

Bachelorarbeit

Zur Erlangung des Grades eines **Bachelor of Engineering**

Planung eines Beschallungssystems für den Erweiterungsbau einer Veranstaltungsstätte

Verfasst durch: Artur Jansen

Matrikelnummer: 881169

Studiengang: Veranstaltungstechnik und -management

Vorgelegt am: 30.12.2022

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

Gutachter: Ma.-Ari. Martin Rode

Kurzfassung

In dieser Arbeit wird die Planung eines Beschallungssystems für eine neue Veranstaltungsstätte vorgenommen. Im Vorfeld werden die Grundkomponenten sowie die physikalischen Zusammenhänge kurz erläutert, um die theoretische Grundlage zu schaffen.

Bei der anschließenden Auslegung des Beschallungssystems wird der Fokus auf die Produkte der Firma L-Acoustics gelegt. Neben der Auswahl der richtigen Hardware ist auch die Erstellung eines dreidimensionalen Raummodells sowie anschließende Simulation mit dem Simulationsprogramm Soundvision (L-Acoustics Software) ein Bestandteil der Arbeit. Anhand dieser erfolgt eine Auswertung der Ergebnisse, welche sich hauptsächlich auf die Homogenität der Frequenzen, den Schalldruckpegel, sowie die Vermeidung eines störenden Diffusfeldes bezieht.

Abstract

In this thesis, the planning of a sound reinforcement system for a new event location is conducted. Upfront, the basic components, as well as the physical relations are briefly explained to build the theoretical foundation.

In the following design of the sound system, the focus is placed on the products of the company L-Acoustics. Beside the selection of the correct hardware, also the creation of a three-dimensional drawing as well as following simulation with the simulation program Soundvision (L-Acoustics software) is a component of the work. Based on these, an evaluation of the results is given, which mainly focusses on the homogeneity of the frequencies, the sound pressure level, as well as the avoidance of a disturbing diffuse field.

Inhaltsverzeichnis

1		Einl	eitu	ng	. 1
2		Gru	ndla	agen	. 2
3		Lau	tspr	echersysteme	. 5
	3.	.1	Hor	nlautsprecher	. 6
	3.	.2	Clu	ster-Array	. 7
	3.	.3	Line	e-Array	. 8
4		Arte	en d	er Lautsprecher	. 8
	4.	.1	Del	ay-Lautsprecher	. 8
	4.	.2	Nah	nfeld-Lautsprecher	. 9
	4.	.3	Mor	nitoring	10
		4.3	.1	Monitor-Wedges	10
		4.3	.2	Monitor-Sidefills	10
		4.3	.3	In-Ear Monitoring	10
	4.	.4	Sub	owoofer	11
5		Leis	stun	gsverstärker	13
6		Ton	mis	chpult	15
7		Übe	ertra	gungsverfahren	16
	7.	.1	Ana	aloge Übertragung	18
	7.	.2	Dig	itale Übertragung	19
		7.2	.1	A/D-Wandler	20
		7.2	.2	Digitale Übertragungsverfahren	22
	7.	.3	Net	zwerkbasierte Übertragung	24
		7.3	.1	OSI-Schichten	25
		7.3	.2	Layer-1-Protokolle	26
		7.3	.3	Layer-2-Protokolle	26
		7.3	.4	Layer-3-Protokoll Dante	27
8		Arte	en d	er Beschallung	27

	8.1	Zentrale Lösung	27
	8.2	Dezentrale Lösung	29
9	Laut	tsprecherpositionierung	29
	9.1	Links/Rechts Aufstellung	29
	9.2	Links/Center/Rechts Aufstellung	30
	9.3	Immersive Lösung	31
1	0 L-	-Acoustics	31
	10.1	L-Acoustics Lautsprecher	31
	10.1	1.1 Short throw	32
	10.1	1.2 Medium throw	32
	10.1	1.3 Long throw	33
	10.1	1.4 Subwoofer	33
	10.1	1.5 Software	33
	10.1	1.6 Prozessoren	33
1	1 M	essung in der Halle	34
	11.1	Messergebnisse	35
	11.2	Nachhallzeit	35
	11.3	Spektogramm	36
1	2 Aı	uslegung des Beschallungssystems	36
	12.1	Bedarfsanalyse	36
	12.2	Lautsprecher	38
	12.3	Hauptbeschallungsanlage	39
	12.4	Nahfeld	43
	12.5	Subwoofer	45
	12.6	Tonales Verhalten	47
	12.7	Diffusfeld	48
	12.8	Maximaler Schalldruck	50
	12.9	Leistungsverstärker	50

12.	10	Mischpult	51
12.	11	Stagebox / Übertragungsart	51
12.	12	Signallaufplan	51
13	Faz	it	52
14	Abb	oildungsverzeichnis	. iii
15	Tab	pellenverzeichnis	.vi
16	Que	ellen- und Literaturverzeichnis	vii
17	Anł	nang	.ix

<u>Einleitung</u> 1

1 Einleitung

Der Bereich der Schallintensität sowie der Umfang der Frequenzen, auf die das menschliche Gehör reagiert, ist beeindruckend groß. Der Unterschied zwischen Geräuschen, die Menschen schmerzen bereiten und den schwächsten Geräuschen, die Menschen wahrnehmen können, beträgt mehr als 10¹² Pascal. Das Verhältnis der niedrigsten und höchsten Frequenz, welche das menschliche Gehör wahrnimmt, beträgt fast 10³, was mehr als neun Oktaven entspricht. Im Laufe der natürlichen Selektion ist es nicht überraschend, dass der Frequenzbereich, den die menschliche Sprache abbildet, am empfindlichsten geworden ist (vgl. Rossing, 2007, S. 1).

Infolgedessen ist es die Aufgabe in der Beschallungstechnik, eine Schallquelle möglichst so zu verstärken, dass sie von einem größeren Publikum gut zu hören ist und als angenehm wahrgenommen wird, ohne dem Gehör zu schaden. Bei dieser Schallquelle kann es sich von einer menschlichen Stimme, über Gitarren, bis hin zu elektronischen Geräten, wie beispielsweise Synthesizern handeln (vgl. Friesecke, 2014, S. 485). Dabei müssen verschiedene Komponenten beachtet werden, die in Abhängigkeit der Veranstaltungsgröße und des Veranstaltungsraumes konzipiert und kombiniert werden. Diese Aufgabe wird durch die Auslegung des Beschallungssystems übernommen.

Die Veranstaltungsstätte Spindler & Klatt führt seit seiner Eröffnung im Januar 2005 viele verschiedene Veranstaltungsformate durch und wird seit dem Jahr 2020 durch eine anliegende Halle, das S&K Studio, erweitert. Dieses war zuvor ein Getränkegroßhandel, der nun in eine Veranstaltungshalle umgebaut wurde, in der eine Vielzahl von Veranstaltungsformen durchgeführt werden sollen. Vor allem bei Kulturveranstaltungen wie Konzerten besteht ein hoher Anspruch an das Beschallungssystem, weshalb im Folgenden ein entsprechendes Beschallungssystem für das S&K Studio ausgelegt werden soll.

Grundlagen 2

2 Grundlagen

Die Hauptkomponenten eines Beschallungssystems sind in der Regel ein Mikrofon, ein Verstärker und ein Lautsprecher. Diese Komponenten werden meist durch ein Mischpult oder einen Delay-Lautsprecher ergänzt. Bevor in den folgenden Kapiteln die einzelnen Komponenten erläutert werden, wird vorab ein kurzer Überblick der grundlegenden Begrifflichkeiten gegeben.

Schallwellen breiten sich mit einer festen Geschwindigkeit aus. Diese Geschwindigkeit ist abhängig von dem Material und der Temperatur. Die Abhängigkeit von der Frequenz kann vernachlässigt werden. Bei der Übertragung durch die Luft mit einer Lufttemperatur von 20 °C beträgt die Schallgeschwindigkeit ungefähr $344 \, \frac{m}{s}$. Die Wellenlänge λ ist hierbei von der Schallgeschwindigkeit c und der Frequenz f abhängig. Es gilt:

$$\lambda = \frac{c}{f}$$

Hieraus ergeben sich aus dem Spektrum des menschlichen Gehörs mit Frequenzen von 16 bis 16.000 Hz Schallwellenlängen von ungefähr 21 m bis 2,1 cm.

Die von Schallwellen abgestrahlte gesamte Energie wird als Schallleistung P in Watt angegeben. Bei Schallwandlern wird zwischen der akustischen Leistung P_{ak} und der elektrischen Leistung P_{el} unterschieden. Aus diesen beiden Größen leitet sich der Wirkungsgrad η ab. Es gilt:

$$\eta = \frac{P_{\rm ak}}{P_{\rm el}}$$

Der Wirkungsgrad von Schallwandlern, welche überwiegend als Lautsprecher bekannt sind, ist sehr gering. Ein Lautsprecher mit einer elektrischen Leistung von 100 W hat eine Schallleistung von ungefähr 1 %.

Um die Schallleistung an einem bestimmten Punkt im Raum zu beschreiben, gibt es das Maß der Schallintensität I. Dieses gibt die Schallenergie an, welche in einer bestimmten Zeit durch eine Fläche S hindurchtritt. Hieraus lässt sich die Schalleistung bestimmen, die durch eine gegebene Fläche tritt. Hierbei stellt die Fläche das Medium dar, auf welches der Schall trifft. Dies kann beispielsweise das Trommelfell des Menschen sein. Über das Integral der Schallintensität über der Fläche S lässt sich die hindurchtretende Leistung errechnen. Es gilt:

$$P = \int I dS$$

Grundlagen 3

Es zwischen Arten von Schallquellen unterschieden, wird zwei der Punktschallquelle und der Linienguelle. Die Punktschallquelle hat kugelförmige Schallausbreitung, wohingegen die Linienguelle eine zylinderförmige Schallausbreitung vorweist. Abbildung 1 veranschaulicht die beiden Arten von Schallquellen und ihre Unterschiede in der Schallausbreitung.

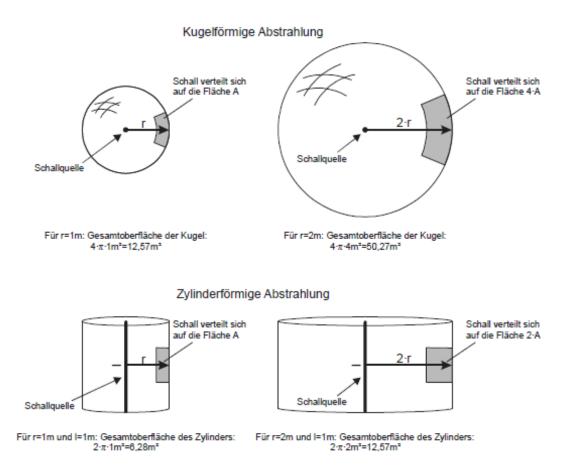


Abbildung 1: Vergleich zwischen kugelförmiger und zylinderförmiger Schallausbreitung. (Friesecke, 2014, S. 494)

Durch dieses Abstrahlverhalten gilt für Punktquellen:

$$I \sim \frac{1}{r^2}$$

Pro Entfernungsverdoppelung entspricht dies einer Abnahme der Schallintensität um 6 Dezibel (dB). Für Linienquellen hingegen gilt:

$$I \sim \frac{1}{r}$$

Somit entspricht dies einer Abnahme der Schallintensität um 3 dB pro Entfernungsverdoppelung (vgl. Weinzierl, 2008, S. 24 ff.).

Grundlagen 4

Der Schall eines Lautsprechers, welcher ohne Reflexion auf direktem Weg zum Hörenden gelangt, nennt sich Direktschall. Wird Schall von den sich im Raum befindenden Gegenständen reflektiert, absorbiert, gebeugt, gestreut oder gebündelt, werden die hieraus entstehenden frühen Reflexionen erste Reflexionen genannt. Aus den darauffolgenden späteren Reflexionen entsteht das Diffusschallfeld, welches auch Nachhall genannt wird (Abbildung 2). Dieses setzt mit einer zeitlichen Verzögerung zum Direktschall ein und spielt eine große Rolle für das Klangerlebnis (vgl. Dickreiter et al., 2014, S. 29 f.).

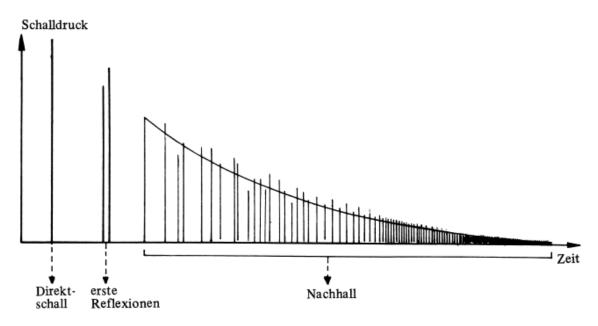


Abbildung 2: Die Reflexionen im Raum nach der Zeit. (Dickreiter et al., 2014, S. 30)

Im Allgemeinen gilt, dass der Anteil von Direktschall gegenüber dem Diffusschall höher sein muss. Zwar erhöht jede frühe Reflexion die Lautstärke des Direktschalls, allerdings nicht immer die Deutlichkeit. Spätere Reflexionen mit einer Verzögerung von über 50ms werden als störendes Echo wahrgenommen. Im Gegensatz dazu kann es bei Reflexionen von etwa 0,8 bis 20 ms zu einer unangenehmen Klangverfärbung kommen.

Neben der Verzögerung sind die Richtung und Stärke der ersten Reflexion von großer Bedeutung. Seitlich einfallender Schall wird deutlicher und angenehmer wahrgenommen als vertikal oder von hinten einfallender Schall (vgl. Dickreiter et al., 2014, S. 32 f.).

Präzedenz-Effekt

Damit sich beim Publikum ein schlüssiges Gesamtbild ergibt, muss der Schall neben der Deutlichkeit auch mit der optischen Wahrnehmung übereinstimmen. Dementsprechend sollte der Schall dort zugeordnet werden können, wo er auch optisch herzukommen scheint. Hierbei ist es entscheidend, welcher Schall zuerst beim Hörenden eintrifft. Treffen zwei gleiche Schallquellen kurz nacheinander beim Hörenden ein, so wird der Richtungseindruck durch die zuerst eintreffende Schallquelle bestimmt, sofern die Verzögerung zwischen den beiden gleichen Schallereignissen nicht über 30 ms liegt. Dieser Effekt nennt sich Gesetz der ersten Wellenfront oder auch Präzedenz-Effekt (vgl. Dickreiter et al., 2014, S. 131). Hierbei darf der Pegel des verzögert eintreffenden Schalls bis zu 10 dB höher sein als der des zuerst eintreffenden Schalls. Dies wird Haas-Effekt genannt (vgl. Weinzierl, 2008, S. 103 ff.).

Kammfiltereffekt

Wenn zwei Schallquellen nebeneinander die gleichen Frequenzen aussenden und der Schall sich überlagert, allerdings eine dieser Schallquellen leicht verzögert ist, kann es zu einer Auslöschung oder einer Verstärkung in bestimmten Frequenzen kommen. Dieser Effekt wird als Kammfiltereffekt bezeichnet. Auch bereits beim Eintreffen in ein Mikrofon kann dieser Effekt durch frühe Reflexionen entstehen (vgl. Grzesinski & Smyrek, 2020, S. 37).

3 Lautsprechersysteme

Die Aufgabe eines Lautsprechers ist die Umwandlung von elektrischer Leistung in akustische Wellen, welche über die Luft für den Menschen hörbar werden. Infolge der unzähligen Einsatzgebiete eines Lautsprechers mit unterschiedlichen Anforderungen sind entsprechend viele verschiedene Formen von Lautsprechern entwickelt worden. Im Folgenden wird hauptsächlich auf elektrodynamische Lautsprecher eingegangen, da diese im Bereich der Beschallung vorwiegend zum Einsatz kommen.

Die Kraft zur Bewegung der Membran bezieht ein elektrodynamischer Wandler aus der Lorentzkraft. Dabei stehen die Richtungen der Kraft, des Stromflusses und des Magnetfeldes jeweils senkrecht zueinander. Das hierfür benötigte Magnetfeld entsteht aus einem Permanentmagneten, wofür heutzutage meist auf einen Neodym-Magnet zurückgegriffen wird, welcher ein geringeres Gewicht bei vergleichbar starken Magnetfeldern besitzt. Bei elektrodynamischen Wandlern sind der Konuslautsprecher und der Kalottenlautsprecher die zwei am meisten eingesetzten Formen. Der Konuslautsprecher nimmt seinen Namen von der konusförmigen Membran und ist im Anhang in Abbildung 16 dargestellt.

Der Kalottenlautsprecher verzichtet auf die konische Membran und den Korb. Die Erzeugung des Schalls geschieht lediglich durch die Kalotte (vgl. Weinzierl, 2008, S. 424 f.).

3.1 Hornlautsprecher

Bei einem Hornlautsprecher wird ein sogenanntes Horn vor einen Kalottenlautsprecher gesetzt, welches als Führung für den Schall dient. Hornlautsprecher sind im Aufbau gleich mit Konuslautsprechern, nur ohne Korb und Konusmembran. Die Hornführung bringt den Schall in eine bestimmte Form, die durch die Öffnung des Horns bestimmt wird. Durch Hinzufügen des Horn wird der abgegebene Schall nur auf ein Segment der vorherigen Abstrahlfläche abgestrahlt, um die Schallenergie zu bündeln und Töne gerichtet weiterzugeben.

Da die Fläche bei gleichbleibender Leistung verkleinert wird, gibt ein Hornlautsprecher mehr Schallintensität ab. Dies ist im Anhang in Abbildung 17 dargestellt.

Die Formgebung des Horns ist maßgeblich für die Form der abgestrahlten Welle verantwortlich. Durch die Formgebung des Horns kann ein direkter Einfluss auf das Abstrahlverhalten genommen werden. Um die Reichweite des Schallereignisses zu vergrößern, ist je nach Frequenzgang eine Mindestlänge des Horns erforderlich. Tiefe Frequenzen benötigen größere Hornvorrichtungen als höhere Frequenzen. Durch diesen Umstand sind bei tiefen Frequenzen mehrere Meter Horn notwendig. Um dies zu umgehen, werden in der Praxis tieffrequente Hornlautsprecher in sich gefaltet.

Da bei Hornlautsprechern ein sehr hoher Gegendruck der Luft vorliegt, besteht die Gefahr der zu geringen Membranbewegung und somit einer Überlastung eines Lautsprechers durch eine zu geringe Kühlung (vgl. Friesecke, 2014, S. 490 f.).

3.2 Cluster-Array

Bei einem Cluster Array handelt es sich um eine Kombination von Lautsprechern in Gruppen. Da der Schalldruckpegel oder Abstrahlwinkel eines einzelnen Lautsprechers bei größeren Veranstaltungen oftmals nicht ausreicht, werden zwei oder mehr Lautsprecher kombiniert. Hierbei gibt es mehrere Möglichkeiten die Lautsprecher miteinander zu verknüpfen. Eine davon ist, die Lautsprecher parallel zueinander aufzustellen. Hierdurch können allerdings negative Interferenzen und frequenzabhängige Kammfiltereffekte entstehen, die einen störenden Einfluss auf das Klangbild haben können.

Eine weitere Möglichkeit besteht darin die Lautsprecher übereinander zu stapeln, das sogenannte Stacking. Hierbei können die gleichen Effekte auftreten wie bei der parallelen Anordnung (vgl. Dickreiter et al., 2014, S. 593 f.). Ist der Abstand d zwischen zwei Lautsprechern geringer als die halbe Wellenlänge der Frequenz, so kommt es zu einer akustischen Kopplung beider Lautsprecher:

$$d < \frac{\lambda}{2}$$

Sobald eine akustische Kopplung eintritt, können beide Schallquellen als eine Schallquelle betrachtet werden. Wenn mehrere Punktstrahler über- oder nebeneinander gestellt werden, entsteht aus dem vorherigen kugelförmigen Abstrahlverhalten ein zylinderförmiges Abstrahlverhalten. Diese Art der Lautsprecher werden Linienstrahler genannt (vgl. Pieper, 2015, S. 272 ff.). Allerdings muss dazu erwähnt werden, dass dies nur für horngeladene Systeme gilt, deren Wellenfront am Hornausgang nicht planar, sondern radial gekrümmt ist. Diese Technik wurde in den 80er und 90er Jahren eingesetzt, als es noch nicht die Möglichkeit gab, mithilfe eines Wellenformers (Waveformer) eine planare Wellenfront zu erzeugen.

Mithilfe eines Wellenformers ist es möglich, eine planare und somit kohärente (phasengleiche) Wellenform zu erzeugen. Der Wellenformer ist nach dem Hochtontreiber angeordnet und so geformt, dass die Welle überall gleichzeitig austritt. Dadurch entsteht eine planare und kohärente Wellenfront ohne Kammfiltereffekte. (vgl. Friesecke, 2014, S. 492 f.) Im Anhang in Abbildung 48 ist die Bildung der Welle dargestellt.

3.3 Line-Array

Das Line-Array ist der heutige Standard der modernen Beschallungstechnik. Das Ziel eines Line-Arrays ist es, in akustisch schwierigen Räumlichkeiten bestimmte Bereiche gezielt zu beschallen. Hierbei wird beim Line-Array auf die Technik der Linienstrahler zurückgegriffen, sodass der Schall als kohärente Wellenfront austritt. Dies ist mithilfe einer Wellenformers möglich. Da hierdurch jeder einzelne Lautsprecher im Line-Array als eine Linienquelle angesehen werden kann, ist oft vom Line-Source-Array die Rede.

Ein einzelnes Lautsprechermodul besteht meist aus einem Zwei- oder Dreiwegelautsprecher, welcher mittels eines Wellenformers auf eine Hornöffnung hinarbeitet. Durch die genaue Einstellung jedes einzelnen Moduls, sind diese genauestens aufeinander abgestimmt, sodass jede abgestrahlte Welle eines Moduls sich phasenrichtig mit der Welle des Nachbarmoduls kombiniert. Hierdurch wird eine gleichphasige Welle aus allen Modulen erzeugt. Zudem ist durch die entstehende planare Welle, bei gleichbleibender Lautstärke, die Reichweite eines Line-Source-Arrays im Vergleich zu einer Punktquelle oder einem Cluster-Array höher (vgl. Dickreiter et al., 2014, S. 595). Die Entwicklung der Reichweite ist beim Line-Source-Array einerseits frequenzabhängig und andererseits in Abhängigkeit der Array Länge zu betrachten.

4 Arten der Lautsprecher

Neben der Hauptbeschallungsanlage, die den großen Teil des Publikumsbereiches abdeckt, kommen weitere Lautsprecher zum Einsatz, um den restlichen Teil abzudecken, welcher von der Hauptbeschallungsanlage nicht, oder nicht ausreichend erreicht wird.

4.1 Delay-Lautsprecher

Aufgrund der teilweise sehr langen Räumlichkeiten ist es oftmals der Fall, dass die hinteren Reihen nicht ausreichend mit Direktschall versorgt werden und somit ein Ungleichgewicht auftritt. Zudem können die örtlichen Gegebenheiten, durch beispielsweise einer Balkonebene, dazu führen, dass eine Beschallung des hinteren Bereichs mit der Hauptbeschallungsanlage zu erheblichen Reflexionen führen kann. Um das zu vermeiden, muss eine zweite Beschallungsebene eingerichtet

werden. Die hier eingesetzten Lautsprecher werden als Delay-Lautsprecher bezeichnet. Sobald Delay-Lautsprecher eingesetzt werden, kann der zu beschallende Bereich in mehrere Teile eingeteilt werden. Die vorderen Lautsprecher beschallen den vorderen Bereichs des Publikums. Die Delay-Lautsprecher übernehmen entsprechend den Bereich dahinter. Hierbei muss beachtet werden, dass die Delay-Lautsprecher verzögert werden, um einen Echo-Effekt zu vermeiden. Mit der Schallgeschwindigkeit von 344 m/s bei 20 °C Lufttemperatur, kann die benötigte Verzögerung errechnet werden. Da es ungefähr ab 30 ms bereits zu störenden Echos kommen kann, sollte bei Delay-Lautsprechern ab einer Distanz von über 10 m eine entsprechende Verzögerung eingestellt werden. Dadurch können zudem die Entstehung von Kammfiltereffekten und Probleme bei der akustischen Lokalisation kompensiert werden.

Damit das Publikum die akustische Lokalisation der Schallentstehung nicht den seitlichen Delay-Lautsprechern zuordnet, sollte das Gesetz der ersten Wellenfront beachtet werden. Entsprechend muss zuerst der Direktschall der vorderen Lautsprecher beim Publikum eintreffen und anschließend der Direktschall der Delay-Lautsprecher. Hierdurch wird die akustische Lokalisation der vorderen Lautsprecherfront zugeordnet. Durch den Haas-Effekt darf der Direktschall der Delay-Lautsprecher um bis zu 10 dB lauter sein (vgl. Dickreiter et al., 2014, S. 576 f.).

4.2 Nahfeld-Lautsprecher

Durch die meist hoch über der Bühne positionierten Lautsprecher, liegen die vorderen Reihen oft außerhalb ihrer Beschallungsrichtung und sind deshalb schlechter beschallt. Zudem wäre in den vordersten Reihen die akustische Lokalisation der Schallentstehung zu hoch über der Bühne und würde einen unnatürlichen Eindruck vermitteln. Daher ist es sinnvoll, für die vordersten Reihen Lautsprecher am vorderen Bühnenrand zu platzieren. Diese Lautsprecher werden Nahfeld-Lautsprecher genannt. Durch die nun näher positionierten Lautsprecher tritt das Gesetz der ersten Wellenfront ein, welches die akustische Lokalisation der Bühnenkante und somit der Bühne bestimmt (vgl. Dickreiter et al., 2014, S. 578 f.).

4.3 Monitoring

Neben der Publikumsbeschallung ist die Beschallung der Bühne ebenfalls ein wichtiger Punkt. Durch beispielsweise den eigenen Ton eines Instrumentes ist es meist schwierig, die Instrumente der anderen Musizierenden auf der Bühne deutlich wahrzunehmen. Hierfür kommt ein eigenes Beschallungssystem, genannt Monitoring, für die Personen auf der Bühne zum Einsatz. So wird allen Musizierenden eine individuelle Anpassung ermöglicht. Jede*r kann so seinen Wunschmix erstellen.

4.3.1 Monitor-Wedges

Die wohl am häufigsten eingesetzte Beschallungsmöglichkeit für das Monitoring sind die Monitor Wedges. Der keilförmige Lautsprecher wird vor der zu beschallenden Person auf dem Boden platziert und versorgt diese mit der gewünschten Mischung. Der Lautsprecher selbst hat die gleichen Anforderungen wie der einer Beschallungsanlage. Hierbei wird in den meisten Fällen ein Lautsprecher mit einer starken Schallbündelung bevorzugt, um auf der Bühne eine deutliche Trennung zwischen den einzelnen Monitorbereichen zu erlangen und somit jeder Person ihre eigene Monitormischung anbieten zu können. Auf diese Weise wird der Schalldruck außerhalb der Bühne und somit das Diffusfeld möglichst geringgehalten. (vgl. Dickreiter et al., 2014, S. 597)

4.3.2 Monitor-Sidefills

Die Monitor Sidefills erweitern die Monitor Wedges am Bühnenrand. Hier wird eine Beschallungsanlage am Rand der Bühne platziert, um die Personen auf der Bühne mit einer Grundbeschallung zu versorgen. Zu der Grundbeschallung erhält jede Person über die Monitor Wedges einen zusätzlichen, individuell abgestimmten Mix. Durch das höhere Diffusfeld von Monitor Sidefills, müssen diese in der Planung für die Publikumsbeschallung mitberücksichtigt werden (vgl. Dickreiter et al., 2014, S. 597).

4.3.3 In-Ear Monitoring

Beim In-Ear Monitoring wird der Monitormix direkt auf meist individuell angepasste In-Ear Kopfhörer übertragen. Heutzutage ist es üblich, diesen Monitormix als Stereo per Funk zu übertragen. Die Person kann über einen Regler die Lautstärke selbst anpassen. Neben der Funktion als Monitor haben die Ohrstöpsel zudem eine dämpfende Funktion von bis zu 25 dB. Hierdurch kann für die Person ein Effekt der akustischen Isolierung entstehen und die Kommunikation untereinander erschwert werden. Um Abhilfe zu schaffen, können Athmo-Mikrofone aufgestellt werden, die auf das Publikum gerichtet sind, um wieder mehr mit diesem in Kontakt treten zu können (vgl. Dickreiter et al., 2014, S. 597 f.).

4.4 Subwoofer

Typische Rock- und Popmusik zeichnet sich neben vielen anderen Bestandteilen durch ihre perkussiven tiefen Frequenzen aus. Eine aktive Bassmelodie ist das Grundkonzept vieler Poplieder. Um dieses Grundkonzept der Musik zu realisieren, ist es notwendig, die Subwoofer geschickt auszuwählen und richtig im Beschallungssystem unterzubringen.

Der Bass hat ein kugelförmiges Abstrahlverhalten, das einzeln keine Richtwirkung aufzeigt. Erst mit bestimmten Anordnungen, lässt sich ein Richtverhalten erzielen. Im Folgenden werden einzelne Möglichkeiten der Subwoofer Anordnungen kurz erläutert, ohne dabei tief ins Detail zu gehen.

Links/Rechts Aufstellung

Bei dieser Aufstellung werden sowohl links als auch rechts neben der Bühne jeweils die Basslautsprecher platziert. Jahrelang war diese Aufstellung gang und gäbe in der Veranstaltungsbranche. Da Bässe allerdings immer Rundstrahler sind und in alle Richtungen abstrahlen, gibt es durch diese Aufstellung viele sich überschneidende Phasen und daraus resultierende Interferenzen und Kammfiltereffekte. Auf der Mittelachse entsteht bei dieser Aufstellung eine ausgeprägte Verstärkung, die "Power-Alley" genannt wird. (vgl. Mike Rauchfleisch, 2017)

Monosub

Um dem Problem der Kammfiltereffekte entgegenzuwirken, können die Subwoofer in der Mitte aufgestellt werden, was als Monosub bezeichnet wird. Das ist vor der Bühne oder aufgehangen über der Bühne möglich. Hierdurch kann eine ausgeglichene Bassverteilung im Raum erzielt werden.

Endfire-Anordnung

Bei der Endfire-Anordnung werden die Subwoofer hintereinander in möglichst gleichem Abstand zueinander gestellt. Die vorderen Subwoofer werden auf den hintersten verzögert, so dass die Phasen gleich sind. Infolgedessen führt dies zu einer Verstärkung und somit zu einer Richtwirkung nach vorne und Dezimierung nach hinten. Durch die Anzahl der Subwoofer im Array ist die Richtwirkung skalierbar.

Cardioid

Bei niedrigen Frequenzen können Interferenzen genutzt werden, um eine Richtwirkung mit mehreren omnidirektionalen Lautsprechern zu erzeugen. Diese Aufstellung wird Cardioid Konfiguration genannt.

Schallwellen schwingen sowohl mit positiver als auch negativer Amplitude innerhalb ihres Wiederholungszyklusses (einer Periode). Wenn zwei Quellen mit gleichem Amplitudenwert, aber entgegengesetzter Polarität, interferieren, können sie sich vollständig auslöschen. Dies kann genutzt werden, um eine geringe Schallabstrahlung auf der Rückseite der Lautsprecher zu erzielen, womit eine erhebliche Richtwirkung erzielt wird. (vgl. Adelman-Larsen, 2014, S. 41).

Eine Kombination aus Cardioid und Endfire-Anordnung ist ebenfalls möglich.

5 Leistungsverstärker

Um das Signal des Mischpultes wiedergeben zu können, benötigt das Lautsprechersystem genügend elektrische Energie. Die für diese Signalumwandlung benötigte elektrische Energie, stellen die Leistungsverstärker, oder auch Endstufen genannt, zur Verfügung.

Prinzipiell wird zwischen passiven und aktiven Systemen unterschieden. Bei aktiven Systemen ist der Leistungsverstärker bereits im Lautsprecher integriert. Bei passiven Systemen hingegen sind die Lautsprecher und die Leistungsverstärker räumlich voneinander getrennt.

Der Aufbau von Leistungsverstärkern lässt sich in die Klassen A/B, D und H unterteilen. Heutzutage ist hauptsächlich die Klasse D vertreten. (Pieper, 2015, S. 237)

Unabhängig von der Klasse des Leistungsverstärkers, existieren technische Parameter, die die Leistung eines Verstärkers kennzeichnen.

Ausgangsleistung in W

Die Ausgangsleistung eines Verstärkers ist abhängig von der Klemmspannung und der Impedanz des Lautsprechers. Bei gleicher Klemmspannung gilt, "Je niedriger die Impedanz, desto höher die Leistung." (Grzesinski & Smyrek, 2020, S. 342). Hierbei sollte die Nennimpedanz in der Praxis nicht geringer als 2 Ω sein, da sonst eine Überhitzung des Leistungsverstärkers und somit eine Sicherheitsabschaltung geschehen kann. Des Weiteren sollte die Impedanz der Lautsprecher an die Ausgangsimpedanz des Verstärkers abgestimmt sein.

Klirrfaktor in %

Der Klirrfaktor beschreibt die maximal zulässige (nichtlineare) Verzerrung. Der Maximalwert liegt nach der aktuellen Norm IEC 286.3/19.4 bei einer Ausgangsleistung von 4 Stunden mit einer Temperaturbegrenzung bei 0,2 %. Hierfür wird ein Sinuston mit 1 kHz als Testsignal verwendet. Dieser Wert ist für Beschallungsanlagen, die für Durchrufe und Alarmierungen verwendet werden, vorgeschrieben.

Frequenzgang im Übertragungsbereich

Der Frequenzgang wird vom Hersteller definiert und zeigt, meistens grafisch dargestellt, die Abweichungen in dB bei den jeweiligen Frequenzen.

Signal-Rausch-Abstand

Der Signal-Rausch-Abstand oder auch Signal-to-Noice ratio (SNR) ist ein Maß für die Stärke des Signals, das im Verhältnis zum Hintergrundrauschen steht. Dieses wird in dB angegeben und kann mit folgender Formel dargestellt werden:

$$SNR_{Verst\"{a}rker} = 10 \cdot log \frac{Mittlere\ Leistung\ des\ Audiosignals\ P_2}{Verst\"{a}rkergrundrauschen\ P_1}$$

Rücklaufzeit

Die Rücklaufzeit beschreibt die Zeitspanne, in der ein Signal auf einen vorher definierten Wert absinkt. "Je schneller die Rücklaufzeit, desto besser die Wiedergabe hoher Frequenzen." (Grzesinski & Smyrek, 2020, S. 343). Die Rücklaufzeit wird in V/µs angegeben.

Eingangsempfindlichkeit

Diese beschreibt die Spannung, die am Eingang anliegen muss, damit die volle Nennleistung erreicht werden kann. (vgl. Grzesinski & Smyrek, 2020, S. 342 ff.).

Tonmischpult 15

6 Tonmischpult

Die Hauptaufgabe des Tonmischpultes ist das Zusammenfügen aller Signalquellen zu einer Summe, die mithilfe der Leistungsverstärker hörbar über die Lautsprecherboxen wiedergegeben wird. Diese Summe aller Eingangssignale ist je nach Anwendungszweck eine Mono- oder Stereosumme.

Neben der Zusammenfassung der Eingangssignale ist das Tonmischpult zuständig für die Bearbeitung und Überwachung des Tonsignals. Darunter fallen unter anderem die Pegeleinstellung, Mischung, sowie dynamische und klangliche Bearbeitung.

Durch die vielen Anwendungsbereiche werden viele verschiedene, explizit auf ihren Anwendungsfall angepasste Tonmischpulte produziert.

Die Entwicklung der ersten Tonmischpulte wurde bis in die 1950er Jahre durch die Rundfunktechnik geprägt. Sie waren komplett analog. Seit dieser Zeit verkürzten sich die Zeitabschnitte der Innovationsentwicklung. Ein Schritt, der maßgeblich zum Fortschritt beigetragen hat, war die Entwicklung der Halbleiter Ende der 1940er Jahre (vgl. Dickreiter et al., 2014, S. 482 ff.).

Ab den 1980er Jahren wurden erstmals Tonmischpulte mit einer digitalen Steuerung entwickelt. Durch den enormen Fortschritt der Technik wurde in den 1990er Jahren das erste Tonmischpult entwickelt, bei dem ausschließlich digitale Steuersignale verarbeitet werden.

Mit den digitalen Tonmischpulten gingen viele Vorteile einher. Vor allem platz- und gewichtstechnisch sind die digitalen den analogen Tonmischpulten überlegen, da die gleiche Bedienoberfläche eine deutlich geringere räumliche Abmessung benötigt. Zudem ist das Preis-Leistungsverhältnis deutlich besser. Analoge Tonmischpulte bringen jedoch auch Vorteile mit sich. Beispielsweise ist es auf einem digitalen Tonmischpult nicht ohne weiteres möglich, an mehreren Kanälen gleichzeitig zu arbeiten, da nur der selektierte Kanal bearbeitet werden kann. Bei analogen Tonmischpulten stellt dies kein Problem dar. Auch werden die klanglichen Eigenschaften von analogen Tonmischpulten meist höher geschätzt (vgl. Grzesinski & Smyrek, 2020, S. 299).

7 Übertragungsverfahren

"Signale sind mathematische Funktionen oder Zahlenfolgen, die sich verändernde Größen beschreiben und dadurch Informationen repräsentieren." (Weinzierl, 2008, S. 5)

Audiosignale werden meist in Form eines Schalldrucks oder einer elektrischen Spannung über einen Zeitverlauf definiert. Auf der horizontalen Achse wird der Zeitverlauf dargestellt. Die vertikale Achse stellt entsprechend des Schalldrucks oder die elektrische Spannung dar. Bei analogen Signalen lassen sich die Abstufungen dieser Variablen beliebig fein darstellen. Aus diesem Grund werden analoge Signale als zeit- und wertkontinuierliche Signale bezeichnet.

Da Computer technisch nicht in der Lage sind, unendlich feine Abstufungen darzustellen, sind sie nicht imstande, analoge Signale zu verarbeiten. Durch die bei digitalen Signalen nicht beliebig fein darstellbaren Variablen, werden digitale Signale als zeit- und wertdiskrete Signale bezeichnet (vgl. Weinzierl, 2008, S. 5).

Die Informationen, die über ein Signal übertragen werden, lassen sich in relevante, irrelevante und redundante Informationen unterteilen.

Bei einem Signal ist es in der theoretischen Betrachtung nicht von Bedeutung, wie viele relevante und irrelevante Informationen enthalten sind. Stattdessen ist vor allem die potenzielle Information von Bedeutung. In der Übertragungstechnik wird diese potenzielle Information, also die relevanten und irrelevanten Anteile, als Entropie eines Signales bezeichnet. Die Redundanz bildet den restlichen Teil des Signals.

Der Entropie-Anteil von Signalen ist abhängig davon, wie vorhersehbar ein Signalverlauf ist. Ein sogenanntes deterministisches Signal, also ein sich periodisch wiederholendes Signal hat einen sehr geringen Informationsgehalt und somit eine sehr geringe Entropie.

Ein stochastisches (zufälliges) Signal, das einen unregelmäßigen und somit komplexen Schwingungsverlauf darstellt, hat einen sehr hohen Informationsgehalt und somit einen sehr hohen Entropie-Anteil. Ein maximaler Entropie-Anteil liegt vor, sobald kein Hinweis auf den zukünftigen Signalverlauf vorhanden ist.

Für die Übertragung eines Signales hat Claude Shannon ein Übertragungsprinzip entwickelt, das auf jede Übertragung zutrifft (im Anhang in Abbildung 18). Es besagt, dass eine Quelle eine Information an einen Sender überträgt. Dieser

sendet die Information in einem Signal über einen Übertragungskanal an einen Empfänger. Der Empfänger gibt die Information des Signals an die Senke weiter. In dem Übertragungskanal können dabei Störungen und/oder Verluste auftreten.

Die meisten Übertragungskanäle lassen sich als Gauß-Kanal darstellen. Dieser ist in seiner Bandbreite beschränkt und besitzt ein additives Rauschen.

Die begrenzte Information, die durch einen Gauß-Kanal geschickt werden kann, hat mehrere Parameter, die in Abbildung 3 konzeptuell dargestellt sind.

Informationsquader und Kanalfenster.

B: Signalbandbreite,

D: Signaldynamik,

T: Signaldauer,

 $B_{\rm K}$: Kanalbandbreite,

 D_{K} : Kanaldynamik

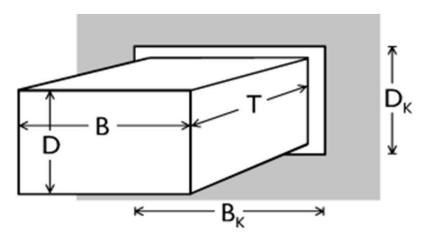


Abbildung 3: Die Abbildung zeigt eine symbolisierte Informationsmenge, welche durch einen Gauß'schen Übertragungskanal geschickt wird. (Görne, 2015, S. 186)

Aus diesen Parametern lässt sich der maximale Informationsgehalt I eines Signales festlegen:

$$I = B \cdot D \cdot T [Bit]$$

Anders ausgedrückt entspricht der maximale Informationsgehalt I = Entropie + Redundanz.

Sobald ein großer SNR in dB vorliegt, lässt sich der Informationsgehalt wie folgt beschreiben:

$$I \approx \frac{B \cdot SNR \cdot T}{3} \ [Bit]$$

Hierbei kann der SNR durch die Signalleistung P_S und die Rauschleistung P_R mit dem Ausdruck $10 \cdot \log \frac{P_S}{P_R}$ dargestellt werden.

Die Kanalkapazität C, welche maßgebend über die maximal übertragbare Datenrate entscheidet, ist abhängig von der Kanalbandbreite B_K und der SNR des Kanals SNR_K :

$$C \approx \frac{B_K \cdot SNR_K}{3} \ [Bit/_S]$$

Eine verlustfreie Signalübertragung ist nur möglich, wenn die Kanalkapazität größer ist als die Informationsmenge pro Zeiteinheit. Es kommt zu einer Verzerrung oder einem Rauschen, sobald das Kanalfenster zu niedrig ist, da das Signal im Frequenzbereich beschnitten wird (vgl. Görne, 2015, S. 184 ff.).

7.1 Analoge Übertragung

Bei der Übertragung analoger Signale wird zwischen der Übertragung im Basisband und der Übertragung im Hochfrequenzbereich über ein Modulationsverfahren unterschieden.

Bei der Basisbandübertragung wird das Signal nicht verändert. Stattdessen bleibt die Übertragung unverändert, was beispielsweise bei der Übertragung von Mikrofon zu Mischpult der Fall ist.

Über ein analoges Modulationsverfahren kann ein Basisband-Signal in ein hochfrequentes Signal umgewandelt werden, das unter anderem benötigt wird, um ein Signal per Funk zu übertragen.

Im Gegensatz zur digitalen Übertragung ist es bei der analogen nicht ohne weiteres möglich, die irrelevanten Informationen von den redundanten und relevanten zu trennen. Über eine Kompandierung (Rauschunterdrückung) des Signals ist es jedoch möglich, die Irrelevanz im Signal zu verringern.

Bei der Kompandierung wird das analoge Signal vor der Übertragung komprimiert und nach dieser invers wieder expandiert. Hierdurch wird bei lauten Signalabschnitten die SNR verringert. Durch eine solche Kompandierung ist die Übertragung von Signalen mit großer Dynamik durch geringere Kanalfenster möglich (vgl. Görne, 2015, S. 189 f.).

Die Übertragung von analogen Signalen in der Tontechnik erfolgt in den meisten Fällen über Kabel. Für die Signalübertragung zwischen zwei Geräten ist das Verhältnis der Impedanz zwischen den Geräten entscheidend. (Görne, 2015, S. 211). Damit von Herstellern übergreifend eine Impendanzanpassung eingehalten werden kann, ist in der Tontechnik eine Nennimpendanz für viele Geräte definiert.

Als symmetrische Übertragung wird die elektrische Übertragung über zwei Drähte bezeichnet, die beide Geräte miteinander verbinden und parallel von demselben

Strom durchflossen werden. Bei Wechselstrom macht sich dies über eine Polarität bemerkbar. Dies bedeutet, dass der Strom seine Flussrichtung an die Polung anpasst und folglich auf dem einen Draht, im Vergleich zum zweiten Draht, entgegengesetzt gerichtet ist (phasengedreht). Es wird also auf beiden Drähten das identisch gleiche Signal übertragen, nur mit umgekehrter Polarität. Die Drähte werden hierbei als + (phasenrichtig) und – (phasengedreht) bezeichnet.

Durch den meist sehr kleinen elektrischen Fluss in den Leitungen, müssen diese zusätzlich von äußerer elektromagnetischer Strahlung abgeschirmt werden. Die Schirmung ist ein Drahtgeflecht, welches um die signalführende Leitung gewickelt wird. Auf der einen Seite wird dies mit dem Gerät verbunden, auf der anderen Seite mit dem Erdpotential der Steckdose. Eine Ausnahme stellen hierbei Lautsprecherkabel dar, die aufgrund ihres höheren Stromflusses ohne Abschirmung auskommen.

Sollten trotz Abschirmungen störende Einstreuungen auftreten, werden diese aufgrund der Polarität auf beiden Drähten jeweils phasengedreht verstärkt, so dass sie sich gegenseitig eliminieren.

Im Gegensatz dazu besitzen unsymmetrische Leitungen nur eine signalführende Leitung. Der Rückfluss aller Signale erfolgt dabei über eine gemeinsame Leitung (vgl. Görne, 2015, S. 213 f.).

7.2 Digitale Übertragung

Da heutzutage hauptsächlich digitale Endgeräte im Einsatz sind, werden die Signale in den meisten Fällen digital übertragen. Dies geschieht mit Hilfe von Analog-Digital-Wandlern (A/D-Wandler), wenn das analoge Signal umgewandelt werden soll oder durch Digital-Analog-Wandler (D/A-Wandler), wenn das digitale Signal umgewandelt werden soll. Die Wandler werden bereits vor der Datenübertragung eingesetzt, damit möglichst wenig analoger Signalweg zurückgelegt wird (vgl. Grzesinski & Smyrek, 2020, S. 239).

In der digitalen Tontechnik erfolgt die Darstellung, wie in den meisten Fällen der Digitaltechnik, mittels des Binärsystems. Im Binärsystem existieren nur zwei verschiedene Zustände, 0 oder 1. Damit Prozessoren mit Hilfe von binären Logikschaltungen mit diesen zwei Zuständen digitale Informationen übertragen können, bedarf es mehrerer Binärstellen. Diese Stellen werden Binary Digit (Bit)

genannt. Heutzutage wird der Speicherplatz in Byte angegeben und dementsprechend eine Umrechnung der Einheiten vorgenommen, wobei 8 Bit 1 Byte ergeben. Die Prozessoren, welche verwendet werden, sind 32- oder 64-Bit Prozessoren. Ein 64- Bit Prozessor kann mit einer Zahlenfolge von 64 Nullen oder Einsen arbeiten (vgl. Friesecke, 2014, S. 505 f.).

Durch die Darstellung der Information in Form einzelner Zahlen, ist die Digitaltechnik in ihrer Anzahl pro Zeit begrenzt und bei der Zahlenmenge ebenfalls endlich. Dies ist je nach Übertragungsstandard unterschiedlich. Bei einer handelsüblichen CD (16-Bit / 44,1kHz) betragen diese 44100 Werte pro Sekunde und 65536 mögliche Spannungsstufen.

7.2.1 A/D-Wandler

Damit ein Analog-Digital-Wandler ein kontinuierliches analoges Signal in ein diskretes digitales Signal umwandeln kann, muss dieses bereits in Abtastwerten vorliegen. Die Abtastwerte werden mittels einer Abtastfunktion, welche in bestimmten regelmäßigen Intervallen mit der Dauer $T_{\rm S}$ den Wert 1 und ansonsten den Wert 0 annimmt, abgetastet. Diese Abtastfunktion wird mit dem zeitkontinuierlichen Analogsignal multipliziert, woraus sich ein zeitdiskretes Signal erzeugt, das ein Abbild des ursprünglichen kontinuierlichen Signals darstellt. Dies ist in Abbildung 4 verdeutlicht dargestellt.

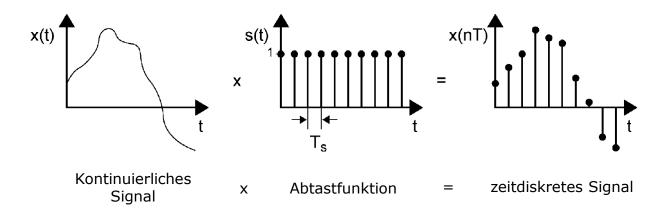


Abbildung 4: Umwandlung eines kontinuierlichen Signals mittels Abtastfunktion in ein zeitdiskretes Signal. (Dickreiter et al., 2014, S. 664)

Für die Rekonstruktion des originalen Tonsignals, ist es notwendig, dieses mit einem Tiefpassfilter oder auch Rekonstruktionsfilter mit einer Grenzfrequenz von $0.5 \, f_S \, zu$ belegen.

Damit bei diesem Prozess keine Fehler auftreten, wie beispielsweise das Überlappen von Frequenzen, hat Claude Shannon im Jahre 1948 ein Abtasttheorem formuliert, welches bis heute seine Gültigkeit hat. Es besagt, dass die Abtastfrequenz $f_{\rm S}$ mindestens doppelt so groß sein muss, wie die höchste vorkommende Frequenz $f_{\rm max}$ des Nutzsignals. Nur dann kann dieses Signal fehlerfrei abgetastet werden:

$$f_S > 2 \cdot f_{max}$$

(vgl. Dickreiter et al., 2014, S. 663 ff.)

Die Abtastung und gleichzeitig die Umwandlung des Signals in ein zeitdiskretes Signal geschieht in der Praxis mit einer sogenannten Sample-and-Hold-Schaltung. Vereinfacht dargestellt besteht diese aus einem Schalter und einem Kondensator. Der Schalter lässt in einer bestimmten, regelmäßigen Periodendauer den aktuellen Spannungswert des analogen Signals durch. Der Kondensator speichert diesen Spannungswert, so dass der darauffolgende Quantisierer diesem Spannungswert einen digitalen Wert zuordnen kann.

Bei der Quantisierung wird jeder Abtastwert mit einer definierten Skala verglichen und entsprechend jedem Abtastwert ein digitaler Wert (Binärzahl) zugewiesen. Die Genauigkeit der Quantisierung ist abhängig von der verfügbaren Anzahl an Binärstellen. Beispielsweise hat ein 1-Bit Wandler 2 verschiedene Abstufungen, wobei ein 24-Bit Wandler bereits eine Genauigkeit von 16777216 Abstufungen vorweist. (vgl. Dickreiter et al., 2014, S. 667 f.).

Während des Quantisierungsvorgangs entstehen immer Quantisierungsfehler. Das wertkontinuierliche Eingangssignal kann in einer Quantisierungsstufe jeden beliebigen Wert annehmen. Daraus folgt, dass die zugewiesenen Spannungsstufen nicht immer den genauen Signalpunkten entsprechen müssen. Der größtmögliche Quantisierungsfehler ist dementsprechend eine halbe Quantisierungsstufe groß. Da der Quantisierungsfehler oftmals als Rauschen wahrgenommen wird, kann dieser auch als Quantisierungsrauschen betrachtet werden, welches dann von der Wortbreite, also der Genauigkeit des Abtastens, abhängig ist.

Hierbei kann der Signal-Rausch-Abstand über den Quantisierungsfehler und die Wortbreite *N* wie folgt berechnet werden:

$$SNR = 20 \cdot \log \frac{(2^N - 1)LSB}{1LSB} + 1,76dB$$

Mögliche Korrektur-
Systemdynamik wert

Die Einheit LSB ist der Fachausdruck für eine Spannungsstufe und bezieht sich auf das "Last Significant Bit". Von Spannungsstufe zu Spannungsstufe ändert sich das LSB jedes Mal. (vgl. Friesecke, 2014, S. 529 f.).

Damit das digitale Signal übertragen werden kann, muss vorher eine Kanalkodierung stattfinden. Kanalkodierung meint hierbei die Anpassung an den Übertragungskanal und somit das Schützen gegen Übertragungsfehler während der Übertragung. Die vielen verschiedenen Möglichkeiten der Kanalkodierung werden nicht weiter erläutert.

Durch das Bilden und Abspeichern von Prüfsummen, welche im Nachhinein die Richtigkeit des Signals darstellen können, lassen sich Fehler aus der Übertragung erkennen und im Nachhinein beheben. Dies ist ein großer Vorteil der Digitaltechnik gegenüber der Analogtechnik. (vgl. Friesecke, 2014, S. 538). Auch hier gibt es viele verschiedene Möglichkeiten der Fehlerkorrektur, auf die nicht weiter eingegangen wird.

7.2.2 Digitale Übertragungsverfahren

Um eine Übertragung digitaler Audiosignale in Echtzeit zu ermöglichen, gibt es verschiedene Verfahren, die im Folgenden näher erläutert werden.

AES/EBU (AES3)

Das AES/EBU Audioprotokoll ist ein professionelles Übertragungsformat für digitale Signale, welches in Zusammenarbeit der Audio Engineering Society (AES) mit der European Broadcast Union (EBU) entwickelt wurde und auf der AES3-Norm basiert, die stetig weiterentwickelt wird. Über das AES/EBU Übertragungsformat können zwei digitale Audiokanäle zeitgleich über eine Verbindung übertragen werden. Dies geschieht über das Zeitmultiplexverfahren. Hierbei werden abwechselnd ein

Sample von Kanal 1 und direkt im Anschluss ein Sample von Kanal 2 übertragen. (vgl. Grzesinski & Smyrek, 2020, S. 254). Diese Samples werden als Subframe bezeichnet und haben eine Länge von 32 Bit. Die ersten vier Bit-Stellen bilden eine Präambel, dienen der Synchronisation und zeigen an, ob es sich um Kanal 1 oder Kanal 2 handelt. Im Anschluss folgt das Audiodatenwort mit einer Länge von 24 Bit. Nach diesem kommen vier Bits, welche folgende Funktion erfüllen:

- Validity (V): Dieses Bit dient der Kennzeichnung fehlerhafter Datenwörter und signalisiert, ob die übertragenen Daten gültig sind.
- User Data Bit (U): Steht zur freien Verfügung für Applikationen.
- Channel Status Bits (C): Diese werden über 192 Frames gesammelt und ergeben die Informationen über den Übertragungskanal (z.B. ob es sich um AES3 oder S/P-DIF handelt).
- Parity Bit (P): Wird gesetzt, um eine gerade Anzahl an Nullen bzw. Einsen zu erzielen, in Hinblick auf eine einfachere Fehlererkennung.

(vgl. Dickreiter et al., 2014, S. 690)

Die Übertragung der AES/EBU Audiosignale erfolgt meist über symmetrische Kabel mit einer Impedanz von 110 Ω über XLR-Stecker. Eine unsymmetrische Übertragung mittels Koaxialkabel über BNC-Stecker mit einer Impedanz von 75 Ω ist auch möglich und wird meistens bei Rundfunkanstalten genutzt (vgl. Dickreiter et al., 2014, S. 694).

S/P-DIF

Das Sony/Philips Digital Interface (S/P-DIF) ist vom Aufbau ähnlich dem AES/EBU Audioprotokoll. Da das S/P-DIF allerdings für den Consumer-Markt gedacht ist, wurde ein zusätzlicher Kopierschutz in Form von Copy-Bits hinzugefügt. Zudem sind zusätzliche Channel-Status-Bytes vorhanden, welche sogenannte Category Codes enthalten. Diese können beispielsweise Start- und Pausenzeiten bei einer Audio-CD kennzeichnen. (vgl. Grzesinski & Smyrek, 2020, S. 256).

Die Übertragung erfolgt entweder über Cinch-Stecker mit einer Impedanz von 75 Ω und einer Signalamplitude von 1 V oder über Kunststoff-Lichtwellenleiter mit TosLink-Stecker, wobei hier die Reichweite auf 5-10 m beschränkt ist.

MADI

Das Multichannel Audio Digital Interface (MADI) basiert auf dem AES/EBU-Interface und ist bis auf die 4 Bit Präamble mit dem Format vergleichbar. Mit MADI können bis zu 64 Audiokanäle mit jeweils bis zu 24 Bit Auflösung und einer Abtastung von bis zu 48 kHz gleichzeitig übertragen werden. Die Übertragungsgeschwindigkeit der Daten beträgt dabei bis zu 100 Mbit/s.

MADI kann mit einer Koaxialleitung mit 75 Ω , über Lichtwellenleiter oder über Netzwerkkabel (Cat-5/Cat-6) erfolgen (vgl. Dickreiter et al., 2014, S. 696). Da MADI nicht selbsttaktend sein muss, wird eine zusätzliche Wordclock-Leitung empfohlen. Hierbei wird der Takt über einen zentralen Taktgenerator vorgegeben, welcher eine Synchronisation zwischen Sender und Empfänger vornimmt.

ADAT-Lightpipe

Der Alesis Digital Audio Tape (ADAT) oder Lightpipe-Standard ist ein Format für die Übertragung von bis zu acht Audiokanälen mit einer Auflösung von 24 Bit und einer Abtastung von 48 kHz über Kunststoff-Lichtwellenleiter mit TosLink-Steckverbindung. Bei einer Übertragung von nur zwei Audiokanälen wird eine Abtastung von 96 kHz unterstützt. Die Übertragung erfolgt selbst-taktend über einen NRZI-Code mit synchron-Bits. Ein ADAT-Datenframe besteht aus 256 Bits (vgl. Görne, 2015, S. 226).

7.3 Netzwerkbasierte Übertragung

Neben der analogen und digitalen Übertragung ist zudem eine netzwerkbasierte Übertragung möglich. Diese basiert auf der durch die Norm IEEE 802.3 standardisierten Ethernet-Hardware. Der große Vorteil der netzwerkbasierten Übertragung im Vergleich zur analogen ist, dass, anstelle von aufwändigen und vielen teuren Kabeln, nur eine Cat5 Netzwerkleitung benötigt wird.

Hierbei gibt es Ethernet kompatible und proprietäre Systeme. Ethernet kompatible Systeme sind unterteilbar in die OSI-Schichten.

7.3.1 OSI-Schichten

Open Systems Interconnection (OSI) ist ein von der International Standardization Organisation (ISO) entwickeltes Schichtmodell. Es wird genutzt, um die Kommunikation zwischen verschiedener Hardware und Software zu ermöglichen, indem sieben Schichten als Referenzmodell definiert werden, welche die Kommunikation beschreiben und vereinheitlichen.

- Schicht 1: Ist die Bitübertragungsschicht, in welcher der physische Transport zwischen zwei Geräten stattfindet.
- Schicht 2: Ist die Datensicherungsschicht. Diese Schicht dient der Fehlererkennung, sowie Fehlerkorrektur, indem beispielsweise Prüfsummen hinzugefügt werden. Des Weiteren wird die Hardware-Adresse in dieser Schicht festgelegt. Diese wird Medium Access Control (MAC) genannt.
- Schicht 3: Ist die Vermittlungsschicht. In dieser findet der Transport von Datenpaketen, das Routing, sowie die logische Adressierung (IP-Adresse) statt.
- Schicht 4: Ist die Transportschicht. Sie dient der Kommunikation zwischen der Anwendung und dem Netzwerk, also der Prozess-zu-Prozess Verbindung (Bsp. Virtual Private Network (VPN), Transmission Control Protocol (TCP)).
- Schicht 5: Dient der Kommunikationssteuerung. Diese Schicht ist für die Kommunikation zwischen zwei Systemen zuständig. Sollte es zu einer Verbindungsunterbrechung kommen, stellt diese Schicht die Verbindung und Synchronisierung wieder her.
- Schicht 6: Ist die Darstellungsschicht. In dieser Schicht werden die lokalen Datenformate für den Transport in standardisierte Formate umgesetzt. Zudem finden hier die Kodierung, Konvertierung und Kompression statt.
- Schicht 7: Ist die Anwendungsschicht. In dieser Schicht findet die Interaktion mit der Anwendungs-Software statt.
- (vgl. Grzesinski & Smyrek, 2020, S. 456 f.)

Die Übertragung von Audionetzen über Ethernet erfolgt in den Schichten 1-3. Durch die mittlerweile sehr vielen verschiedenen Ethernet kompatiblen-Netzwerke, wird im Folgenden jeweils ein Netzwerk pro Layer genauer betrachtet.

7.3.2 Layer-1-Protokolle

Die Audionetze im Layer-1 greifen auf die Ethernet Verkabelung zurück, nutzen allerdings nicht die Ethernet-Paket-Struktur. Damit entsprechen sie meist einer Punkt-zu-Punkt Verbindung.

AES50

AES50 wurde von Sony entwickelt und existiert in zwei Varianten: Super- und Hyper-MAC. Die Übertragung erfolgt über eine CAT-5 Netzwerkleitung. Dabei ist Super-MAC auf eine Übertragung von bis zu 48 Audiokanälen bidirektional begrenzt und Hyper-MAC auf bis zu 384 Audiokanäle bidirektional. Eine Besonderheit ist die Fehlerkorrektur, welche auf der Empfängerseite auch größere Übertragungsfehler korrigieren kann. Die typischen Latenzzeiten betragen 2 ms (vgl. Grzesinski & Smyrek, 2020, S. 465).

7.3.3 Layer-2-Protokolle

Im Gegensatz zu Audionetzen im Layer-1 verwenden Layer-2 Audionetze neben der Ethernet Verkabelung auch die Ethernet-Paket-Struktur.

CobraNet (Cirrus Logic)

CobraNet wurde in den 1990er Jahren entwickelt und war somit eine der ersten erfolgreichen Audionetzwerke. Mit der Verwendung eines Gigabit-Ethernets (Cat5-oder höher, sowie Glasfaser) können bis zu 700 Audiokanäle mit 32 Bit und 192 kHz verteilt werden. Hierbei beträgt die Datenrate 43 GBit/s. Die Latenz ist sowohl bei kleinen (1,33 ms), mittleren (2,66 ms) und großen Anlagen (5,33 ms) konstant. Aufgebaut ist das System über eine Sterntopologie mit doppelter Verbindung, durch welche eine hohe Ausfallsicherheit vorhanden ist. CobraNet verfügt zudem über die Power-over-Ethernet Funktion zur Stromversorgung der angeschlossenen Geräte (vgl. Grzesinski & Smyrek, 2020, S. 461 f.).

7.3.4 Layer-3-Protokoll Dante

Das Digital Audio Network Through Ethernet (Dante) der Firma Audinate ist das weltweit am bekanntesten und wohl meist genutzte Audionetzwerk. Dante ist ein IP-basiertes Audionetz, das eine direkte Verbindung zwischen den Endgeräten mittels CAT-5 Netzwerkkabeln ermöglicht. Die Übertragung ist dabei an alle Geräte mit einer Netzwerkkarte möglich. Die IP-Vergabe an die jeweiligen Geräte kann automatisch über ein Dante-Gerät oder manuell erfolgen.

Die Organisation von Dante erfolgt in sogenannten Flows. Ein Flow entspricht vier Kanälen. Insgesamt ist eine Übertragung von 128 Kanälen, also 32 Flows bei 48 kHz möglich. Auch eine Übertragung mit bis zu 192 kHz ist möglich, allerdings mit weniger Übertragungskanälen.

Im Vergleich zum CobraNet ist die Latenz bei Dante abhängig von der Anzahl an im Netzwerk vorhandenen Geräten. Diese ist aber im Praxisgebrauch nicht merkbar (vgl. Grzesinski & Smyrek, 2020, S. 460 f.).

8 Arten der Beschallung

Das Ziel eines Beschallungssystems ist die Versorgung des Hörers mit ausreichend Direktschall und möglichst geringem Diffusschall. Dies zu erreichen ist von vielen verschiedenen Faktoren abhängig, durch welche diverse Lösungen zur Beschallung entstanden sind. Grundlegend gibt es bei der Beschallung zwei verschiedene Vorgehensweisen, die zentrale und die dezentrale Lösung.

8.1 Zentrale Lösung

Bei der zentralen Lösung erfolgt die Beschallung, wie der Name schon sagt, von einem zentralen Punkt aus. Hierzu werden ein oder mehrere zusammenwirkende Lautsprecher in der Nähe der Bühne platziert. So gelingt es, das gesamte Publikum mit derselben Schallquelle gleichmäßig mit Schall zu versorgen, vorausgesetzt, der Abstand jedes Hörenden zur Schallquelle ist ungefähr gleich. Folglich ist eine Frontalbeschallung, bei der die Platzierung der Lautsprecher an der Bühnenkante vorgenommen wird, nicht sinnvoll, da die erste Reihe einen sehr hohen Schalldruckpegel erhält und die letzte Reihe einen entsprechend geringeren (Abbildung 5).



Abbildung 5: Frontalbeschallung mit Lautsprecher an der Bühnenkante. (Dickreiter et al., 2014, S. 575)

Um diese ungleichmäßige Verteilung zu umgehen, kann der Lautsprecher höher in einer vertikalen Position aufgehängt werden. So wird der Abstand zur ersten Reihe vergrößert. (Abbildung 6).

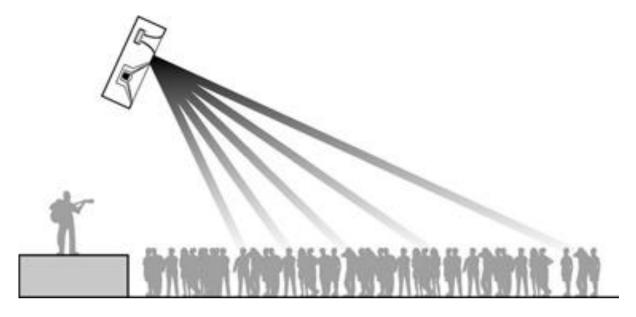


Abbildung 6: Frontalbeschallung mit einer höheren und angewinkelten Lautsprecherposition. (Dickreiter et al., 2014, S. 576)

Durch die nun größere Entfernung zum Lautsprecher ist ein höherer Schalldruck erforderlich (vgl. Dickreiter et al., 2014, S. 570). Es sollte auf die Ausrichtung der Lautsprecher geachtet werden, um die Entstehung eines störenden Diffusschallfeldes zu vermeiden.

Bei längeren Räumen kommt es vor, dass die hinteren Reihen nicht mehr ausreichend mit Schalldruck versorgt werden. Hier kommen Delay-Lautsprecher zum Einsatz.

Da durch den Einsatz von Delay-Lautsprechern nun zwei Beschallungsebenen vorhanden sind, kann theoretisch nicht mehr von einer zentralen Lösung gesprochen werden. Durch den Einsatz entsprechender Verzögerungszeiten kann mittels des Gesetzes der ersten Wellenfront ein Richtungsbezug zur

Hauptbeschallung hergestellt werden, so dass dies der Idee der zentralen Lösung sehr nah kommt.

8.2 Dezentrale Lösung

Um der Entstehung eines zu starken Diffusfeldes entgegenzuwirken, setzt die dezentrale Beschallung auf den Einsatz von mehreren Schallquellen, sodass die zu beschallenden Personen möglichst nahe am Lautsprecher platziert sind und der Schalldruckpegel entsprechend gering gehalten werden kann. Der Extremfall wäre die Beschallung jeder einzelnen Person durch einen eigenen Lautsprecher, der beispielsweise an jedem Sitzplatz installiert ist, was wiederum ein Gefühl der Isolierung beim Besucher hervorrufen könnte. Das zeichnet sich vor allem durch eine fehlende akustische Lokalisation zum Geschehen aus. Des Weiteren ist der Einsatz von vielen Lautsprechern nicht kostengünstig und wenig ökologisch, selbst wenn diese nicht die gleichen Leistungsanforderungen benötigten. (vgl. Dickreiter et al., 2014, S. 571).

Da beide Beschallungslösungen Vor- und Nachteile mit sich bringen, ist in der Praxis meist eine Kombination aus beiden zu finden.

9 Lautsprecherpositionierung

Die Position eines Lautsprechers hat einen großen Einfluss auf die Klangqualität. Hierbei sind zwei Extremfälle denkbar. Im ersten Fall ist der Lautsprecher frei in der Luft im Freien positioniert. In diesem Fall würde nur Direktschall beim Hörenden eintreffen. Es gäbe keinen Diffusschall, da kein Objekt eine Reflexion abgeben kann. Im zweiten Fall befindet sich der Lautsprecher in einem Raum, wobei hier der Hörende hinter dem Lautsprecher steht. In diesem Fall erreicht der Direktschall nie den Hörenden und dieser nimmt den Schall nur über das existierende Diffusschallfeld war. Die meisten realen Situationen werden sich zwischen diesen beiden Fällen befinden (vgl. Friesecke, 2014, S. 482).

9.1 Links/Rechts Aufstellung

Bei der Links/Rechts Aufstellung wird jeweils links und rechts von der Bühne eine Schallquelle platziert. Diese Aufstellung ist auch aus der klassischen Stereofonie bekannt.

Die Stereofonie bildet mehrere Klangquellen ab. So können einzelne Schallquellen herausgehört und lokalisiert werden. Dies verleiht dem Klang Raum und Tiefe. Die klassische Stereofonie wird als 2/0-Stereofonie bezeichnet. Hierbei ist rechts und links jeweils eine Klangquelle vorhanden. Diese Art der Stereofonie erzeugt keine Klangtiefe im Raum. Bei der sogenannten 3/2-Stereofonie, bei welcher drei frontale und zwei seitliche Klangquellen vorhanden sind, besteht hingegen die Möglichkeit, eine räumliche Tiefe mit dem Klang zu erzeugen (vgl. Dickreiter et al., 2014, S. 219).

Ob ein stereofoner Höreindruck entsteht, ist allerdings stark abhängig von der Abhörposition. Diese sollte im Idealfall mit den zwei Lautsprechern ein gleichschenkliges Dreieck bilden. Der Stereoeffekt wird über Intensitätsdifferenzen des linken und rechten Kanals erzeugt. Hierdurch kann es vorkommen, dass die Ortung des Schalls zwischen den beiden Lautsprechern zugewiesen wird. Hier spricht man von Phantomschallquellen (vgl. Friedrich, 2008, S. 117 f.).

Stereofonie wird häufig im Tonstudio angewandt. Durch die sehr genaue Abhörposition, die eingehalten werden muss, um ein gutes Klangbild zu erzeugen, wird Stereofonie jedoch selten in Konzertveranstaltungen eingesetzt.

Bei Konzerten wird in den meisten Fällen auf eine Mono- bzw. Dualmonobeschallung gesetzt. Hierbei wird das gleiche Signal über beide Schallquellen ausgegeben, die aber trotzdem nach links oder rechts gepegelt werden, sowie getrennt voneinander angespielt werden können.

9.2 Links/Center/Rechts Aufstellung

allem Bei größeren Konzerten größeren und in vor breiteren Veranstaltungsräumen, kann es schnell dazu kommen, dass eine Links-/Rechts-Aufstellung den mittleren Publikumsbereich nicht ausreichend beschallt. Um dem entgegenzuwirken, werden oftmals in der Mitte der Bühne sogenannte Center-Lautsprecher platziert. Deren Zweck ist die Beschallung der Mitte des Publikumraumes mit Hauptaugenmerk auf den mittleren/hinteren Publikumsbereich. Die vorderen Reihen werden von den Nahfeld-Lautsprechern abgedeckt. Dazu kommt, dass mithilfe des Gesetzes der ersten Wellenfront die akustische Lokalisation in Richtung der Bühnenmitte verstärkt werden kann.

L-Acoustics 31

9.3 Immersive Lösung

Eine immersive Lösung erweitert die klassische Frontalbeschallung, so dass möglichst das gesamte Publikum eine korrekte akustische Lokalisation der Bühne erhält. Dazu kann eine immersive Lösung mithilfe von Surround Lautsprechern die akustische Lokalisation bis hin zu einer 360° Beschallung erweitern. Hierdurch ist ein objektbasiertes Mischen möglich, mit welchem sich im gesamten Raum Klangobjekte platzieren lassen. Dieser Ansatz findet meist in der Virtual-Reality-Welt Anwendung. Dieser Ansatz wird bei L-Acoustics L-ISA genannt.

Bei L-ISA werden mindestens 5 Lautsprecher verteilt über der Bühne platziert, wovon jeder möglichst viel vom Publikumsbereich abdeckt. Dadurch ist ein korrekter Richtungsbezug an jeder Position im Publikum möglich. Da L-Acoustics den Ansatz der Frontalbeschallung beibehalten will, wird nicht von einem immersiven System gesprochen, sondern von einem Hyperrealen-System. Sobald dieses mit 360° Surround Lautsprechern erweitert wird, spricht L-Acoustics von einem immersiven Hyperreal-System. Die Berechnung dazu übernimmt der L-ISA II Prozessor, welchen L-Acoustics anbietet.

10 L-Acoustics

Da im praktischen Teil dieser Arbeit die Audiotechnik von L-Acoustics Verwendung findet, werden die wichtigsten Systemkomponenten im Folgenden erläutert. Die Firma L-Acoustics, 1984 von Christian Heil gegründet, beschränkt sich aktuell nicht mehr nur auf die Herstellung von Lautsprechern, sondern bietet neben diesen die entsprechenden Verstärker, das entsprechende Rigging System und die empfohlene Software an.

10.1 L-Acoustics Lautsprecher

Die L-Acoustics Lautsprecher sind in vier Kategorien unterteilbar (short throw, medium throw, long zhrow und subwoofer) und werden im Folgenden kurz vorgestellt. Des Weiteren wird auf die Software und die Prozessoren von L-Acoustics eingegangen.

L-Acoustics 32

10.1.1 Short throw

Die short throw Lautsprecher von L-Acoustics sind auf eine Reichweite von bis zu 15 m empfohlen.

X Series:

Bei der X-Series handelt es sich um koaxiale Punktquellenlautsprecher. Diese sind in den Ausführungen von 4" (speziell für Festinstallation), 5", 8", 12" und 15" erhältlich. Bei den Lautsprechern der X Serie handelt es sich um 2-Wege passiv Lautsprecher. Nur der X15 HiQ ist ein 2-Wege aktiv Lautsprecher. Eine genaue Auflistung ist im Anhang in der Tabelle 2 zu finden.

P Series:

Die P Series umfasst zwei koaxiale Lautsprecher und einen Subwoofer. Die beiden Lautsprecher haben einen integrierten Class-D Verstärker und benötigen somit keinen Vorverstärker. Eine Auflistung der P Serie ist im Anhang in Tabelle 3 zu finden.

10.1.2 Medium throw

Die Kategorie medium throw umfasst 2 Arten von Lautsprechern und ist bis zu einer Reichweite von bis zu 45 m empfohlen.

S Serie:

Bei der S Series handelt es sich um Linienlautsprecher, welche in 2 Ausführungen kommen, Soka und Syva. Die Syva Lautsprecher werden auch als kleine Line Arrays bezeichnet werden. Die S Series ist der Kategorie medium throw zugeordnet. Eine Auflistung ist im Anhang in Tabelle 4 zu finden.

A Series:

Es handelt sich bei der A Serie um ein Line-Source-Array, welches mit konstante Zwischenwinkeln arbeitet. Das hat den Vorteil, dass mit weniger Elementen ein größerer Vertikaler Winkel abgedeckt werden kann. Das ist im Vergleich zu einer L-Acoustics 33

Line-Source-Array Lösung, wie der K-Serie von L-Acoustics, effizienter und kostengünstiger.

Die A Serie umfasst zwei Ausführungen, die 10" und die 15" Lautsprecher. Diese haben einen Abstrahlwinkel in der Kopplungsebene von 10° (Focus) und 30° (Wide). In der orthogonal angeordneten Abstrahlebene lässt sich der Winkel zwischen symmetrisch 100° und 70° oder asymmetrisch 90° einstellen. Zusammen mit dem KS21 Subwoofer lässt sich der Frequenzbereich von 60 Hz auf bis zu 29 Hz erweitern. Eine Auflistung ist im Anhang in Tabelle 5 zu finden.

10.1.3 Long throw

Die Long Throw Kategorie, welche nur die K Serie beinhaltet, umfasst alle Line Arrays von L-Acoustics, die ab einer Reichweite von über 35 m empfohlen werden. Eine Auflistung ist im Anhang in Tabelle 6 zu finden.

10.1.4 Subwoofer

Eine Auflistung der Subwoofer ist im Anhang in Tabelle 7 zu finden.

10.1.5 Software

L-Acoustics stellt entsprechende Software für ihre Produkte zur Verfügung. Mithilfe von Soundvision kann im Vorfeld eine genaue Simulation der Beschallung erfolgen. Diese kann im Anschluss in LA Network Manager importiert werden, um mit dieser die richtige Einstellung der Leistungsverstärker und Tuning-Optionen vorzunehmen. Auch während der Live-Veranstaltung kann LA Network Manager dazu genutzt werden, das komplette Beschallungssystem zu überwachen und zu steuern.

Für Beschallungen mit L-ISA stellt L-Acoustics ebenfalls eine entsprechende Software zur Steuerung und Einstellung zur Verfügung.

10.1.6 Prozessoren

Bei den Prozessoren stellt L-Acoustics für eine immersive Beschallung einen L-ISA II Prozessor zur Verfügung, welcher die Berechnung vornimmt und als Schnittstelle zwischen der Software und der Beschallung dient.

Der P1 Prozessor ist für die Beschallung ohne L-ISA System vorhanden. Dieser kombiniert eine Equalizer Station, die Überbrückung von AVB, AES/EBU und analogem Signal, sowie einem offline-Delay-Finder und Equalizer Modulation in einem Gerät. Gesteuert werden kann der P1 Prozessor über die Software LA Network Manager.

11 Messung in der Halle

Um das S&K Studio akustisch darzustellen und um zu zeigen, wie sich die Frequenzen im Raum verhalten, wurde eine Messung der Halle durchgeführt.

Setup

Für die Messung wurde folgende Technik verwendet:

Programm	Room EQ Wizard (REW)
Messmikrofon	Beyerdynamic MM1
Audiointerface	Focusrite Scarlett 2i2
Lautsprecherbox	Electro-Voice ELX 112P
	(Frequenzbereich: 60Hz - 18kHz)
Schallpegelmessgerät	PeakTech P 8005

Tabelle 1: Auflistung der Messinstrumente.

Die Lautsprecherbox wurde kurz vor der Bühne platziert und nach oben gerichtet, um eine Richtwirkung der Box zu vermeiden. In einem Abstand von 15m wurde das Messmikrofon aufgestellt. Die Messung des Messmikrofons erfolgte in einem 90° Winkel. Das Mikrofon ist im Eingang 1 des Audiointerfaces und der Lautsprecher im Ausgang 1. Der Versuchsaufbau ist im Anhang in Abbildung 19 noch einmal dargestellt.

Um eine genaue Messung zu erzielen, müssen im Vorfeld das Audiointerface und das Messmikrofon kalibriert werden. Die Kalibration des Audiointerfaces ist über das Programm REW möglich. Für das Messmikrofon wurde die Kalibrationsdatei verwendet, die von Beyerdynamic selbst für das Mikrofon erstellt wurde.

Um eine genaue Pegelmessung durchführen zu können, wurde zudem die dB Anzeige kalibriert. Hierfür wurde das Schallpegelmessgerät neben das Messmikrofon gelegt und über die Software REW ein Rauschen ausgegeben. Mit dem Gain der Lautsprecherbox wurde dies auf 75dB angepasst und entsprechend in der Software eingestellt.

Im Anschluss wurde die Messung in der Software REW gestartet. Die genauen Einstellungen des Messvorgangs sind der Abbildung 21 im Anhang zu entnehmen.

11.1 Messergebnisse

Durch das Messprogramm REW werden viele verschieden Messungen aufgenommen. Für diese Arbeit relevant sind die Messung der Nachhallzeit (T30) und das Spektogramm.

11.2 Nachhallzeit

Die frequenzabhängig gemessene Nachhallzeit stellt dar, wie lange eine bestimmte Frequenz benötigt, um einen Pegelabfall um 60 dB zu bewirken. T30 bezeichnet die bei der Messung ausgewertete Dynamik. Hierbei wird der Pegelabfall von 5 dB zu 35 dB gemessen und mit 2 multipliziert.

Die Nachhallzeit spielt für das Klangerlebnis eine große Rolle. Ist diese zu lang, können störende Echos und im tieffrequenten Bereich ein Dröhnen auftreten. Ist diese kurz, kann ein dumpfes Klangerlebnis eintreten. Eine gute Länge für eine Konzerthalle ist eine Nachhallzeit bei 500 Hz – 1 kHz um 2 s herum (vgl. Beranek, 2010, S. 503).

Im Anhang in Abbildung 22 ist die Nachhallzeit des S&K Studios graphisch dargestellt. Diese liegt im Bassbereich bei über 2 s bis maximal 2,5 s und in dem Bereich von 500 Hz bis 1 kHz ebenfalls bei bis zu 2,4 s. Es kann also zu einem störenden Klangerlebnis in Form eines leichten Echos auftreten. Hieraus folgernd sollte darüber nachgedacht werden, die Nachhallzeit mithilfe von Absorbern zu dämpfen, um die gewünschten 2 s zu erzielen.

Mithilfe der Software "Enhanced Acoustic Simulator for Engineers" (EASE) der Ahnert Feistel Media Group kann eine genaue Simulation und somit Berechnung der Akustik erfolgen. Hierdurch könnte eine Verbesserung mit beispielsweise Absorbern simuliert werden. Da allerdings kaum Informationen zu den Oberflächen der Fassade des S&K Studios vorhanden sind, steht der Aufwand nicht im Verhältnis zu dieser Arbeit.

Für die folgende Auslegung der Beschallungsanlage sollte darauf geachtet werden, dass möglichst wenig Direktschall auf die Fassaden trifft und somit störende Reflexionen verhindert werden.

11.3 Spektogramm

Das bei der Messung erstellte Spektogramm, welches im Anhang in Abbildung 23 zu finden ist, zeigt auf, welche Frequenzen besonders stark hervorgehoben werden und zu Störungen führen könnten. Es ist deutlich zu sehen, dass der tieffrequente Bereich stärker ausgeprägt ist, was zu einem ungewollten Dröhnen oder störenden Interferenzen, sowie Rückkopplungen führen kann. Mithilfe eines Equalizers kann dies vermieden werden.

12 Auslegung des Beschallungssystems

Im folgenden Kapitel wird ein Beschallungssystem für das S&K Studio ausgelegt und anschließend simuliert. Um die Planung des Beschallungssystems anhand der oben beschriebenen Komponenten durchzuführen, bedarf es im Vorfeld einer Bedarfsanalyse, im Zuge welcher der genaue Einsatzzweck, sowie die örtlichen Gegebenheiten dargelegt werden. Anschließend werden die einzelnen Komponenten des Beschallungssystems Verwendung des unter der Simulationsprogramms Soundvision ausgelegt.

12.1 Bedarfsanalyse

Das S&K Studio befindet sich in Berlin Kreuzberg direkt an der Spree auf einem Industriehof. Die Größe der Halle beträgt in der Länge 42,4 m, in der Breite 23,8 m und in der Höhe 10,2 m. In dieser Halle wird ein Innenraum durch Gaze abgegrenzt. Dieser Innenraum hat eine Länge von 34,2 m und eine Breite von 20,0 m. Dies bildet die zu beschallenden Publikumsfläche. Die Abmessungen können der Abbildung 7 entnommen werden. Außerhalb des Innenraumes sind Schiffscontainer am Rand abgestellt, die zu Garderoben, Toiletten und Büros umfunktioniert wurden. Die im S&K Studio installierte Bühne hat eine Größe von 10 m $\times 4$ m $\times 0,8$ m.

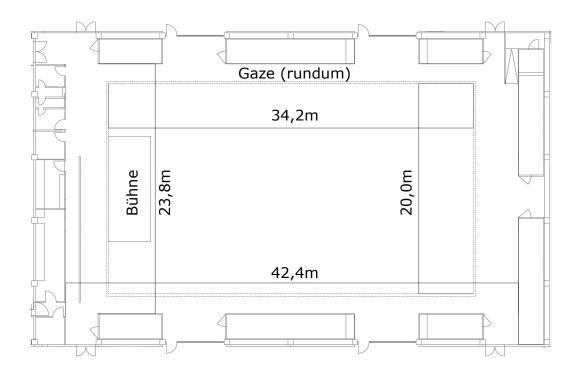


Abbildung 7: Grundriss des S&K Studios. Eingezeichnet sind die jeweiligen Maße und die eingrenzenden Gaze ringsum, sowie die Schiffscontainer, in welchen die Toiletten, sowie Garderoben untergebracht sind.

Das Beschallungssystem soll auf das Anwendungsszenario "Konzert im Bereich Rock & Pop Musik" ausgelegt werden, da dieses in allen Frequenzbereichen einen hohen Anspruch darstellt. Ziel ist es, im kompletten Publikumsbereich ein ausgewogenes Klangbild in allen Frequenzen zu erzeugen und Schalldruckpegel von 105 dB(A) und 115 dB(C) zu erreichen. Da eine als angenehm empfundene Beschallung von Mensch zu Mensch individuell wahrgenommen wird, ist es wünschenswert eine räumlich variable Verteilung des Schalldruckpegels zu erzeugen. Folglich wird angestrebt, in den vorderen Reihen einen höheren Schalldruckpegel zu erzeugen als in den hinteren Reihen.

Da es sich bei der Lage des S&K Studios nicht um ein reines Industriegelände handelt, sind kritische Anwohnende auf dem Gelände vorhanden, die mitberücksichtigt werden sollen. Im Anhang in Abbildung 20 sind die Orte der kritischen Anwohnenden genauer dargestellt. Das Planungsziel hierbei ist, die abgestrahlte Schallleistung möglichst nur auf den Publikumsbereich zu begrenzen, um ein möglichst geringes Diffusfeld zu erzeugen und Schallemissionen zu vermeiden.

Unter der Hallendecke sind Betonpfeiler, welche ein Gewicht von 500kg pro Meter aufnehmen können. Hier können Anschlagpunkte zur Montage der Lautsprecher gesetzt werden.

Hinter der Bühne kann eine Leinwand mit der Größe von 5,80 m x 3,70 m montiert werden. Vor der Bühne hängt ein Beamer, der in der Planung beachtet werden sollte, um das Projektionsfeld nicht einzuschränken.

Eine Alarmierung im Notfall muss nicht in das Beschallungssystem integriert werden. Somit müssen keine Richtlinien im Bezug auf die Sprachverständlichkeit eingehalten werden.

Um im Publikumsbereich jegliche Schädigungen des Gehörs zu vermeiden, muss das Beschallungssystem während der Veranstaltung im gesetzlich vorgeschriebenen Bereich bleiben. Dies schreibt die Norm DIN 15909-5 vor. Zulässig sind 99 $L(A)_{Eeq}$ gemittelt über eine halbe Stunde. Der Pegel von 135 dB(C) darf niemals überschritten werden. Das gilt für den lautesten Ort, der für die Zuhörenden zu erreichen ist. Das dafür zu verwendende Messverfahren wird ebenfalls in der DIN 15909-5 beschrieben.

Auf dieser Grundlage soll das Beschallungssystem ausgewählt werden.

12.2 Lautsprecher

Um die passenden Lautsprecher auszuwählen, wird der Raum in den in Kapitel 10.1 genannten L-Acoustics Lautsprecherkategorien eingeordnet. Da der zu beschallende Bereich eine Länge von 34,2 m, ohne Abzug der Bühne, nicht überschreitet, sind die Lautsprecher der "medium throw" Kategorie ausreichend.

Die Syva Lautsprecher sind von der Leistung her geeignet, um ein Konzert zu beschallen, allerdings nicht in der hier vorgegebenen Größenordnung. Dazu kommt, dass die Syva Lautsprecher aufgrund ihres vertikalen Abstrahlverhaltens von 26° nicht geeignet sind, über der Bühne aufgehangen zu werden. Auf dem Boden platziert würde ein Problem mit der SPL-Verteilung und den Reflexionen bei den Containern auftreten. Aus diesen Gründen fällt die Auswahl der Lautsprecher zugunsten der A Serie. Hierbei wird, um genügend Schalldruck in alle Bereiche zu erzeugen, die Lautsprecherserie A15 als Hauptbeschallungsanlage ausgewählt. Um passende Anzahl Lautsprechern, sowie deren ideale die an Position herauszufinden, ist eine Simulation in dem Programm Soundvision notwendig. Für die Simulation in Soundvision wurde ein 3D Model des S&K Studios mit der Software SketchUp angefertigt. Dieses ist auf der Grundlage des Grundrisses, welcher von einem Ingenieurbüro gezeichnet wurde, entworfen worden. Um Rechenleistung zu sparen, wurden bei der Erstellung des Grundrisses nur die Wände mit eingezeichnet, welche eine direkte Auswirkung auf den Schall haben. Details wurden hierbei vernachlässigt. Das Model ist im Anhang in Abbildung 24 dargestellt.

Über das SketchUp Plugin zur Implementierung von SketchUp-Dateien in Soundvision, wurde der Grundriss importiert.

Der Publikumsbereich vor der Bühne ist auf eine Kopfhöhe von 1.80m gesetzt. Das Programm kann nur die Schalldrücke darstellen, die von oben auf die Zuhörerfläche treffen. Aus diesem Grund müssen alle Lautsprecher über der Kopfhöhe angebracht werden. Dies ist lediglich für die Simulation in Soundvision notwendig und betrifft in diesem Fall nur Nahfeldlautsprecher.

Die Simulation in Soundvision erfolgt im Frequenzbereich von 1 kHz bis 10 kHz, da in diesem Bereich die Wellenlänge stets kleiner ist als die äquivalent schallabstrahlende Fläche des Lautsprechers und dadurch eine Richtwirkung des Schalls erzeugt werden kann. Bei zu großen Wellenlängen verhält sich der Schall meist omnidirektional.

12.3 Hauptbeschallungsanlage

Bei der Art der Beschallung wird auf eine frontale Beschallung gesetzt. Hierbei wird die Hauptbeschallungsanlage jeweils rechts und links neben der Bühne platziert. Auf den Einsatz von Center Lautsprechern wird verzichtet, da die Richtwirkung der L/R Lautsprecher den kompletten Publikumsbereich abdecken.

Die Hauptbeschallungsanlage wird in einer Höhe von 7 m aufgehängt, um eine ausgeglichene Schalldruckverteilung zu erzielen. Neben der Verteilung des Schalldrucks ist es wichtig, den in der DIN 15905-5 vorgeschrieben maximalen Schalldruck einzuhalten. Durch eine höhere Aufhängung kann dies an der kritischen Stelle, der vorderen Reihe, besser reguliert werden. Auch das durch die höhere Aufhängung ein möglicher Nachteil in Bezug auf die akustische Ortung des Schalls geschieht, wird hingenommen, um die Vorteile der homogenen Schalldruckverteilung und der Einhaltung der Schalldruckgrenzen gerecht zu werden.

Um sowohl die erste Reihe als auch die letzte Reihe zu beschallen, ist der Einsatz von vier A15 Lautsprechern notwendig. Dazu werden drei A15 Focus für den mittleren bis hinteren Bereich, sowie eine A15 Wide für den vorderen Bereich eingesetzt. Die Hauptabstrahlachse der oberen A15 Focus wird so eingestellt, dass sie auf der Kopfhöhe der letzten Reihe endet (dmax). Die unterste A15 Wide soll hingegen die vorderen Reihen mit Schalldruck versorgen (dmin). Dies entspricht einer Neigung des Arrays um -4.6°. (Abbildung 8)

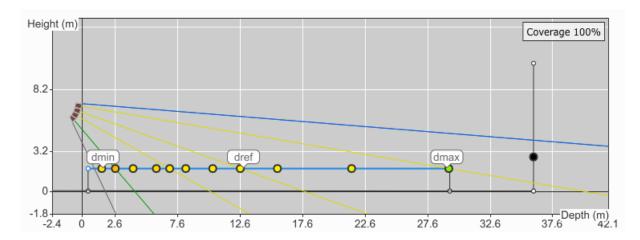


Abbildung 8: Abstrahlung der Hauptbeschallungsanlage vertikal betrachtet in Soundvision.

Vertikal ist die Abdeckung komplett gegeben. Dies muss nun mit der horizontalen Ebene ebenfalls geschehen. Dazu ist die Einstellung des Azimuth, sowie die Richtwirkung jedes einzelnen Lautsprechers wichtig.

Als Richtpunkt für die Einstellung des Azimuths kann die Mittelachse gewählt werden. Um störende Interferenzen und Kammfiltereffekte zwischen der linken und rechten Hauptbeschallungsanlage zu vermeiden, sollten sich die beiden Mittelachsen der Lautsprecher nicht überschneiden.

Das Array selbst wird jeweils 5m rechts und links neben der Bühne angebracht. Um nun mit der Hauptstrahlachse des Arrays annäherungsweise an die Mittelachse des Publikumsbereich zu gelangen, ist ein Azimuth von 7° notwendig, was in Abbildung 9 nochmals verdeutlicht dargestellt ist.

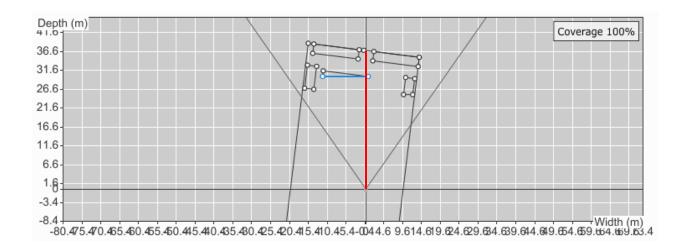


Abbildung 9: Horizontale Abstrahlung des linken Arrays der Hauptbeschallungsanlage. In Rot eingezeichnet die Hauptstrahlachse. Die Hauptrahlachse trifft mittig auf der Rückwand auf.

Um eine Abstrahlung des Schalls außerhalb des Publikumbereichs zu vermeiden, wird die Richtwirkung der oberen drei A15 Focus auf 70° eingestellt, was von der Hauptstrahlachse jeweils 35° nach rechts und links entspricht. Dies reicht aus, um den Publikumsbereich zu beschallen. Die untere A15 Wide wird auf eine Richtwirkung von 110° eingestellt, da hier ein geringerer Abstand zum Publikum gegeben ist. Das erfordert einen größerer Abstrahlwinkel.

Damit eine ausgeglichene Verteilung des SPL im gesamten Publikumsbereich vorgenommen werden kann, ist es wichtig, jede einzelne A15 mithilfe von fünf "finite impulse response filtern" (FIR-Filtern) im Frequenzbereich von 1.25 kHz bis 20 kHz anzupassen. Dazu kommt ein zusätzlicher FIR Autofilter-Fullrange für den Bereich bis 80 Hz.

Bei FIR-Filtern handelt es sich um einen digitalen Filter, welcher rückkopplungsfrei und phasenlinear mit einer endlichen Impulsantwort arbeitet. Hierfür wird eine hohe Rechenleistung benötigt, was zu einer Latenz von bis zu 50ms für kann (vgl. Weinzierl, 2008, S. 461). Bei L-Acoustics geschieht diese Filterung im Leistungsverstärker. Die hierfür benötigte Latenz beträgt 3.9ms und umfasst die Rechendauer, die A/D-Wandlung und die FIR-Filterung. Mit dem zusätzliche FIR-Autofilter-Fullrange beträgt diese Latenz 6.5ms. Die Leistungsverstärker von L-Acoustics unterstützen alle FIR-Filter.

Das Publikum geht in den meisten Fällen bei einem Konzert davon aus, dass die vorderen Reihen lauter beschallt werden im Vergleich zu den hinteren. Um dieser Erwartung nachzukommen, wird ein Ziel der SPL-Verteilung von +3dB vorne (dmin) über 0dB (dref) bis -4dB in der hintersten Reihe (dmax) gewählt. Hierbei

wird darauf geachtet, dass der Abfall der Lautstärke gleichmäßig geschieht, damit keine Verzerrung im Klangbild entsteht. Durch die einzuhaltenden 99dB $L(A)_{Eeq}$ an der lautesten Stelle, welche der vorderen Reihe entspricht, ist zudem damit gewährleistet, dass die hinteren Reihen mit -7dB, also 92dB $L(A)_{Eeq}$ genügend Schalldruck erreicht, welcher ausreichend für ein gutes Klangergebnis ist.

Die Abbildung 25 im Anhang zeigt die SPL-Verteilung ohne den Einsatz des FIR-Filters. Dazu zeigt Abbildung 26 im Anhang den entsprechenden Frequenzverlauf im Publikum. Durch den Einsatz des FIR-Filters kann diese SPL-Verteilung angepasst werden. Außerdem wird durch die FIR-Filter der Frequenzverlauf ebenfalls deutlich homogener. Im Anhang in Abbildung 27 und Abbildung 28 ist die SPL-Verteilung und der entsprechende Frequenzverlauf dargestellt. Ebenfalls ist im Vergleich der beiden Frequenzgänge mit und ohne FIR-Filter erkennbar, dass der FIR-Filter einen deutlich homogenere Frequenzverlauf schafft. Dazu sind die Abweichungen im Bereich von unter 3dB.

Im Anhang in Abbildung 27 ist zu sehen, dass durch den Einsatz des FIR-Filters die SPL-Verteilung im Bereich von 1 kHz bis 10 kHz (hellblaue Linie) zu 97.4% erreicht wird (Target). Die dunkelblaue Linie oberhalb stellt in Abbildung 27 die SPL-Verteilung im Frequenzbereich von 63 – 250 Hz da. Es ist zu erkennen, dass diese ebenfalls einen homogenen Verlauf im Publikumsbereich darstellt. Sichtbar wird auch, dass die tiefen Frequenzen deutlich angehoben sind, was für die Auslegung für ein Pop- und Rockkonzert wichtig ist.

Der Abbildung 29 im Anhang kann entnommen werden, wie die FIR-Filter die jeweiligen Lautsprecher in den jeweiligen Frequenzbereichen beeinflusst. Auch ist zu erkennen, dass dadurch die Gesamtleistung abnimmt. Allerdings ist dies bei der Dimensionierung der Beschallungsanlage nicht relevant. Alle für das linke Array der Hauptbeschallungsanlage ausgeführten Schritte werden gespiegelt auch für das rechte Array durchgeführt. Daraus ergibt sich eine ausgeglichene Beschallung (Abbildung 10).

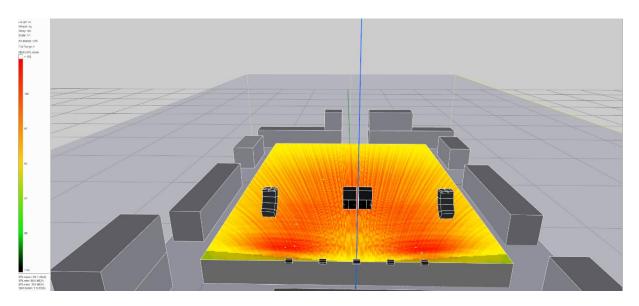


Abbildung 10: Die SPL-Verteilung der Hauptbeschallungsanlage in Full Range A betrachtet im Frequenzbereich von 1 kHz bis 10 kHz. Die Abstufung beginnt bei 103 dB(A) in Rot und geht in dreier Schritten abwährts.

Die Hauptbeschallungsanlage deckt somit den kompletten Publikumsbereich mit einer gleichmäßig Beschallung ab. Über das Histogramm (Abbildung 31 im Anhang) und die Statistik (Abbildung 30 im Anhang) von Soundvision ist erkennbar, dass die Abweichung vom SPL(A) Durchschnittswert (Mean) bei 7.8 dB(A) liegt (Distribution).

Durch diese Abdeckung ist der Einsatz von Delay Lautsprechern nicht notwendig.

12.4 Nahfeld

In Abbildung 10 ist zu sehen, dass die Beschallung in der ersten Reihe nicht ganz optimal ist. Daher empfiehlt sich hier der Einsatz von Nahfeld-Lautsprechern. Da hier nur die Beschallung der ersten Reihen geschehen muss, reichen kleinere Lautsprecher aus. Dafür werden an der Bühnenkante X8 Lautsprecher platziert.

Mithilfe von den in Soundvision simulierten "impact points" lässt sich ein optimaler Abstand zwischen den Lautsprechern bestimmen.

Die impact Points stellen den Bereich dar, zu welchem der Lautsprecher einen bestimmten dB Abfall erfährt. Diese sind in Abbildung 11 dargestellt. Die ausgefüllten impact Points stellen den Bereich dar, zu dem ein Abfall von 3 dB erreicht ist. Die unausgefüllten impact Points stellen den Bereich dar, zu dem ein Abfall von 6 dB erreicht ist. Der Abfall von 6 dB entspricht der Richtwirkung des Lautsprechers.

Um ein möglichst homogenes Schallfeld zu erreichen, ist es sinnvoll die Lautsprecher so zu positionieren, dass sich die ausgefüllten impact Points knapp überlappen. Hierdurch können allerdings starke Kammfiltereffekte.

Die andere Möglichkeit, um Kammfiltereffekte zu vermeiden und eine höhere Sprachverständlichkeit zu erlangen, ist die nicht ausgefüllten impact points knapp überlappen zu lassen.

Für eine Konzertbeschallung ist eine Sprachverständlichkeit nicht so relevant, wie eine homogene Schallverteilung. Daher werden die Lautsprecher so positioniert, dass diese sich an der -3 dB Grenze überlappen. Der sich hieraus ergebende Abstand beträgt 2 m zwischen jedem Lautsprecher. Somit können an der Bühnenkante insgesamt fünf Nahfeld-Lautsprecher platziert werden. Dazu kommt, dass die Hauptbeschallungsanlage ebenfalls die erste Reihe beschallt und somit die Kammfiltereffekte abmildert.

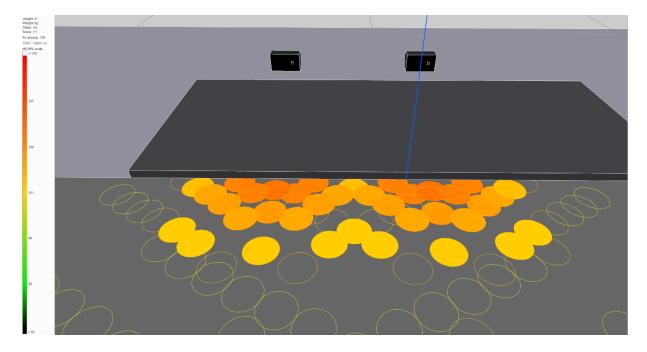


Abbildung 11: Abstrahlung beider Nahfeld-Lautsprecher.

Damit die Nahfeld-Lautsprecher im Vergleich nicht zu laut sind, wird der Gain der Nahfeld-Lautsprecher um 9 dB gesenkt. Hierdurch ergibt sich eine gleichmäßige Verteilung, wie im Anhang in Abbildung 32 zu sehen ist. Dies verdeutlicht das Histogramm, sowie die Statistik, welche im Anhang in Abbildung 33 und Abbildung 34 zu sehen sind.

12.5 Subwoofer

Die Auswahl der Subwoofer fällt auf den KS21. Der KS21 kann in Kombination mit den A15 Lautsprechern über ein Voreinstellung des Herstellers (Preset) zusammen genutzt werden. Hierbei wird der Frequenzbereich, welcher ohne Subwoofer bei 60 Hz – 20 kHz liegt, auf 29 Hz – 20 kHz erweitert. Der KS21 kann zudem in einer Cardioid Aufstellung genutzt werden, um eine gerichtete Abstrahlung zu erzielen. (vgl. L-Acoustics, 2022, S. 50)

Da der Platz auf dem Boden begrenzt ist und die Subwoofer gestapelt die Sicht auf die Bühne versperren, werden die Subwoofer aufgehängt (geflogen). Ein weiterer Vorteil ist, dass dadurch die SPL-Distribution in der Tiefe des Raumes deutlich besser ist. Hierbei muss beachtet werden, ob der Beamer, der sich in der Mitte des Raumes vor der Bühne befindet, in Gebrauch ist. Daher werden im Folgenden 2 Varianten vorgestellt.

1. Variante:

Die KS21 werden außen neben der Hauptbeschallungsanlage geflogen, um die Sicht auf die Leinwand nicht zu verdecken. Um hier eine ausreichende Beschallung des Publikumsbereiches zu erzielen, sind mindestens drei KS21 nötig, wobei der untere als Cardioid eingesetzt wird, um eine Richtwirkung zu erzielen.

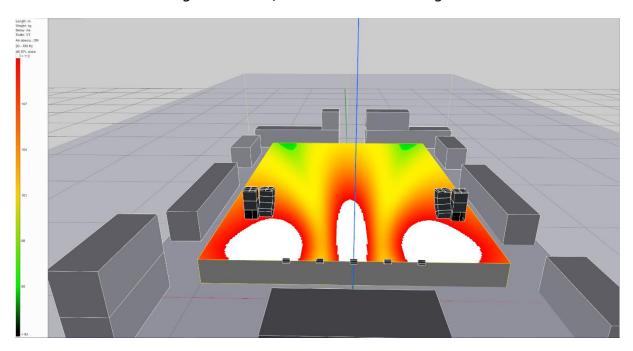


Abbildung 12: Beschallung der Subwoofer in der außen geflogenen Variante.

Zwar ist hier eine ausreichende Beschallung der Publikumsfläche gegeben, jedoch geht diese mit einem unerwünschten Kammfiltereffekt einher, was vermieden werden sollte. Um die Kammfiltereffekte veranschaulicht im Frequenzgang zu zeigen, sind diese im Anhang in Abbildung 35 dargestellt. Die gesetzten Proben, welche im Publikumsbereich verteilt wurden, sind in der Abbildung 36 im Anhang zu finden. Diese Variante kann eingesetzt werden, wenn der mittlere Bereich vor der Bühne frei bleiben muss, da sonst der Beamer verdeckt wäre.

2. Variante:

In dieser Variante werden die KS21 direkt mittig über der Bühne geflogen. Hierfür sind vier KS21 ausreichend, wobei die unteren beiden als Cardioid genutzt werden. Somit werden insgesamt zwei KS21 weniger benötigt.

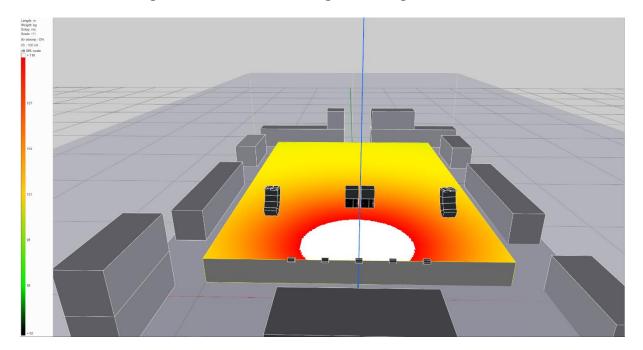


Abbildung 13: Beschallung der Subwoofer mittig geflogen.

Es ist zu sehen, dass eine deutlich ausgewogenere Beschallung des Publikums in dieser Variante vorliegt. Dies wird im Frequenzverlauf im Anhang in Abbildung 37 nochmal verdeutlicht. Hier ist ein sehr homogener Frequenzverlauf im Bassbereich sichtbar, ohne Kammfiltereffekte. Auch die Erwartung, dass der vordere Bereich einen höheren Schalldruck im Vergleich zum hinteren Bereich erfährt, wird erfüllt. Wenn möglich sollte diese Variante verwendet werden.

12.6 Tonales Verhalten

Damit im Publikum ein angenehmes Klangbild entsteht, sollte ein möglichst homogener Frequenzverlauf im kompletten Bereich des Publikums vorliegen. Soundvision kann diesen Frequenzverlauf simulieren.

Im Anhang in Abbildung 28 ist zu sehen, dass der Frequenzverlauf der Lautsprecher sehr ausgeglichen ist, so dass davon ausgegangen werden kann, dass ein angenehmes Klangbild erzeugt wird. Die Abweichung liegen hierbei nicht über 3dB.

Des Weiteren wurden im kompletten Publikumsbereich 14 Proben gesetzt, um die Frequenzen miteinander vergleichen zu können (Abbildung 14). Die Probe 1 ist nahe der Bühne, wohingegen die Probe 14 am weitesten entfernt ist. Der Vergleich jeder Probe zeigt, dass diese, wie gewollt, nach hinten einen geringeren Schalldruck vorweisen, allerdings in der Frequenz gleichbleiben und homogen nach hinten sind. Auch die Verstärkung des Subwoofers ab einer Frequenz von 29Hz ist deutlich zu erkennen. Der Übergang von Subwoofer zu Lautsprecher (die beiden schwarzen Kurven) ist gleichmäßig und unterscheidet sich nur um wenige dB. Es ist also zu erwarten, dass die Subwoofer die Lautsprecher homogen erweitern.

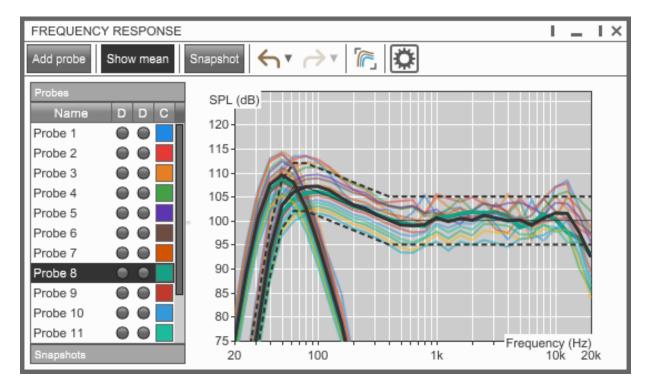


Abbildung 14: Frequenzen von 14 auf der Abstrahlachse gesetzten Proben im Publikumsbereich. Probe 1 ist der Bühne am nächsten. Probe 14 ist der Bühne am entferntesten.

12.7 Diffusfeld

Um das Klangerlebnis zu bewahren, muss das Diffusfeld entsprechend geringgehalten werden und darf den Direktschall nicht erheblich übertönen. Im Anhang in Abbildung 38 ist dies veranschaulicht dargestellt.

Durch das Panflex-System der A15 Lautsprecher wird versucht, den Schall nicht auf schallharte Wände zu bringen, sondern diesen im Publikumsbereich zu behalten. Da das nicht komplett möglich ist, werden im Folgenden die kritischen Punkte einzeln betrachtet. Dafür ist es wichtig zu wissen, dass beim Schall auch das Gesetz der Physik gilt, dass der Einfallswinkel gleich dem Ausfallswinkel entspricht.

Das Publikum kann als großer Absorber gesehen werden. Die Absorptionswerte können hierbei aus der Software EASE abgelesen werden.

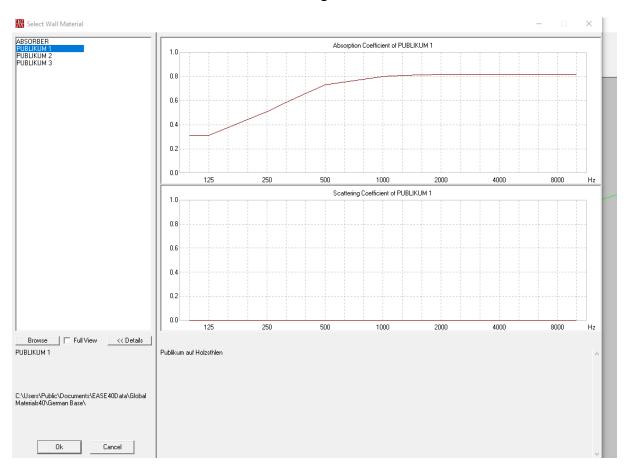


Abbildung 15: Die Absorption eines auf Holzstühlen sitzenden Publikums.

Zwar befinden sich in EASE selbst nur Werte für ein auf Holzstühlen sitzendes Publikum, diese können aber als Vergleichswerte genutzt werden. Das Publikum absorbiert somit oberhalb von 1000 Hz bis zu 80% des Schalls. Dies bedeutet,

dass von der Publikumsfläche selbst keine Reflexionen zu erwarten sind, welche ein störendes Diffusfeld erzeugen könnten.

Ein weiterer kritischer Bereich ist rechts bzw. links neben der Publikumsfläche. Über Proben in Soundvision (im Anhang in Abbildung 39) wird ersichtlich, dass der Schall mit -3dB, was der halben Schalleistung entspricht, auf die Containerwand trifft. Dies kann zu einem störenden Klangerlebnis am Rande des Publikumbereichs führen. Zudem entstehen weitere Reflexionen (in Abbildung 42 im Anhang). Wenn die Reflexionen bei der Bühne ankommen, sind sie stark geschwächt, da es sich bereits um die vierte Reflexion handelt. Eine störende Auswirkung auf die Künstler*innen ist somit nicht zu erwarten. Es sollte trotzdem darüber nachgedacht werden, hier mit Absorbern zu arbeiten. Eine Möglichkeit wäre, die Container mit Molton abzudecken.

Der wohl kritischste Bereich ist die Containerwand hinter dem Publikum. Durch das Setzen von einer Probe in Soundvision in der letzten Reihe und einer auf der Containerwand ist erkennbar, dass der Schall mit ungefähr 3dB weniger an der Containerwand eintrifft (im Anhang in Abbildung 40). Da der Schall von oben auf die Containerwand trifft, wird die erste Reflexion in das Publikum geleitet. (im Anhang in Abbildung 41) Durch den Absorptionsgrad des Publikums von 80% oberhalb von 1 kHz wird der Schall absorbiert. Diese Bereiche stellen somit keinen kritischen Punkt dar.

Auch der Schall hinter der Bühne kann für ein Diffusfeld sorgen. Da nur die Subwoofer eine nach hinten abstrahlende Richtwirkung besitzen, werden diese näher betrachtet. Durch ebenfalls in Soundvision gesetzte Proben wird die Bühne und die Rückwand näher betrachtet (im Anhang in Abbildung 43). An der hinteren Rückwand ist eine Dämpfung von ungefähr 20 dB. Die Rückwand stellt somit ebenfalls keinen kritischen Punkt für die Entstehung des Diffusfeldes dar. Hinzu kommt, dass zwischen der Rückwand und der Bühne im Konzertbetrieb ein Molton aufgehängt ist, wodurch der Schall ebenfalls absorbiert wird.

Es lässt sich aus den oben genannten Punkten schlussfolgern, dass eine Entstehung eines störenden Diffusfeldes für die gewählte Beschallungsanlage unwahrscheinlich ist.

12.8 Maximaler Schalldruck

Die oben ausgeführte Simulation von Soundvision ist mit einem Gain von 0 durchgeführt worden. Um zu erfahren, welcher maximale Schalldruck erreicht werden kann, bietet Soundvision die Möglichkeit an, dies zu simulieren. Hierbei werden alle Faktoren berücksichtigt.

L-Acoustics arbeitet mit einem Headroom von +8dB(U). Das bedeutet, dass ein Lautsprecher über das Mischpult um +8dB(U) verstärkt werden kann, bis er an seine Leistungsgrenze kommt. Allerdings wird dieser Headroom verändert, sobald beispielsweise ein FIR-Filter eingestellt wird. Das hängt damit zusammen, dass der FIR-Filter bestimmte Frequenzen hervorhebt oder senkt, was auf Kosten der Gesamtleistung geschieht.

Wie im Histogramm und der Statistik aus Soundvision (im Anhang in Abbildung 44 und Abbildung 45) zu sehen ist, erreicht das Beschallungssystem bis zu 110.7 dB(A). Der Mittelwert liegt bei 104.7 dB(A). Der maximale Headroom liegt bei 6.4 dB(U) (Abbildung 46 im Anhang). Der maximale Schalldruck im dB(C) bewerteten Bereich liegt bei 114.8 dB(C) (im Anhang in Abbildung 47).

12.9 Leistungsverstärker

Die Leistungsverstärker sind auf der Grundlage des oben ausgewählten Lautsprechersystems ausgelegt.

<u>Hauptbeschallungsanlage</u>

Wie oben schon beschrieben, ist es aufgrund des FIR-Filters nötig, für die Hauptbeschallungsanlage die LA4X oder LA12X zu verwenden. Zudem muss jeder Lautsprecher einen eigenen Kanal belegen, um unabhängig eingestellt zu werden. Da die LA4X vier Ausgänge hat, wird jeweils pro Seite eine LA4X verwendet. Dazu kommt, dass ein LA4X Verstärker kostengünstiger ist.

Subwoofer

Die Subwoofer werden ebenfalls über LA4X betrieben. Um hier die volle Leistung auszunutzen, wird jeder Subwoofer über einen eigenen Kanal betrieben. Hierbei ist es wichtig, bei dem Cardioid Subwoofer das entsprechende Preset einzustellen.

Nahfeld

Die Nahfeld X8 Lautsprecher werden mit einem LA4X betrieben. Hierbei werden die beiden linken X8 gelinkt und die beiden auf der rechten Seite ebenfalls.

12.10 Mischpult

Um die Auslegung für das Mischpult treffen zu können, muss im Vorfeld der Einsatzbereich definiert werden. Da dieser sich auf Rock & Popkonzerte bezieht und diese oftmals mehrere Musikinstrumente und Mikrofone in Benutzung haben, sollten entsprechend viele Eingangssignal verarbeitet werden können. Des Weiteren soll ein Digitalmischpult zum Einsatz kommen, um lange Kabelwege zu vermeiden.

Die Auswahl ist hierbei auf das Yamaha QL5 Tonmischpult gefallen. Dieses besitzt insgesamt 64 Mono und 8 Stereoeingänge. Mit den 2 Layern mit je 32 Fadern kann zudem auch ein größeres Konzert problemlos bedient werden. Es sollte somit allen Anforderungen gerecht werden. Des Weiteren unterstützt das Tonmischpult alle gängigen Übertragungsarten. (vgl. "Yamaha Übersicht QL Serie", o. J.)

12.11 Stagebox / Übertragungsart

Passend zum Tonmischpult bietet Yamaha Stageboxen an. Hier ist die Entscheidung auf die Yamaha Rio3224-D2 Stagebox gefallen. Diese bietet 32 analoge Eingänge zu 16 Ausgängen und 8 digitalen Ausgängen. Damit sollte jedes größere Konzert problemlos bedienbar sein. (vgl. "Yamaha Übersicht QL Serie", o. J.)

Bei der Übertragungsart wird auf AVB gesetzt. Dazu ist eine Fallback-Leitung mit AES/EBU eingerichtet.

12.12 Signallaufplan

Um die Installation vor Ort möglichst einfach zu gestalten, ist im Anhang in Abbildung 49 ein Signallaufplan zu finden.

Fazit 52

13 Fazit

Durch die im Vorfeld geschaffenen Grundlagen und die folgende Bedarfsanalyse konnte ein Überblick gewonnen werden, welche Möglichkeiten bei der Auslegung des Beschallungssystems existieren, sowie auf welche Aspekte besonders geachtet werden muss. Hierbei hat die Messung der Nachhallzeit verdeutlicht, dass es vor allem im tieffrequenten Bereich zu Komplikationen kommen kann, und dass ein Diffusfeld des Schalls möglichst geringgehalten werden muss. Anhand der Produkte der Firma L-Acoustics konnte ein entsprechendes Beschallungssystem in der Software Soundvision entworfen und simuliert werden. Durch die Möglichkeiten der Simulation konnten alle Aspekte berücksichtig werden, so dass ein den Ansprüchen der Bedarfsanalyse entsprechendes Beschallungssystem entworfen wurde. Es kann davon ausgegangen werden, dass aufgrund der homogenen SPL und Frequenzverteilung ein gutes Klangbild im S&K Studio erzeugt wird. Des Weiteren sind die Anforderungen des maximalen Schalldrucks, welche im Vorfeld in der Bedarfsanalyse an das Beschallungssystem gestellt wurden, erreicht.

Es ist bei der Auslegung der Beschallungsanlage darauf geachtet worden, dass diese unter den in der Bedarfsanalyse erwähnten Betonträgern positioniert sind. Eine Aufhängung mit entsprechenden Anschlagmitteln ist an diesen möglich. Auch das Gewicht der Beschallungsanlage ist zulässig.

Im Rahmen dieser Arbeit konnten in der Simulation nicht alle Aspekte berücksichtigt werden, so dass es unumgänglich ist, das Beschallungssystem nach der Installation gründlich einzurichten und die einzelnen Aspekte nochmals unter Realbedingungen zu überprüfen und gegebenenfalls zu verbessern.

Schlussendlich kann festgehalten werden, dass das in dieser Arbeit vorgestellte Konzept eines Beschallungssystem für das S&K Studio für Rock- und Popkonzerte geeignete und umsetzungsfähig ist.

14 Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1: Vergleich zwischen kugelförmiger und zylinderförmiger
Schallausbreitung. (Friesecke, 2014, S. 494)
Abbildung 2: Die Reflexionen im Raum nach der Zeit. (Dickreiter et al., 2014, S.
30)4
Abbildung 3: Die Abbildung zeigt eine symbolisierte Informationsmenge, welche
durch einen Gauß'schen Übertragungskanal geschickt wird. (Görne, 2015, S. 186)
Abbildung 4: Umwandlung eines kontinuierlichen Signals mittels Abtastfunktion in
ein zeitdiskretes Signal. (Dickreiter et al., 2014, S. 664) 20
Abbildung 5: Frontalbeschallung mit Lautsprecher an der Bühnenkante. (Dickreiter
et al., 2014, S. 575)
Abbildung 6: Frontalbeschallung mit einer höheren und angewinkelten
Lautsprecherposition. (Dickreiter et al., 2014, S. 576)
Abbildung 7: Grundriss des S&K Studios. Eingezeichnet sind die jeweiligen Maße
und die eingrenzenden Gaze ringsum, sowie die Schiffscontainer, in welchen die
Toiletten, sowie Garderoben untergebracht sind
Abbildung 8: Abstrahlung der Hauptbeschallungsanlage vertikal betrachtet in
Soundvision
Abbildung 9: Horizontale Abstrahlung des linken Arrays der
Hauptbeschallungsanlage. In Rot eingezeichnet die Hauptstrahlachse. Die
Hauptrahlachse trifft mittig auf der Rückwand auf41
Abbildung 10: Die SPL-Verteilung der Hauptbeschallungsanlage in Full Range A
betrachtet im Frequenzbereich von 1 kHz bis 10 kHz. Die Abstufung beginnt bei
103 dB(A) in Rot und geht in dreier Schritten abwährts
Abbildung 11: Abstrahlung beider Nahfeld-Lautsprecher 44
Abbildung 12: Beschallung der Subwoofer in der außen geflogenen Variante 45
Abbildung 13: Beschallung der Subwoofer mittig geflogen 46
Abbildung 14: Frequenzen von 14 auf der Abstrahlachse gesetzten Proben im
Publikumsbereich. Probe 1 ist der Bühne am nächsten. Probe 14 ist der Bühne am
entferntesten
Abbildung 15: Die Absorption eines auf Holzstühlen sitzenden Publikums 48
Abbildung 16: Schnittbild durch einen Konuslautsprecher mit
Ferritmagnet.Eingezeichnet sind die Lorentz Kräfte und daraus resultierende
Antriebskraft F. (Weinzierl, 2008, S. 424)ix

Abbildung 17: Links ein Kugelförmiges Abstrahlverhalten. Rechts ein durch ein
Horn gerichtetes Abstrahlverhalten. (Friesecke, 2014, S. 490)ix
Abbildung 18: Das Übertragungsprinzip von Informationen nach Claude Shannon.
x
Abbildung 19: Der Aufbau der Messung eingezeichnet im Grundriss des S&K
Studios
Abbildung 20: Die kritischen Anwohner mit einer ungefähren Entfernungsangabe.
Die Bühne ist in schwarz eingezeichnet. Die schwarzen Pfeile markieren die
Richtung des Schalldrucks. ("Ausschnitt S&K Studio", o. J.)xi
Abbildung 21: Einstellung des Messvorgangs in der Software REWxii
Abbildung 22: Die Nachhallzeit des S&K Studios in der Software REWxii
Abbildung 23: Das Spektogramm der Messung im S&K Studio in der Software REW.
xiii
Abbildung 24: Das in SketchUp auf dem Grundriss erstellte Model des S&K Studios.
xiii
Abbildung 25: SPL-Verteilung ohne den Einsatz des FIR-Filters. Die dunkelblaue
Linie kennzeichnet die SPL-Verteilung im Bereich 63 – 250 Hz. Die hellblaue Linie
im Bereich 1 kHz – 10 kHz xvii
Abbildung 26: Frequenzverteilung im Publikumsbereich ohne dem Einsatz des FIR-
Filtersxviii
Abbildung 27: SPL-Verteilung mit dem Einsatz des FIR-Filters. Die dunkelblaue
Linie kennzeichnet die SPL-Verteilung im Bereich 63 – 250 Hz. Die hellblaue Linie
im Bereich 1 kHz – 10 kHzxviii
Abbildung 28: Frequenzbereich im Publikumsbereich mit dem Einsatz des FIR-
Filtersxix
Abbildung 29: Die Änderung des FIR für jeden Lautsprecherxix
Abbildung 30: Die Statistik des Publikumsbereichs des Frequenzbereiches 1 kHz -
10 kHz ohne Nahfeld-Lautsprecherxx
Abbildung 31: Histogramm für den Publikumsbereich im Frequenzbereich 1 kHz –
10 kHz im dB(A) bewerteten Bereich ohne Nahfeld-Lautsprecherxx
Abbildung 32: Gesamtbeschallung mit reduziertem Gain bei den Nahfeld-
Lautsprechern im Frequenzbereich 1 kHz – 10 kHz in dB (A) bewertet. Rot stellt
105 dB(A) dar und ist farblich in 3dB(A) Schritten dargestellt xxi
Abbildung 33: Die Statistik des Publikumsbereichs des Frequenzbereiches 1 kHz -
10 kHz mit Nahfeld-Lautsprecher xxi

Abbildung 34: Histogramm für den Publikumsbereich im Frequenzbereich 1 kHz –
10 kHz im dB(A) bewerteten Bereich mit Nahfeld-Lautsprecher xxii
Abbildung 35: Kammfiltereffekt der Variante 1 der Subwoofer Anordnung xxii
Abbildung 36: Die im Publikumsbereich gesetzten Proben aus Abbildung 35 und
Abbildung 37. Die Probe eins ist der Bühne am nächsten. Die Probe 6 am
entferntestenxxiii
Abbildung 37: Frequenzverteilung mit den gesetzten Proben aus Abbildung 36 für
die Variante 2 der Subwoofer Anordnungxxiii
Abbildung 38: Der Einfluss des Diffusfeldes auf das Klangerlebnis xxiv
Abbildung 39: Vergleich des Schalldrucks am seitlichen Container mit dem
Publikumsbereich xxiv
Abbildung 40: Vergleich des Schalldrucks am hinteren Container mit dem
Publikumsbereich xxv
Abbildung 41: Der einfallende Schall auf den hinteren Container mit der ersten
Reflexion in Rot eingezeichnet xxv
Abbildung 42: Die ersten vier Reflexionen horizontal betrachtet xxvi
Abbildung 43: Vergleich des Schalldrucks an der Rückwand mit dem
Publikumsbereich xxvi
Abbildung 44: Histogramm des maximalen Schalldrucks in dB(A) bewertetxxvii
Abbildung 45: Die Statistik für den maximalen Schalldruck im dB(A) bewerteten
Bereichxxvii
Abbildung 46: Die Darstellung des maximal einstellbaren Pegelsxxvii
Abbildung 47: Die Statistik für den maxmialen Schalldruck im dB(C) bewerteten
Bereichxxviii
Abbildung 48: Vergleich zwischen einer Zylinderwelle von Punktlautsprechern und
einer kohärenten Wellenfront mithilfe von Wellenformer. (Friesecke, 2014, S. 492)
xxviii

<u>Tabellenverzeichnis</u> vi

15 Tabellenverzeichnis

Tabelle 1: Auflistung der Messinstrumente	34
Tabelle 2: X Serie von L-Acoustics. (vgl. L-Acoustics, o. J.)	xiv
Tabelle 3: P Series von L-Acoustics. (vgl. L-Acoustics, o. J.)	xiv
Tabelle 4: S Series von L-Acoustics. (vgl. L-Acoustics, o. J.)	xv
Tabelle 5: A Series von L-Acoustics. (vgl. L-Acoustics, o. J.)	xv
Tabelle 6: K Series von L-Acoustics. (vgl. L-Acoustics, o. J.)	xv
Tabelle 7: Die Subwoofer von L-Acoustics. (vgl. L-Acoustics, o. J.)	xv
Tabelle 8: Die Leistungsverstärker von L-Acoustics. (vgl. L-Acoustics. o. J.).	xvi

16 Quellen- und Literaturverzeichnis

Adelman-Larsen, N. W. (2014). *Rock and pop venues: accoustic and architectural design*. Heidelberg: Springer.

Ausschnitt S&K Studio. (o. J.). *OpenStreetMap*. Zugriff am 28.12.2022. Verfügbar unter:

https://www.openstreetmap.de/karte/?zoom=19&lat=52.50573&lon=13.4361&layers=B00TT

Beranek, L. L. (2010). *Concert Halls and opera houses: music, acoustics, and architecture* (2., nd ed., softcover version of orig. hardcover ed. 2004.). New York, NY: Springer.

Dickreiter, M., Dittel, V., Hoeg, W. & Wöhr, M. (2014). *Handbuch der tonstudiotechnik* (De Gruyter Saur reference) (8., überarbeitete und erweiterte Auflage.). Berlin: De Gruyter Saur.

Friedrich, H. J. (2008). *Tontechnik für Mediengestalter: Töne hören - Technik verstehen - Medien gestalten* (X.media.press). Berlin Heidelberg: Springer.

Friesecke, A. (2014). *Die Audio-Enzyklopädie: ein Nachschlagewerk für Tontechniker* (Reference) (2. Auflage.). Berlin: De Gruyter Saur.

Görne, T. (2015). *Tontechnik: Hören, Schallwandler, Impulsantwort und Faltung, digitale Signale, Mehrkanaltechnik, tontechnische Praxis; mit 33 Tabellen* (4., aktualisierte Aufl.). München: Hanser.

Grzesinski, C. & Smyrek, V. (2020). *Tontechnik: für Veranstaltungstechniker in Ausbildung und Praxis: mit 706 Abbildungen, 71 Tabellen und 152 Übungsaufgaben* (4., völlig neu bearbeitete Auflage.). Stuttgart: Hirzel Verlag.

L-Acoustics (Hrsg.). (2022, Juli 27). A15 owner's manual (EN) version 3.1. Zugriff am 19.12.2022. Verfügbar unter: https://www.l-acoustics.com/documentation/LOUDSPEAKERS/A15%20Focus/EN/Owner's%20M anual/A15_OM_EN.pdf

L-Acoustics. (o. J.). L-Acoustics Lautsprecher. Zugriff am 19.12.2022a. Verfügbar unter: https://www.l-acoustics.com/loudspeakers/x-series/

L-Acoustics. (o. J.). L-Acoustics Electronics. Zugriff am 19.12.2022b. Verfügbar unter: https://www.l-acoustics.com/electronics/

Mike Rauchfleisch. (2017, Oktober 1). Subwoofer-Anordnung: Der Bass, das Rudeltier. *Production Partner*. Zugriff am 28.12.2022. Verfügbar unter: https://www.production-partner.de/basics/subwoofer-anordnung-der-bass-das-rudeltier/

Pieper, F. (2015). *Das P.A. Handbuch: praktische Einführung in die professionelle Beschallungstechnik* (Factfinder-Serie) (5., überarbeitete Auflage.). München: GC Carstensen.

Rossing, T. D. (Hrsg.). (2007). *Springer handbook of acoustics*. New York, N.Y: Springer.

Weinzierl, S. (Hrsg.). (2008). *Handbuch der Audiotechnik* (Ausgabe in 2 Bänden.). Berlin Heidelberg: Springer.

Yamaha Übersicht QL Serie. (o. J.). . Zugriff am 19.12.2022. Verfügbar unter: https://de.yamaha.com/de/products/proaudio/mixers/ql_series/index.html

<u>Anhang</u> ix

17 Anhang

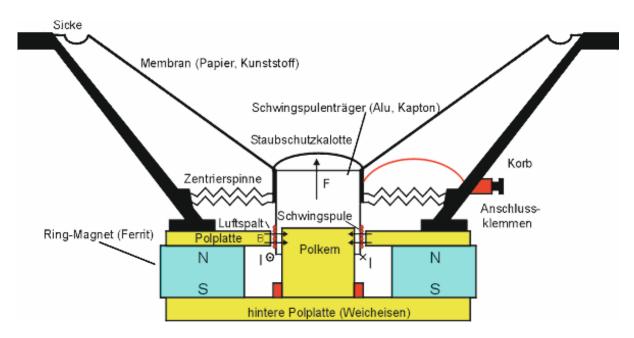


Abbildung 16: Schnittbild durch einen Konuslautsprecher mit Ferritmagnet. Eingezeichnet sind die Lorentz Kräfte und daraus resultierende Antriebskraft F. (Weinzierl, 2008, S. 424)

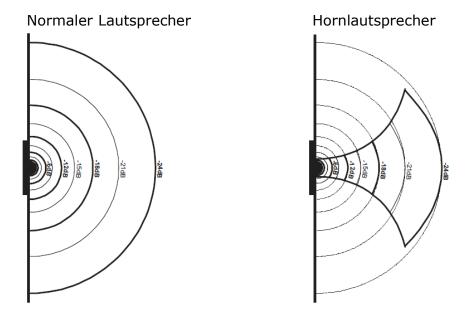


Abbildung 17: Links ein Kugelförmiges Abstrahlverhalten. Rechts ein durch ein Horn gerichtetes Abstrahlverhalten. (Friesecke, 2014, S. 490)

<u>Anhang</u> <u>x</u>

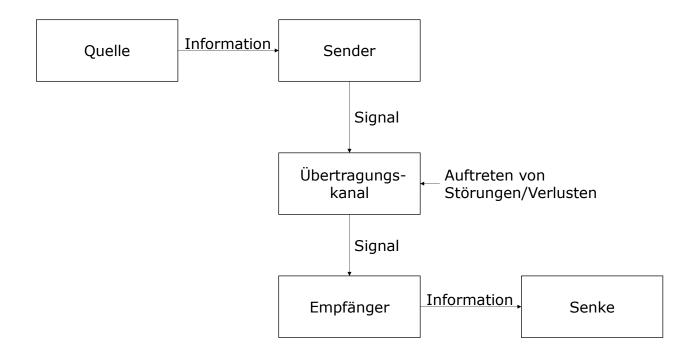


Abbildung 18: Das Übertragungsprinzip von Informationen nach Claude Shannon.

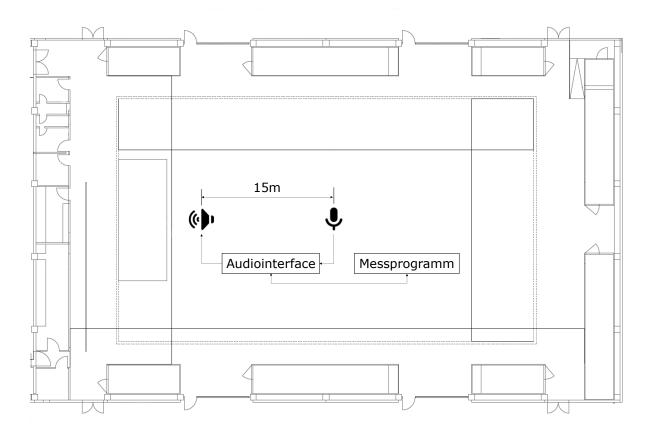


Abbildung 19: Der Aufbau der Messung eingezeichnet im Grundriss des S&K Studios.

<u>Anhang</u> <u>xi</u>



Abbildung 20: Die kritischen Anwohner mit einer ungefähren Entfernungsangabe. Die Bühne ist in schwarz eingezeichnet. Die schwarzen Pfeile markieren die Richtung des Schalldrucks. ("Ausschnitt S&K Studio", o. J.)

<u>Anhang</u> <u>xii</u>

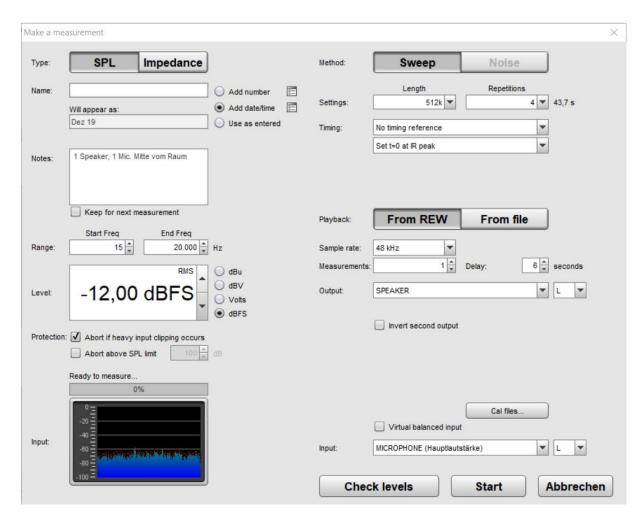


Abbildung 21: Einstellung des Messvorgangs in der Software REW.

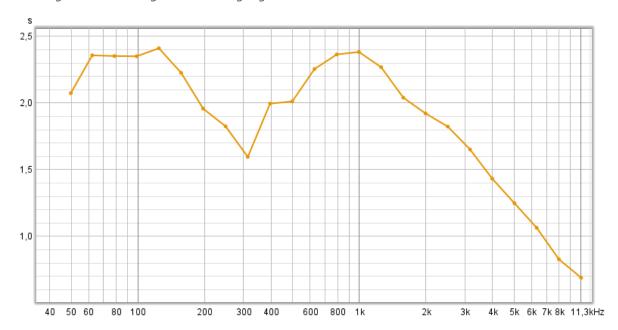


Abbildung 22: Die Nachhallzeit des S&K Studios in der Software REW.

<u>Anhang</u> <u>xiii</u>

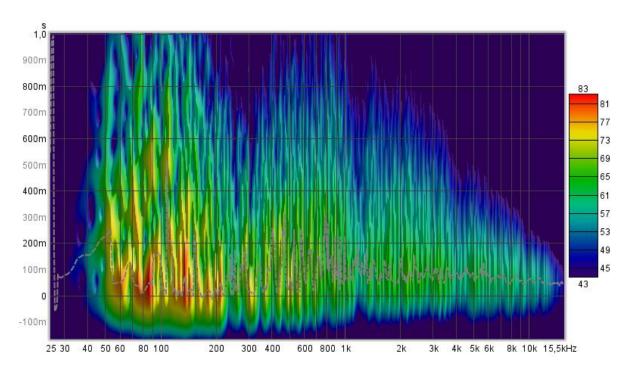


Abbildung 23: Das Spektogramm der Messung im S&K Studio in der Software REW.

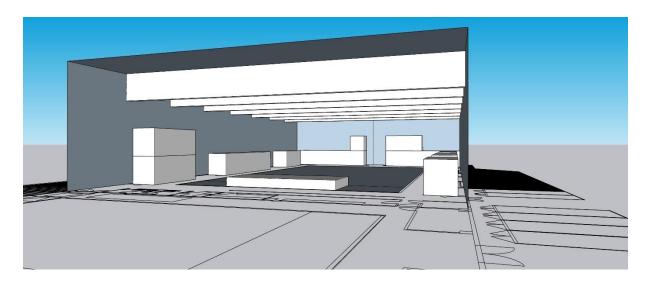


Abbildung 24: Das in SketchUp auf dem Grundriss erstellte Model des S&K Studios.

Name	Max SPL	Bandbreite	Richtwirkung	Art
X4i (Festinstallation)	116 dB	120 Hz – 20 kHz	H: 110° V: 110°	4" passiv
5XT	121 dB	95 Hz – 20 kHz	H: 110°	5" passiv

<u>Anhang</u> <u>xiv</u>

			V: 110°	
X8	129 dB	60 Hz – 20 kHz	H: 100°	8" passiv
			V: 100°	
X12	136 dB	59 Hz – 20 kHz	H: 90°	12" passiv
			V: 60°	
X15 HiQ	138 dB	55 Hz – 20 kHz	H: 60°	15" aktiv
			V: 40°	

Tabelle 2: X Serie von L-Acoustics. (vgl. L-Acoustics, o. J.)

Name	Max SPL	Bandbreite	Richtwirkung	Art
108P	127 dB	55 Hz – 20 kHz	H: 100° V: 100°	8" aktiv
112P	133 dB	50 Hz – 20 kHz	H: 90° V: 90°	12" aktiv
SB15P	133 dB	Niedrigste Frequenz: 40 Hz	Standard	15" Bassreflexbox

Tabelle 3: P Series von L-Acoustics. (vgl. L-Acoustics, o. J.)

<u>Anhang</u> xv

Name	Max SPL	Bandbreite	Richtwirkung	Art
Soka	133 dB	60 Hz – 20 kHz	H: 140° V: +5°/-21°	3,5" passiv
Syva	137 dB	87 Hz – 20 kHz	H: 140° V: +5/-21°	5" passiv
Syva Low	137 dB	Niedrigste Frequenz: 40 Hz	Standard	2x 12" Bassreflexbox
Syva Sub	128 dB	Niedrigste Frequenz: 27 Hz	Standard	12" Bassreflexbox

Tabelle 4: S Series von L-Acoustics. (vgl. L-Acoustics, o. J.)

Name	Max SPL	Bandbreite	Richtwirkung	Art
A10 Focus	140 dB	66 Hz – 20 kHz	H: 70°/90°/110° V: 10°	10" passiv
A10 Wide	137 dB	67 Hz – 20 kHz	H: 70°/90°/110° V: 30°	10" passiv
A15 Focus	144 dB	41 Hz – 20 kHz	H: 70°/90°/110° V: 10°	15" passiv
A15 Wide	141 dB	42 Hz – 20 kHz	H: 70°/90°/110° V: 30°	15" passiv

Tabelle 5: A Series von L-Acoustics. (vgl. L-Acoustics, o. J.)

<u>Anhang</u> <u>xvi</u>

Name	Max SPL	Bandbreite	Richtwirkung	Art
KIVA II	138 dB	70 Hz – 20 kHz	H: 100° V: 15°	2x 6,5" passiv
KARA II	142 dB	55 Hz – 20 kHz	H: 70°/90°/110° V: 10°	2x 8" passiv
КЗ	143 dB	42 Hz – 20 kHz	H: 70°/90°/110° V: 10°	2x 12" aktiv
К2	147 dB	35 Hz – 20 kHz	H: 70°/90°/110° V: 10°	2x 12"
K1	149 dB	35 Hz – 20 kHz	H: 90° V: 5°	2x 15"
K1-SB	145 dB	30 Hz	Standard	2x 15" Bassreflexbox

Tabelle 6: K Series von L-Acoustics. (vgl. L-Acoustics, o. J.)

Name	Max SPL	Tiefste Frequenz	Richtwirkung	Art
SB6i	117 dB	29 Hz	Standard	6,5"
SB10i	124 dB	25 Hz	Standard	10"
SB15m	137 dB	40 Hz	Standard or cardioid	15"
SB18	138 dB	32 Hz	Standard or cardioid	18"
KS21	138 dB	29 Hz	Standard or cardioid	21"
KS28	143 dB	25 Hz	Standard or cardioid	2X 18"

Tabelle 7: Die Subwoofer von L-Acoustics. (vgl. L-Acoustics, o. J.)

<u>Anhang</u> <u>xvii</u>

Name	Achitkektur	Ausgangsleistung	Eingänge
LA7.16i	16 x 16	16 x 1300 W bei 8 Ω	AVB, AES, Analog
(festinstallation)			
LA2Xi	4 x 4	4 x 640 W bei 8 Ω	AVB, AES, Analog
(festinstallation)			
LA4X	4 x 4	$4 \times 1000 \text{ W bei } 4 \Omega \text{ und}$	AVB, AES, Analog
		8 Ω	
LA12X	4 x 4	4 x 3300 W bei 2.7 Ω	AVB, AES, Analog

Tabelle 8: Die Leistungsverstärker von L-Acoustics. (vgl. L-Acoustics, o. J.)

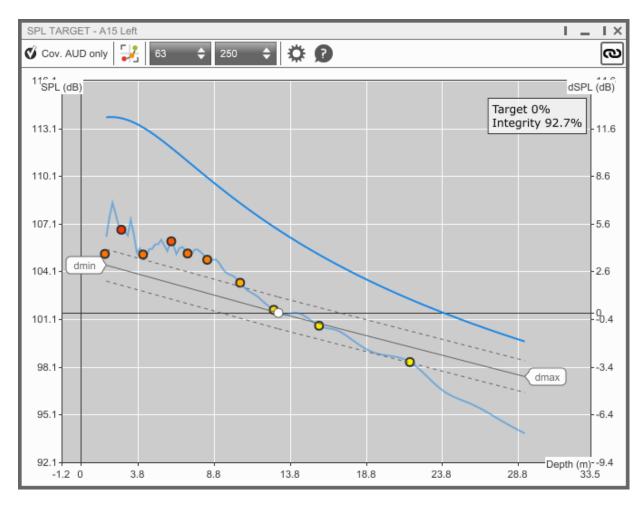


Abbildung 25: SPL-Verteilung ohne den Einsatz des FIR-Filters. Die dunkelblaue Linie kennzeichnet die SPL-Verteilung im Bereich 63 – 250 Hz. Die hellblaue Linie im Bereich 1 kHz – 10 kHz.

<u>Anhang</u> <u>xviii</u>

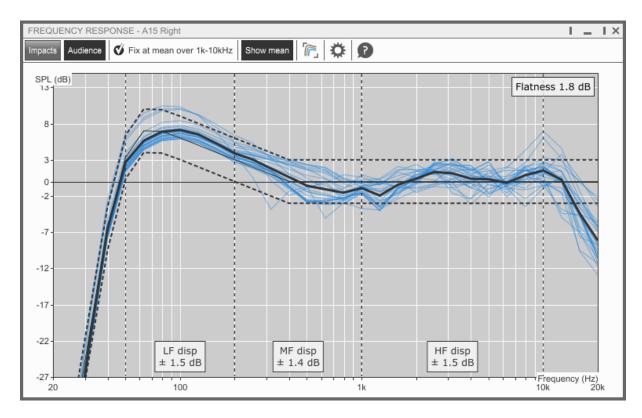


Abbildung 26: Frequenzverteilung im Publikumsbereich ohne dem Einsatz des FIR-Filters.

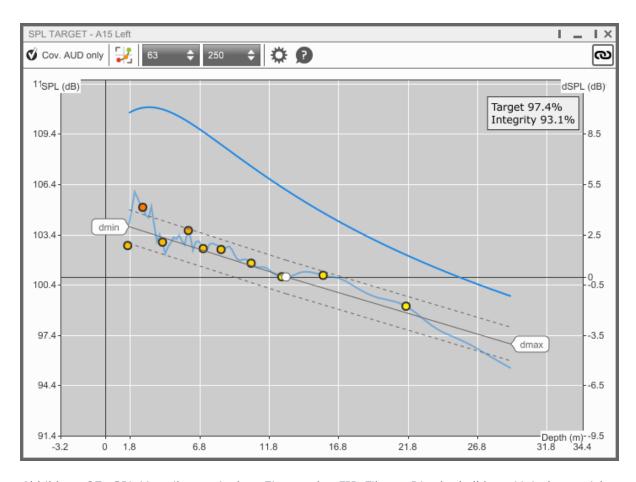


Abbildung 27: SPL-Verteilung mit dem Einsatz des FIR-Filters. Die dunkelblaue Linie kennzeichnet die SPL-Verteilung im Bereich 63 – 250 Hz. Die hellblaue Linie im Bereich 1 kHz – 10 kHz.

<u>Anhang</u> <u>xix</u>

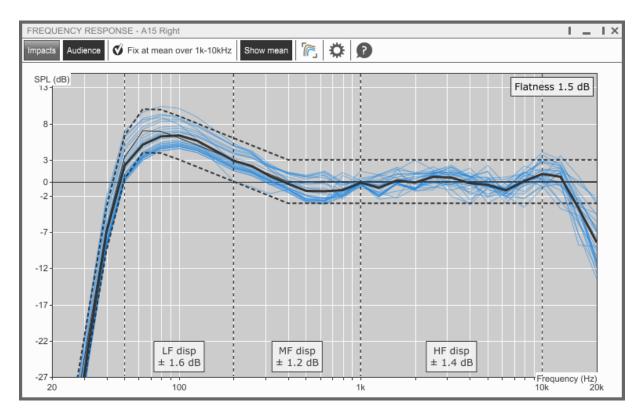


Abbildung 28: Frequenzbereich im Publikumsbereich mit dem Einsatz des FIR-Filters.

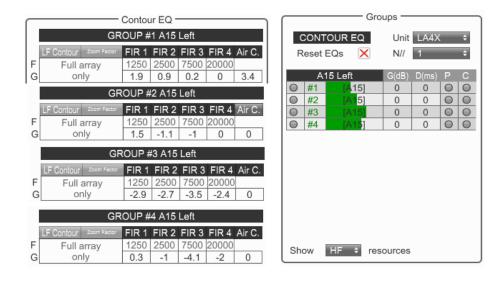


Abbildung 29: Die Änderung durch den FIR-Filter für jeden Lautsprecher.

<u>Anhang</u> xx

SPL mean: 98.1 dB(A)

SPL min: 89.6 dB(A)

SPL max: 103 dB(A)

Distribution: 7.8 dB(A)

Abbildung 30: Die Statistik des Publikumsbereichs des Frequenzbereiches 1 kHz - 10 kHz ohne Nahfeld-Lautsprecher.

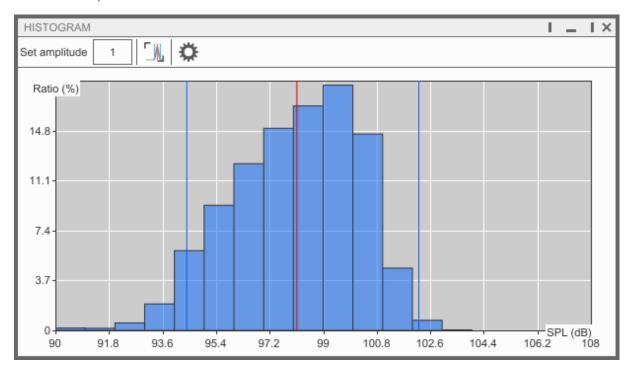


Abbildung 31: Histogramm für den Publikumsbereich im Frequenzbereich 1 kHz – 10 kHz im dB(A) bewerteten Bereich ohne Nahfeld-Lautsprecher.

<u>Anhang</u> <u>xxi</u>

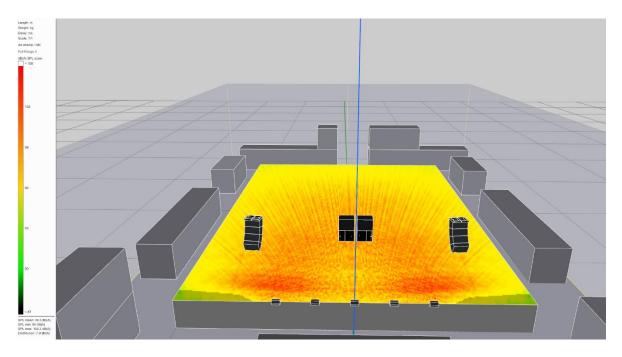


Abbildung 32: Gesamtbeschallung mit reduziertem Gain bei den Nahfeld-Lautsprechern im Frequenzbereich 1 kHz – 10 kHz in dB (A) bewertet. Rot stellt 105 dB(A) dar und ist farblich in 3dB(A) Schritten dargestellt.

SPL mean: 98.3 dB(A)

SPL min: 90 dB(A)

SPL max: 104.2 dB(A)

Distribution: 7.9 dB(A)

Abbildung 33: Die Statistik des Publikumsbereichs des Frequenzbereiches 1 kHz - 10 kHz mit Nahfeld-Lautsprecher.

<u>Anhang</u> <u>xxii</u>

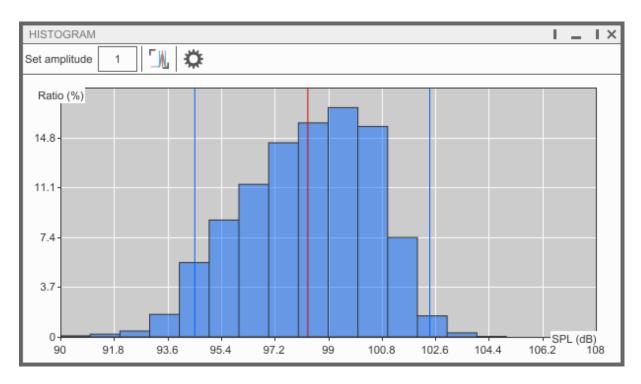


Abbildung 34: Histogramm für den Publikumsbereich im Frequenzbereich 1 kHz – 10 kHz im dB(A) bewerteten Bereich mit Nahfeld-Lautsprecher.

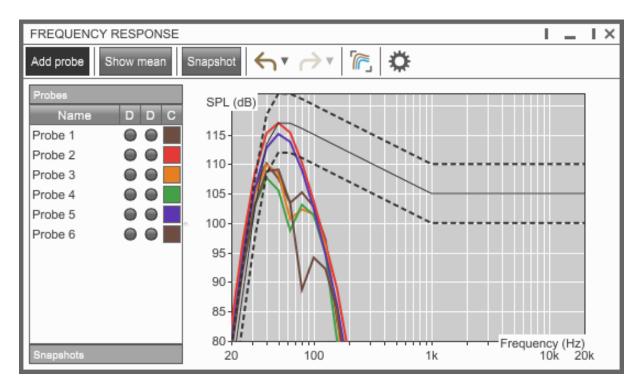


Abbildung 35: Kammfiltereffekt der Variante 1 der Subwoofer Anordnung.

<u>Anhang</u> <u>xxiii</u>

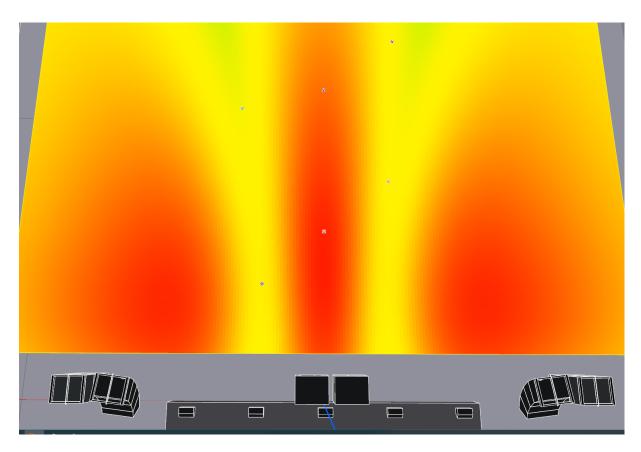


Abbildung 36: Die im Publikumsbereich gesetzten Proben aus Abbildung 35 und Abbildung 37. Die Probe eins ist der Bühne am nächsten. Die Probe 6 am entferntesten.

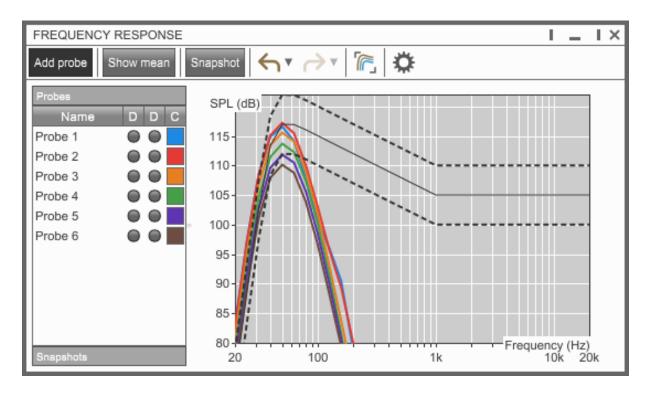


Abbildung 37: Frequenzverteilung mit den gesetzten Proben aus Abbildung 36 für die Variante 2 der Subwoofer Anordnung.

<u>Anhang</u> xxiv

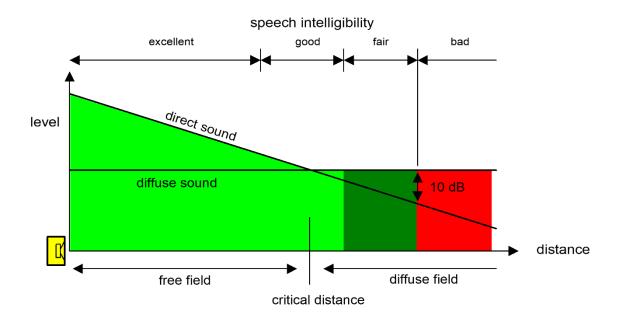


Abbildung 38: Der Einfluss des Diffusfeldes auf das Klangerlebnis.

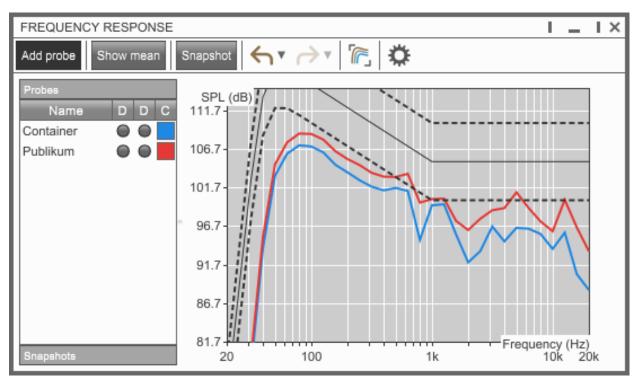


Abbildung 39: Vergleich des Schalldrucks am seitlichen Container mit dem Publikumsbereich.

<u>Anhang</u> xxv

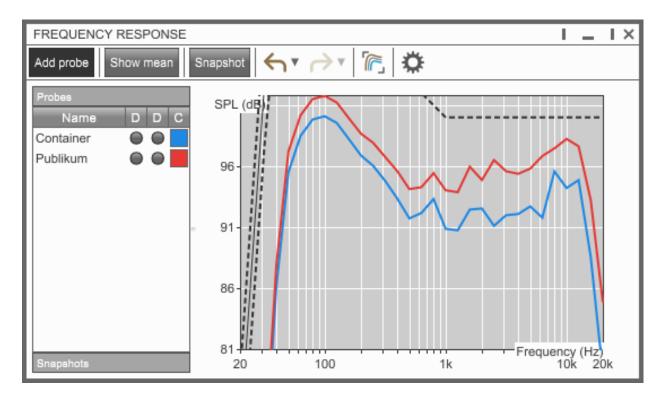


Abbildung 40: Vergleich des Schalldrucks am hinteren Container mit dem Publikumsbereich.

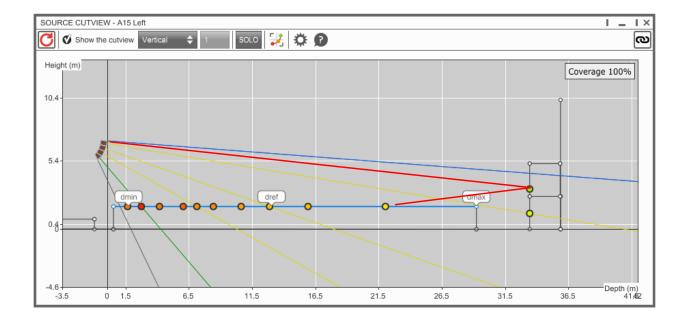


Abbildung 41: Der einfallende Schall auf den hinteren Container mit der ersten Reflexion in Rot eingezeichnet.

<u>Anhang</u> xxvi

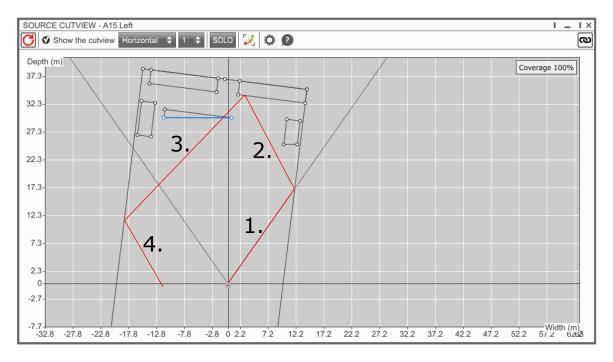


Abbildung 42: Die ersten vier Reflexionen horizontal betrachtet.

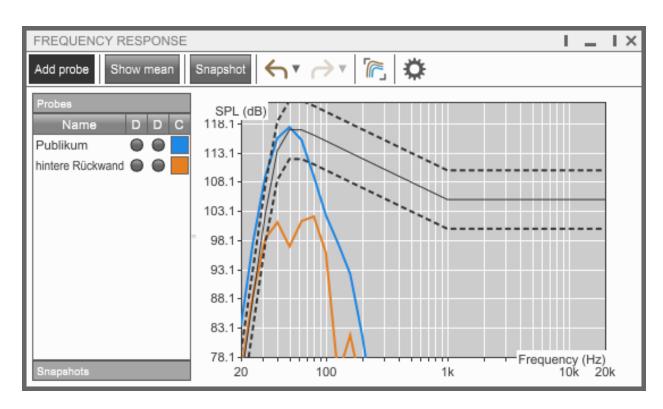


Abbildung 43: Vergleich des Schalldrucks an der Rückwand mit dem Publikumsbereich.

<u>Anhang</u> xxvii

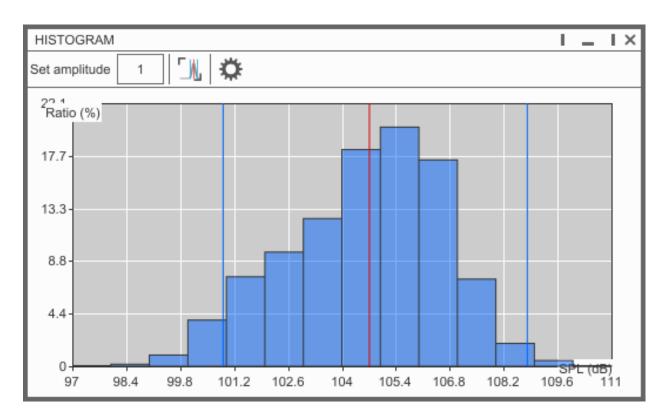


Abbildung 44: Histogramm des maximalen Schalldrucks in dB(A) bewertet.

SPL mean: 104.7 dB(A) SPL min: 97.5 dB(A) SPL max: 110.7 dB(A) Distribution: 7.9 dB(A)

Abbildung 45: Die Statistik für den maximalen Schalldruck im dB(A) bewerteten Bereich.

LOUDSPEAKER DATA I _ I ×							
☐ ☐ ▼ ☐ ▼ ☐ ▼ ☐ SOLO ② Warning: 0 / Overload: 0							
Console output level 6.4 dBu ÷							
	Name	Amplifier Latency (ms)	Delay (ms)	Σ delay (ms)	Gain (dB)	Σ gain (dB)	s м
	All		0	0	0	6.4	
	PA		0	0	0	6.4	00
•	A15 Left	6.5	0	6.5	0	6.4	0 0
•	A15 Right	6.5	0	6.5	0	6.4	0 0
	Frontfill		0	0	-9	-2.6	0 0
	X8 1	3.84	0	3.84	0	-2.6	0 0
	X8 1 Center Left	3.84	0	3.84	0	-2.6	0 0
	X8 1 Left	3.84	0	3.84	0	-2.6	00
	X8 1 Center Right	3.84	0	3.84	0	-2.6	0 0
	X8 1 Right	3.84	0	3.84	0	-2.6	
	Subwoofer v2		0	0	0	6.4	
	KS21 Left	3.84	0	3.84	0	6.4	
1	KS21 Right	3.84	0	3.84	0	6.4	
New source New group System Config							

Abbildung 46: Die Darstellung des maximal einstellbaren Pegels.

<u>Anhang</u> xxviii

SPL mean: 108.9 dB(C) SPL min: 102.6 dB(C) SPL max: 114.8 dB(C) Distribution: 9.3 dB(C)

Abbildung 47: Die Statistik für den maximalen Schalldruck im dB(C) bewerteten Bereich.

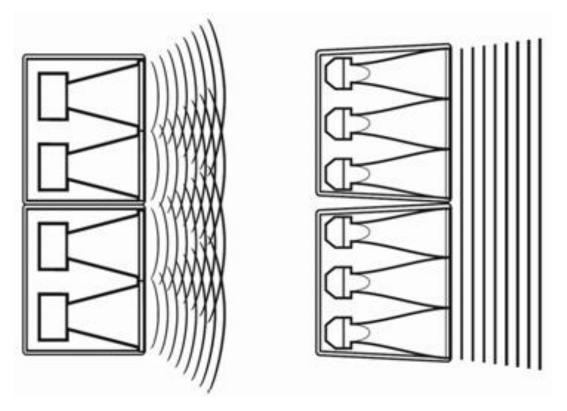


Abbildung 48: Vergleich zwischen einer Zylinderwelle von Punktlautsprechern und einer kohärenten Wellenfront mithilfe von Wellenformer. (Friesecke, 2014, S. 492)

<u>Anhang</u> xxix

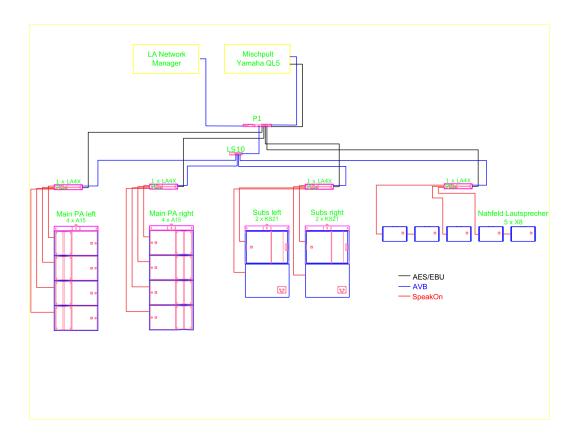


Abbildung 49: Signallaufplan des Beschallungsystems.