischen den einzelnen Array-Elementen wird für jedes individuell eingestellt, sodass die gesamte Publikumsfläche mit Schallenergie abgedeckt wird. Für den ersten Aufbau betragen diese Winkel zwischen 0° und 2° (vgl. Abb. 21).

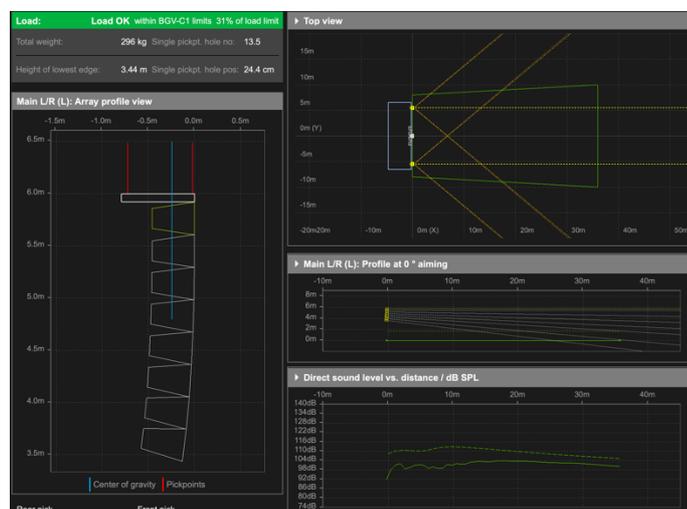


Abbildung 21: Aufbau der Line-Array-Hauptbeschallung
eigene Darstellung in ArrayCalc (ArrayCalc V10, 2022)

Der Zuhörerbereich direkt vor der Bühnenkante wird im Vergleich zu der restlichen Fläche geringer von den Line Arrays mit Pegel versorgt. Aufgrund ihrer Ausrichtung strahlen sie weniger Energie in diesen Bereich ab. Eine steilere Winkelung der Elemente oder die Verlängerung des Arrays bewirken dabei nicht die gewünschte Verbesserung. Während in der Raummitte punktuell zu hohe Schalldruckpegel entstehen, bleibt der vordere Bereich unterversorgt. Die Herausforderung ist, die größtmögliche Fläche von der Bühne bis hin zu den seitlichen und der hinteren Raumkante mittels einer passenden Line Array Länge gleichmäßig zu beschallen.

Da das Line Array die ersten Publikumsreihen nicht erreicht, werden Fülllautsprecher eingesetzt. Dafür gibt es zwei Möglichkeiten: Die erste Option beinhaltet, Punktquellen an der vorderen Bühnenkante zu positionieren. In diesem Fall sind das passive Zweiwegehochleistungslautsprecher mit einem Abstrahlverhalten von $100^\circ \times 40^\circ$ (Y10P Lautsprecher aus unserer Y-Serie, o. D.). Diese Aufstellung hat den Vorteil, dass hauptsächlich nur die ersten Publikumsreihen von diesen Quellen erreicht werden und mit zunehmender Entfernung deren Einfluss deutlich nachlässt. Die Frontfills werden 30 cm weit auseinander mit einem Winkel von 45° zueinander positioniert. Die zweite Variante unterscheidet sich darin, dass keine Punktquellen, sondern ein einzelnes Array-Element mittig vor der Bühne geflogen wird. Es wird wie die Hauptbeschallung auf 6 m Höhe angeordnet und für eine bessere Erfassung der vorderen Bereiche vertikal um 10° zur Bodenfläche geneigt. Werden nun die Schallabstrahlungen dieser Lautsprecher isoliert betrachtet, wird der Unterschied sehr deutlich. Die bodennahen Frontfills decken die vorderen Publikumsreihen wesentlich zielgerichteter über die Frequenzbereiche ab, als der geflogene Lautsprecher und eignen sich damit für diese Situation besser (vgl. Abb. 22). Aus diesem Grund wird im weiteren Verlauf mit den Punktquellen als Frontfills gearbeitet.

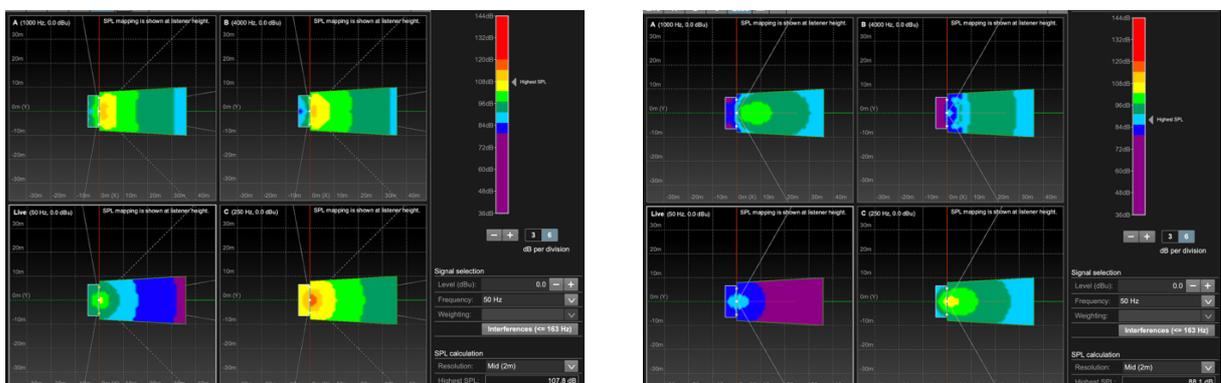


Abbildung 22: Schallpegelverteilung der Frontfills (links) und Centerlautsprecher (rechts)

eigene Darstellung in ArrayCalc (ArrayCalc V10, 2022)

Nachdem die Hauptbeschallung und Frontfills festgelegt wurden, müssen die Subwoofersysteme mit einbezogen werden. Hierbei werden zwei Positionierungen verglichen:

Die Subwoofer auf dem Boden oder im Line Array mit integriert. Im ersten Aufbau werden die Subwoofer nach dem Zahnlückenprinzip auf dem Boden positioniert. Dadurch kann die Ankopplung der Subwoofer an den Boden genutzt werden. Es werden vier Lautsprecher in einem Abstand von 67 cm nebeneinander aufgestellt, die zusammen eine keulenförmige Abstrahlcharakteristik ergeben. Werden nur die Subwoofer angesteuert und die Abstrahlung bei 50 Hz betrachtet, ist der Schalldruckpegel direkt vor der Bühne sehr hoch und nimmt mit zunehmender Entfernung zu den Raumbegrenzungen ab. Werden anstatt der vier nur zwei Subwoofer in einem Abstand von 40 cm angeordnet, ändert sich die Abstrahlcharakteristik nur wenig. Der über den Raum abgestrahlte Schalldruckpegel nimmt zu den hinteren Raumbereichen schneller ab.

Für die zweite Variante werden die Subwoofer in das Line Array der Hauptbeschallung integriert. In diesem Fall wird das oberste Element durch einen Subwoofer ersetzt und über den Fullrange-Lautsprechern angeordnet. Die Ausrichtung des Line Arrays wird nun entsprechend angepasst. Während die Höhe und der Abstand zwischen den Line Arrays nicht verändert werden, werden die Winkel der einzelnen Elemente neu eingestellt. Auch hier wird die alleinige Abstrahlung der Subwoofer betrachtet. Sie ist schwächer als bei den auf dem Boden positionierten Subwoofern. Jedoch sind der Verlauf und die Pegelabnahme gleichmäßiger, sodass sich jeweils für den vorderen, mittleren und hinteren Raumbereich gleiche Basspegel ergeben. Da bei der vorherigen Variante hauptsächlich mit vier Subwoofern gearbeitet wurde, werden für den Vergleich zusätzlich zwei weitere Subwoofer zu dem Line Array hinzugefügt (vgl. Abb. 23). Aber auch hier spiegelt sich der gleiche Zustand lediglich mit höheren Schallpegeln wie bei den zwei Subwoofern wieder. Der Unterschied beider Positionierungen zeigt sich nur in den Tiefen, sobald die Line Arrays hinzukommen gleicht sich dieser aus.



Abbildung 23: Abstrahlung der Subwoofer bei 50 Hz am Boden (links) und im Line Array (rechts) mit jeweils vier Subwoofern

eigene Darstellung in ArrayCalc (ArrayCalc V10, 2022)

Nachdem die Komponenten und deren Positionen aufgezeigt wurden, gibt es weitere Möglichkeiten, das Setup zu optimieren. Es wird geprüft, ob die Filterung der

Frequenzabstrahlung der Line Arrays durch die CUT-Funktion sowie der Subwoofer eine Verbesserung in der Gleichmäßigkeit der Schallverteilung bewirkt. Für die oberen Mitten und Höhen ist der Unterschied gering. Im Bereich der unteren Mitten und um 100 Hz hingegen wirkt sich die Filterung deutlich aus. Die auf den Raum verteilte Schallenergie wird zum einen etwas reduziert und zum anderen werden die Punkte hohen Schalldrucks ausgeglichener. Zudem wird das Array-Processing angewandt. Bei diesem werden die Einstellungen der einzelnen Array-Elemente fixiert, sodass nur noch Gruppenfunktionen verfügbar sind. Das Array-Processing dient der Optimierung des montierten Line Arrays, indem der Abstrahlbereich in eine Front-, Central- und Rear-Sektion eingeteilt werden kann. Für jede Sektion wird eine separate Anpassung vorgenommen. In diesem Fall wurde der Raum ebenfalls in diese drei Abschnitte unterteilt und die Pegel der Central- und Rear-Sektion leicht angehoben, wodurch sich wie in Abb. 24 ersichtlich, der Frequenzgang geglättet und damit verbessert hat.

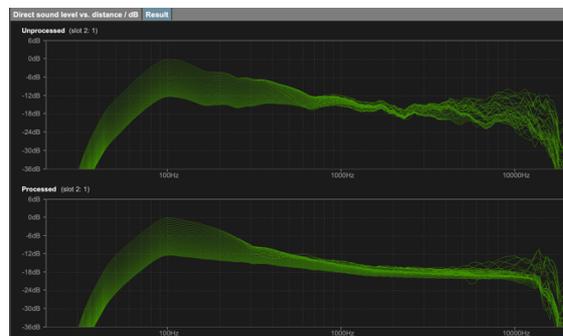


Abbildung 24: Array-Processing der Line Arrays

eigene Darstellung in ArrayCalc (ArrayCalc V10, 2022)

Wie auch zuvor müssen die Laufzeitunterschiede zwischen den Line Arrays und den Frontfills korrigiert werden. Dies ist nötig, damit die vordersten Zuhörerreihen, die durch die Frontfills versorgt werden, das Schallereignis von der Bühne aus orten. Treffen die Schallwellen der Arrays vor den Frontfills ein, verschiebt sich gemäß dem Gesetz der ersten Wellenfront die Lokalisation nach oben. Das Subwoofersystem wird anschließend auf die Hauptlautsprecher angepasst (vgl. Abb. 25). Hierbei wird auf die Phasenausrichtungen der Systeme geachtet. Durch die Wahl passender Testpunkte wird die Verzögerung der Subwoofer so eingestellt, dass die bestmögliche Ausrichtung zustande kommt.

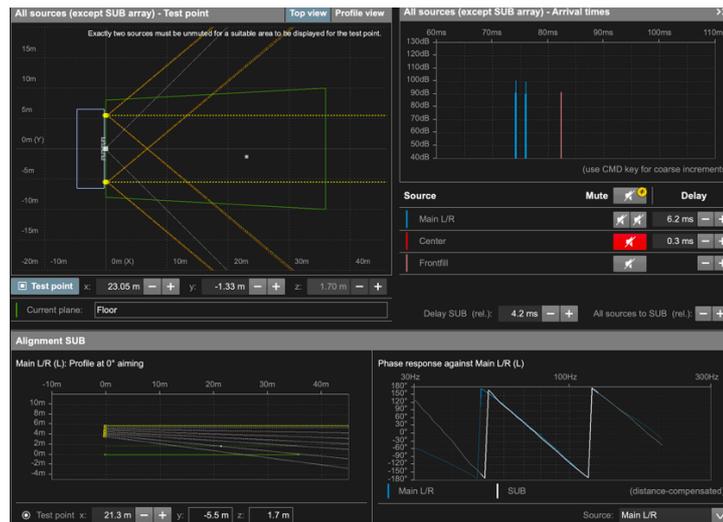


Abbildung 25: Angepasste Verzögerungszeiten der einzelnen Systeme
eigene Darstellung in ArrayCalc (ArrayCalc V10, 2022)

Damit ergibt sich die in Abb. 26 dargestellte mögliche Beschallung mit den eben beschriebenen Lautsprecherpositionen und folgender Schallverteilung über die Frequenzbereiche hinweg:

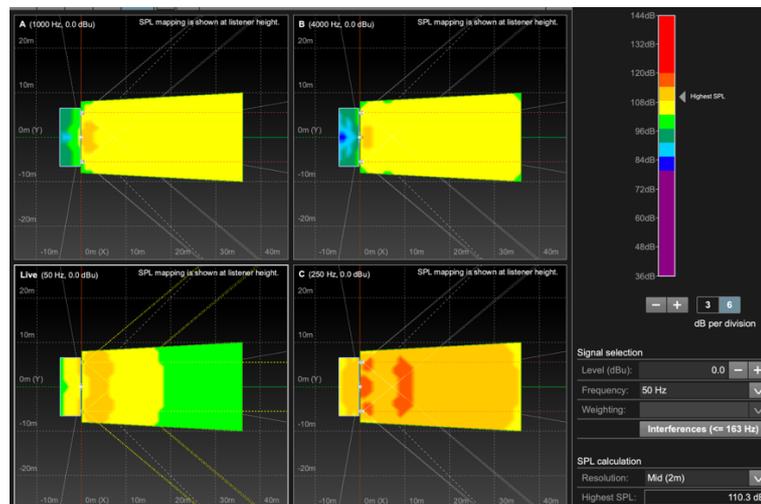


Abbildung 26: Mögliche Beschallung mit zwei geflogenen Subwooffern
eigene Darstellung in ArrayCalc (ArrayCalc V10, 2022)

7.2.3 Raum 3: Mehrzweckarena

Die dritte Beschallung soll ein großes Hallenkonzert mit über 15.000 Zuschauern widerspiegeln. Veranstaltungen dieser Größe sind aufgrund des hohen Aufwands und der Kosten nur sehr populären Künstlern vorbehalten (Pieper, 2011). Für die Erstellung des Raummodells wurden weltweit bekannte Mehrzweckarenen wie die O2 Arena in London, der Ziggo Dome in Amsterdam, der Madison Square Garden in New York oder auch die Schleyer Halle in Stuttgart als Orientierung genutzt. Die Kapazität liegt dabei zwischen 15.500 bis knapp

21.000 Zuschauerplätzen (Wikipedia contributors, o. D.; *Schleyerhalle: Hallenduo im Neckarpark*, o. D.).

Die modellierte Räumlichkeit besitzt eine ca. 2310 m² große Bodenfläche, auf der sich das stehende Publikum befindet. Zusätzlich schließen Ränge seitlich und hinten an die Bodenfläche an. Die Ränge sind durchgehend in einen oberen und einen unteren Rang aufgeteilt, wobei von sitzenden Zuhörern ausgegangen wird. Mit über 26 m Breite, einer Tiefe von 12,5 m sowie einer Höhe von 1,5 m ist die Bühne entsprechend der Arena größer dimensioniert (vgl. Abb. 27).

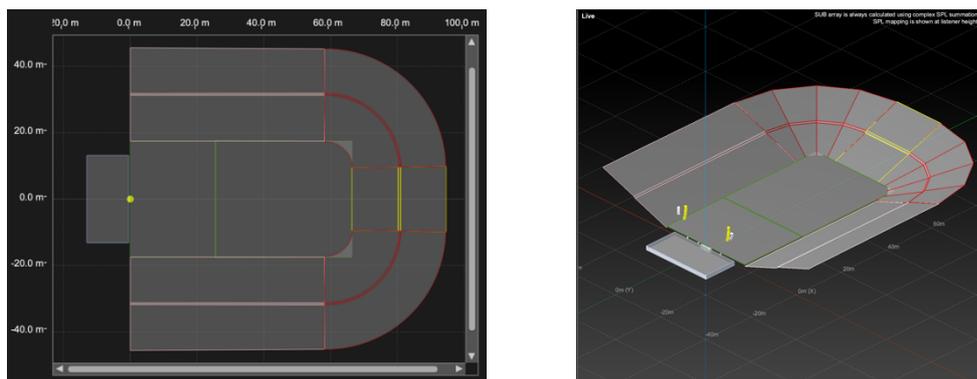


Abbildung 27: Raummodell Mehrzweckarena
eigene Darstellung in ArrayCalc (ArrayCalc V10, 2022)

Um eine solche Räumlichkeit zu beschallen, bedarf es einer sehr leistungsstarken Groß-P.A. mit diversen zusätzlichen Fülllautsprechern. Es werden die bereits bekannten Lautsprecher der vorherigen Simulationen verwendet. Für die Hauptlautsprecheranlage werden Line Arrays aus V8 und V12 Elementen kombiniert. Der Unterschied der V12 Lautsprecher liegt in dem breiteren horizontalen Abstrahlverhalten von 120° statt 80° (V12 Lautsprecher aus unserer V-Serie, o. D.). Für die Fills werden entweder Line Arrays mit V8 Lautsprechern oder die Punktquellen Y10P verwendet. Das Subwoofersystem wird erneut durch die V-SUBs realisiert. Zuerst wird die L/R-Hauptbeschallung umgesetzt, wobei zunächst die Länge der Line Arrays und die Position im Raum festgelegt werden. Für die große zu beschallende Fläche werden 16 Elemente für das Line Array in einer Höhe von 12 m geflogen. Sie befinden sich in einem Abstand von 19 m symmetrisch der Bühnenmitte und werden ohne horizontale und vertikale Neigung auf die Zuhörerfläche gerichtet. Der Winkel zwischen den Array-Lautsprechern hingegen wird mit zunehmender Länge des Arrays größer und reicht von 0° bis 7°. Die oberen 12 Elemente bestehen aus V8 Lautsprechern, während die unteren vier des Arrays V12 Lautsprecher sind. Der größere Abstrahlwinkel ermöglicht eine etwas breitere Schallabdeckung der Bodenfläche durch das Line Array. Die Hauptlautsprecheranlage deckt hauptsächlich entlang der Hauptstrahlachse die Innenfläche der Halle mit Schalldruckpegel ab. Vor allem in den oberen Rängen und Kurvenbereichen werden Defizite erkennbar, ebenso

direkt vor und seitlich der Bühne. Zudem wird deutlich, dass mit steigender Frequenz die Schallpegelverteilung geringer und ungleichmäßiger wird (vgl. Abb. 28).

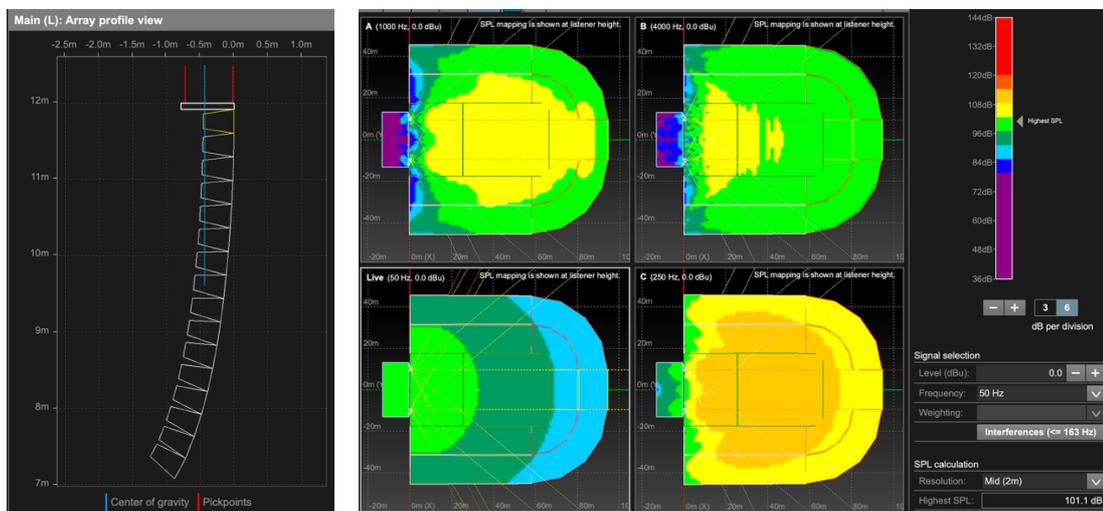


Abbildung 28: Schallpegelverteilung der Line Arrays, der Hauptbeschallungsanlage
eigene Darstellung in ArrayCalc (ArrayCalc V10, 2022)

Um diesen Defiziten entgegenzuwirken, kommen Fills zum Einsatz. Für den Front of Stage Bereich werden, wie in der zweiten Simulation Frontfills an der Bühnenvorderkante verbaut. In diesem Fall befinden sich vier Punktquellen in einem Abstand von jeweils 5 m zueinander, deren Membranen auf 1,8 m Höhe positioniert sind (vgl. Abb. 29 (links)). Sie werden in ihrer horizontalen Ausrichtung angepasst. Die beiden äußeren Fills sind um $\pm 35^\circ$, die inneren zwei um $\pm 10^\circ$ ausgerichtet, um möglichst entlang der gesamten Bühnenbreite die ersten Reihen mit Schall zu versorgen. Kurz vor den seitlichen Rängen ist ein Einbruch im Pegel erkennbar. Vergleichsweise wurden sechs anstatt vier Frontfills verwendet, doch auch diese Anordnung wirkt dem vorliegenden Problem nur bedingt entgegen. Insgesamt ist der Wirkungsbereich der Frontfills eingeschränkt. Dennoch beschallen sie die Bereiche, die das Line Array nicht direkt erreicht und sorgen damit für die passende Lautstärke vor der Bühne.

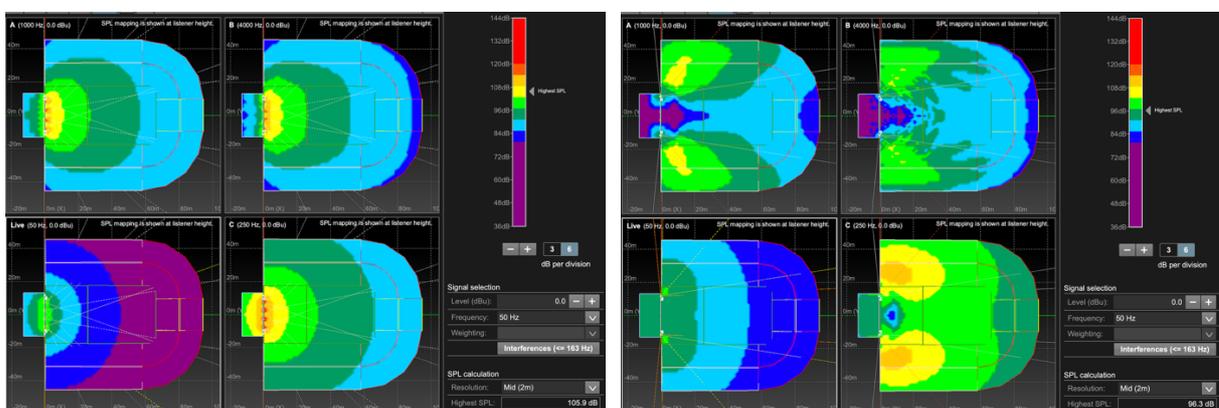


Abbildung 29: Abstrahlbereiche der Frontfills (links) und Outfills (rechts)
eigene Darstellung in ArrayCalc (ArrayCalc V10, 2022)

Die vorderen seitlichen Ränge werden jeweils durch ein Outfill gestützt (vgl. Abb. 29 (rechts)). Dafür werden zwei weitere Line Arrays neben den Hauptarrays geflogen. Diese bestehen aus acht Elementen mit V8 Lautsprechern und werden einen Meter tiefer auf 11 m positioniert. Der Abstand zwischen den Outfills beträgt 24 m, wobei sie um -1° vertikal geneigt und um 49° horizontal gewinkelt werden. Der Winkel zwischen den Array-Komponenten wird von 0° bis 8° eingestellt, sodass sie die zuvor benachteiligten vorderen seitlichen Ränge mit Schall ausleuchten.

Die L/R-Hauptbeschallung zusammen mit den Front- und Outfills ermöglichen meist eine gute Schallpegelverteilung über die verschiedenen Raumbereiche. Mit steigender Frequenz nimmt die ankommende Schallenergie zunehmend ab. An den hinteren Raumbegrenzungsflächen ist der Schalldruckpegel am geringsten. Die Filterung der Abstrahlung mittels der CUT-Funktion wirkt sich leicht auf die tiefen Frequenzen aus. Für den Bassbereich sind ohnehin leistungsstarke Subwoofer notwendig.

Für die Abbildung der tiefen Frequenzen werden zwei Subwooferanordnungen miteinander verglichen: die Wirkung eines geflogenen Sub-Arrays sowie deren Positionierung am Boden. Zuerst werden die Subwoofer wieder nach dem Zahnlückenprinzip auf dem Boden 50 cm vor der Bühne positioniert. Dabei werden 10 Lautsprecher in jeweils 40 cm Abständen in einer Reihe aufgestellt. Sie werden gerade in Richtung des Publikums ausgerichtet und nicht gewinkelt. Durch die individuelle Ansteuerung und Verzögerungswerte strahlen die Subwoofer den Schall in Form einer breiten Keulencharakteristik ab (vgl. Abb. 30 (links)). Für die beschallte Zuhörerfläche bedeutet das sehr hohe Pegel in Bühnennähe, die mit zunehmender Entfernung kreisförmig abnehmen. Der Pegelunterschied zwischen den vorderen und hinteren Raumbereichen ist ausgeprägt und beträgt mehr als 20 dB. Die unteren Ränge zusammen mit der hinteren Bodenfläche werden mit dem gleichen Pegel abgedeckt, ebenso wie die oberen Ränge und der gesamte hintere Rang. Werden statt der eingesetzten zehn Subwoofer nur acht verwendet, ändert sich das Abstrahlverhalten nicht. Lediglich die Bereiche des höchstmöglichen Schalldrucks werden kleiner und der Pegel nimmt über die Raumfläche schneller ab.

Im Gegensatz dazu ist bei einem separat geflogenen Sub-Array mit sechs gekoppelten Subwoofern die Pegelverteilung wesentlich gleichmäßiger (vgl. Abb. 30 (rechts)). Bei dieser Anordnung gibt es keine rot gefärbten Bereiche vor der Bühne mit Schallpegeln über 120 dB. Auch hier wird die der Bühne nahe gelegene Publikumsfläche mit einem höheren Pegel abgedeckt. Der komplette Raummittenbereich und die seitlichen oberen Ränge werden gleichmäßig versorgt, nur im oberen hinteren Rang sinkt der Schalldruckpegel. Wird das Sub-Array in seiner Länge verkleinert, tritt derselbe Effekt auf: Das Abstrahlverhalten ändert sich nicht und die Pegelabnahme findet schneller statt. Bezüglich der Positionierung werden die Sub-Arrays auf der gleichen Höhe neben den Haupt-Line-Arrays geflogen und sind 10,5 m von

der Bühnenmitte aus symmetrisch angeordnet. Sie werden ohne Neigung auf das Publikum gerichtet, wobei die einzelnen Elemente entweder 0° oder $2,5^\circ$ zueinander gewinkelt sind. Somit führt die Positionierung der Subwoofer in diesem Fall zu einem gravierenden Unterschied bei der Schallpegelverteilung der tiefen Frequenzen.

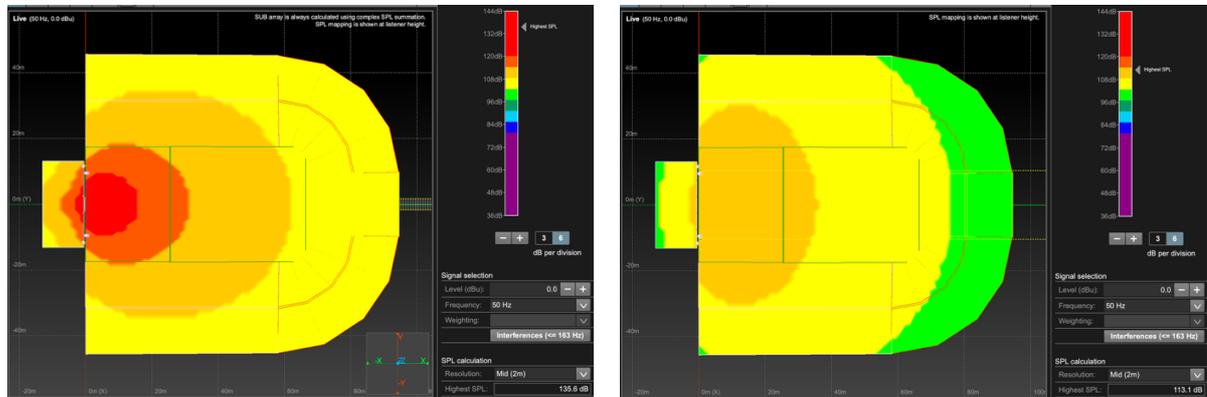


Abbildung 30: Vergleich zehn Subwoofer auf dem Boden (links) und als Sub-Arrays mit sechs Elementen (rechts)
eigene Darstellung in ArrayCalc (ArrayCalc V10, 2022)

Nach der Umsetzung der Hauptlautsprecheranlage mit Fülllautsprechern wurde der zum hinteren Raumbereich sinkende Schalldruckpegel in höheren Frequenzbereichen deutlich. Wenn hier ebenfalls die gleiche Pegelverteilung wie in der vorderen Raumhälfte erreicht werden soll, kann eine Delay-Line eingesetzt werden (vgl. Abb. 31). Diese sollte sich nicht mit den Sichtlinien des Publikums auf den Rängen kreuzen, sodass die Bühne stets sichtbar ist. Ein einzelner Lautsprecher ist für die Delay-Line nicht ausreichend, da die zu beschallende Fläche noch immer ausgedehnt ist und ansteigende Ränge vorliegen. Aus diesem Grund wird die Delay-Line durch ein weiteres Line Array mit acht Lautsprechern realisiert, das wie die L/R-Hauptbeschallung angeordnet wird. Es wird in einem Abstand von 45 m zur Bühne positioniert und um $\pm 12^\circ$ horizontal gewinkelt, um die hinteren Ränge und Kurvenbereiche zu erreichen. Die Winkel zwischen den Elementen betragen 0° bis 6° . Die Aufgabe der Delay-Line ist, nur den begrenzten Bereich mit Schallpegel abzudecken und die Hauptbeschallung zu unterstützen. Wird lediglich die Delay-Line zusammen mit der Hauptbeschallung betrachtet, wird der hintere Bereich etwas besser ausgeleuchtet, jedoch entstehen bei 4 kHz seitliche Einkerbungen und keine gleichmäßige Schallpegelverteilung.

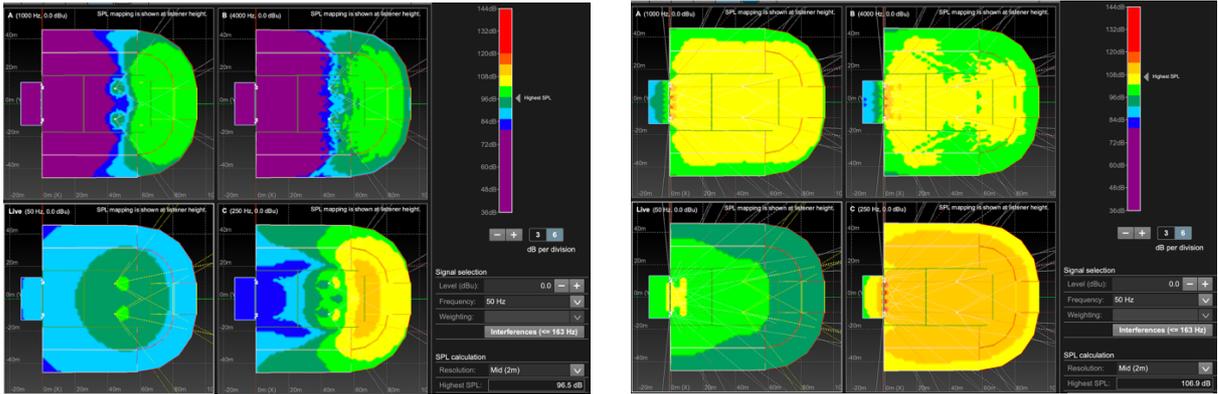


Abbildung 31: Schallpegelverteilung der Delay-Line alleine (links) und mit den Fullrange-Systemen (rechts) (ohne Subwoofer)

eigene Darstellung in ArrayCalc (ArrayCalc V10, 2022)

Für diese Beschallung wird eine Vielzahl an komplexen Lautsprechersystemen verwendet. Werden diese in ihrer Laufzeit und Phase nicht zueinander angepasst, treten einerseits Phasenprobleme auf, andererseits orten die Zuhörer beispielsweise an den vorderen seitlichen Rängen das Schallereignis nicht von der Bühne, sondern aus den Fülllautsprechern. Um das zu vermeiden, müssen auch hier alle Komponenten auf das Hauptsystem verzögert werden (vgl. Abb. 32). Während für die Fills und Delay-Line die Verzögerungswerte nach dem Eintreffen der Schallwellen an geeigneten Testpunkten erfolgen, wird das Sub-Array in der Phase angeglichen.

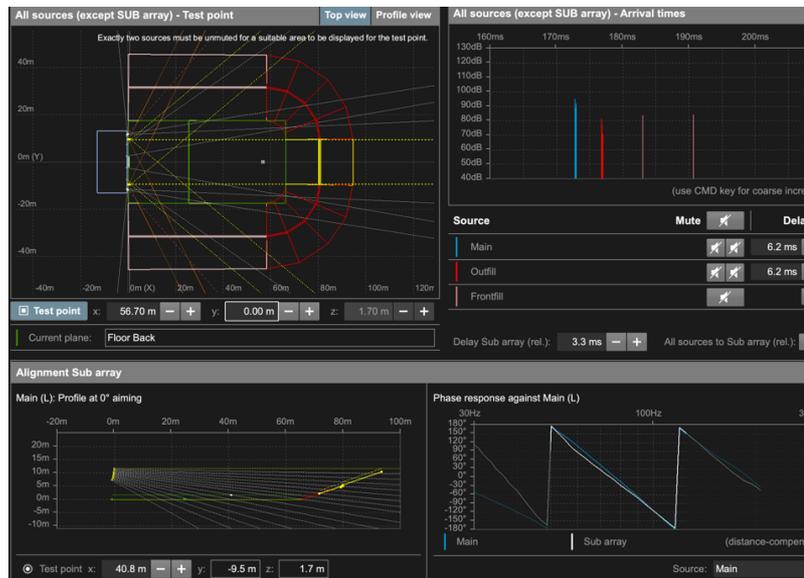


Abbildung 32: Angepasste Laufzeitverzögerung der bodennahen Subwoofer

eigene Darstellung in ArrayCalc (ArrayCalc V10, 2022)

Wie in der Simulation zuvor werden auch hier Optimierungen des Lautsprechersetups durchgeführt. Die Filterung der Abstrahlung der Lautsprechersysteme wirkt sich nur

geringfügig auf die Beschallung aus und wird daher nicht weiter betrachtet. Durch die Anwendung des Array-Processings hingegen können signifikante Verbesserungen in der Schallpegelverteilung erzielt werden. Das Array-Processing wird dabei für die L/R-Hauptbeschallung, aber auch für die Outfills und das geflogene Sub-Array angewendet. Für jedes Lautsprechersystem wird der Raum in einen Front-, Central- und Rear-Bereich unterteilt. Die Central- und Rear-Sektionen werden anschließend einzeln in ihrem Pegelverlauf um weniger als 1 dB angehoben, sodass sich der Frequenzgang glättet und ein gleichmäßigeres Ergebnis erzielt wird. Während das Array-Processing in der Simulation bei den Outfills gut funktioniert, ist die Verbesserung bei dem Sub-Array gering. Bei den Haupt-Line-Arrays können nur wenige Anpassungen durch das Array-Processing vorgenommen werden, sodass die Umsetzung realisierbar bleibt. Auch hier hilft das Processing, besonders die Bodenfläche und die unteren Ränge gleichmäßiger auszuleuchten. Das Array-Processing bietet die Möglichkeit einzelne Planes (Bereiche) zu beeinflussen. Wenn beispielsweise bei einem Konzert der hintere Rang nicht besetzt wird, kann dies berücksichtigt werden, indem dieser Bereich weniger mit Schallenergie versorgt wird. In der durchgeführten Simulation wird von einer voll besetzten Arena ausgegangen, sodass die gesamte Innenfläche mit Schallenergie versorgt werden muss.

Somit ergibt sich nach Berücksichtigung der Arbeitsschritte eine Möglichkeit für die Beschallung einer großen Mehrzweckarena. Tendenziell wird in dieser Simulation die Verwendung des geflogenen Sub-Arrays aufgrund der gleichmäßigeren Schalldruckpegelverteilung bevorzugt (vgl. Abb. 33). Dieser Aufbau zeigt wie auch in den vorherigen Simulationen keine perfekte Beschallung, sondern lediglich eine mögliche Umsetzung.

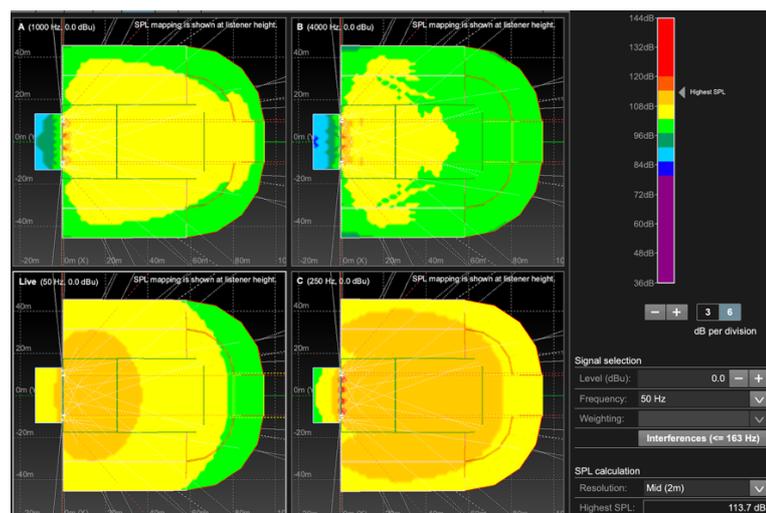


Abbildung 33: Beschallungsentwurf der Mehrzweckarena mit geflogenen Sub-Arrays
eigene Darstellung in ArrayCalc (ArrayCalc V10, 2022)

7.3 Evaluation

In der Simulation wurden drei unterschiedliche Räume modelliert und mit verschiedenen Beschallungssystemen ausgestattet. Obwohl bei allen Räumen das Ziel einer zentralen Frontalbeschallung verfolgt wurde, sind die Unterschiede zwischen den verwendeten P.A.-Anlagen deutlich.

Während für den kleinsten Raum eine Klein-P.A. ausreicht, musste diese in den anderen Räumen größer dimensioniert werden, um die Zuhörerfläche ausreichend mit Schall zu versorgen. Ein bedeutender Unterschied liegt zudem in der Nutzung der Räumlichkeiten. Raum zwei und drei spiegeln kleine Konzerthallen bzw. große Mehrzweckarenen wieder, in welchen ausschließlich Veranstaltungen und Events mit Beschallungen stattfinden. Im ersten Raum hingegen teilt sich die Aufmerksamkeit auf die Musikwiedergabe und einer weiteren Nutzung wie beispielsweise in Cafés. Zum Vergleich der Anlagen in den Räumen, werden die zentralen Ergebnisse gegenübergestellt.

Die Klein-P.A. des ersten Raums wurde aus zwei auf Stativen befestigten Punktquellen mit zwei Subwoofern neben der Bühne realisiert. Die Zuhörerfläche wird gleichmäßig mit Schall abgedeckt, zu den Raumecken hin fällt der Pegel etwas ab.

Verglichen dazu ist die Groß-P.A. Anlage wesentlich leistungsstärker. Sie besteht aus zwei Line Arrays mit jeweils acht Elementen und einem Frontfill mittig auf der Bühne, welche die Hauptbeschallung übernehmen. Neben der Ausrichtung der Line Arrays wurde deutlich, dass der Splay, der eingestellte Winkel zwischen den Array-Elementen, entscheidend für die gleichmäßige Ausleuchtung der Zuhörerfläche ist. Die Subwoofer wurden sowohl auf dem Boden positioniert als auch in das Line Array integriert. Der markanteste Unterschied liegt im Abstrahlverhalten und der verschiedenen starken Pegelverteilung über die Raumfläche.

Diese Erkenntnis hat sich auch im dritten Beschallungsmodell bestätigt. Im Gegensatz zu den vorherigen Anlagen sind die Line Arrays und Subwoofer für eine flächendeckende Beschallung nicht mehr ausreichend. Es werden zusätzliche Lautsprecherstützen in Form von Frontfills und Outfills sowie einer möglichen Delay-Line benötigt, um alle Zuhörerbereiche mit ausreichendem Schallpegel zu erreichen. Die Hauptanlagen müssen ebenfalls in ihrer Leistung durch Hinzufügen weiterer Elemente verstärkt werden. Je größer der Raum ist, desto mehr Subwoofer werden benötigt und desto länger wird das Line Array konzeptioniert. Dieses Beispiel repräsentiert bekannte Mehrzweckhallen, in welchen große Veranstaltungen mit über 15.000 Zuschauern stattfinden.

Durch die Simulation wurde ersichtlich, dass mit zunehmender Raumgröße eine höhere Lautsprecherleistung gefordert wird. Ausreichend hohe Schalldruckpegel reichen alleine nicht aus. Nur zusammen mit der passenden Auswahl und optimierten Positionierung der Lautsprechersysteme wird eine klanglich zufriedenstellende Beschallung möglich. Dieser Arbeitsschritt ist nicht zu unterschätzen, denn mit steigender Lautsprecheranzahl wird die

Ausrichtung zunehmend komplexer. Im Anhang befindet sich eine Zusammenstellung von Graphiken, welche die Auswirkungen unterschiedlicher Lautsprecherpositionen und -ausrichtungen zeigen. Der Anhang eins bis vier umfasst die erste Räumlichkeit, Anhang fünf bis acht die zweite und Anhang neun bis 15 die dritte Raumsimulation. Die Beschallungsansätze der drei Räumlichkeiten verdeutlichen, dass ausgehend von einem Konzept die Realisierung individuell an den Raum vorgenommen wird. Entsprechend der Form und Größe des Raums werden die Lautsprechersysteme angepasst. Durch die Simulation wurde die Variabilität bei der Umsetzung von mobilen Beschallungen aufgezeigt. Gleichzeitig wurden die auftretenden Probleme sowie die Herausforderung einer gleichmäßigen Schallpegelverteilung sichtbar.

Wichtige aus der Simulation gewonnene Erkenntnisse bezüglich der Sitzreihenüberhöhungen decken sich mit den Werken der Literatur. Der Nutzen von angeschrägten Zuhörerflächen zeigt sich vor allem in großen Mehrzweck- und Konzerthallen, da Effekte der Schallbeugung, -streuung und -absorption durch die Publikumsfläche am Boden verringert werden. Dies funktioniert nur, wenn der Winkel zwischen der ansteigenden Publikumsfläche und der Schalleinfallrichtung mindestens 15° beträgt. Folglich muss mit zunehmendem Abstand zur Schallereignisfläche die Sitzreihenüberhöhung steiler werden (Fasold & Veres, 2003).

Es muss beachtet werden, dass in den Simulationsmodellen ausschließlich die Lautsprecherpositionierungen dargestellt wurden. Da in ArrayCalc lediglich die Unterscheidung zwischen Hörer-, Strukturflächen oder akustischen Hindernissen möglich ist, konnte keine detaillierte Sekundärstruktur nachgebildet und miteinbezogen werden. Daher zeigen die angeführten Beispiele der Simulation keine vollständige Beschallungsplanung. Für diese müssten weitere Schritte, wie die Berücksichtigung der Oberflächenstrukturen sowie weitere Parameter wie Absorptionen durch das Publikum, erfolgen. Die Nachhallzeit wurde in der Simulation nicht verortet, muss aber als ausschlaggebendes Kriterium der Raumakustik für die Beschallung berechnet werden. Sie muss entsprechend der Anwendung innerhalb eines bestimmten Toleranzbereiches liegen. Für Musik entspricht das Nachhallzeiten von 0,8 bis 2 Sekunden bei Frequenzen zwischen 500 und 1000 Hz (Fuchs, 2017). Sofern die gemessene Nachhallzeit außerhalb des Bereichs liegt, sollte sie angepasst werden.

Eine weitere Einschränkung dieser Simulation ist, dass stets bei einer Temperatur von 20° mit einer Luftfeuchte von 60% gearbeitet wurde. In einer vollbesetzten Halle ändern sich diese Werte und haben Auswirkungen auf die Schallausbreitung. Dies sollte bei der Planung ebenfalls berücksichtigt werden.

8. Fazit

Ziel dieser Arbeit ist es, die Einflussfaktoren für Beschallungen in geschlossenen Räumen darzustellen und verschiedene Möglichkeiten zu deren Umsetzungen aufzuzeigen. Dabei

wurde besonders der Aspekt der Raumgröße in Bezug auf Frontalbeschallungen hervorgehoben und in einer Simulation veranschaulicht. Es hat sich gezeigt, dass es nicht einen übergeordneten Aufbau von Beschallungen gibt, sondern dass dieser im Hinblick auf die Räumlichkeit und vorgesehene Anwendung ausgehend von drei Aufbaukonzepten individuell geplant wird. Die erstellten Beschallungsentwürfe zeigen lediglich Möglichkeiten von Lautsprecheranordnungen, deren Umsetzungen weiter optimiert werden können.

Um die Zusammenhänge für eine erfolgreiche Konzeption zu verstehen, wurden zu Beginn wichtige akustische Grundlagen erklärt. Die Ausbreitungsformen der Schallfelder, besonders die Eigenschaften von Zylinderwellen, sind im Bereich der Beschallungen von großer Bedeutung. Nur durch die akustische Kopplung wird es möglich, räumlich ausgedehnte Flächen gleichmäßig mit Schall abzudecken und ist daher Teil des Bauprinzips von Beschallungslautsprechern.

Die menschliche Wahrnehmung muss bei Beschallungen ebenfalls berücksichtigt werden. Zum einen aufgrund der Frequenzabhängigkeit des Gehörs für ausgewogene Klangdarstellungen, zum anderen aufgrund der Richtungswahrnehmung. Die Laufzeiten der einzelnen Lautsprechersysteme müssen zeitlich aufeinander verzögert und abgestimmt werden, damit der akustische Richtungseindruck mit dem optischen Eindruck übereinstimmt und keine Echos auftreten.

Ein Schlüsselfaktor für eine qualitativ hochwertige Beschallung liegt in der Raumakustik. Sie stellt eine Grundbedingung für die Beschallung dar und beeinflusst die Hörsamkeit des Raumes. Raumakustische Kriterien ergeben sich mitunter durch den zeitlichen Aufbau des Schallfelds und beschreiben das Verhältnis von Direkt- und Diffusschall, und damit auch den Nachhall, die Klarheit und Durchsichtigkeit einer Beschallung. Zusätzlich wird sie durch Absorption des Publikums beeinflusst.

Durch die Raumakustik in Kombination mit der Lautsprecherwahl und -positionierung entstehen häufig Probleme, die bei der Planung im Voraus analysiert und behoben werden sollten. Dazu gehören aus verschiedenen Ursachen entstandene Interferenzerscheinungen durch Phasenverschiebung, die zu Kammfiltereffekten und stehenden Wellen führen. Ebenso Fokussierungen durch gewölbte Raumflächen sowie Zonen mit Schallschatten hinter akustischen Hindernissen. Während nicht immer alle störenden Faktoren beseitigt werden können, müssen Rückkopplungen grundsätzlich bei allen Beschallungen vermieden werden. Neben der Raumakustik bilden die Lautsprecher den zweiten zentralen Schlüsselfaktor. Die Eigenschaften der Lautsprechersysteme zusammen mit deren Ausrichtungen bestimmen, inwiefern der Publikumsbereich mit Schall versorgt wird. Um die Positionen festzulegen, werden Beschallungssituationen im Voraus wie zuvor dargestellt in Simulationssoftwares geplant. Jedoch bedarf es einer gewissen Erfahrung, um die Software effizient bedienen zu können.

Die Besonderheit bei Beschallungen liegt darin, dass nicht nur ein einzelner Zuhörer, sondern eine Vielzahl an Personen gleichzeitig ein möglichst gutes und vergleichbares Klangerlebnis wahrnehmen soll. Die Beschallung muss über die gesamte Fläche optimiert und stets mit einem angemessenen Schalldruckpegel umgeben sein. Der Einsatzzweck entscheidet über das Aufbaukonzept der Beschallungen. Während dezentrale Beschallungen in Gebäuden für Festinstallationen genutzt werden, dienen zentrale (gestützte) Beschallungskonzepte beispielsweise für Konzertbeschallungen. Der spezifische Anwendungsfall entscheidet darüber, ob die Sprachverständlichkeit oder musikalische Durchsichtigkeit im Vordergrund steht und welche Lautstärke angestrebt wird. Mit zunehmender Raumgröße steigt die nötige Lautsprecherleistung, sodass Punktquellen nur in sehr kleinen Räumen ausreichen und von in der Länge variablen Line-Array-Systemen mit hoher Reichweite und zusätzlichen Subwoofersystemen abgelöst werden. Groß-P.A.s können in ihrer Dimension für den Veranstaltungsort angepasst werden. In sehr großen Räumlichkeiten, wie beispielsweise in Mehrzweckarenen, können Line Arrays und Subwoofer nicht die gesamte Zuhörerfläche beschallen, weswegen der Einsatz verschiedener Fülllautsprecher an der Bühnenvorderkante und an den seitlichen Rängen rechts und links der Bühne üblich ist. Auch sind Delay-Lines bei großen Distanzen für den hinteren Raumbereich möglich.

Nach der Installation muss die Beschallungsanlage überprüft und eingemessen werden, bevor sie für die Veranstaltung genutzt werden darf. Die Parameter der einzelnen Geräte müssen aufeinander abgestimmt sein und gerätetechnische sowie akustische Kriterien müssen kontrolliert werden.

Zusammenfassend zeigt diese Arbeit, welchen Einfluss die Raumgröße neben der Raumakustik auf eine (Frontal-) Beschallung hat und stellt Möglichkeiten für die Realisierung dieser vor.

Literaturverzeichnis

- Ahnert, W., & Feistel, S. (2018). Einmessung und Verifizierung raumakustischer Gegebenheiten und von Beschallungsanlagen. (M. Möser, Hrsg.) Berlin: Springer Vieweg.
- Ahnert, W., & Goertz, A. (2008). Beschallungstechnik, Beschallungsplanung und Simulation. In S. Weinzierl, Handbuch der Audiotechnik (S. 491-550). Berlin: Springer.
- Ahnert, W., & Reichardt, W. (1981). Grundlagen der Beschallungstechnik. Stuttgart: Hirzel.
- Ahnert, W., & Tennhardt, H.-P. (2008). Raumakustik. In S. Weinzierl, Handbuch der Audiotechnik (S. 181-266). Berlin: Springer.
- Bernstein, H. (2019). Elektroakustik (2. Ausg.). Wiesbaden: Springer Vieweg.
- Blauert, J., & Braasch, J. (2008). Räumliches Hören. In S. Weinzierl, Handbuch der Audiotechnik (S. 87-122). Berlin: Springer.
- Dickreiter, M. (2014a). Grundlagen der Akustik. In M. Dickreiter, V. Dittel, W. Hoeg, & M. Wöhr, Handbuch der Tonstudioteknik (S. 1-65). Berlin: De Gruyter .
- Dickreiter, M. (2014b). Schallwahrnehmung. In M. Dickreiter, V. Dittel, W. Hoeg, & W. Martin, Handbuch der Tonstudioteknik (S. 115-135). Berlin: De Gruyter .
- Dickreiter, M., Dittel, V., Hoeg, W., & Wöhr, M. (2014). Handbuch der Tonstudioteknik (8. Ausg., Bd. 1). Berlin: De Gruyter .
- Eargle, J. (2003). Loudspeaker Handbook (Second Edition Ausg.). New York: Springer Science + Business Media.
- Ellermeier, W., & Hellbrück, J. (2008). Hören-Psychoakustik-Audiologie. In S. Weinzierl, Handbuch der Audiotechnik (S. 41-86). Berlin: Springer.
- Fasold, W., & Veres, E. (2003). Schallschutz und Raumakustik in der Praxis (2. Ausg.). Berlin: Huss-Medien.
- Friesecke, A. (2014). Die Audio-Enzyklopädie (2. Ausg.). Berlin Boston: De Gruyter.
- Frisch, H. (1995). Beschallungstechnik. In M. Heckl, & H. Müller, Taschenbuch der Technischen Akustik (2. Ausg., S. 646-660). Berlin Heidelberg: Springer.
- Fuchs, H. V. (2017). Raum-Akustik und Lärm-Minderung (4. Ausg.). Berlin: Springer Vieweg.
- Görne, T. (2015). Tontechnik (4. Ausg.). München: Carl Hanser Verlag.
- Goertz, A. (2008). Lautsprecher. In S. Weinzierl, Handbuch der Audiotechnik (S. 421-490). Berlin: Springer.
- Grzesinski, C. (2020). Smyrek Tontechnik für Veranstaltungstechniker in Ausbildung und Praxis (4. Ausg.). Stuttgart: S. Hirzel Verlag.
- Kuttruff, H. (1995). Raumakustik. In M. Heckl, & H. Müller, Taschenbuch der Technischen Akustik (2. Ausg., S. 596-624). Berlin Heidelberg: Springer.

- Maschke, C., & Fastl, H. (2015). Schallwirkungen beim Menschen. In M. Möser, & G. Müller, Taschenbuch der Technischen Akustik (S. 1-29). Berlin Heidelberg: Springer.
- Pieper, F. (2011). Das P.A. Handbuch - Praktische Einführung in die professionelle Beschallungstechnik (4. Ausg.). München: Carstensen.
- Scholz, F. C. (2015). Audiotechnik für Mediengestalter. Berlin, Boston: De Gruyter .
- Schullan, B., Zuleeg, R., & Hoeg, W. (2014). Beschallung. In M. Dickreiter, V. Dittel, W. Hoeg, & M. Wöhr, Handbuch der Tonstudioteknik (S. 565-612). Berlin: De Gruyter.
- Weinzierl, S. (2008a). Grundlagen. In S. Weinzierl, Handbuch der Audiotechnik (S. 1-40). Berlin: Springer.
- Weinzierl, S. (2008b). Handbuch der Audiotechnik. Berlin: Springer.
- Wirsum, S. (1991). Praktische Beschallungstechnik: Gerätekonzepte, Installation, Optimierung. München: Franzis-Verlag GmbH .

Internetquellen

- ArrayCalc*. (o. D.). d&b audiotechnik. Abgerufen am 17. Mai 2022, von <https://www.dbaudio.com/global/de/produkte/software/arraycalc/>
- ArrayCalc V10 (10.22.3)*. (2022). [Lautsprecher-Simulationsprogramm]. d&b Audiotechnik. <https://www.dbaudio.com/global/de/produkte/software/arraycalc/>
- E12-D Lautsprecher aus unserer E-Serie*. (o. D.). d&b audiotechnik. Abgerufen am 29. Mai 2022, von <https://www.dbaudio.com/global/de/produkte/serien/e-serie/e12-d/#tab-overview>
- gGmbH, A. F. M. (2016, 15. August). *Halle* –. Alte Feuerwache Mannheim. Abgerufen am 21. Mai 2022, von <https://altefeuerwache.com/vermietung/location/halle/>
- Schleyerhalle: Hallenduo im Neckarpark*. (o. D.). -. Abgerufen am 26. Mai 2022, von <https://www.hallenduo.de/de/veranstalter/raumangebote/schleyerhalle/>
- Technical Rider*. (2021, 11. Oktober). LKA Longhorn. Abgerufen am 21. Mai 2022, von <https://lka-longhorn.de/technical-rider/>
- Über d&b*. (o. D.). d&b audiotechnik. Abgerufen am 17. Mai 2022, von <https://www.dbaudio.com/global/de/ueber-db/>
- V Subwoofer mit hoher Leistungsstärke*. (o. D.). d&b audiotechnik. Abgerufen am 29. Mai 2022, von <https://www.dbaudio.com/global/de/produkte/serien/v-serie/v-sub/>
- V8 Lautsprecher aus unserer V-Serie*. (o. D.). d&b audiotechnik. Abgerufen am 6. Juni 2022, von <https://www.dbaudio.com/global/de/produkte/serien/v-serie/v8/#tab-technicaldata>
- V12 Lautsprecher aus unserer V-Serie*. (o. D.). d&b audiotechnik. Abgerufen am 11. Juni 2022, von <https://www.dbaudio.com/global/de/produkte/serien/v-serie/v12/>
- Wikipedia contributors. (o. D.). *List of indoor arenas by capacity*. Wikipedia. Abgerufen am 21. Mai 2022, von https://en.wikipedia.org/wiki/List_of_indoor_arenas_by_capacity
- Y10P Lautsprecher aus unserer Y-Serie*. (o. D.). d&b audiotechnik. Abgerufen am 6. Juni 2022, von <https://www.dbaudio.com/global/de/produkte/serien/y-serie/y10p/>

Anhang

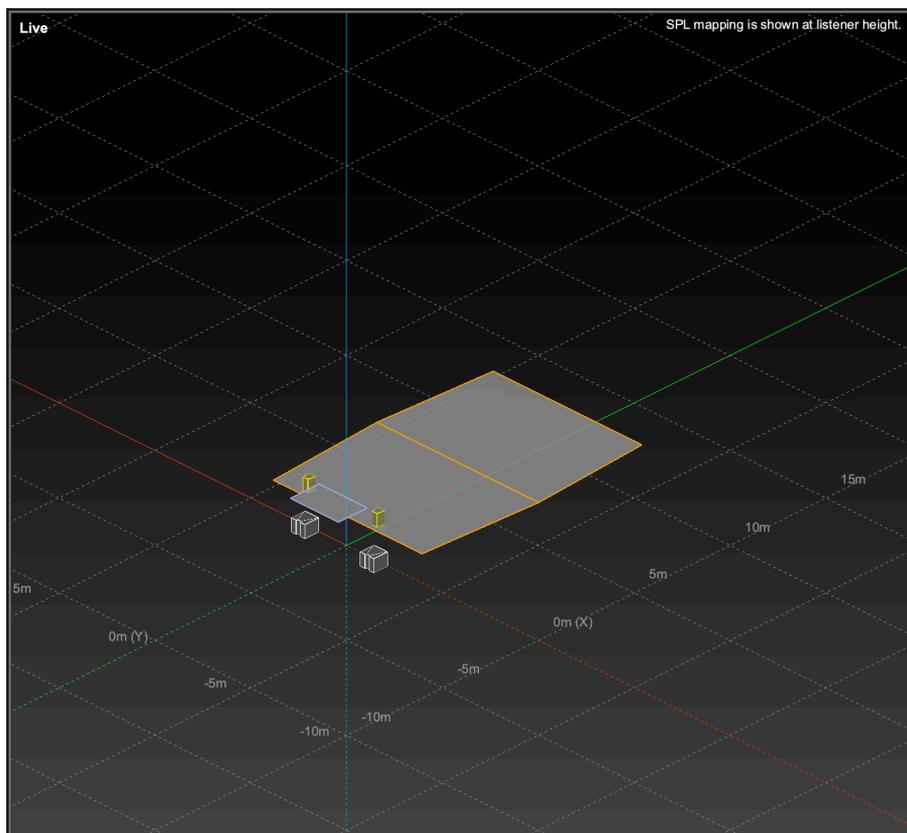
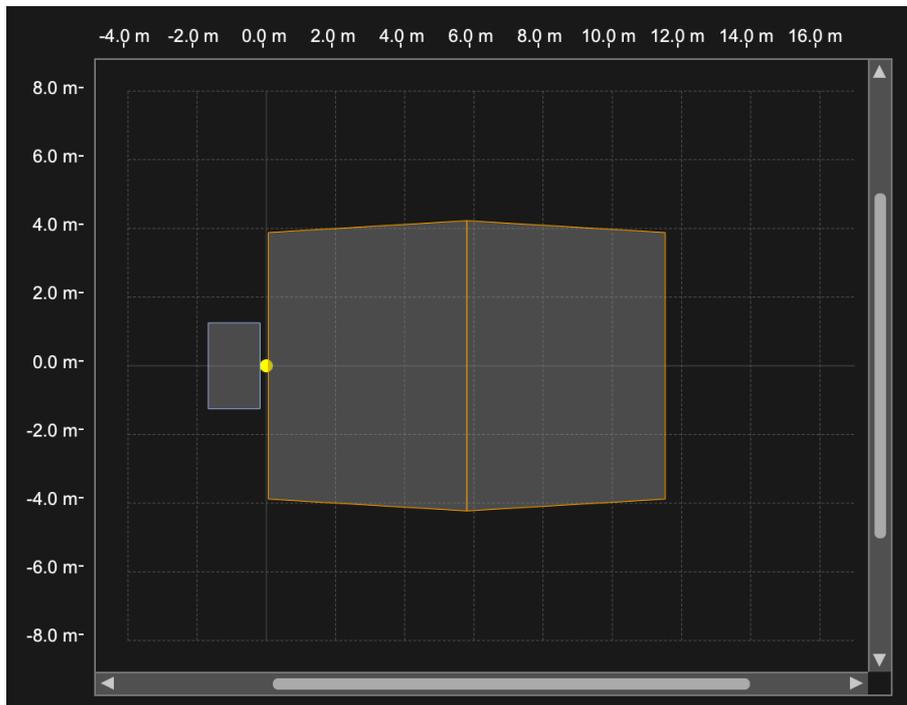
Anhang 1: Raum 1 – Café, Lokal, Proberaum.....	XII
Anhang 2: Raum 1 – Lautsprecheranordnung auf der Bühne.....	XIII
Anhang 3: Raum 1 – Lautsprecheranordnung neben der Bühne.....	XVI
Anhang 4: Raum 1 – Alternatives Lautsprechersetup	XIX
Anhang 5: Raum 2 – Kleine Konzerthalle.....	XX
Anhang 6: Raum 2 – Aufbauvariante 1	XXI
Anhang 7: Raum 2 – Aufbauvariante 2	XXVII
Anhang 8: Raum 2 – Vergleich der Frontfills mit einem Centerlautsprecher.....	XXXI
Anhang 9: Raum 3 – Mehrzweckarena	XXXIII
Anhang 10: Raum 3 – Hauptbeschallung: Line Arrays.....	XXXIV
Anhang 11: Raum 3 – Fülllautsprecher	XXXVII
Anhang 12: Raum 3 – Line Arrays mit Frontfills und Outfills	XLI
Anhang 13: Raum 3 – Subwooferposition auf dem Boden.....	XLIII
Anhang 14: Raum 3 – Subwoofer als eigenes Line Array.....	XLV
Anhang 15: Raum 3 – Delay-Line	XLVIII

Hinweis:

Alle nachfolgend aufgeführten Abbildungen wurden Mithilfe der Software *ArrayCalc V 10* (*ArrayCalc V10*, 2022) angefertigt und sind aus dieser in Form von Screenshots entnommen. Die Schallpegelverteilungen werden in den Vierervergleichen immer bei 50, 250, 1000 und 4000 Hz betrachtet. Im Fall einer Abweichung wird dies deutlich gemacht.

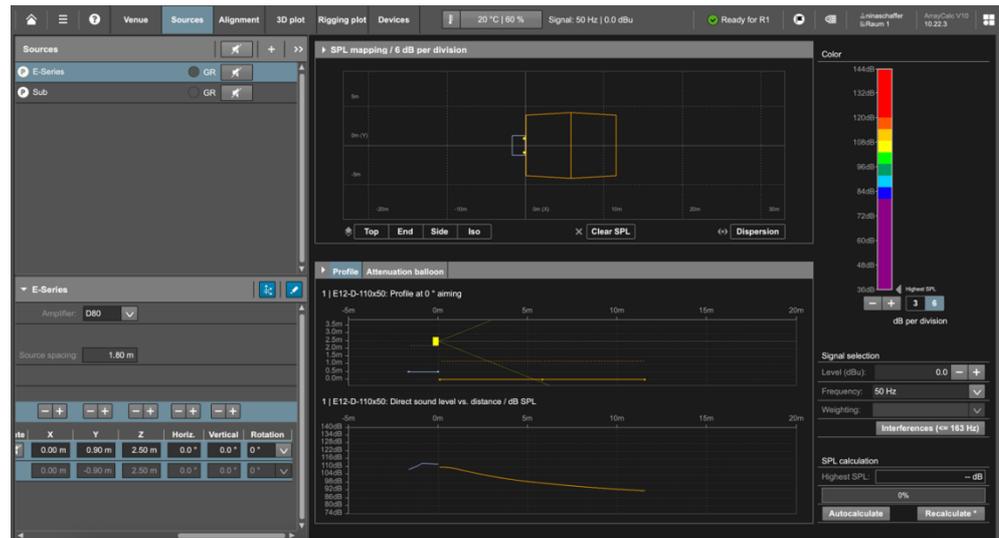
Anhang 1: Raum 1 – Café, Lokal, Proberaum

Modellierter Raum

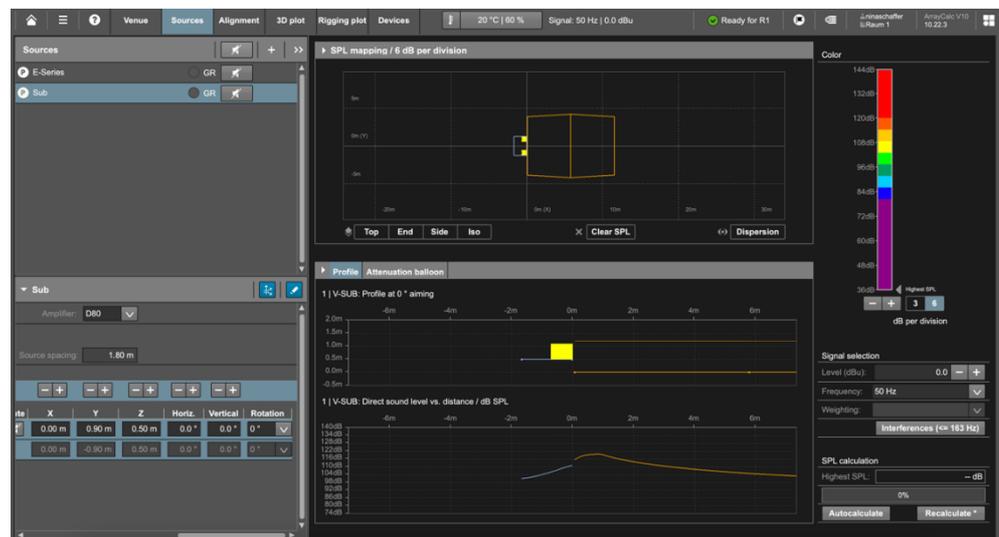


Anhang 2: Raum 1 – Lautsprecheranordnung auf der Bühne

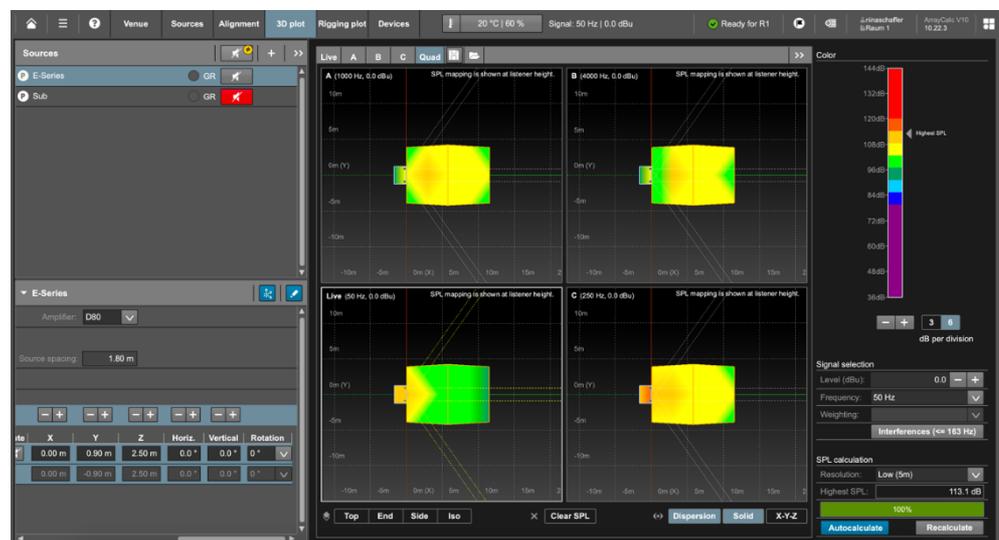
Lautsprecher-
position der
Top-
Lautsprecher



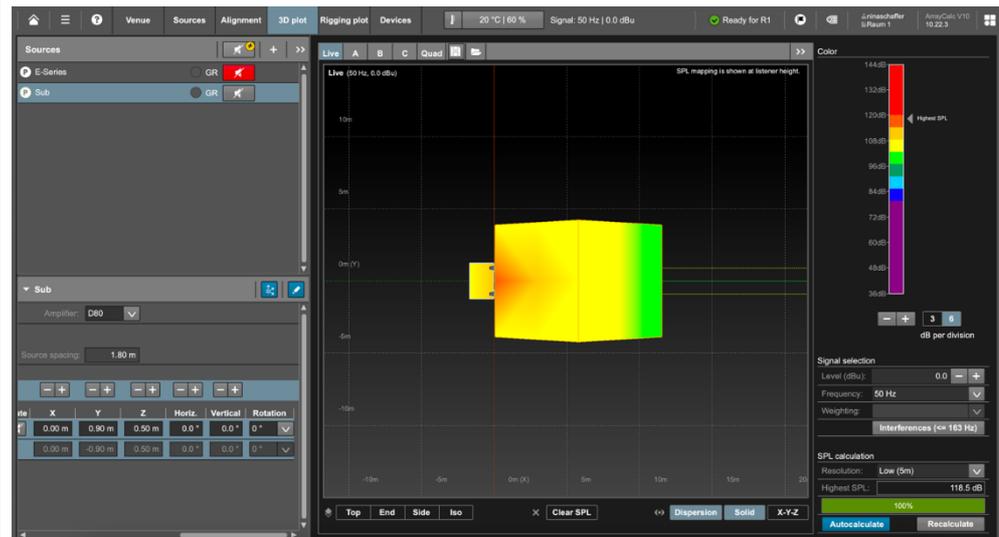
Lautsprecher-
position der
Subwoofer



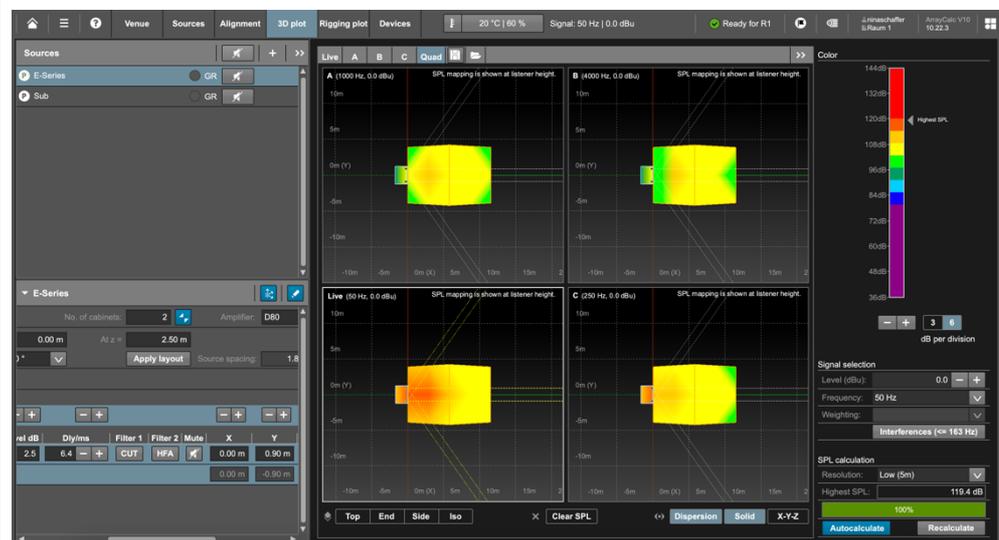
Schalldruck-
pegel-
verteilung der
Top-
Lautsprecher



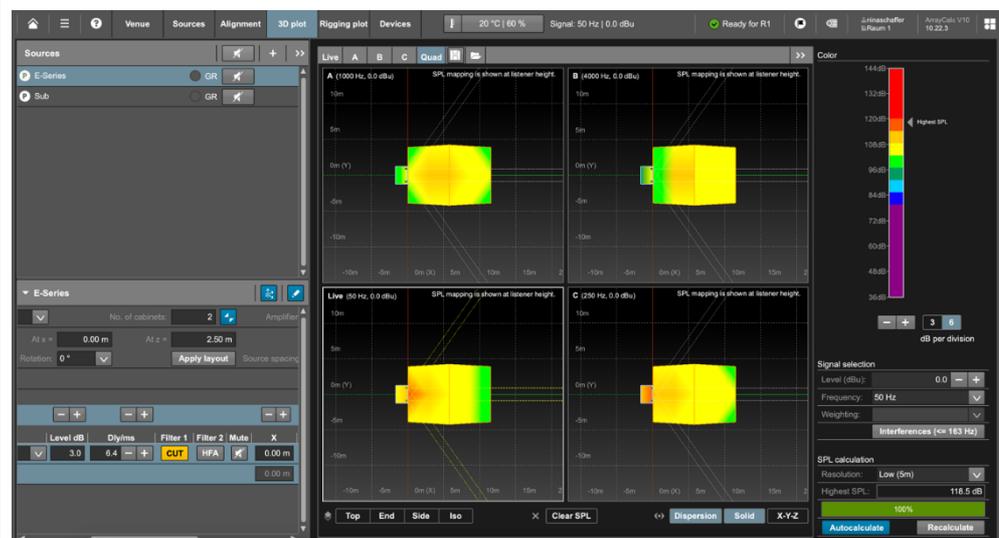
Schalldruck-
pegel-
verteilung der
Subwoofer
bei 50 Hz



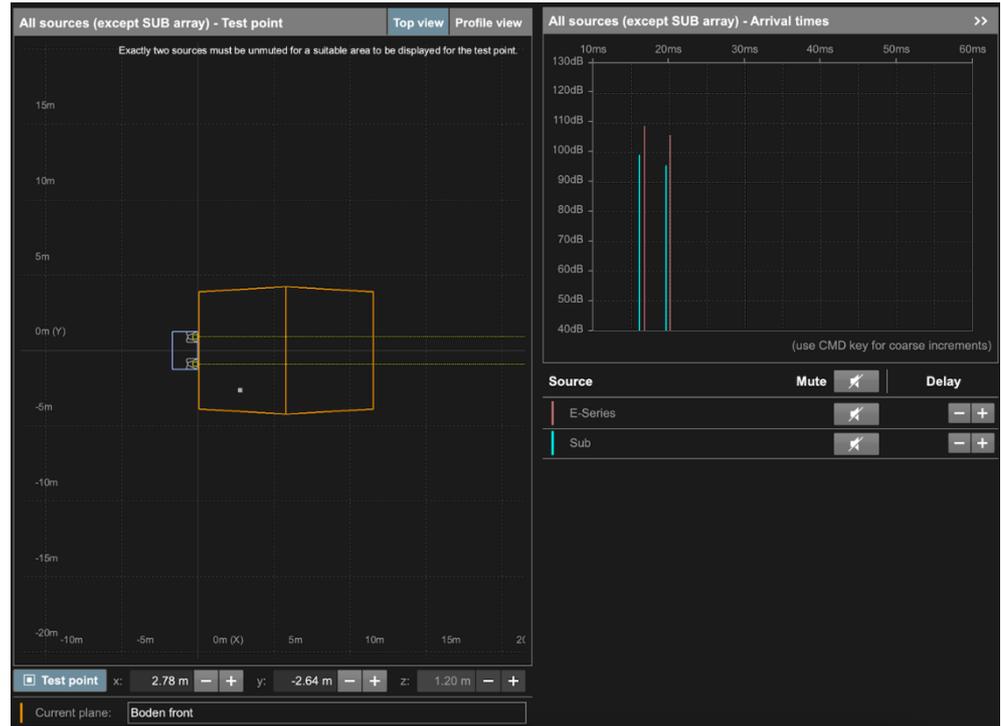
Top-
Lautsprecher
und
Subwoofer
ohne CUT-
Funktion



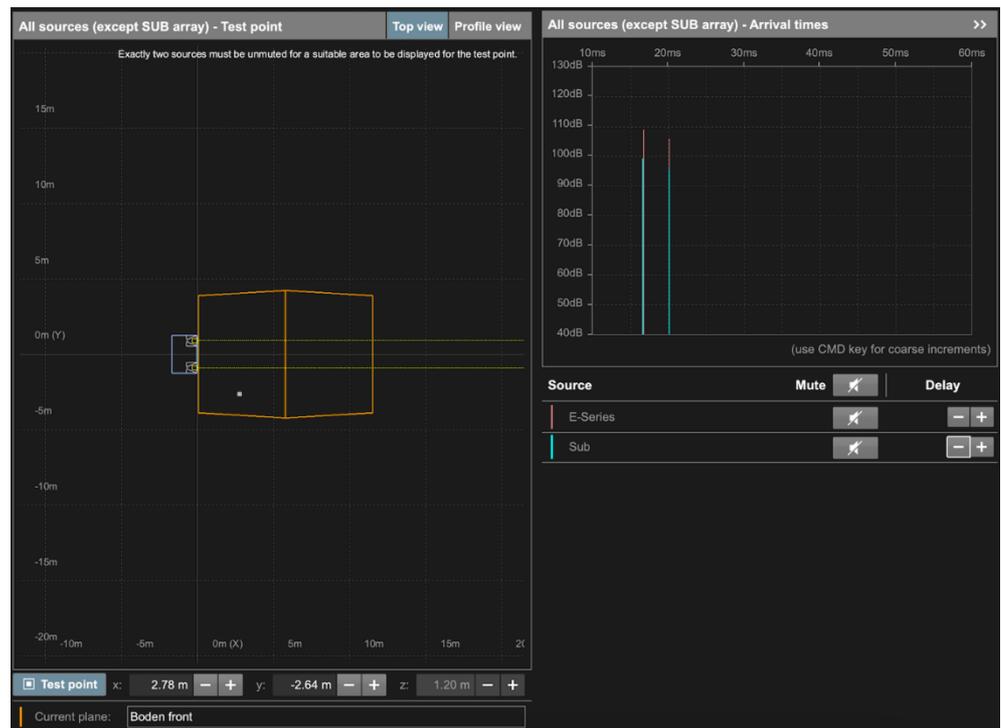
Anhebung
der Top-
Lautsprecher
um 3 dB für
eine gleich-
mäßigere
Ausleuchtung
des hinteren
Raum-
bereichs bei
den höheren
Frequenzen
(mit CUT-
Funktion)



Time Alignment:
Lautsprecher
ohne
eingestellte
Verzögerungswerte

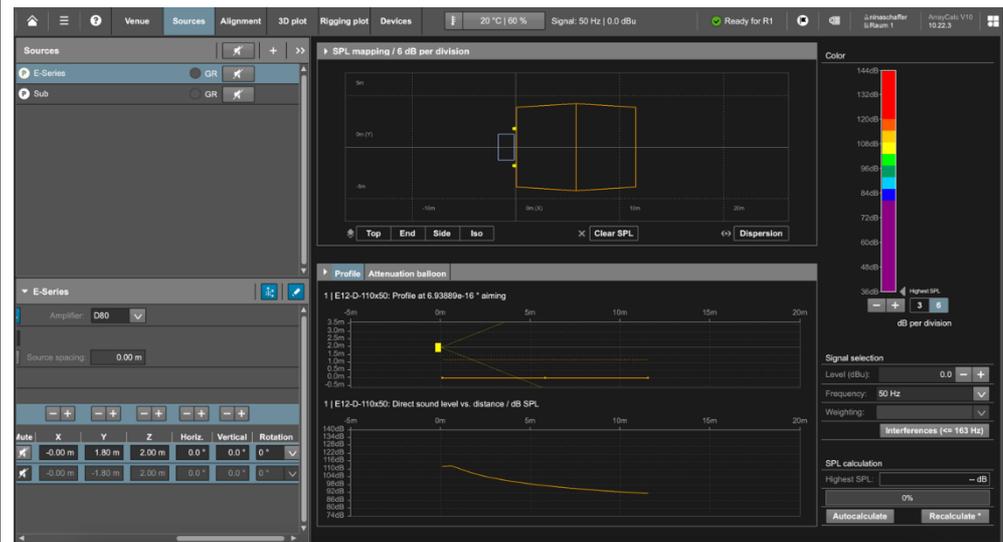


Time Alignment:
Subwoofer
auf die Top-
Lautsprecher
verzögert

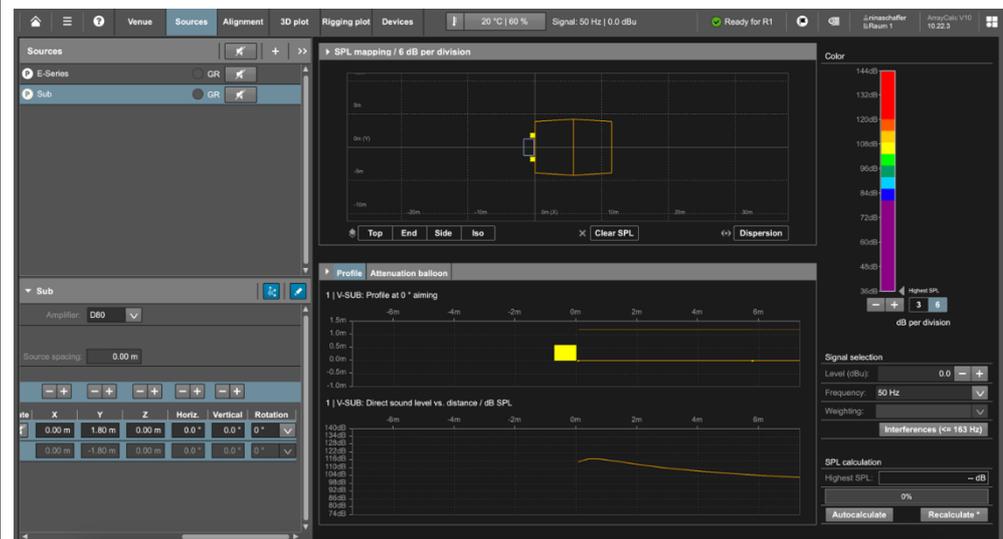


Anhang 3: Raum 1 – Lautsprecheranordnung neben der Bühne

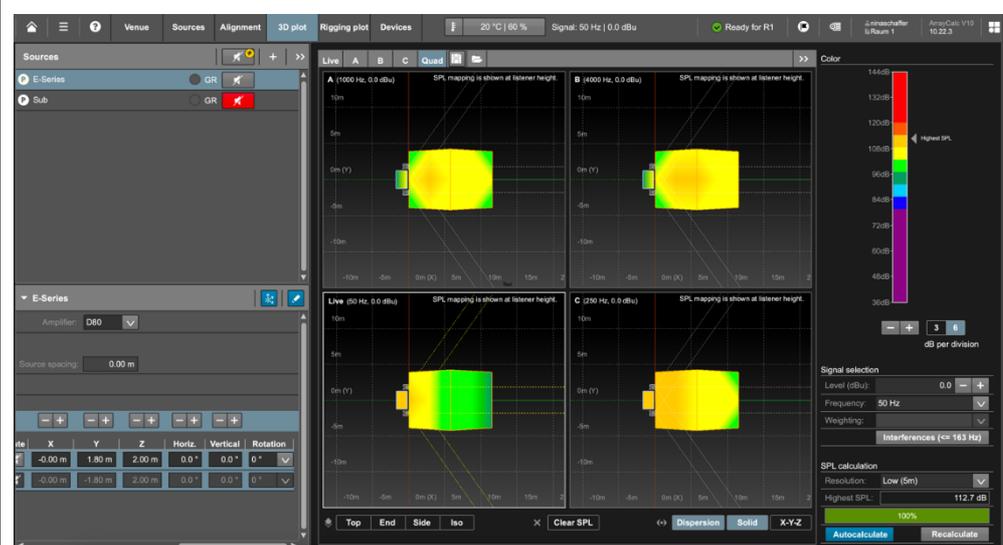
Lautsprecher-
position der
Top-
Lautsprecher



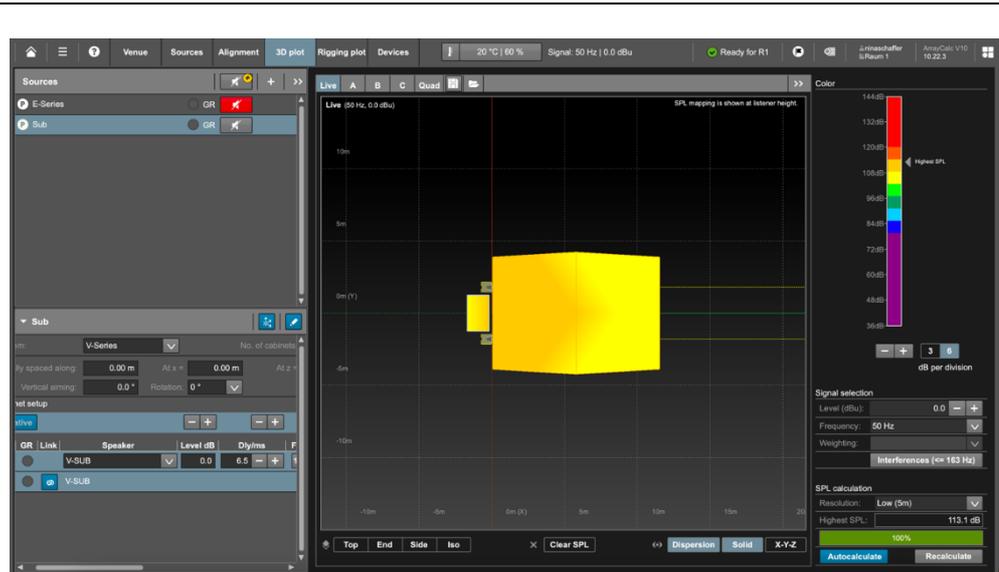
Lautsprecher-
position der
Subwoofer



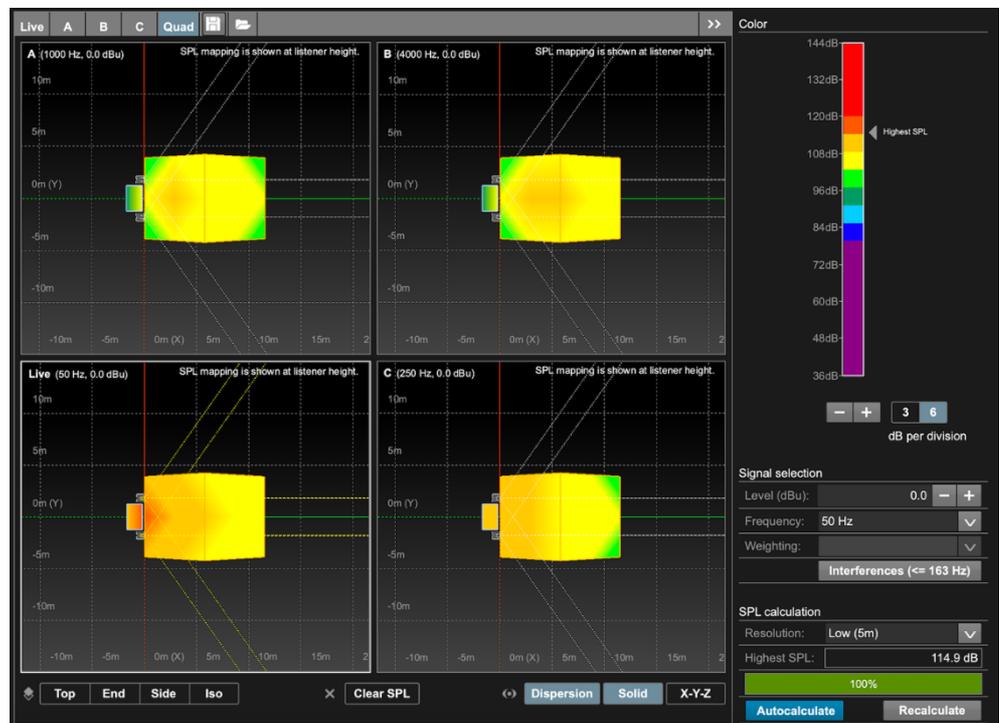
Schalldruck-
pegel-
verteilung der
Top-
Lautsprecher



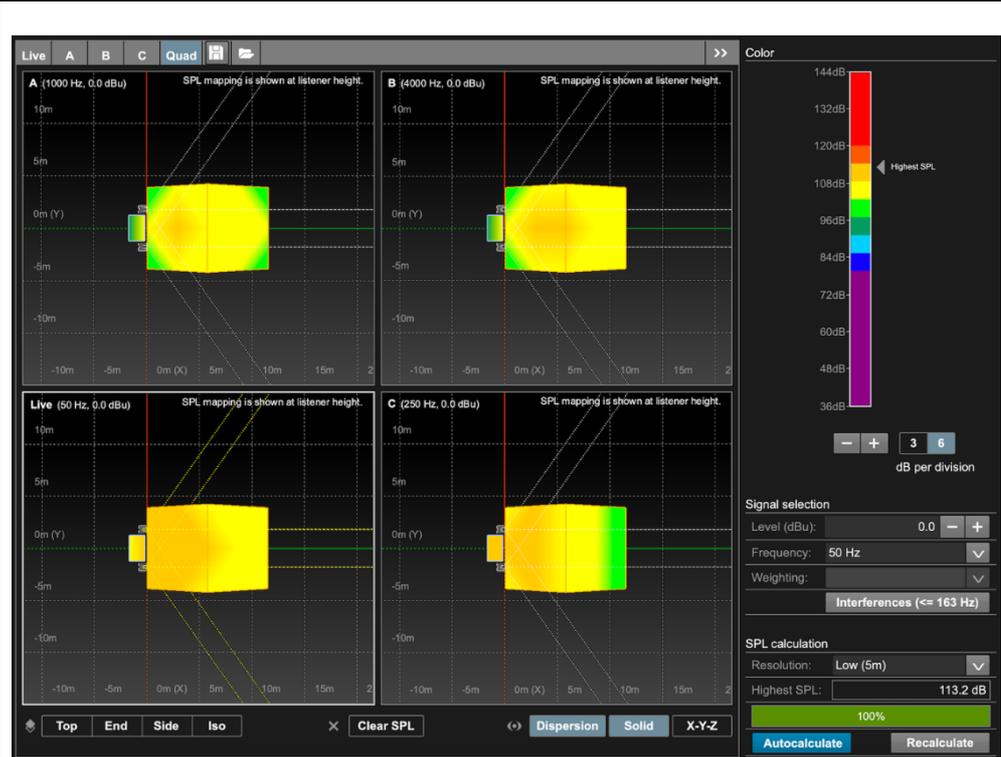
Schalldruck-
pegel-
verteilung der
Subwoofer
bei 50 Hz



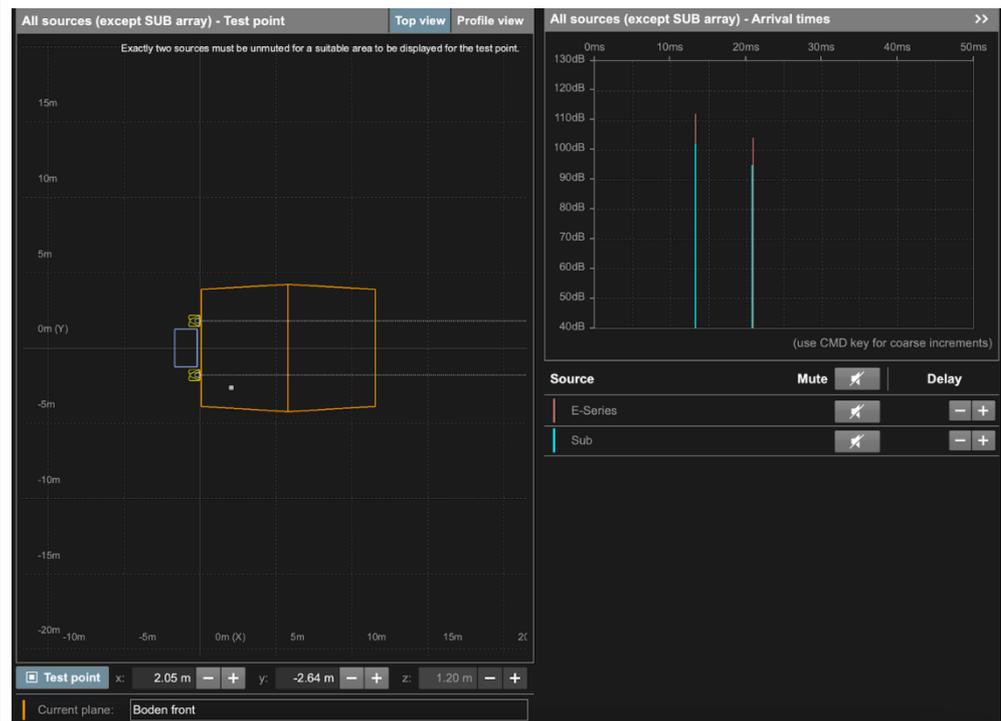
Top-
Lautsprecher
und
Subwoofer
ohne CUT-
Funktion



Top-Lautsprecher und Subwoofer mit CUT-Funktion

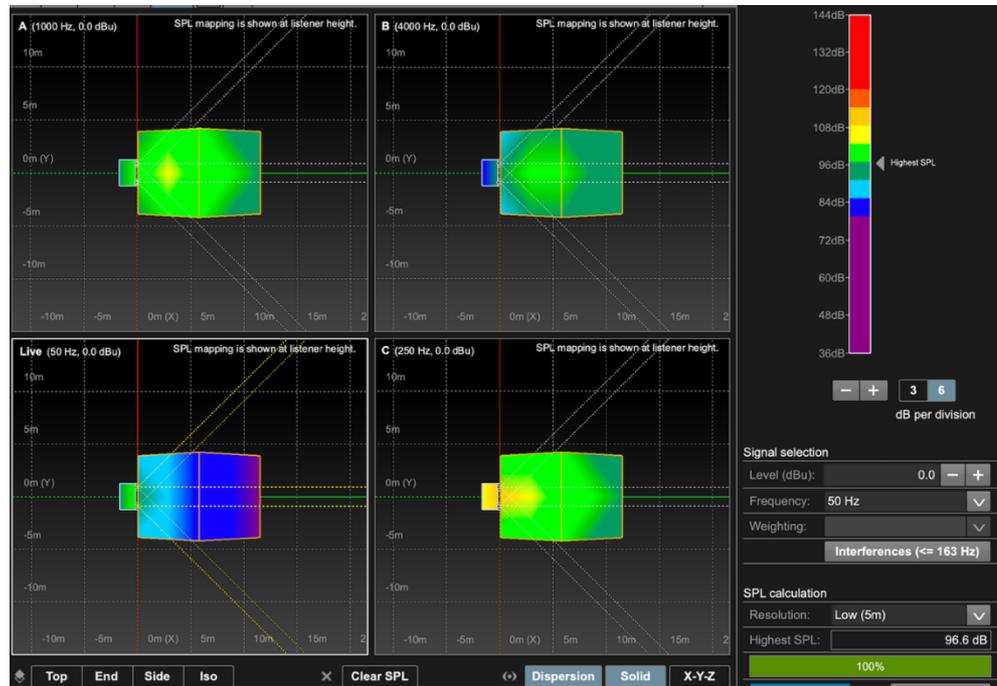


Time-Alignment: Subwoofer auf die Top-Lautsprecher verzögert

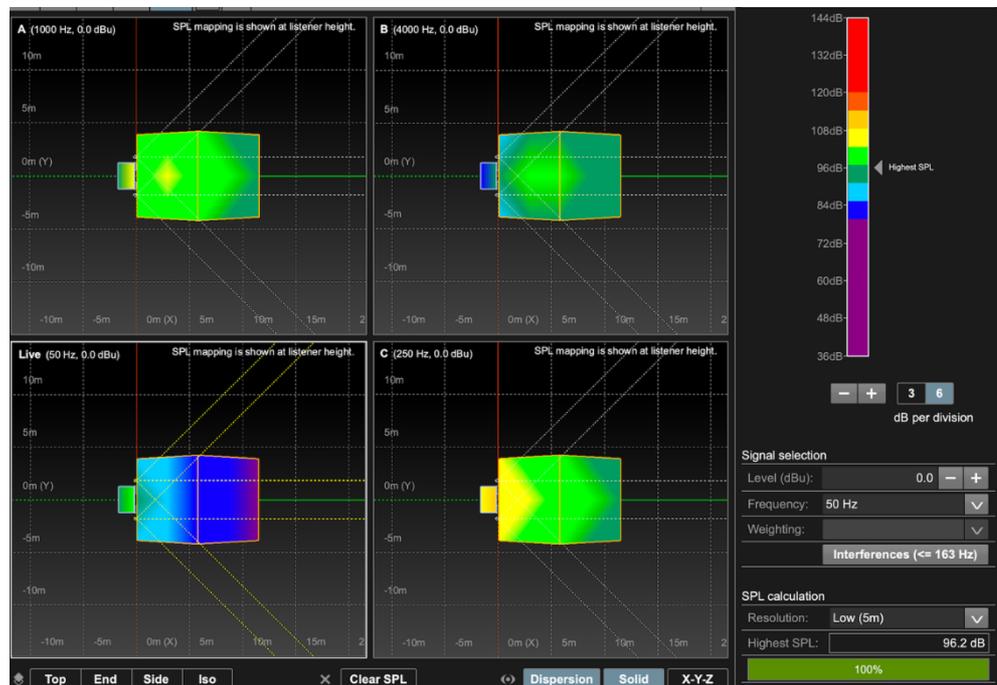


Anhang 4: Raum 1 – Alternatives Lautsprechersetup kleinere Treiber und schmalere Abstrahlcharakteristik (90°x50°)

Schallpegel-
verteilung
ohne
Subwoofer
bei der
Lautsprecher-
positionier-
und auf der
Bühne

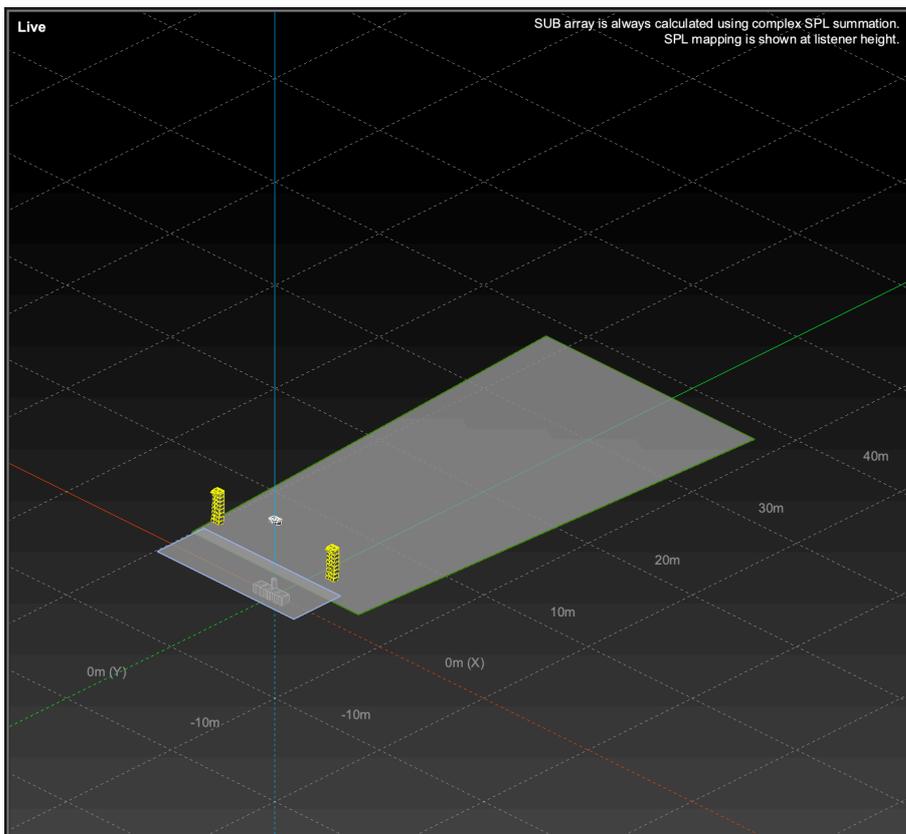
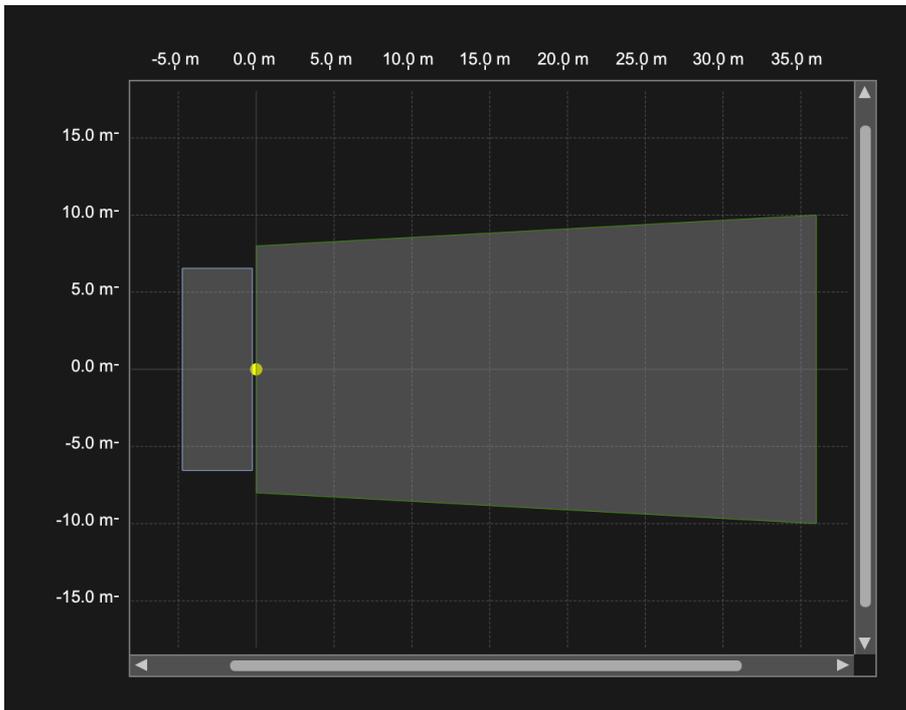


Schallpegel-
verteilung
ohne
Subwoofer
bei der
Lautsprecher-
positionier-
und neben
der Bühne



Anhang 5: Raum 2 – Kleine Konzerthalle

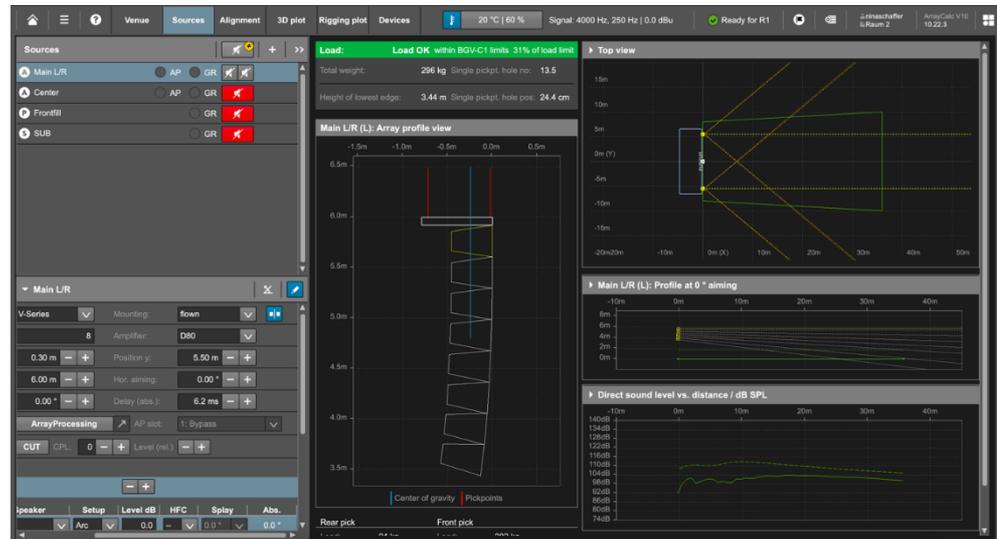
Modellierter Raum



Anhang 6: Raum 2 – Aufbauvariante 1

Line-Array mit auf dem Boden positionierten Subwoofern

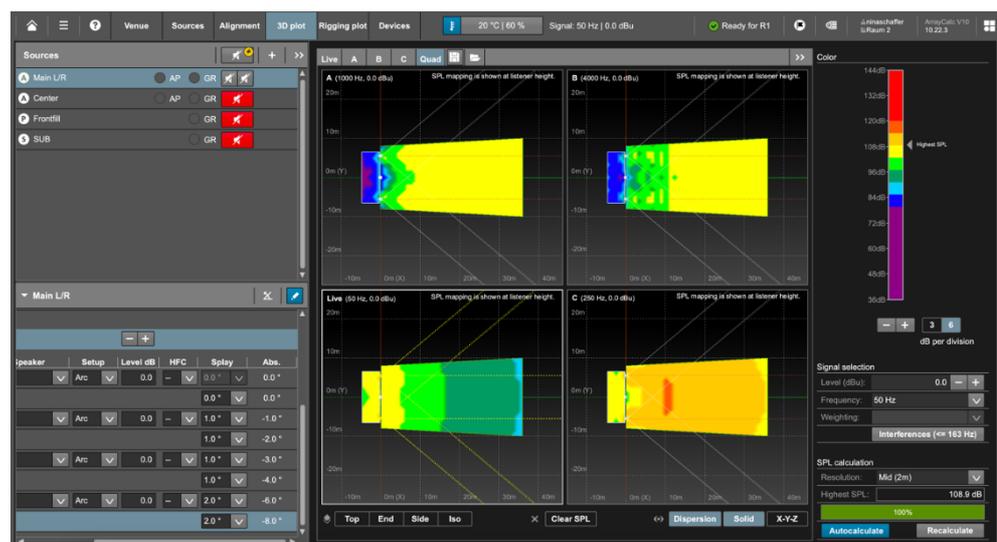
Positionierung des Haupt-Line-Arrays



Winkel zwischen den Array-Elementen

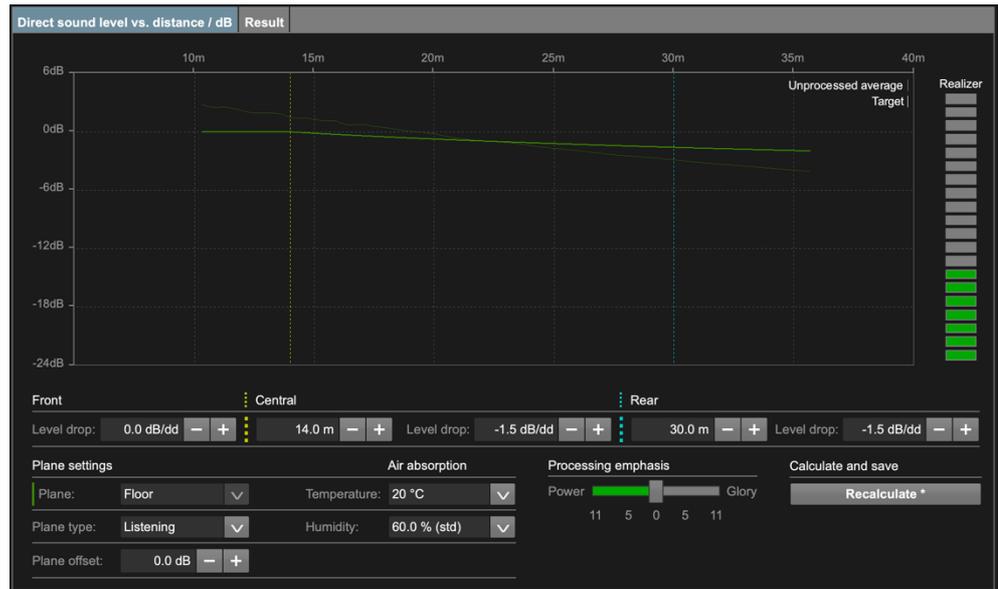
Splay	Abs.
0.0°	0.0°
0.0°	0.0°
1.0°	-1.0°
1.0°	-2.0°
1.0°	-3.0°
1.0°	-4.0°
2.0°	-6.0°
2.0°	-8.0°

Schallpegelverteilung des Haupt-Line-Arrays

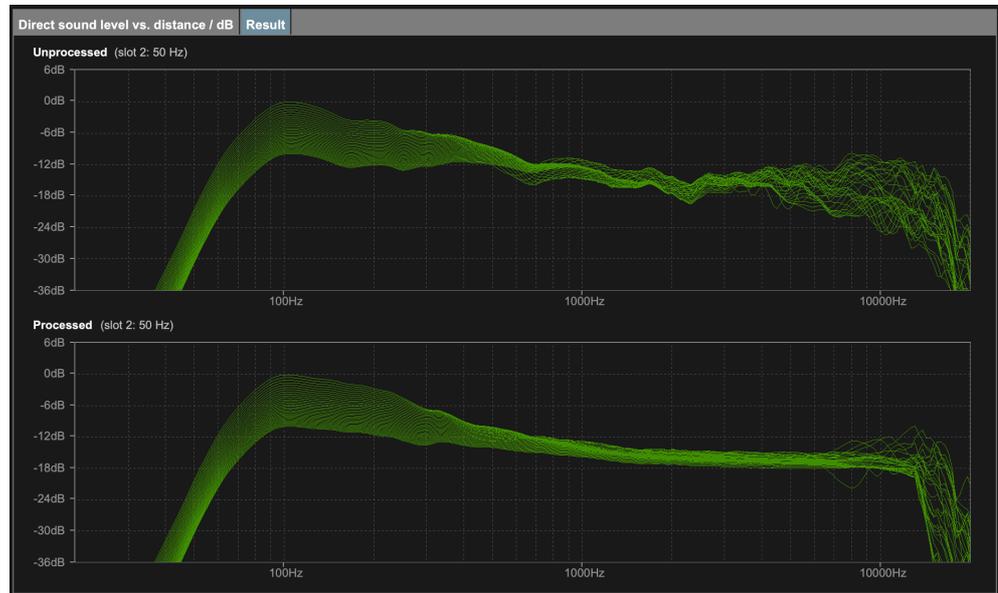


Array-Processing
Line-Array:

Einstellung
des Array
Processing



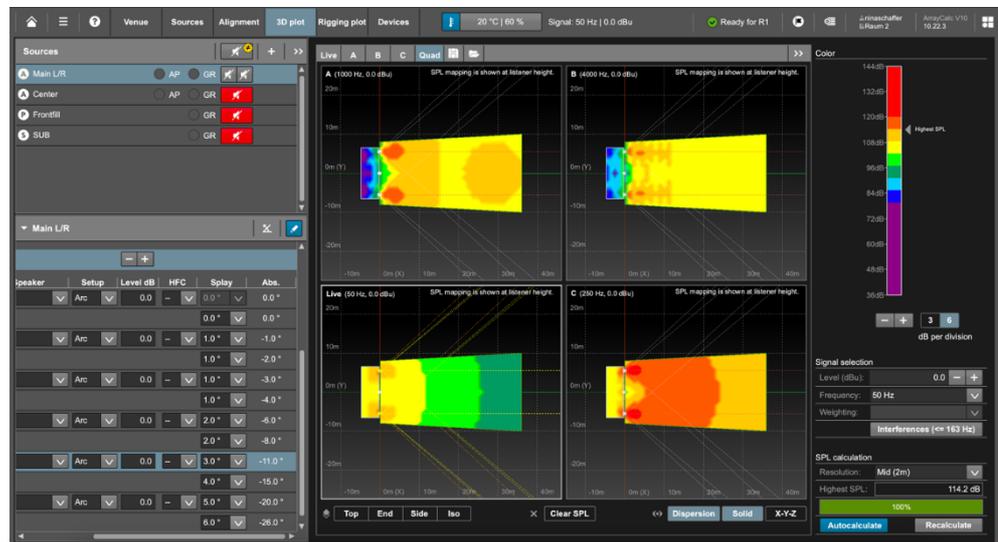
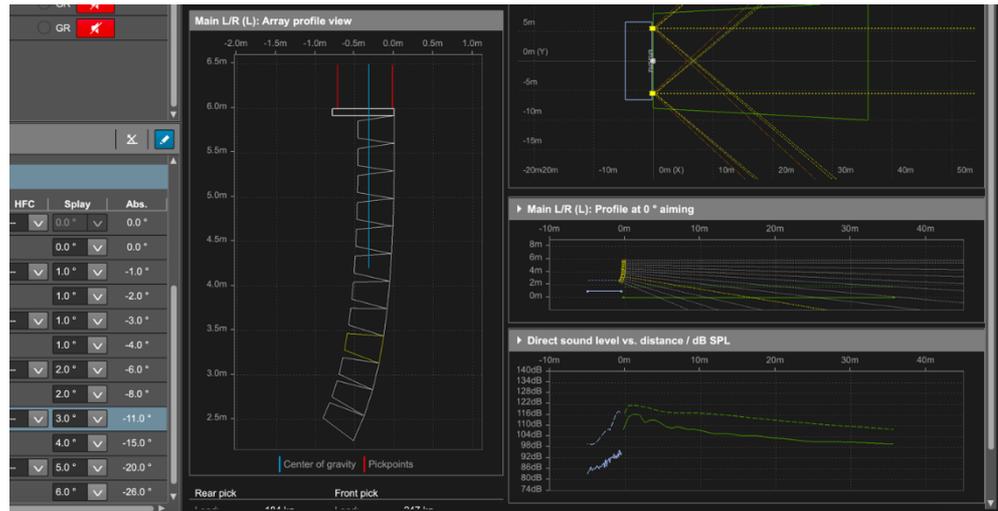
Frequenz-
gang ohne
und mit
Array
Processing



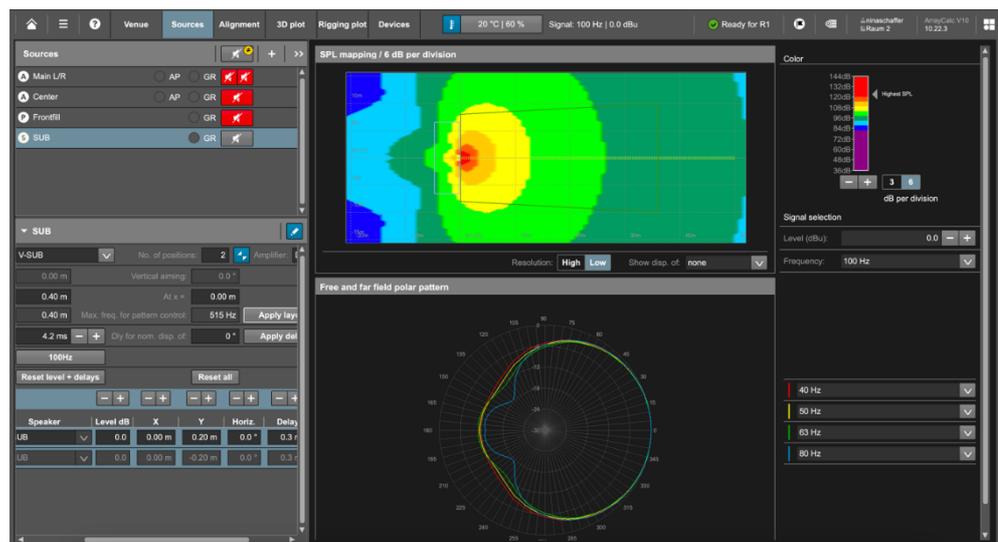
Schallpegel-
verlauf bei
200 und 400
Hz mit Array
Processing

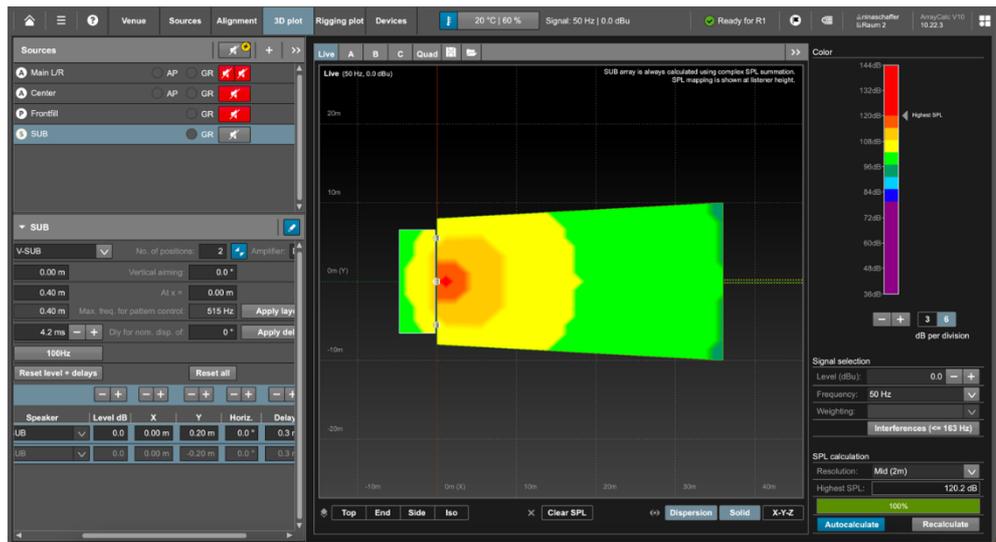


Verlängertes Line-Array mit 12 Elementen (Position und Schallpegelverteilung)

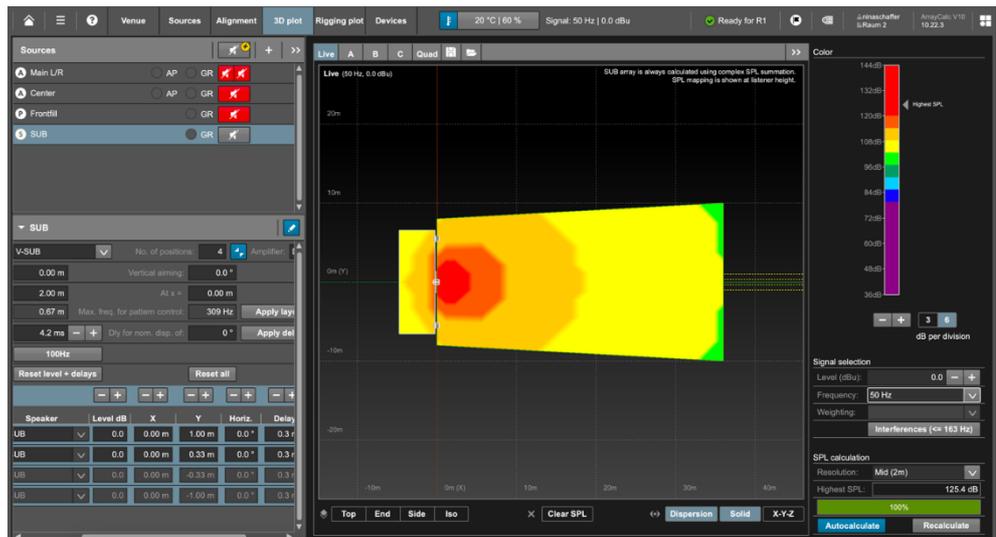
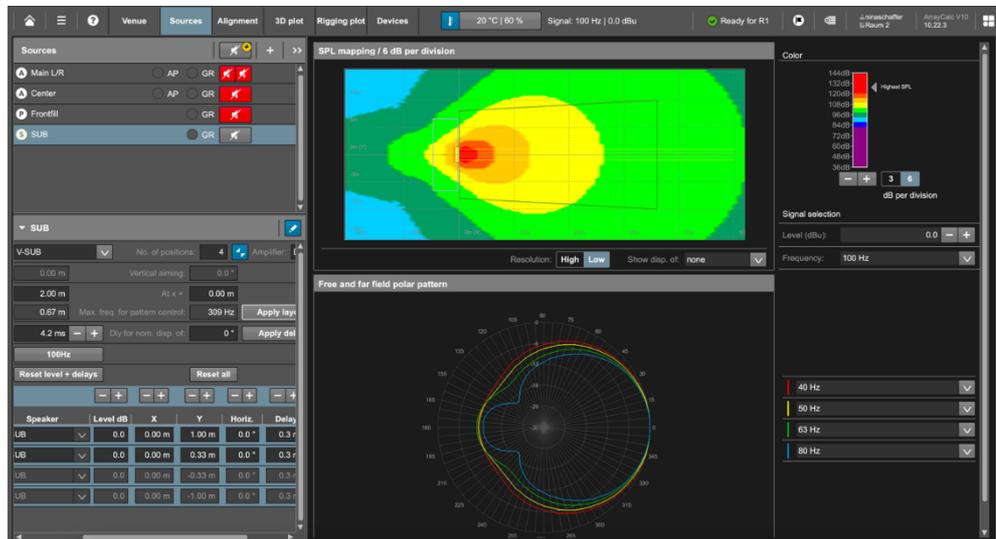


Zwei Subwoofer (Position und Schallpegelverteilung bei 50 Hz)

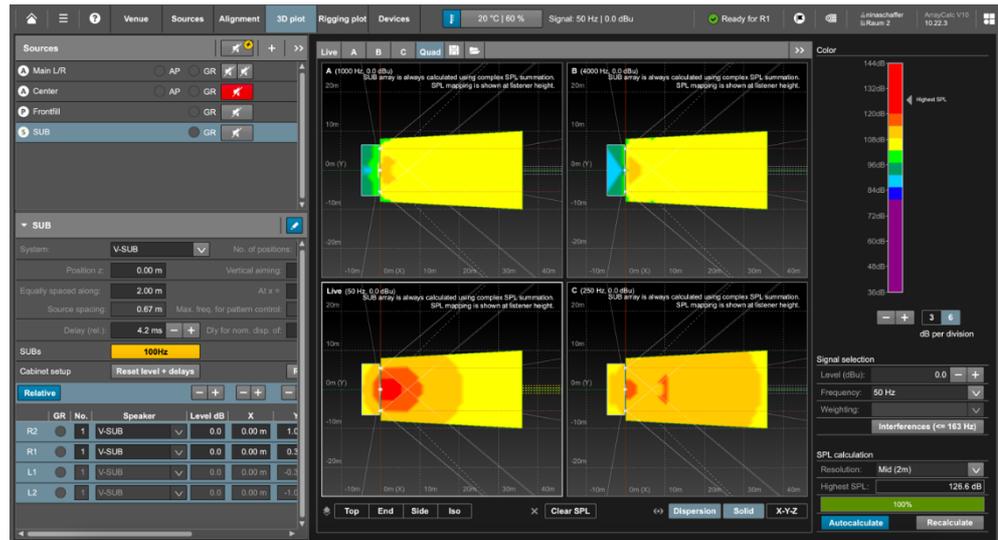




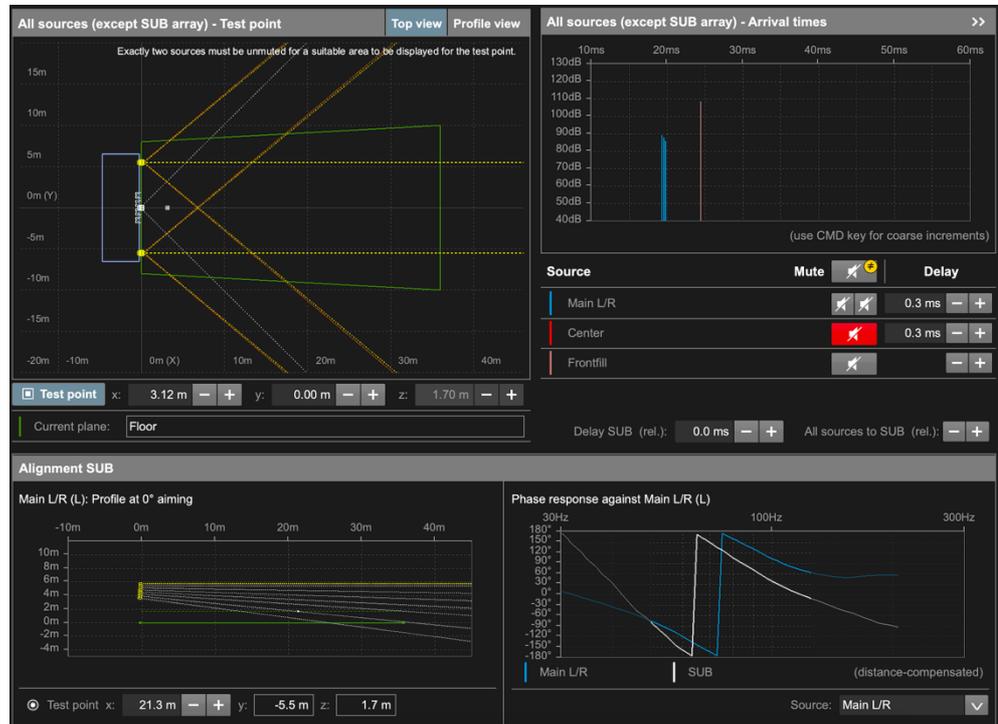
Vier
Subwoofer
(Position
und
Schallpegel-
verteilung
bei 50 Hz)



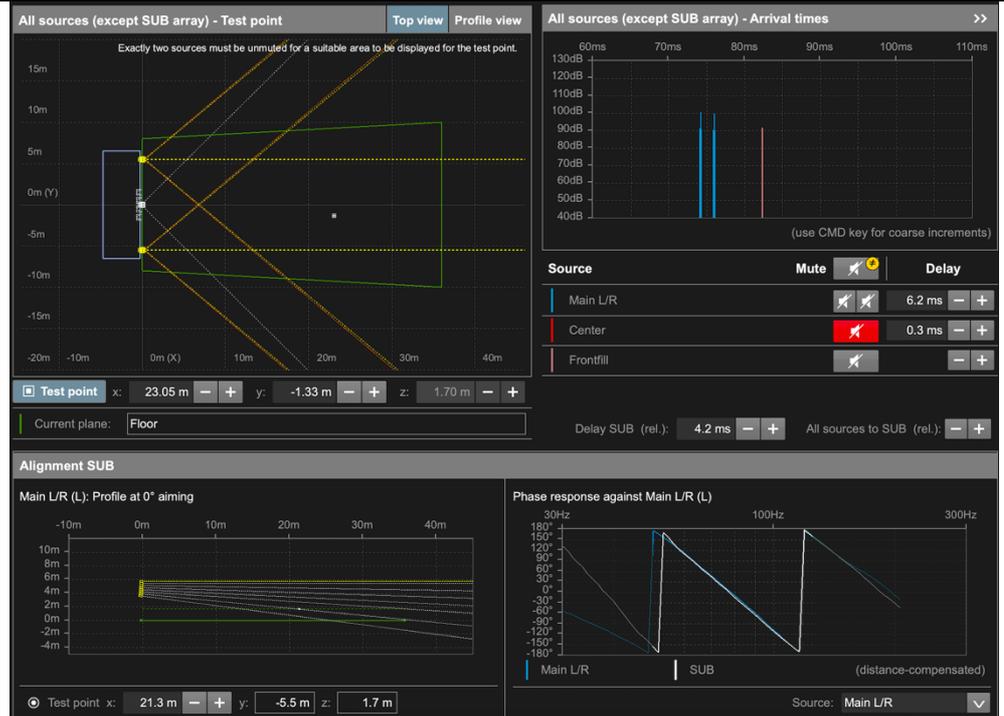
Vier Subwoofer zusammen mit den Line Arrays und Frontfills (Abstrahlung mit Filterung, CUT)



Time Alignment ohne eingestellte Verzögerungswerte

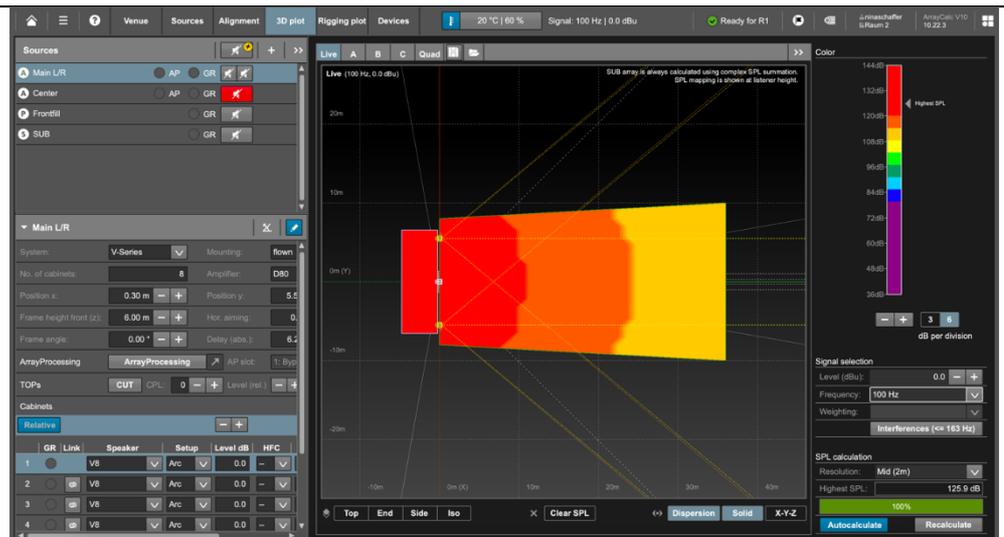


Time Alignment eingestellt: Subwoofer auf die Hauptbeschallung verzögert

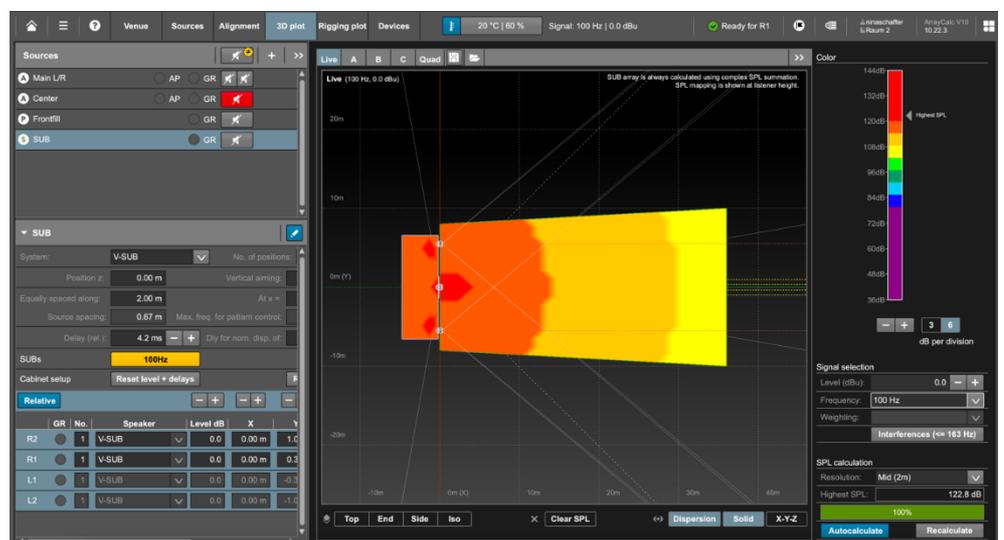


Auswirkung der CUT-Funktion bei 100 Hz:

Ohne Filterung



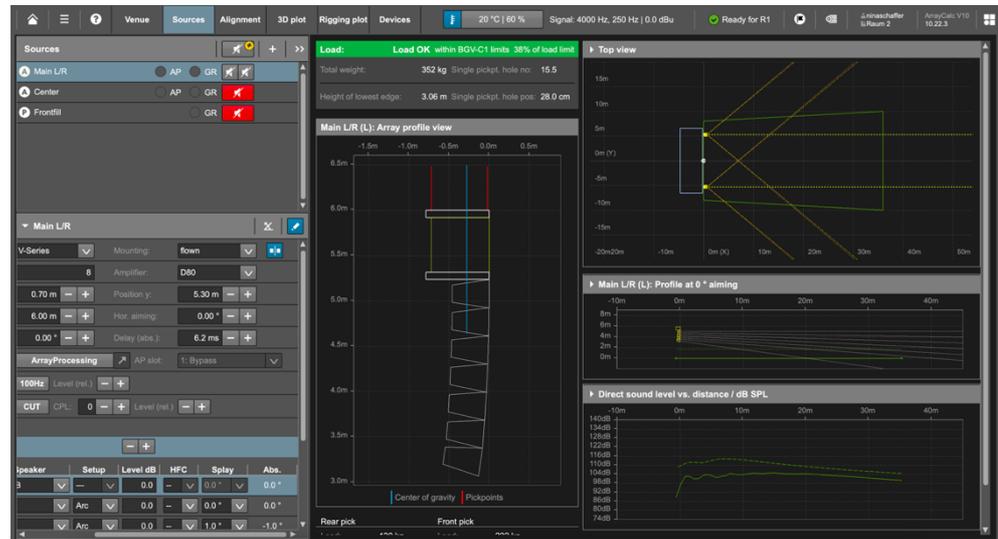
Mit Filterung



Anhang 7: Raum 2 – Aufbauvariante 2

Subwoofer im Line-Array integriert

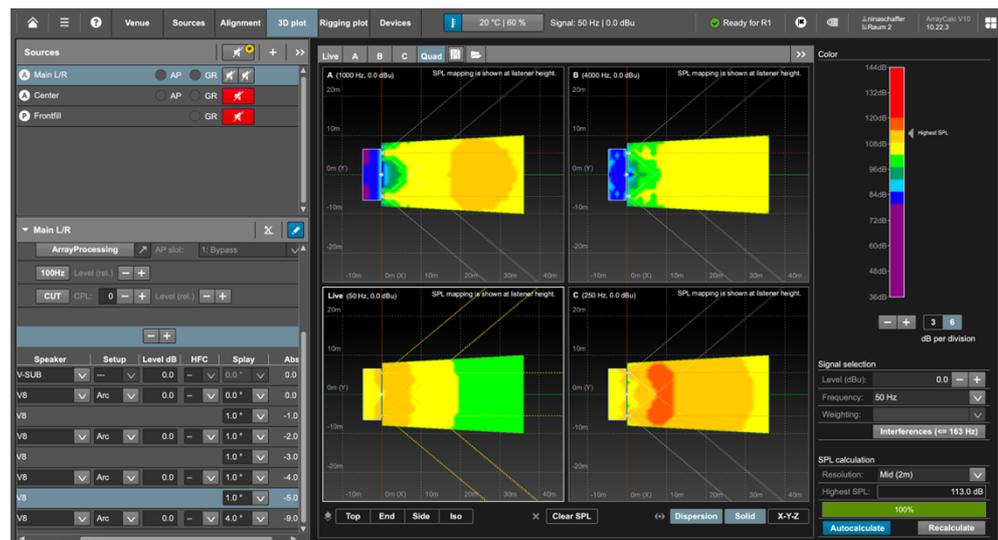
Positionierung Line Arrays mit integrierten Subwoofern



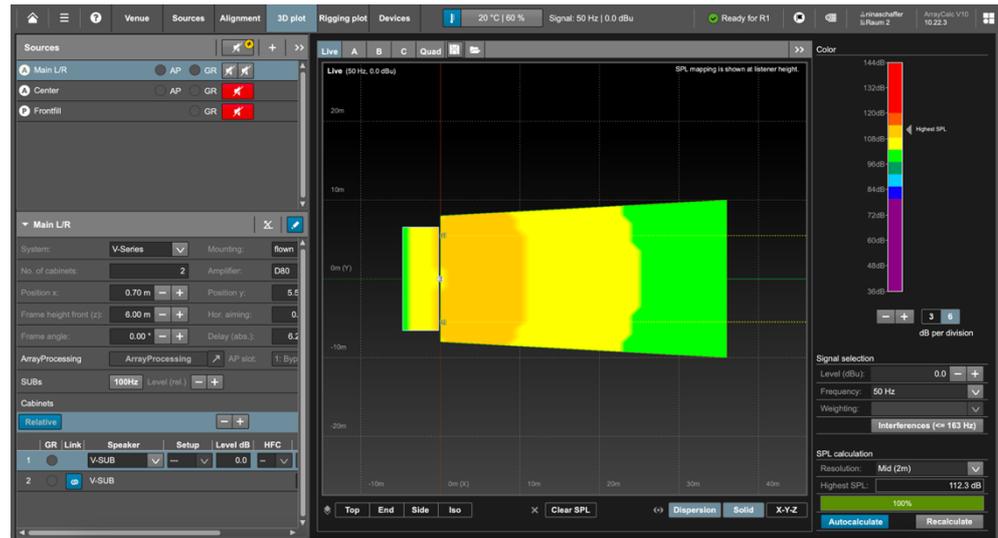
Winkel zwischen den Line-Array-Elementen

Splay	Abs.
0.0°	0.0°
0.0°	0.0°
1.0°	-1.0°
1.0°	-2.0°
1.0°	-3.0°
1.0°	-4.0°
1.0°	-5.0°
4.0°	-9.0°

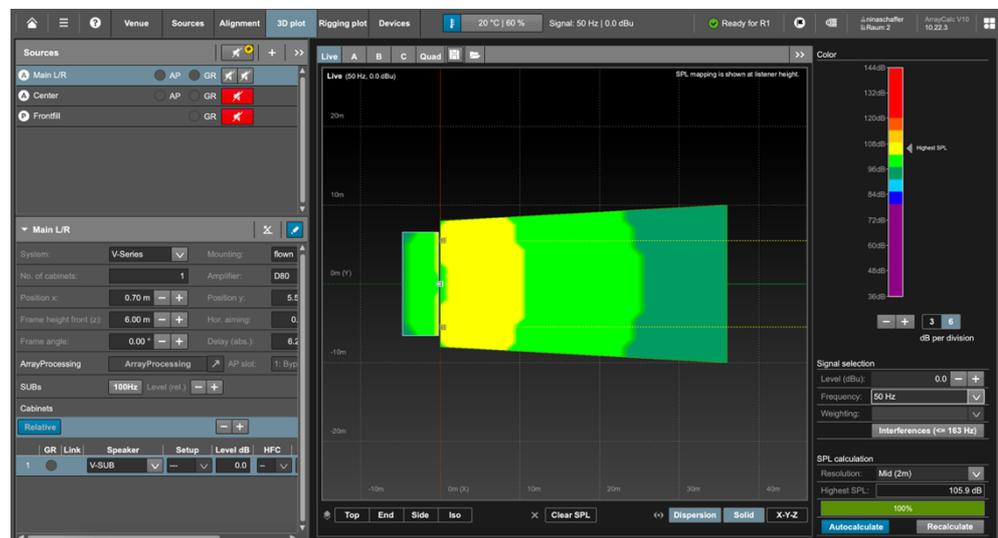
Schallpegelverteilung des Line Arrays mit den integrierten Subwoofern



Schallpegelverteilung der Subwoofer bei 50 Hz (zwei Subwoofer pro Seite)

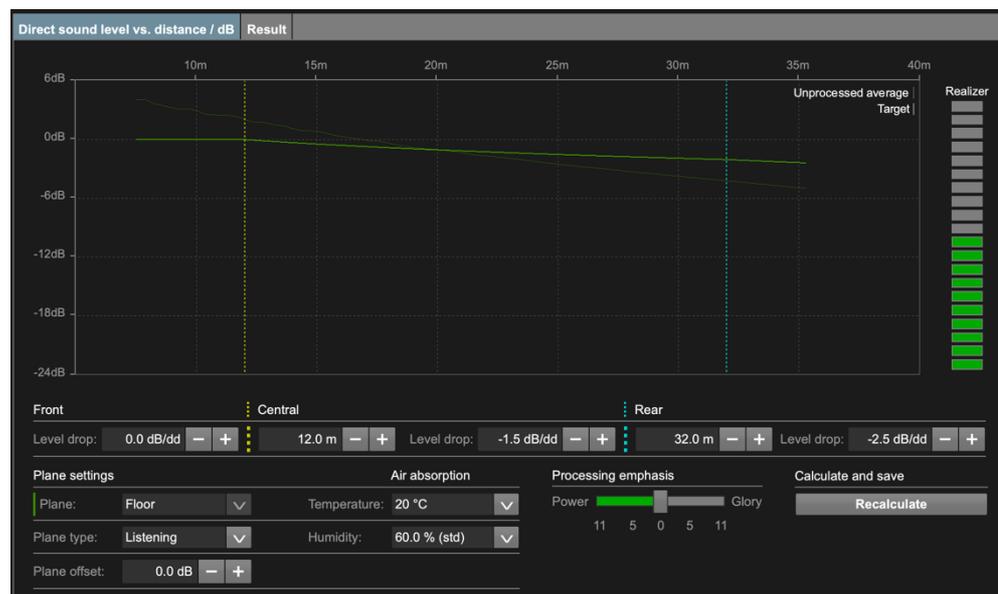


Schallpegelverteilung der Subwoofer bei 50 Hz (ein Subwoofer pro Seite)

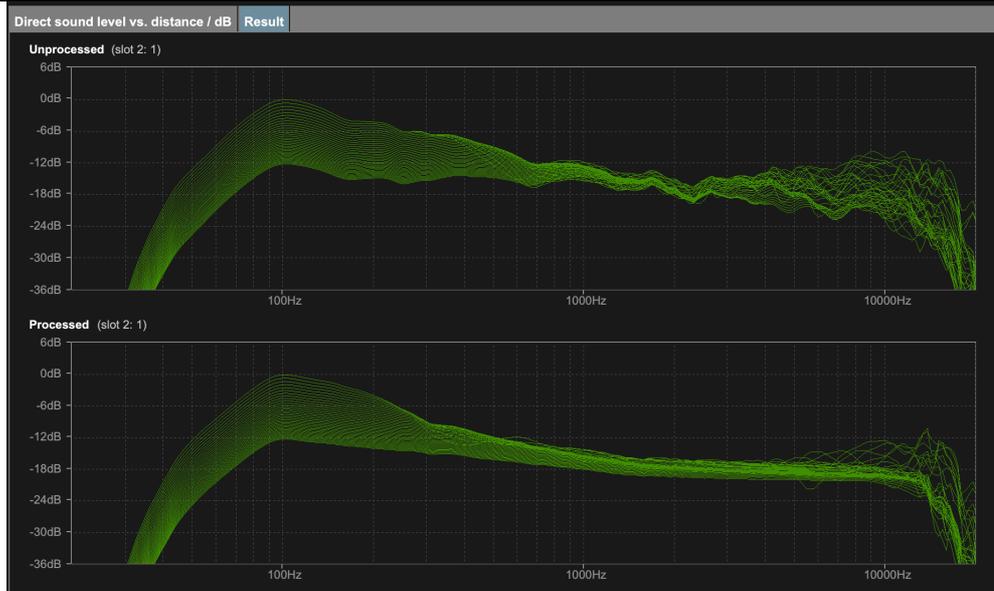


Array-Processing Line-Array:

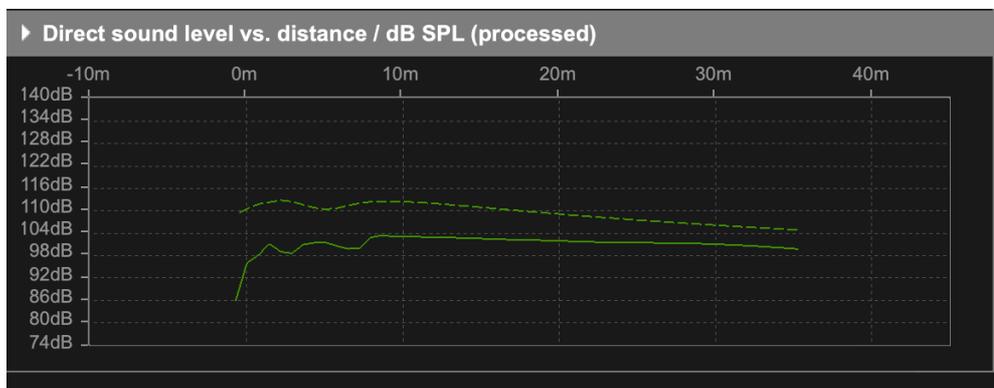
Einstellung des Array Processing



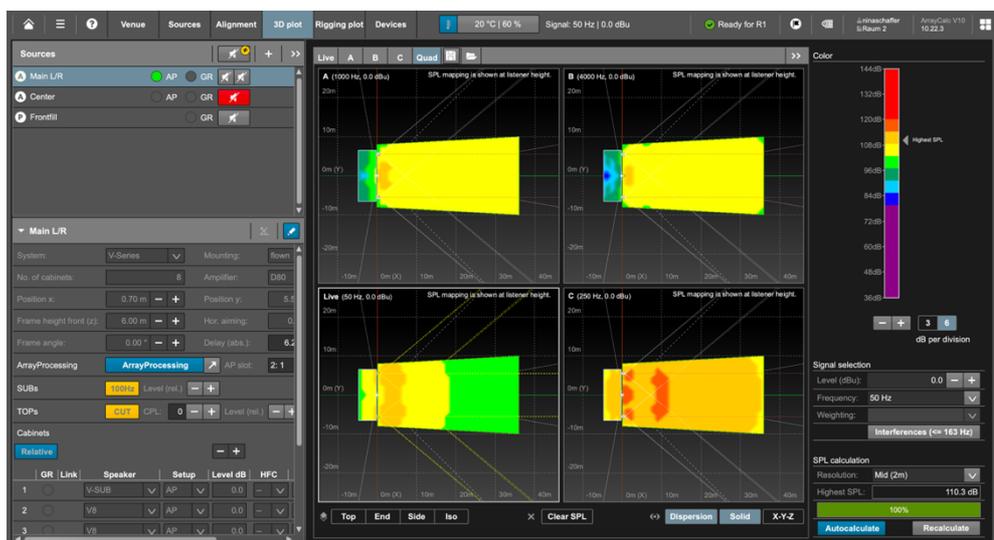
Frequenzgang ohne und mit Array Processing



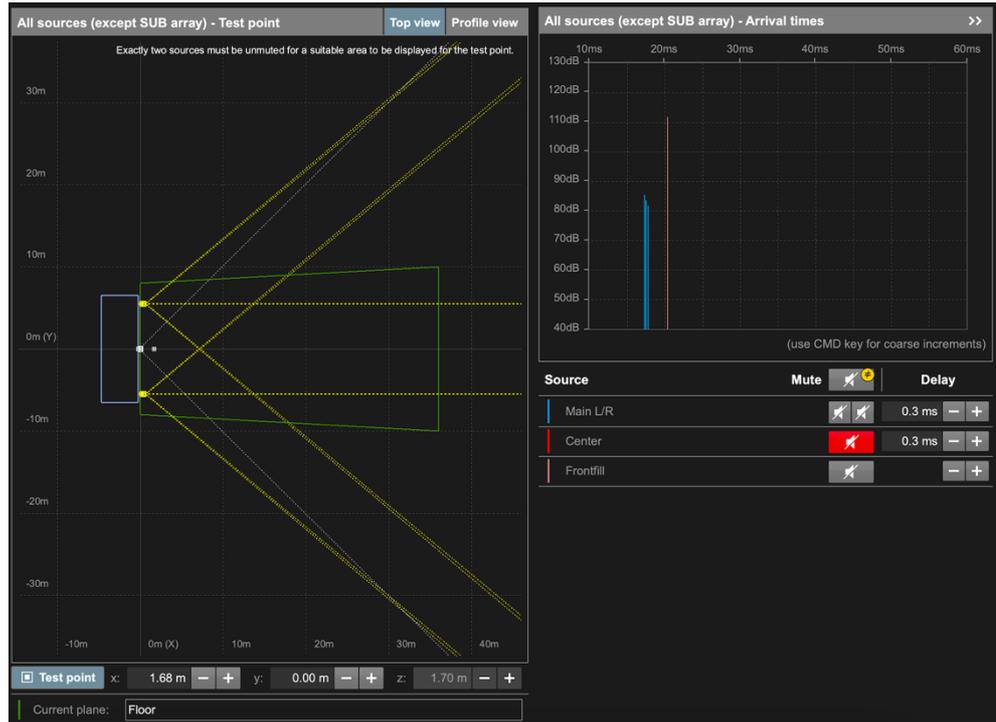
Schallpegelverlauf bei 200 und 400 Hz mit Array Processing



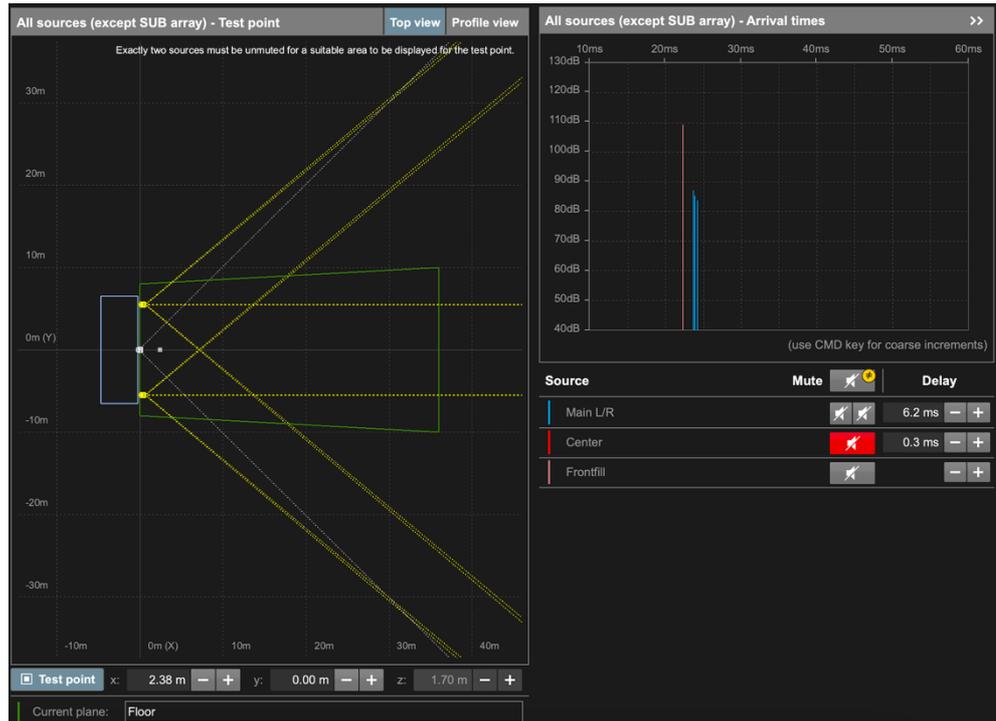
Schallpegelverteilung des Line Arrays mit Array-Processing und den Frontfills



Time Alignment ohne eingestellte Verzögerungswerte

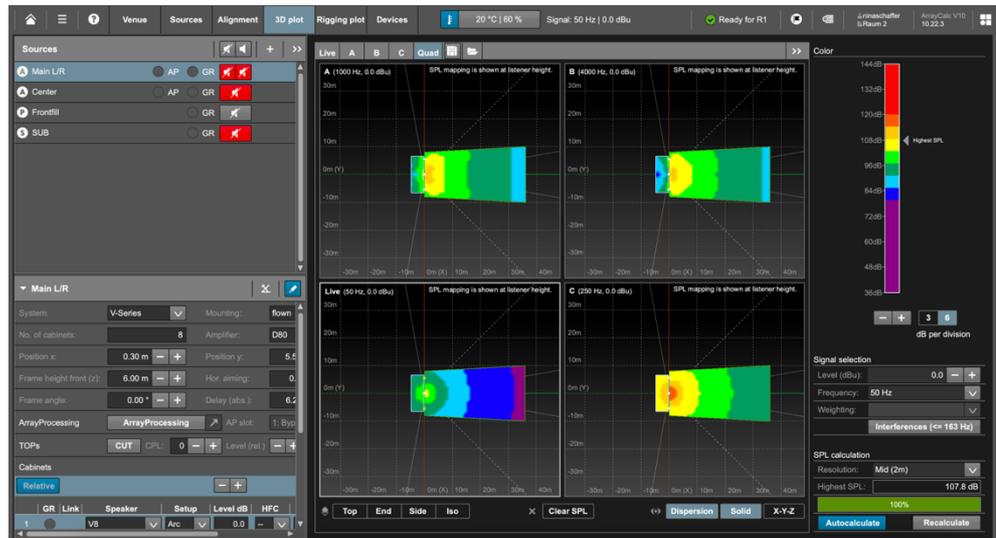


Time Alignment eingestellt

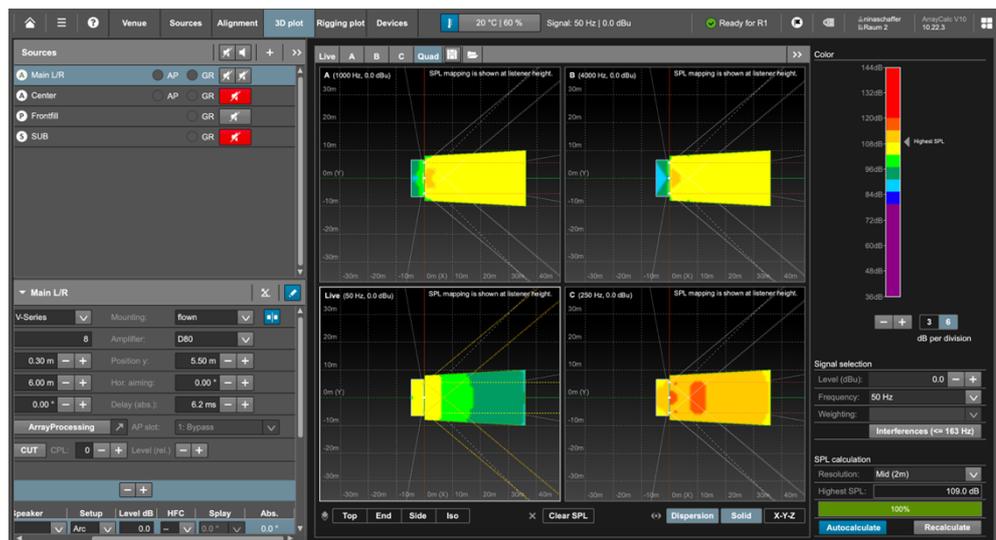


Anhang 8: Raum 2 – Vergleich der Frontfills mit einem Centerlautsprecher

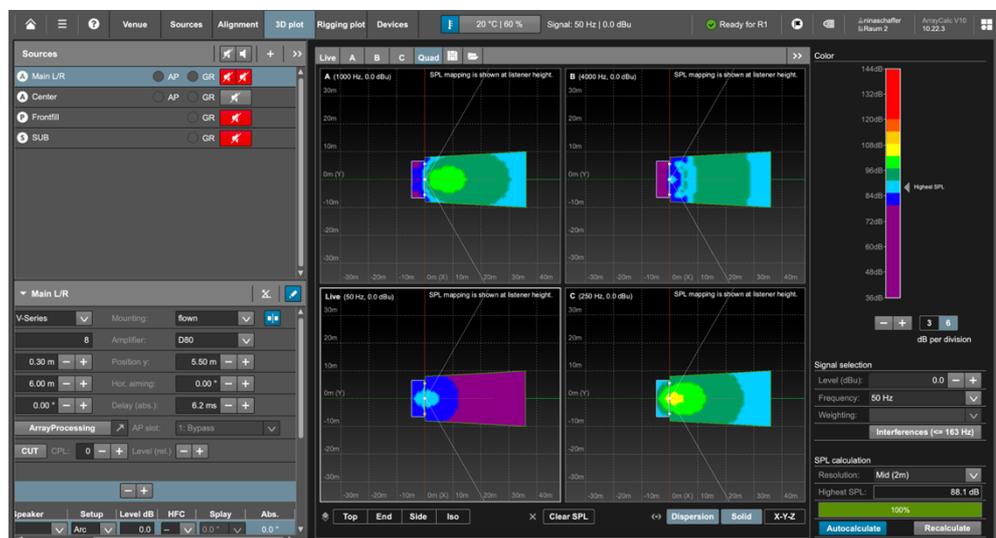
Schallpegelverteilung der Frontfills



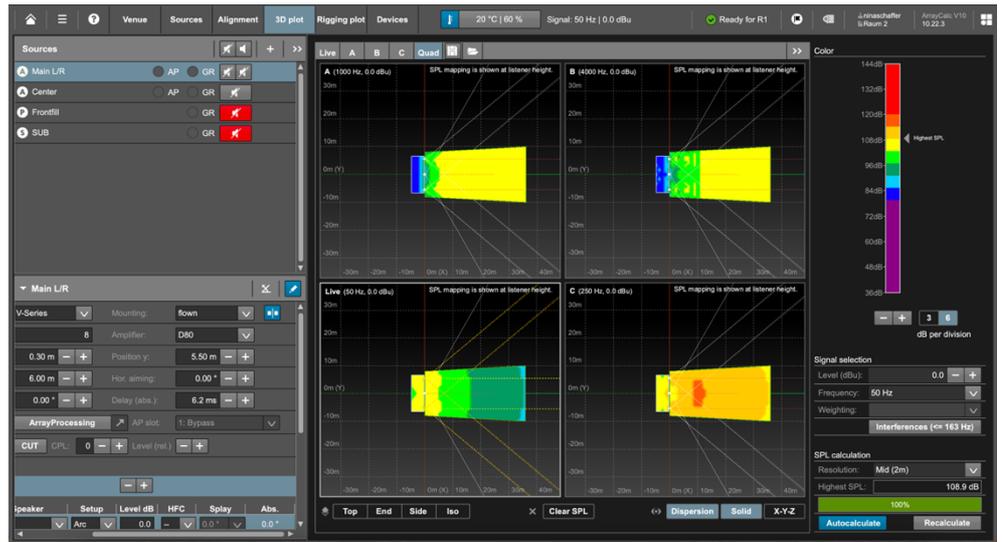
Schallpegelverteilung der Frontfills zusammen mit dem Line-Array der Hauptbeschallung



Schallpegelverteilung des Centers

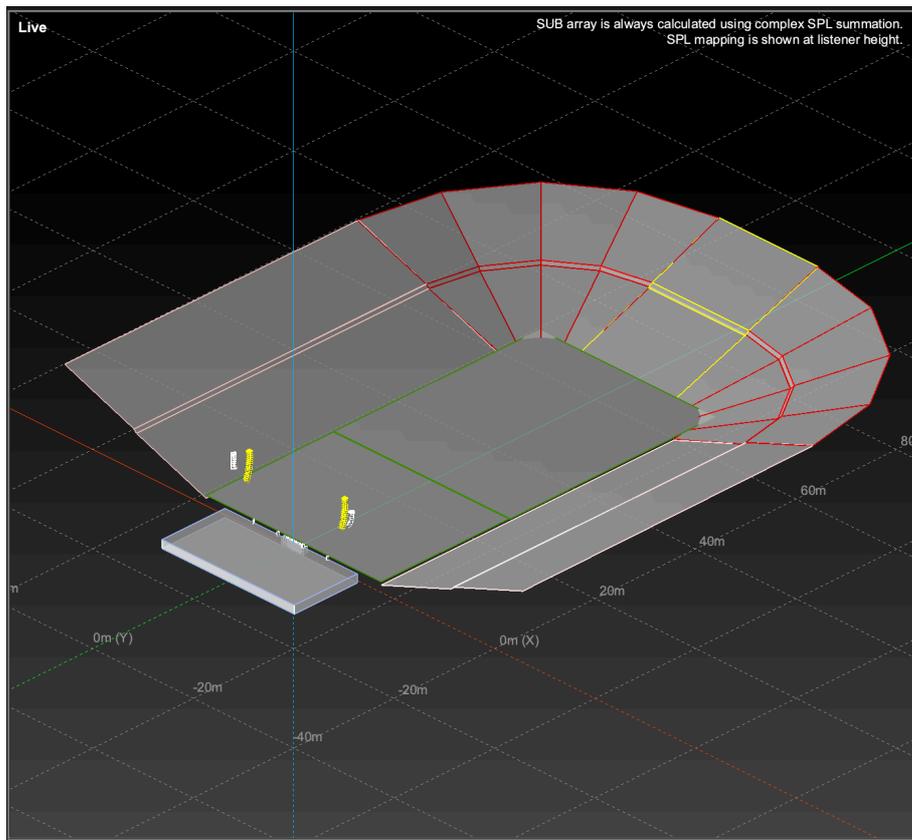
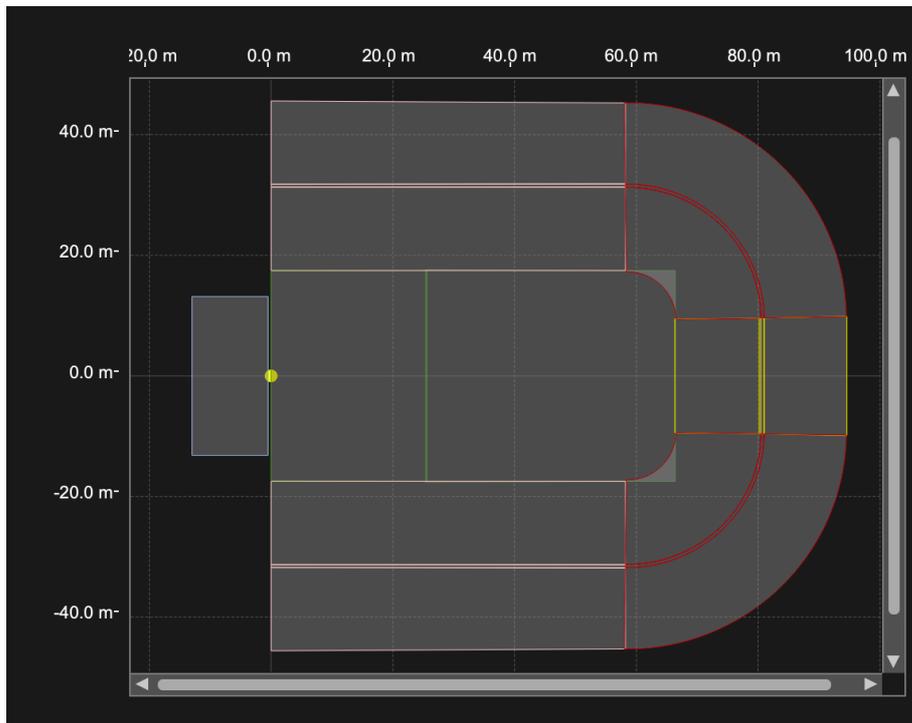


Schallpegelverteilung des Centers zusammen mit dem Line-Array der Hauptbeschallung



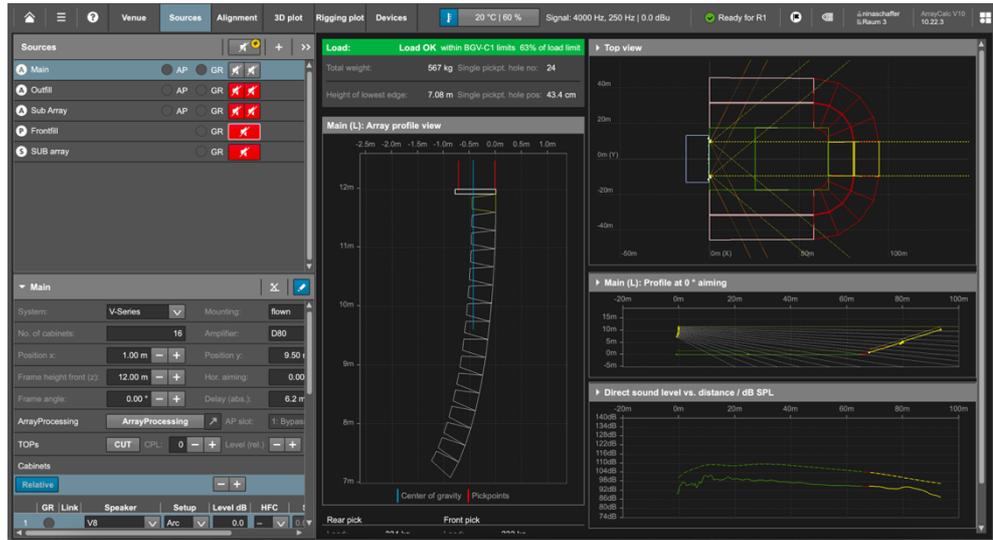
Anhang 9: Raum 3 – Mehrzweckarena

Modellierter Raum



Anhang 10: Raum 3 – Hauptbeschallung: Line Arrays

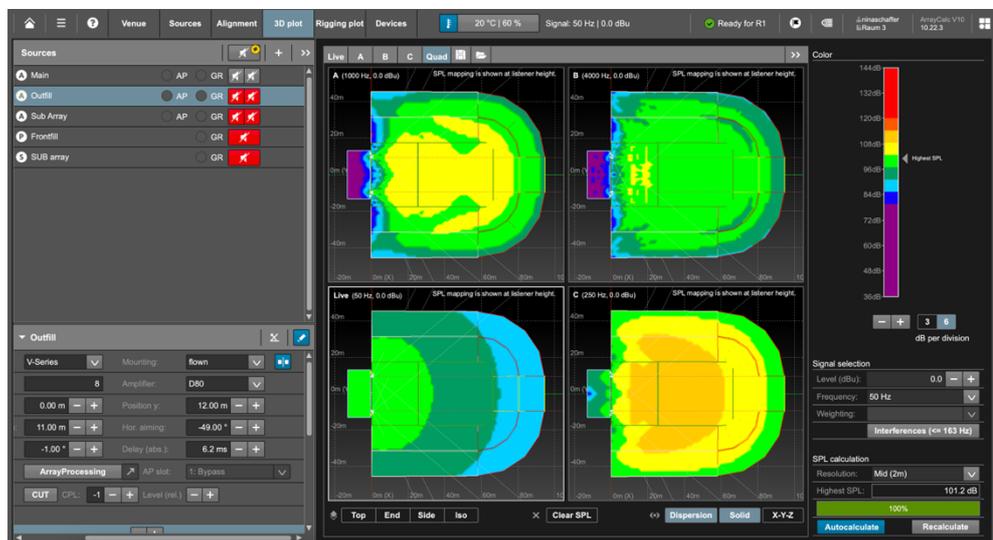
Positionierung und Ausrichtung des Haupt-Line-Arrays



Winkel zwischen den einzelnen Array-Elementen

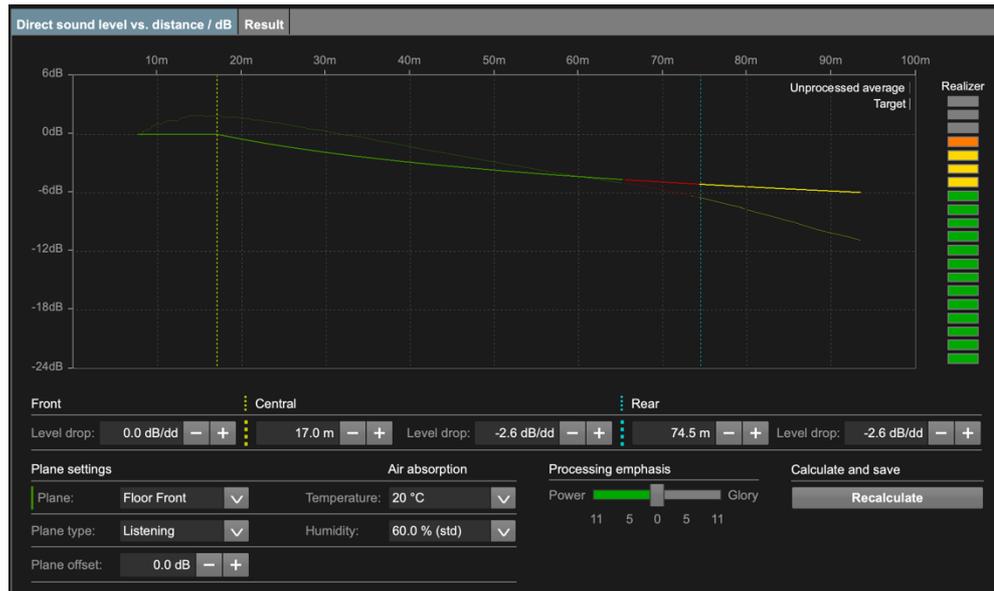
Link	Speaker	Setup	Level dB	HFC	Splay
	V8	Arc	0.0	--	0.0 °
⊗	V8	Arc	0.0	--	1.0 °
⊗	V8	Arc	0.0	--	1.0 °
⊗	V8	Arc	0.0	--	1.0 °
⊗	V8	Arc	0.0	--	1.0 °
⊗	V8	Arc	0.0	--	1.0 °
⊗	V8	Arc	0.0	--	1.0 °
⊗	V8	Arc	0.0	--	1.0 °
⊗	V8	Arc	0.0	--	1.0 °
⊗	V8	Arc	0.0	--	2.0 °
⊗	V8	Arc	0.0	--	2.0 °
⊗	V12	Arc	0.0	--	3.0 °
⊗	V12	Arc	0.0	--	3.0 °
⊗	V12	Arc	0.0	--	4.0 °
⊗	V12	Arc	0.0	--	7.0 °

Schallpegelverteilung des Haupt-Line-Arrays

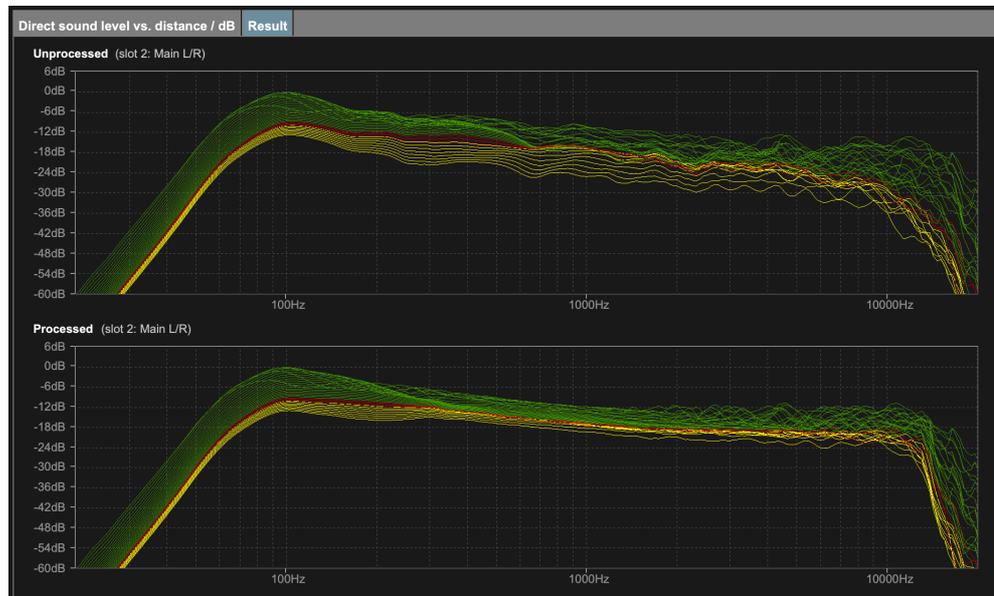


Array
Processing
Haupt-Line
Array:

Einstellung
des Array
Processing



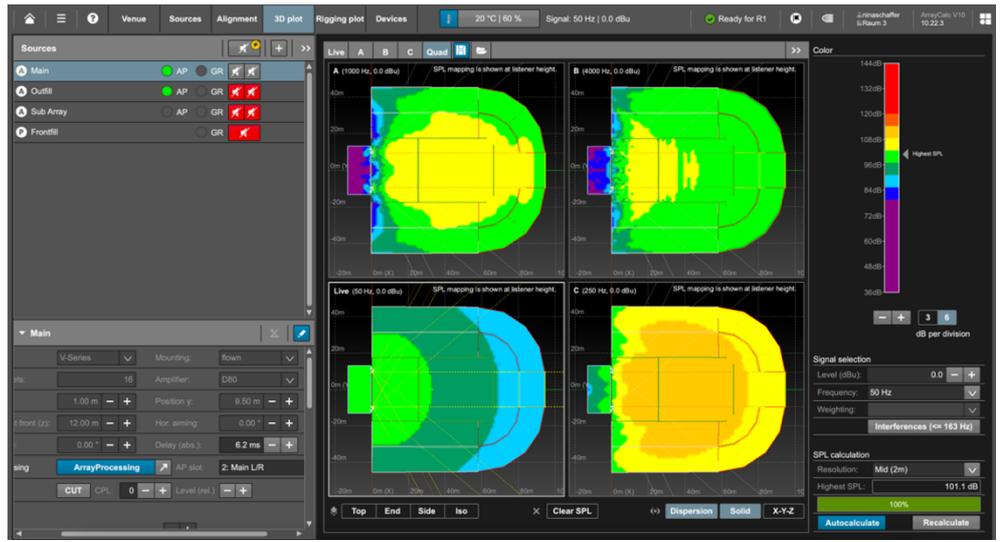
Frequenz-
gang ohne
und mit
Array
Processing



Schallpegel-
verlauf bei
200 und
400 Hz mit
Array
Processing



Schall- pegel- verteilung des Haupt- Line-Arrays mit Array- Processing

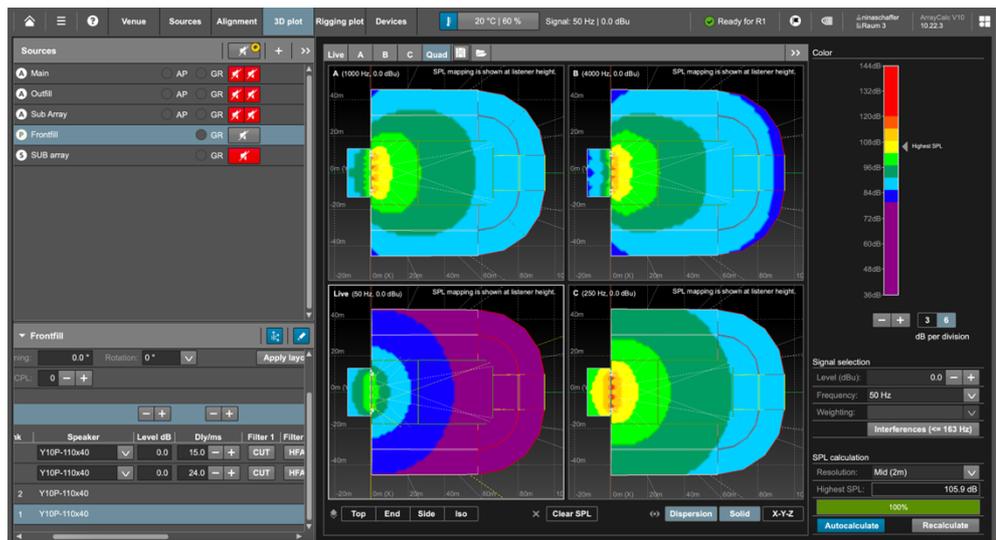


Anhang 11: Raum 3 – Fülllautsprecher

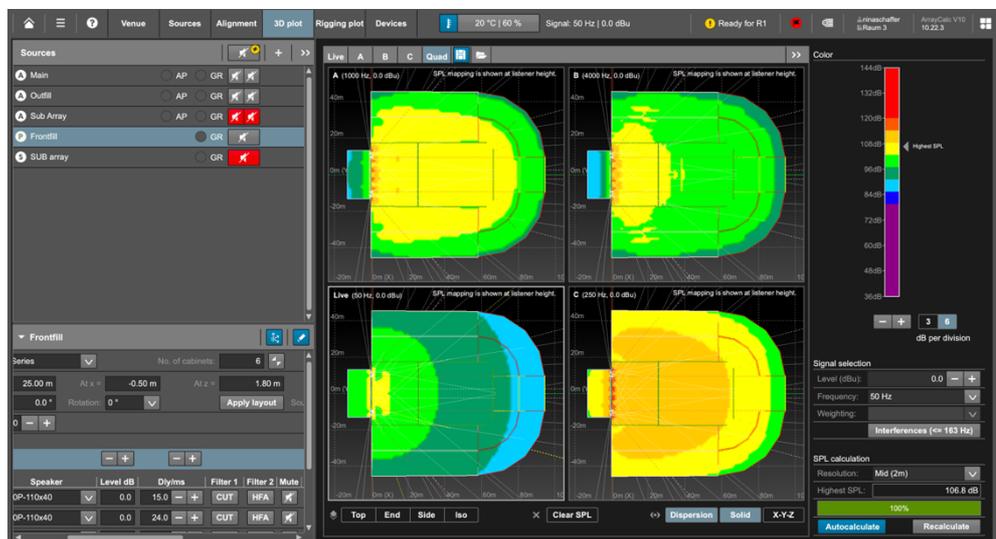
Positionierung der Frontfills



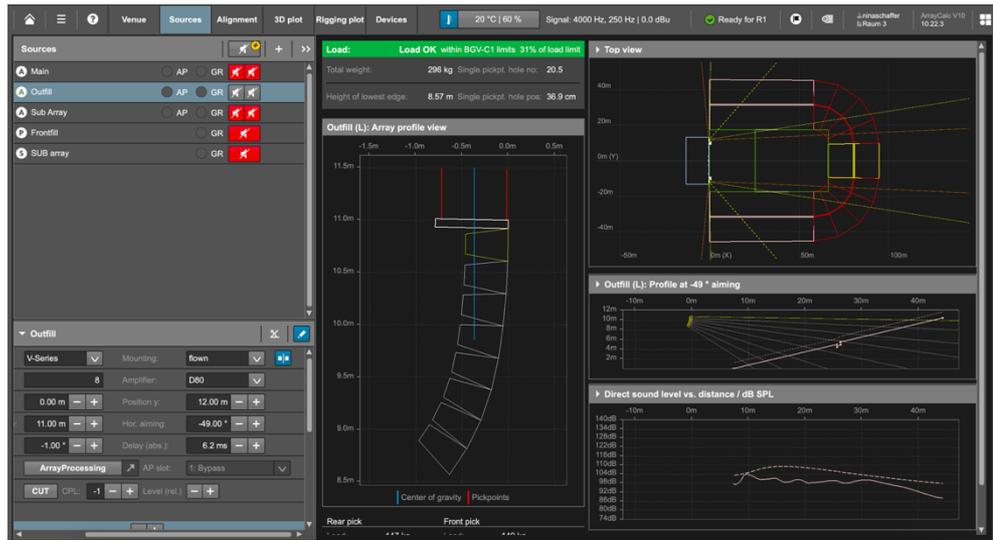
Schallpegelverteilung der Frontfills



Schallpegelverteilung von sechs anstatt vier Frontfills zusammen mit dem Haupt-Line-Array und Outfills (Einbrüche seitlich vor der Bühne)



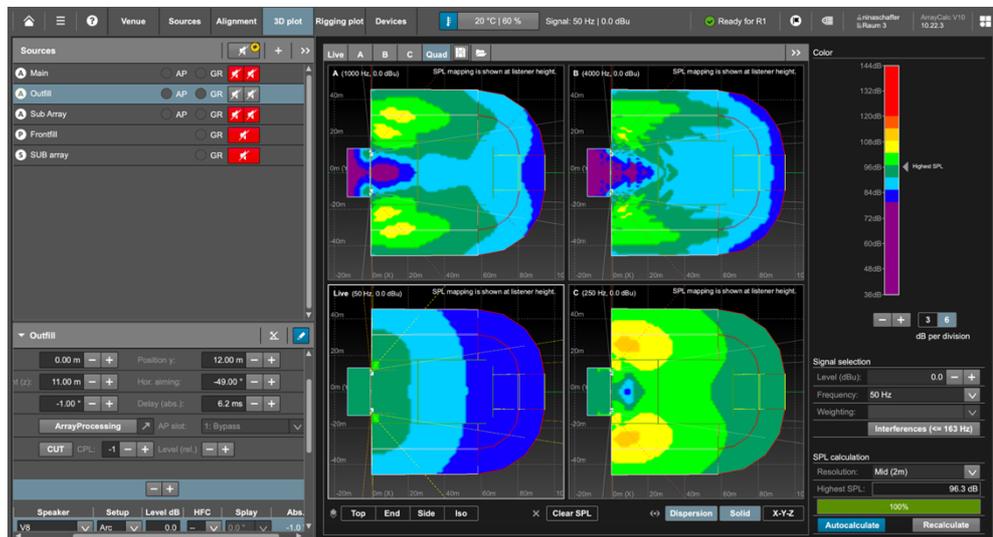
Positionierung der Outfills



Winkel zwischen den Array-Elementen

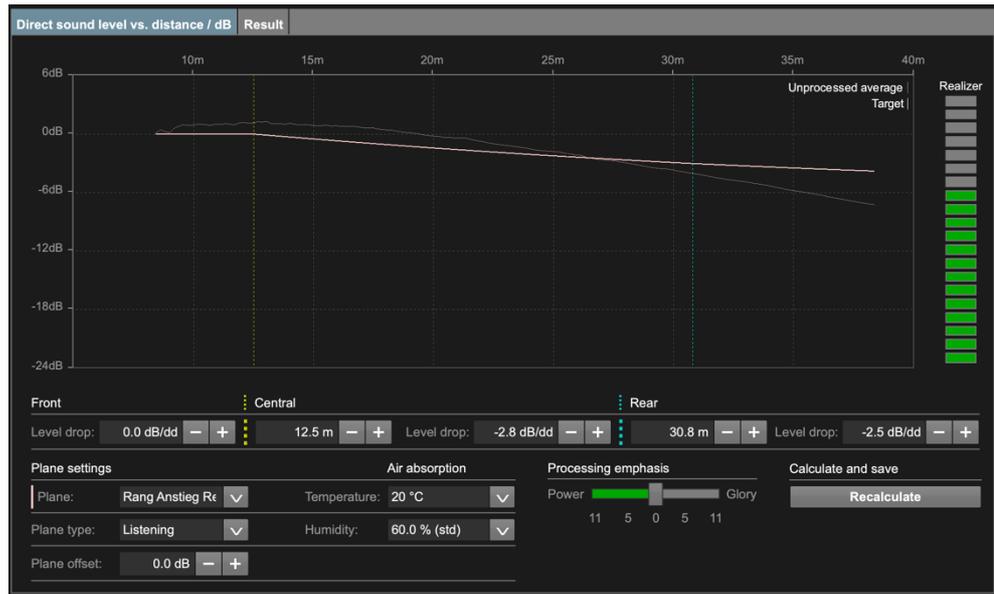
Speaker	Setup	Level dB	HFC	Splay	Abs.
	Arc	0.0	--	0.0°	-1.0°
				2.0°	-3.0°
	Arc	0.0	--	3.0°	-6.0°
				3.0°	-9.0°
	Arc	0.0	--	5.0°	-14.0°
				7.0°	-21.0°
	Arc	0.0	--	8.0°	-29.0°
				8.0°	-37.0°

Schallpegelverteilung der Outfills

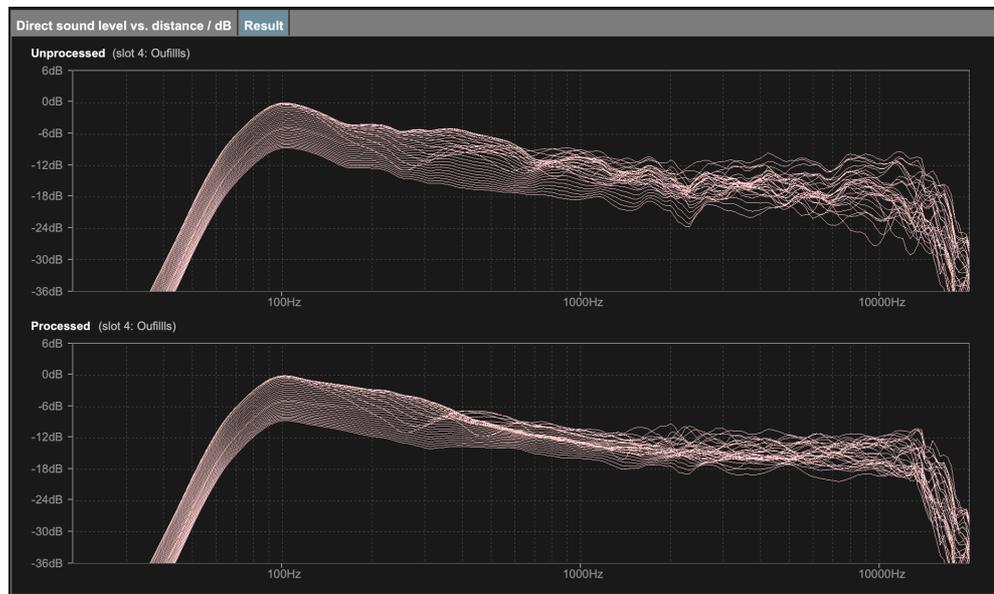


Array-Processing
Outfills:

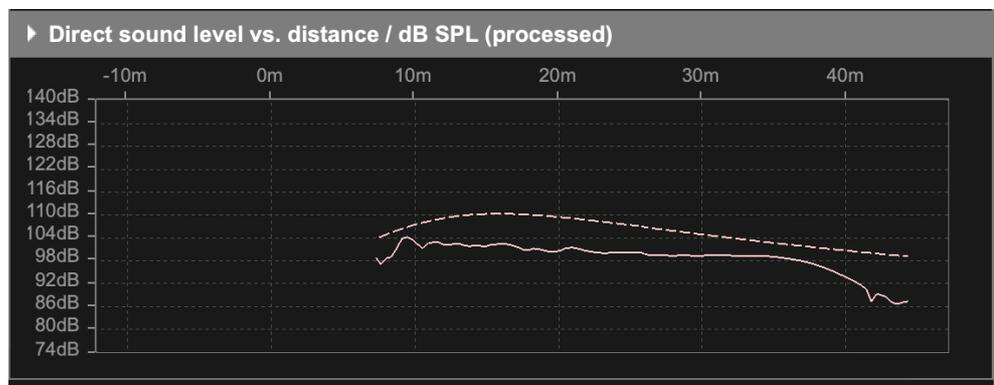
Einstellung
des Array
Processing



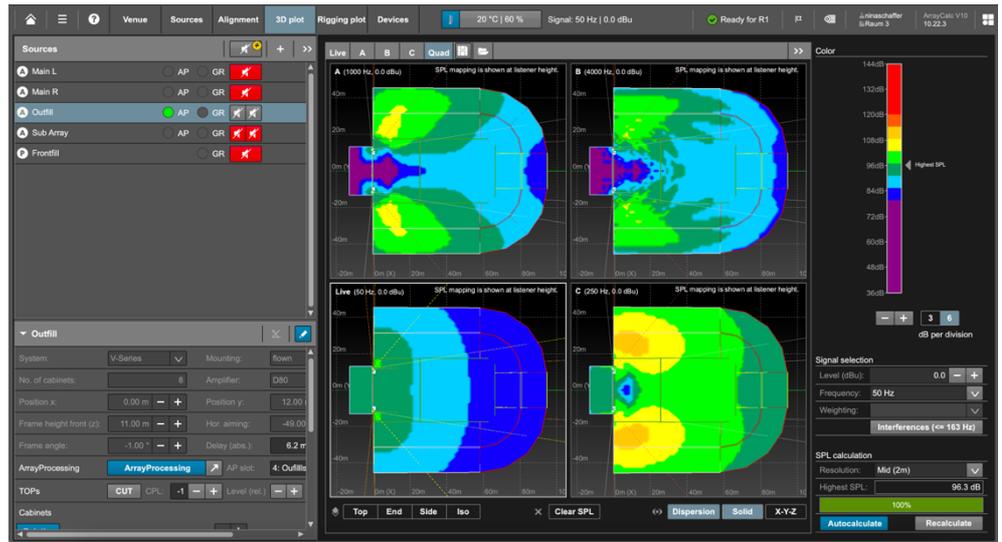
Frequenz-
gang ohne und
mit
Array
Processing



Schallpegel-
verlauf bei
200 und
400 Hz mit
Array
Processing

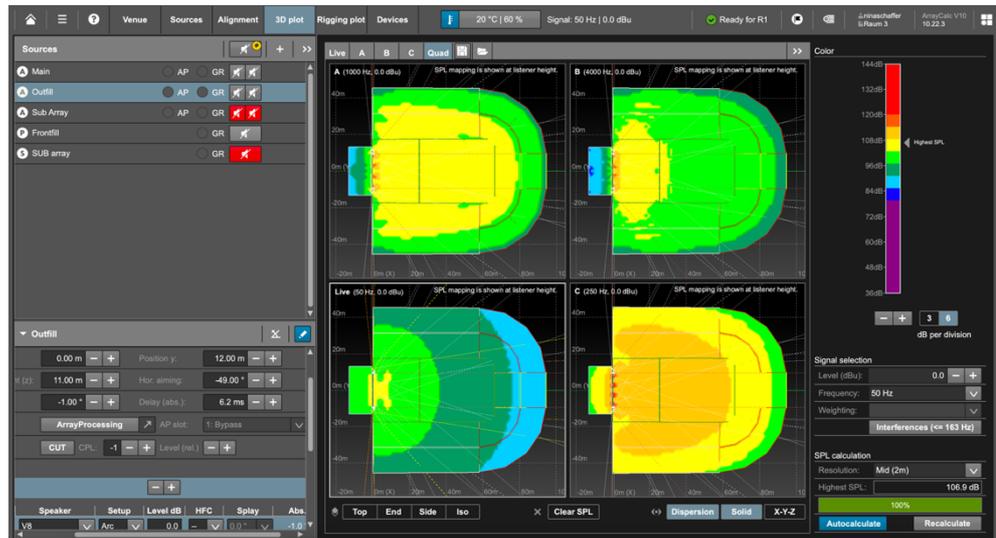


Schall- pegel- verteilung der Outfills mit Array- Processing

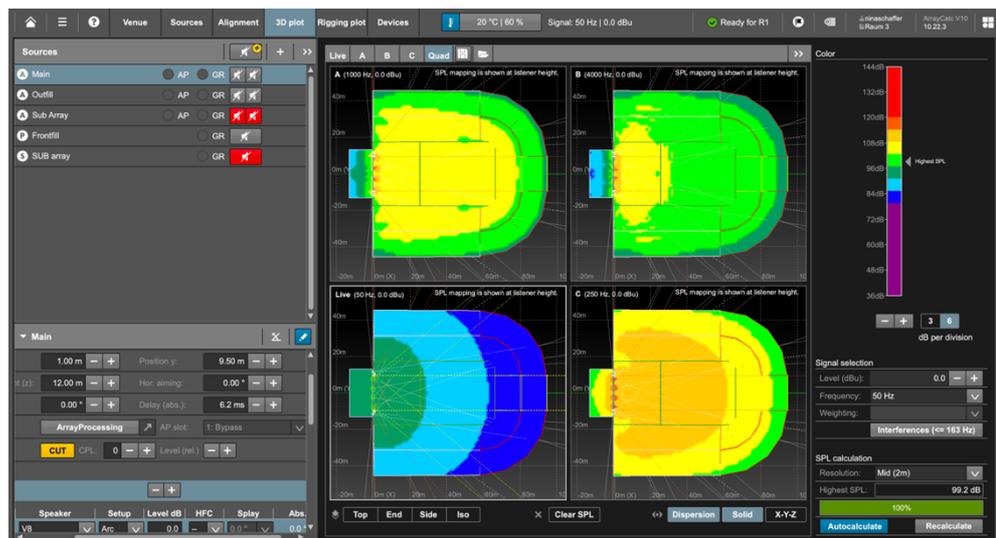


Anhang 12: Raum 3 – Line Arrays mit Frontfills und Outfills

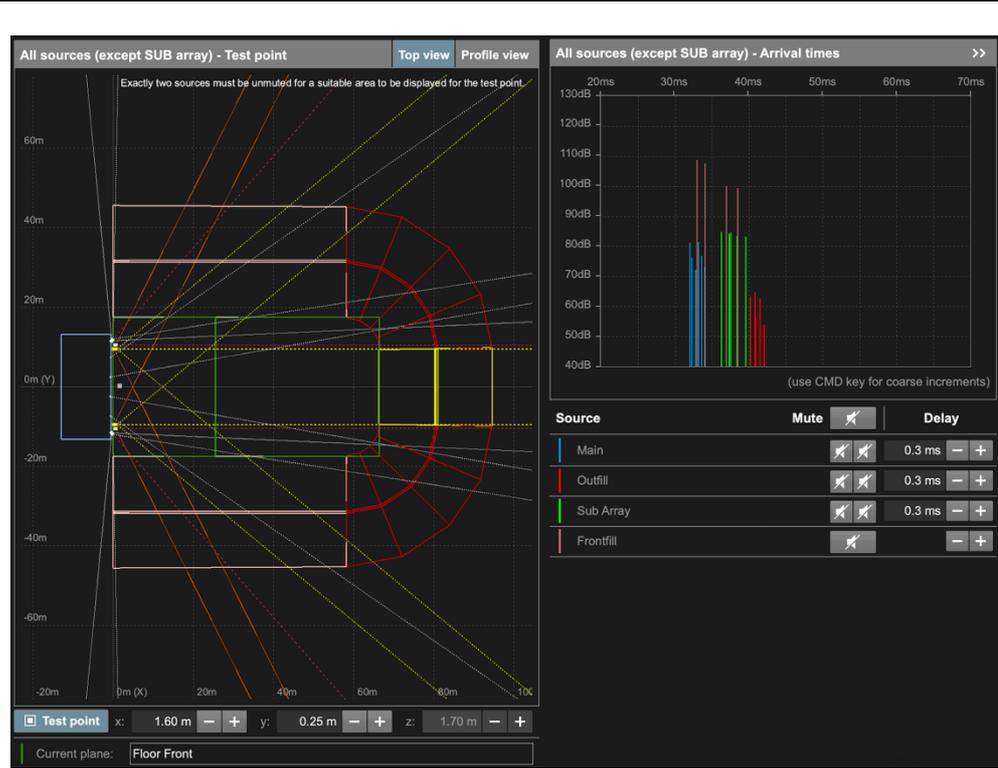
Schallpegelverteilung der Line Arrays, Frontfills und Outfills zusammen ohne CUT-Funktion



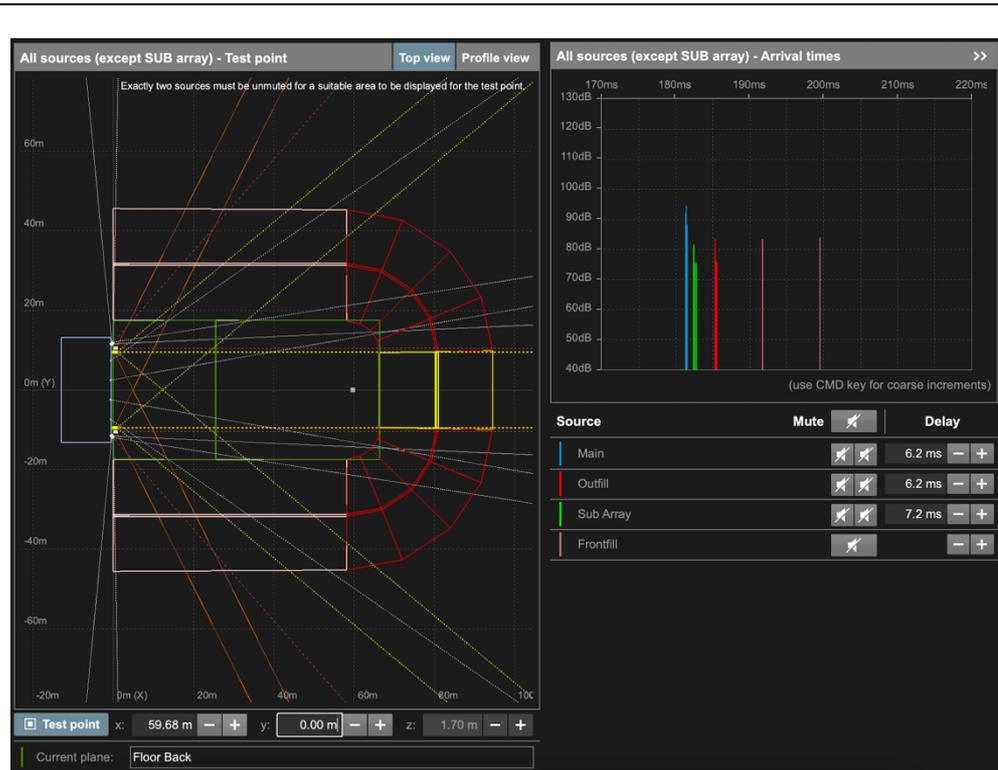
Schallpegelverteilung der Line Arrays, Frontfills und Outfills zusammen mit CUT-Funktion



Time Alignment: ohne eingestellte Verzögerungswerte der einzelnen Systeme

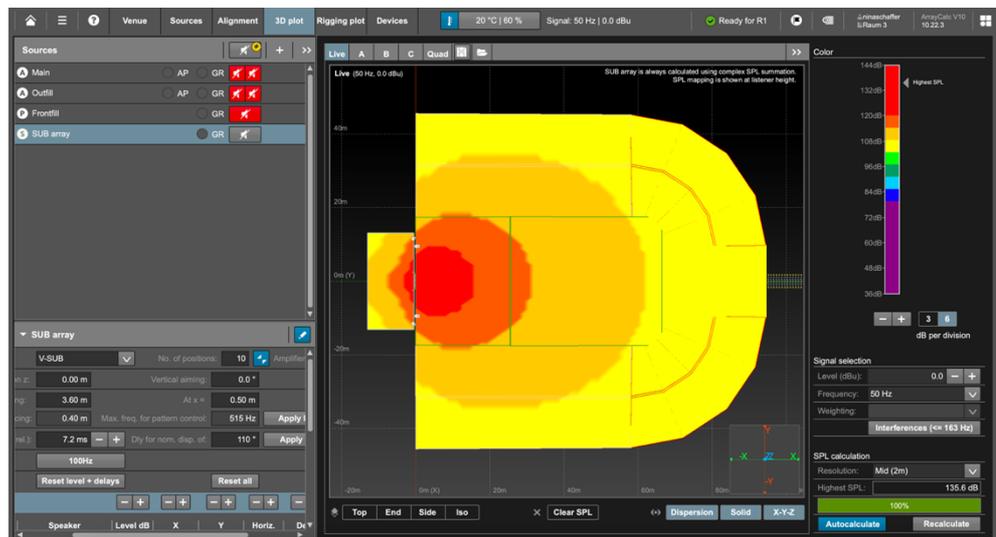
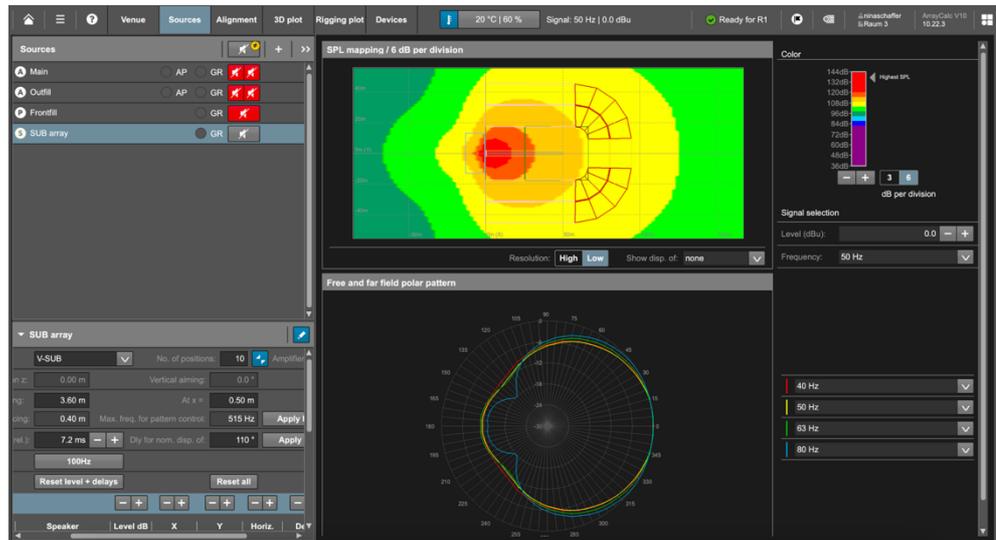


Time Alignment: Verzögerungszeit für jedes System angepasst

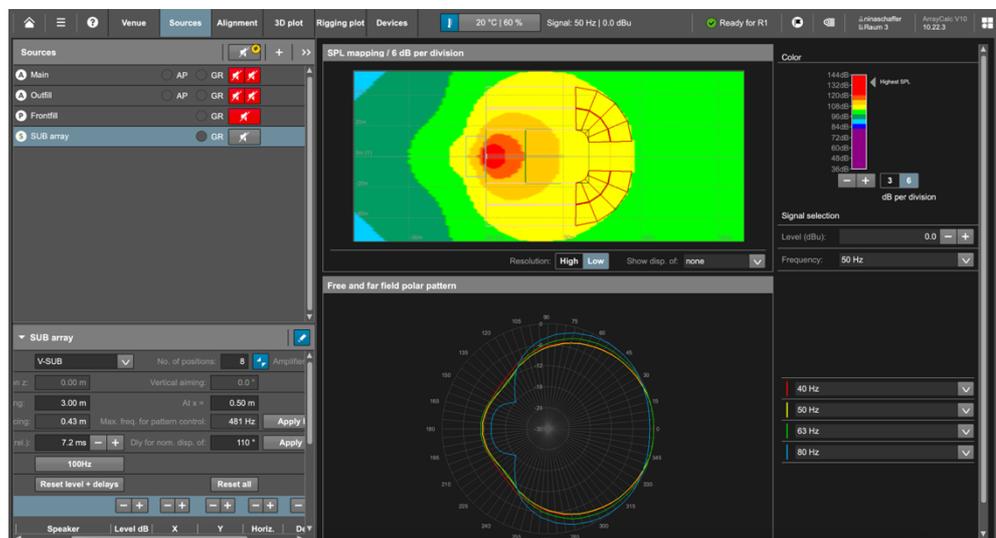


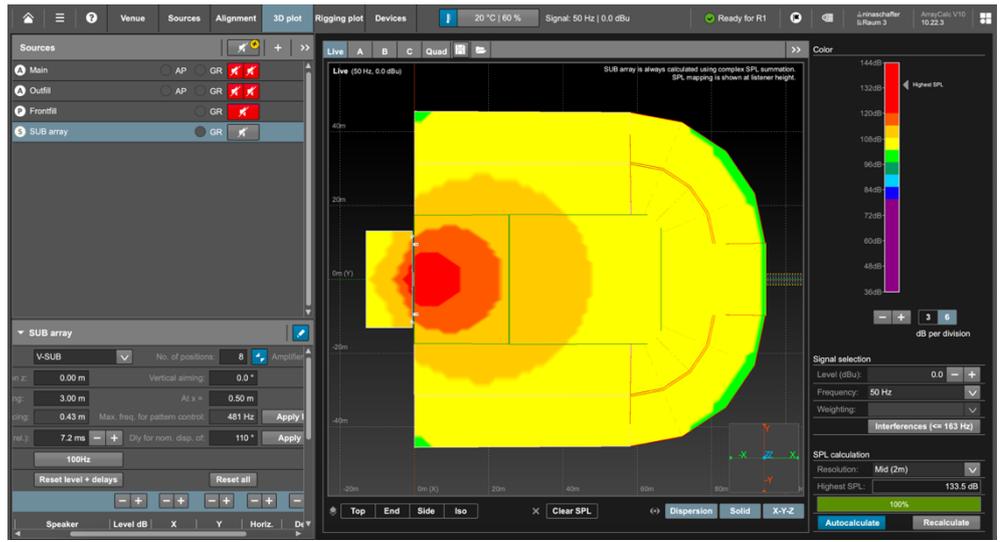
Anhang 13: Raum 3 – Subwooferposition auf dem Boden

Zehn
Subwoofer
(Position-
ierung und
Schallpegel-
verteilung
bei 50 Hz)

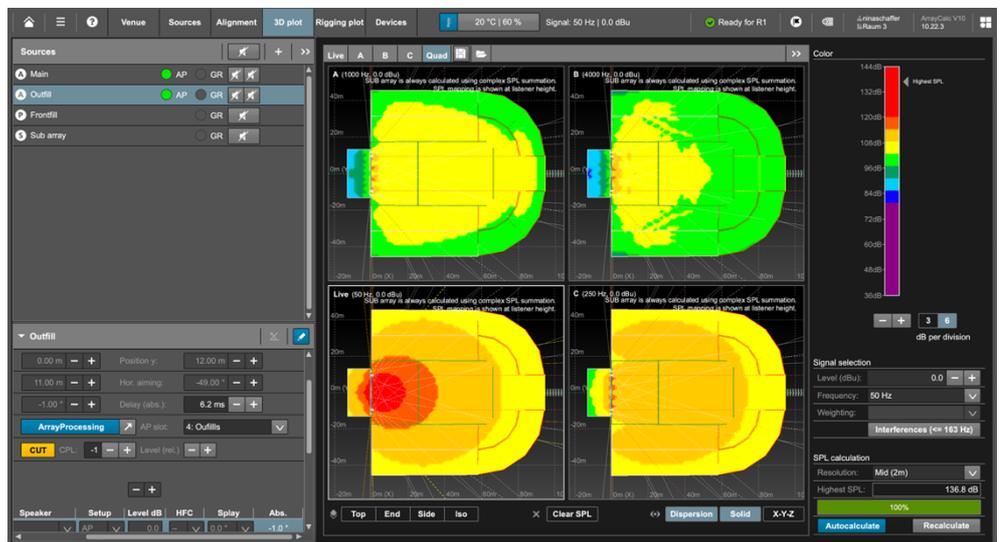


Acht
Subwoofer
(Position-
ierung und
Schallpegel-
verteilung
bei 50 Hz)

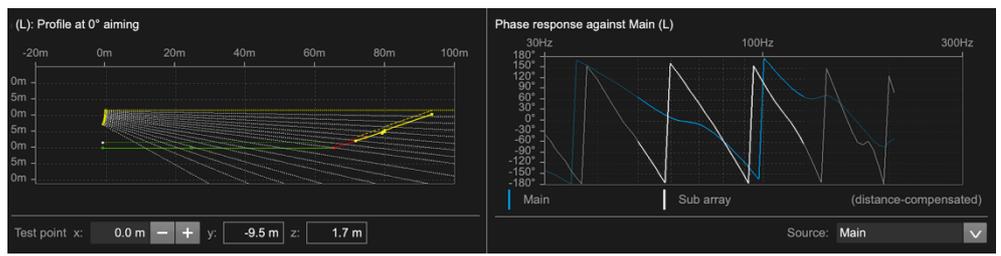




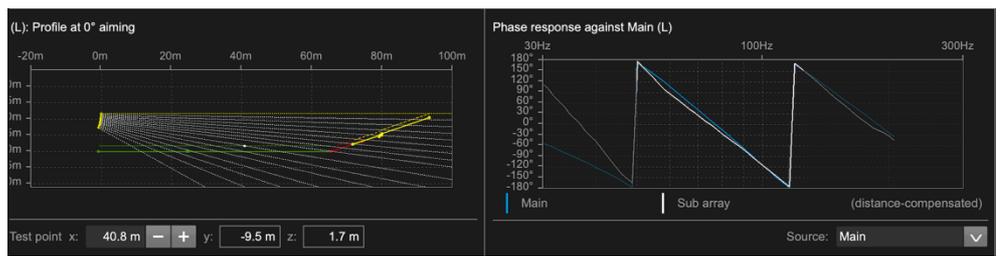
Zehn Subwoofer zusammen mit dem Line-Array und den Fülllautsprechern



Time Alignment der Subwoofer nicht eingestellt

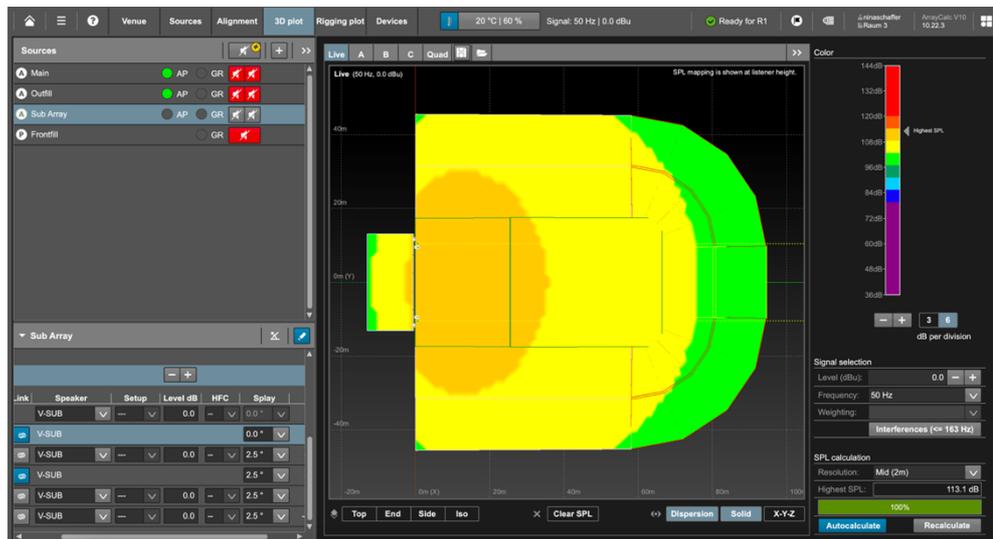
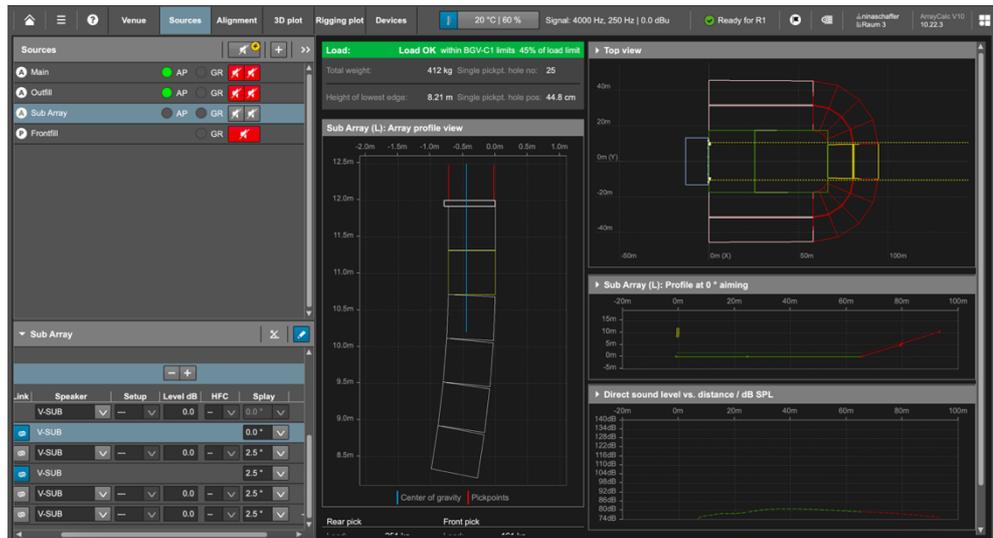


Time Alignment der Subwoofer eingestellt

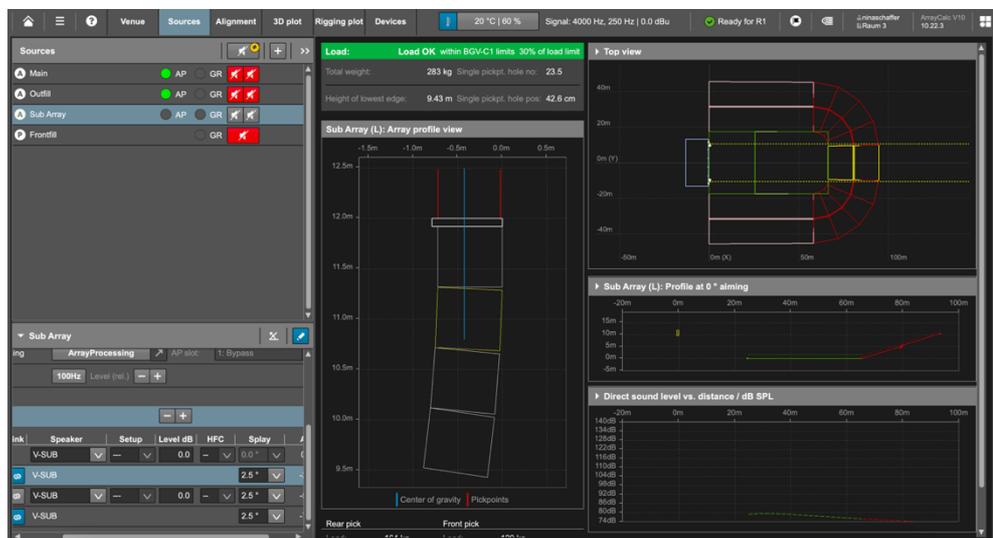


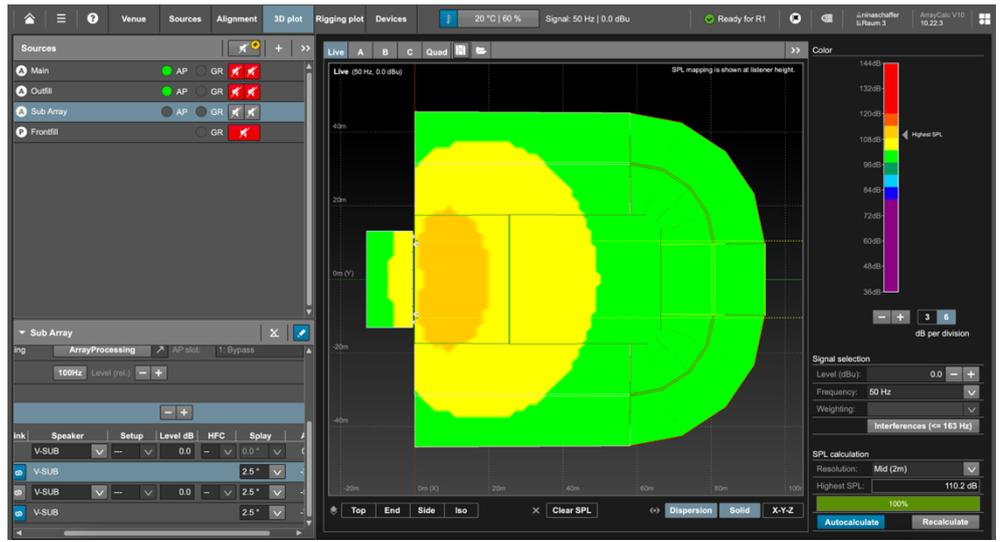
Anhang 14: Raum 3 – Subwoofer als eigenes Line Array

Array mit sechs Subwoofern (Positionierung und Schallpegelverteilung bei 50 Hz)



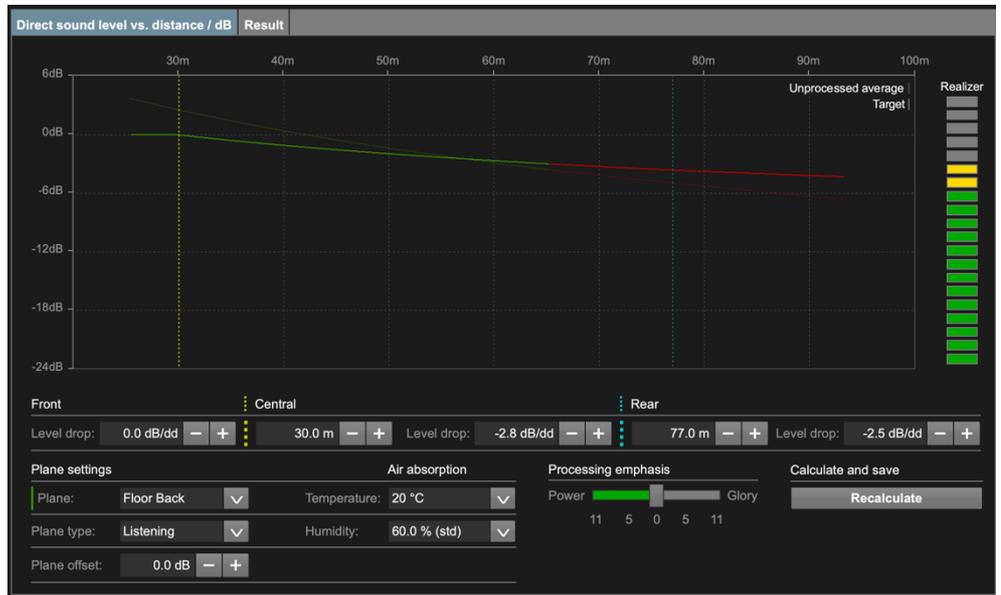
Array mit vier Subwoofern (Positionierung und Schallpegelverteilung bei 50 Hz)



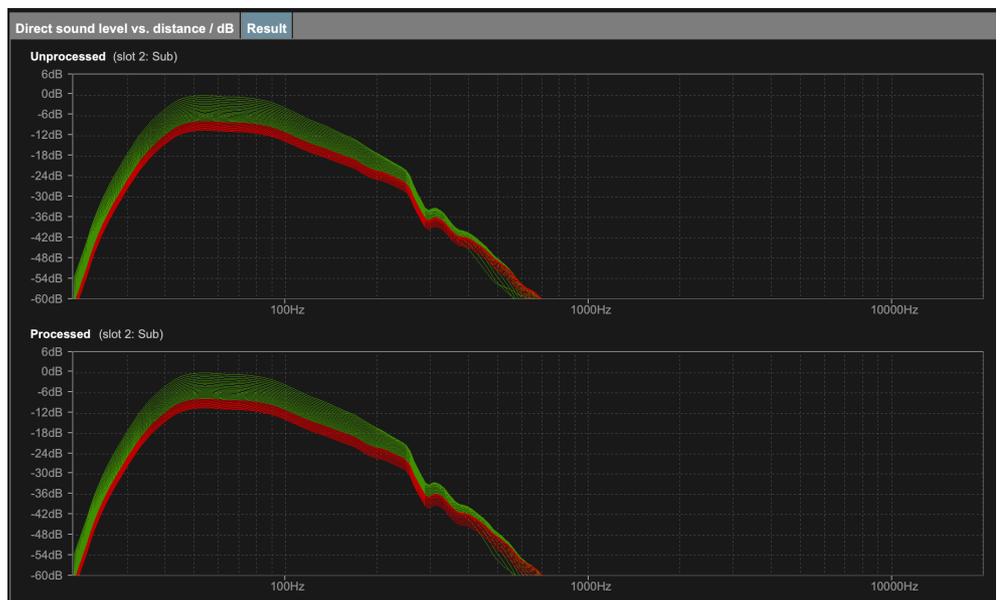


Array Processing:
System mit sechs Subwoofer

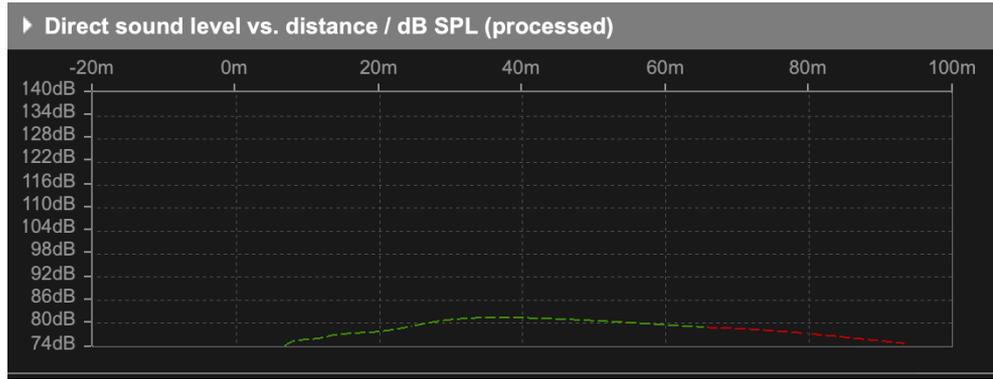
Einstellung des Array Processing



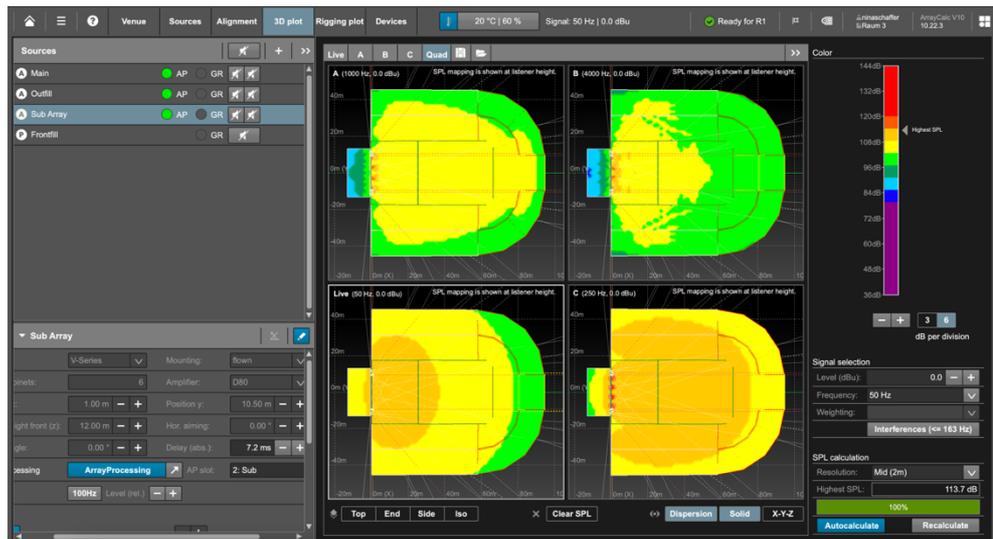
Frequenzgang ohne und mit Array Processing



Schallpegelverlauf bei 200 und 400 Hz mit Array Processing

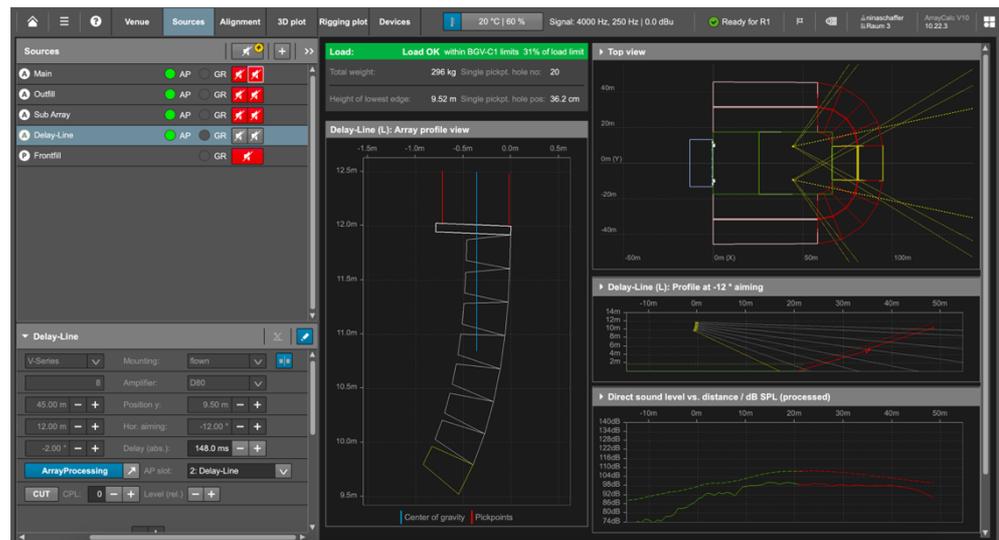


Geflogenes Sub-Array zusammen mit dem Haupt-Line-Array und den Fills

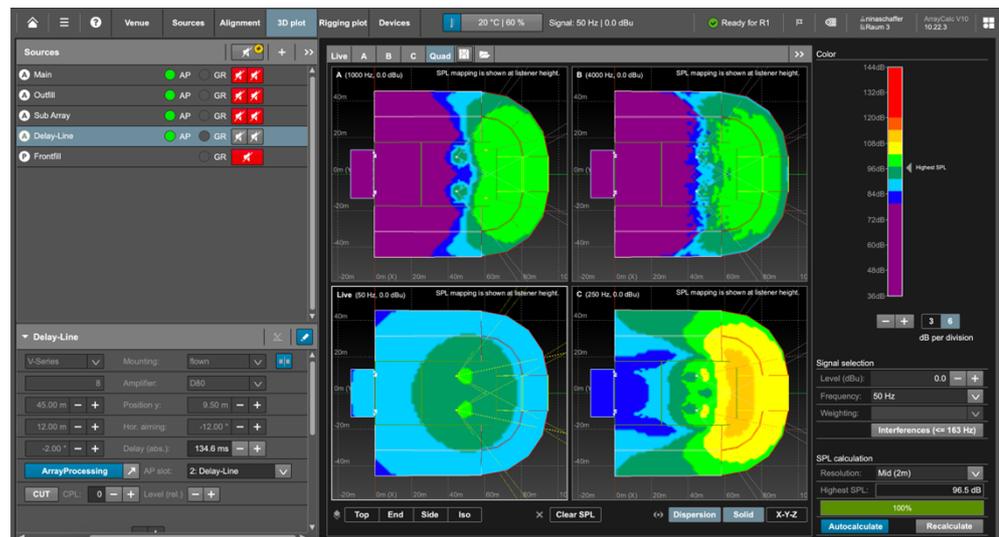


Anhang 15: Raum 3 – Delay-Line

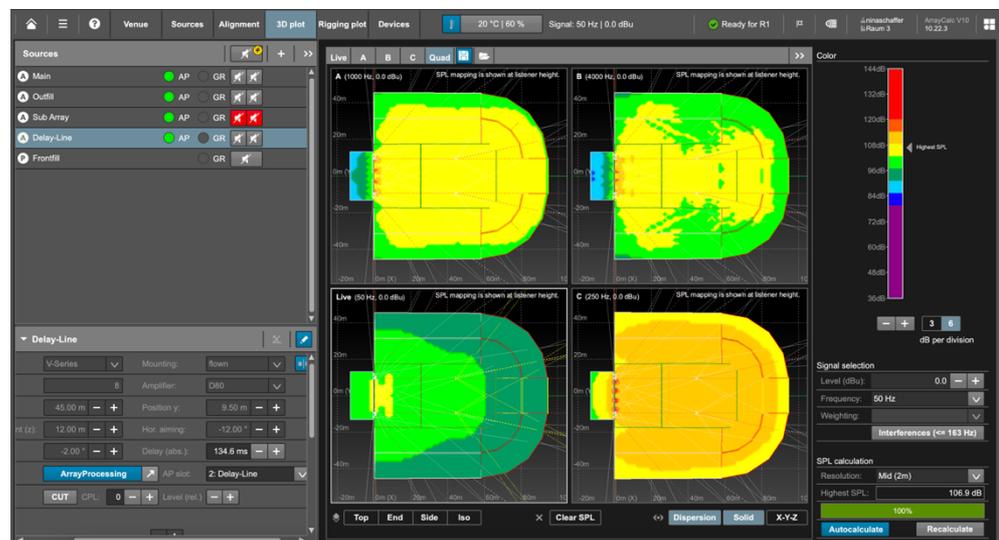
Positionierung der Delay-Line



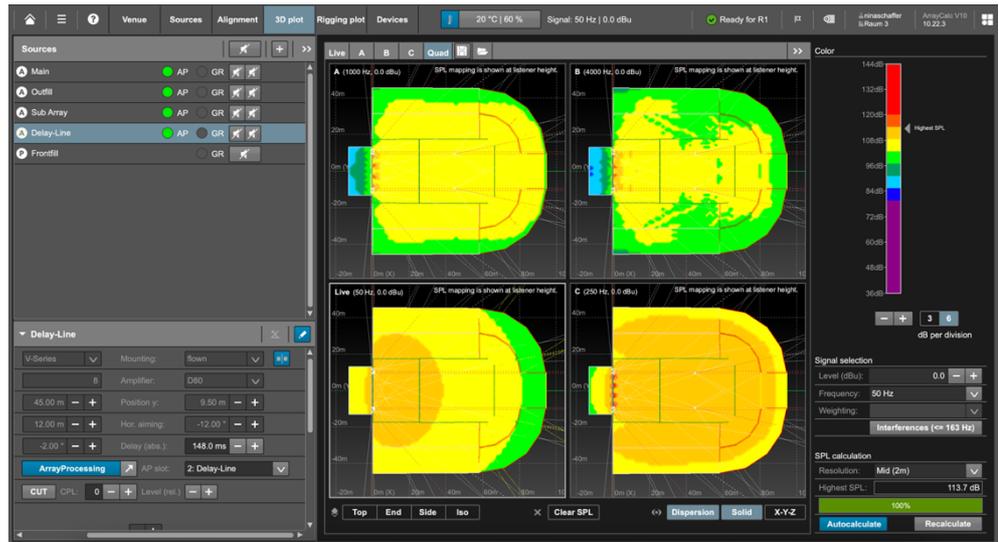
Schallpegelverteilung der Delay-Line



Schallpegelverteilung der Delay-Line mit dem Haupt-Line-Array sowie den Fronfills und Outfills



Schall-
pegel-
verteilung
aller Laut-
sprecher-
systeme mit
Array
Processing
(geflogener
Subwoofer
als Line-
Array)



Verzöger-
ung der
Delay-Line
auf die L/R-
Haupt-
beschallung

