



BACHELORARBEIT

Herr
Jonas Rein

**Theorie der Hörereignisbildung
bezüglich des Aufbaus von Be-
schallungssystemen zur Erzeu-
gung virtueller Schallquellen**

2019

BACHELORARBEIT

**Theorie der Hörereignisbildung
bezüglich des Aufbaus von Be-
schallungssystemen zur Erzeu-
gung virtueller Schallquellen**

Autor:
Herr Jonas Rein

Studiengang:
Media and Acoustical Engineering

Seminargruppe:
MG15wA-B

Erstprüfer:
Prof. Dr.-Ing. Michael Hösel

Zweitprüfer:
Tim Helbig

Einreichung:
Mittweida, 07.02.2019

BACHELOR THESIS

**Theory of auditory event
formation regarding the setup
of public address systems for
the generation of virtual
sound sources**

author:
Mr. Jonas Rein

course of studies:
Media and Acoustical Engineering

seminar group:
MG15wA-B

first examiner:
Prof. Dr.-Ing. Michael Hösel

second examiner:
Tim Helbig

submission:
Mittweida, 07.02.2019

Bibliografische Angaben:

Rein, Jonas

Theorie der Hörereignisbildung bezüglich des Aufbaus von Beschallungssystemen zur Erzeugung virtueller Schallquellen

Theory of auditory event formation regarding the setup of public address systems for the generation of virtual sound sources

2018 - 71 Seiten

Mittweida, Hochschule Mittweida (FH), University of Applied Sciences,
Fakultät Medien, Bachelorarbeit, 2019

Abstract

Diese Arbeit beschäftigt sich mit der zentralen Frage: Wie erzeugt man eine virtuelle Schallquelle über ein Beschallungssystem um ein Hörereignis hervorzurufen, das dem einer natürlichen Quelle an diesem Ort möglichst weitgehend entspricht?

Um der Lösung dieser Frage näher zu kommen, werden Erkenntnisse aus der Psychoakustik auf den Aufbau von Beschallungssystemen bezogen. Der aktuelle Stand der Entwicklung in dieser Richtung wird dargestellt und die Lösungsansätze von Produkten auf dem Markt verglichen.

Inhaltsverzeichnis

Abstract.....	IV
Abkürzungsverzeichnis.....	VII
Abbildungsverzeichnis.....	X
Tabellenverzeichnis.....	XI
1 Einleitung.....	1
2 Psychoakustische Grundlagen.....	2
2.1 Räumliches Hören.....	2
2.1.1 Theorien zur Bildung von Hörereignissen.....	3
2.1.1.1 Summenlokalisierung.....	4
2.1.1.2 Assoziationsmodell.....	4
2.1.2 Richtungshören in der Horizontalebene.....	5
2.1.2.1 Interaurale Laufzeitunterschiede.....	5
2.1.2.2 Interaurale Pegeldifferenzen.....	6
2.1.2.3 Zusammenwirken interauraler Pegel- und Zeitdifferenzen.....	7
2.1.3 Richtungshören in der Medianebene.....	7
2.1.4 Entfernungshören.....	8
2.2 Zeitverhalten des Gehörs bei mehreren Schallquellen.....	10
2.2.1 Summenlokalisierung.....	11
2.2.2 Haas-Effekt.....	11
2.2.2.1 Maskierung von Echostörungen.....	13
2.3 Wahrnehmbarkeit von Verzerrungen.....	14
2.3.1 Lineare Verzerrungen.....	15
2.3.2 Kammfilter-Effekt.....	15
2.3.2.1 Theoretische Grundlage.....	16
2.3.2.2 Auswirkungen des Kammfilter-Effektes.....	17
2.3.2.3 Konsequenzen in der Beschallungsplanung.....	20
2.3.3 Doppler-Effekt.....	21
3 Umsetzung der Lokalisierung virtueller Schallquellen in der Beschallungs- technik.....	25
3.1 Einleitung in die Beschallungstechnik.....	25
3.2 Grundlagen.....	26
3.2.1 Wirkung der Lokalisierbarkeit von Schallquellen in der Veranstaltung- technik.....	26

3.2.2	Formen der Audiowiedergabe.....	27
3.3	Einkanalige Verzögerungsverfahren.....	27
3.4	Mehrkanalige Intensitätsverfahren.....	29
3.5	Mehrkanalige Verfahren mit Verzögerungssystemen.....	29
3.5.1	Aufbau.....	30
3.5.1.1	Ort und Ausdehnung der virtuellen Schallquelle.....	31
3.5.1.2	Klanggestaltung.....	33
3.5.2	Bewegung von virtuellen Schallquellen.....	34
3.5.2.1	Algorithmus der Konfigurations-Mischung.....	35
3.5.2.2	Algorithmus der Konfigurations-Angleichung.....	36
3.5.2.3	Kombination der Algorithmen.....	38
3.5.3	Anwendung.....	40
3.6	Schallfeldsynthese.....	41
3.6.1	Theorie der Wellenfeldsynthese.....	42
3.6.1.1	Grenzen in der Praxis.....	43
3.6.2	Local Wave Field Synthesis (LWFS).....	45
3.6.3	Aufbau und Gestaltung.....	46
3.6.4	Verzerrungen bei der Bewegung virtueller Quellen.....	47
3.6.5	Anwendung.....	47
3.7	Produkte in der Anwendung.....	48
3.7.1	d&b: Soundscape.....	49
3.7.2	Out board: TiMax SoundHub.....	50
3.7.3	Müller BBM Group: Vivace.....	51
3.7.4	Fraunhofer IDMT: Richtungsmischer (Rimi).....	51
3.7.5	Fraunhofer IDMT: Spatial Sound Wave.....	52
3.7.6	Übersicht.....	53
4	Fazit.....	55
	Literaturverzeichnis.....	XII
	Eigenständigkeitserklärung.....	XV

Abkürzungsverzeichnis

DSS

...Deltastereofonie-System

EQ

...Equalizer

FH-G

...Fraunhofer-Gesellschaft zur Förderung der angewandten Forschung e.V.

GUI

...Graphical User Interface

IDMT

...Institut für digitale Medientechnologie

ITDG

...Initial Time Delay Gap

LWFS

...Local Wave Field Synthesis

SFS

...Schallfeldsynthese

SSW

...Spatial Sound Wave

WFS

...Wellenfeldsynthese

Formelverzeichnis

Audiotechnik

Δt_s	Laufzeitunterschied	[s]
Δs	Laufwegunterschied	[m]
c	Schallgeschwindigkeit	[m/s]
f_{dN}	N-te Mittenfrequenz der destruktiven Kammfilter-Interferenzen	[Hz]
f_{kN}	N-te Mittenfrequenz der konstruktiven Kammfilter-Interferenzen	[Hz]
N	Ganzzahliger Zähler	[1,2,3,...]
Δt	Verzögerungszeit	[s]
B	Bandbreite	[Hz]
Q	Güte	
f_R	Frequenz des Residualtones	[Hz]
f_D	Resultierende Frequenz durch den Doppler-Effekt	[Hz]
v	Geschwindigkeit einer Schallquelle	[m/s]
v'	Verzögerungsgeschwindigkeit	[s/s]
t_A	Zeit über welche die Differenz angeglichen wird	[s]
Δt_v	Differenz der Start- und Endverzögerungszeit	[s]
D	Doppler-Verzerrungsmaß	
$f_{Aliasing}$	Aliasing-Frequenz	[Hz]

Δx Lautsprecherabstand [m]

Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1: Kopfbezogenes Koordinatensystem.....	3
Abbildung 2: Assoziationsmodell der Hörwahrnehmung nach Theile.....	4
Abbildung 3: Interauraler Laufwegunterschied bei seitlichem Schalleinfall.....	6
Abbildung 4: Schwellen des Haas-Effektes.....	13
Abbildung 5: Kammfilter-Effekt: Theoretisches Modell mit auslöschenden Senken und Abhängigkeit der Interferenzwirkung bei Pegelunterschied zwischen den verzögerten Signalen.....	17
Abbildung 6: Kammfilter-Effekte für verschiedene Dämpfungsfaktoren des Gesamtpegels zwischen den Signalen.....	18
Abbildung 7: Vergleich der Schallausbreitung zwischen stationärer (links) und sich gleichförmig bewegender Quelle (rechts).....	21
Abbildung 8: "Geltungsbereich von Phantomschallquellenbildung und Gesetz der ersten Wellenfront".....	28
Abbildung 9: Einrichtung der Verzögerungszeiten auf Grundlage der Laufzeitunterschiede des Bezugslautsprechers zu einem weiteren Lautsprecher.....	32
Abbildung 10: Schema Konfigurations-Mischung für den Signalfluss eines Quellsignals auf einen Lautsprecherkanal.....	36
Abbildung 11: Schema Konfigurations-Angleichung für den Signalfluss eines Quellsignales auf einen Lautsprecherkanal.....	37
Abbildung 12: Kombination der Algorithmen der Konfigurations-Mischung und der Konfigurations-Angleichung zur Kompensation des Kammfilter- und Doppler-Effektes.....	39
Abbildung 13: Huygens-Fresnel-Prinzip.....	42
Abbildung 14: LWFS-Bereich (Ω_1) ist ein Teilbereich der von den Lautsprechern umschlossenen Fläche (Ω).....	45
Abbildung 15: Vergleich Spektrum WFS - LWFS.....	45

Tabellenverzeichnis

Tabelle 1: Blauertsche Bänder.....	8
Tabelle 2: Deltastereofonie: Vor- und Nachteile.....	41
Tabelle 3: Schallfeldsynthese: Vor- und Nachteile.....	48
Tabelle 4: Übersicht Produkte in der Anwendung.....	54

1 Einleitung

Der Schritt von der mono- zur stereofonen elektroakustischen Übertragungstechnik war revolutionär. Erstmals konnte zwischen zwei Lautsprechern ein akustisches Panorama übertragen werden. Schon früh fand diese Anwendung in der Musik- und Filmproduktion. Jedoch blieb auch mit den darauf folgenden Surround-Sound Entwicklungen das Erlebnis lange nur auf einen kleinen Bereich im Publikumsbereich beschränkt. Außerhalb dieses „Sweet Spots“ treten im Pegel und der Lokalisation von Phantomschallquellen erhebliche Abweichungen auf. Deswegen ist dieses Konzept nie gut auf Veranstaltungen übertragbar, da der überwiegende Teil des Publikums davon nur Nachteile hat.

Über lange Zeit war deswegen das ausschließliche Ziel der Beschallungsplanung bei Veranstaltungen, das akustische Bühnengeschehen elektroakustisch monofon zu verstärken. So, dass das Publikum alles, was sich auf der Bühne abspielt, verstehen und mit möglichst angenehmen Klang miterleben kann. Dabei lag der Fokus auf einer möglichst gleichmäßigen Schalldruckpegel- und Klangverteilung im Publikumsbereich. Diese Anforderungen gehören schon lange zum Standard im Aufbau von professionellen Beschallungssystemen.

Ein verstärkter Schauspieler ist somit verständlich, wird aber akustisch nicht auf der Position lokalisiert, die er optisch einnimmt. Dieser Widerspruch ist sehr anstrengend für das Gehirn. Diese Arbeit nimmt sich der Frage an, wie man Beschallungssysteme aufbauen kann, um diesen Widerspruch aufzuheben bzw. um virtuelle Schallquellen frei positionieren zu können.

Eine virtuelle Schallquelle soll in dieser Arbeit ein durch mindestens zwei Lautsprecher hervorgerufenen Hörereignis beschreiben, welches stabil an einer Position lokalisiert wird, unabhängig von der Hörposition im Raum. Somit grenzt sie sich klar von der Phantomschallquelle ab, welche abhängig von der Hörposition lokalisiert wird.

Die Einführung in das psychoakustische Verhalten des Gehörs soll aufzeigen, in welchen Grenzen die Erzeugung von virtuellen Schallquellen möglich ist. Im Anschluss werden Systeme vorgestellt, die im Stande sind, virtuelle Schallquellen zu erzeugen und deren aktueller Forschungsstand beleuchtet. Diese Ende der 70er und 80er Jahre entwickelten Systeme sind erst in den letzten Jahrzehnten durch moderne digitale Rechentechnik voll ausschöpfbar gemacht worden.

2 Psychoakustische Grundlagen

Die Psychoakustik stellt sich die Frage, wie der von einem Schallereignis ausgesendete Schall beim Menschen zu der Bildung eines Hörereignisses führt.

Das Schallereignis ist durch akustische Kenngrößen beschreibbar, wie Schalldruckpegel, Spektrum und zeitliche Struktur des Signales.

Das Hörereignis ist hingegen der Eindruck eines akustischen Geschehens auf den menschlichen Geist. Er ist nur subjektiv in seiner Lautheit, der lokalisierten Position, seiner Klangfarbe, seiner Ausdehnung und der Räumlichkeit beschreibbar, welche er hervorruft. Die Klangfarbe drückt die wahrgenommene spektrale Verteilung eines akustischen Signales aus. Die Ausdehnung beschreibt die räumlich wahrgenommenen Dimensionen eines Hörereignisses. Die Räumlichkeit kennzeichnet den Eindruck über die Dimensionen des Raumes in der das Schallereignis stattfindet.¹

2.1 Räumliches Hören

Das räumliche Hören des Menschen ist ein äußerst komplexes System. Es differenziert sich durch gewonnene Erfahrungen über das ganze Leben hinweg weiter aus. Auf dem akustischen Weg vom Schallereignis bis in den Gehörgang entstehen zwei unterschiedliche Ohrsignale. Je nach Richtung des einfallenden Schalls ergeben sich unterschiedliche lineare Verzerrungen, zeitliche Strukturen, sowie interaurale* Zeit- und Pegelunterschiede.

Diese Erscheinungen sollen in dieser Arbeit getrennt in der Horizontal- und Medianebene betrachtet werden (Abb. 1). Die wichtigsten Faktoren für die Lokalisation in der Horizontalebene sind interaurale Zeit- und Pegelunterschiede. Kenntnisse über die Schallquelle sind nicht notwendig. In der Medianebene wird vor allem aus der Auswertung der linearen Verzerrungen und der zeitlichen Struktur des empfangenen Signales lokalisiert. (vgl. Kap. 2.1.2, 2.1.3) Hier ist es notwendig, dass Vorerfahrungen zwischen Schall- und Hörereignis bestehen. Trotzdem muss in dieser Arbeit immer der Gesamtkontext betrachtet werden.

1 Vgl. Dickreiter: Schallwahrnehmung. In: Dickreiter, Dittel und Hoeg (Hg.), 2014, S.118

* Interaurale Unterschiede bezeichnen Unterschiede, die zwischen zwei Ohrsignalen auftreten.

Um dem Ziel, ein authentisches Hörereignis durch ein Beschallungssystem zu erzeu-

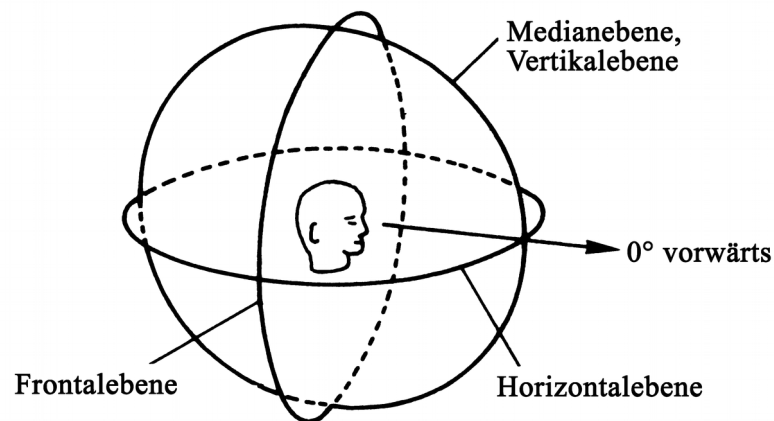


Abbildung 1: Kopfbezogenes Koordinatensystem (Dickreiter: Schallwahrnehmung.

In: Dickreiter et al. (Hg.), 2014, S.128)

gen, näher zu kommen, muss beachtet werden, was für Ohrsignale eine reale Schallquelle hervorrufen würde, wenn sie an der Position der virtuellen stehen würde. So wird ein Hörereignis schnell unauthentisch und zerfällt, wenn zwar die wichtigsten Faktoren für die Ortung eingehalten werden, die weniger relevanten Faktoren jedoch außer Acht gelassen werden. Denn auch sie gehören zur menschlichen Erfahrung, die ein Hörereignis bilden.

Im Folgenden soll deswegen zwischen einem natürlichen Schallfeld und einem künstlichem Schallfeld unterschieden werden. Das natürliche wird von einer realen Quelle hervorgerufen. Das Künstliche wird durch mindestens zwei Lautsprecher hervorgerufen, die zusammen ein Hörereignis bilden. Beide sollen, wenn nicht anders vermerkt, im freien Schallfeld statt finden, welches eine theoretische Umgebung beschreibt, in der Schallquellen strahlen ohne Reflexionen zu verursachen.

2.1.1 Theorien zur Bildung von Hörereignissen

In einem Schallfeld mit mehreren Lautsprechern, die kohärente Signale abstrahlen, treten Effekte auf, die so in der Natur nicht anzutreffen sind. Kohärent soll hier bedeuten, dass zwei Signale in ihrer Signalstruktur identisch sind, jedoch in Pegel, Spektrum und in ihrer Verzögerungszeit zueinander abweichen können.

Der Mensch nimmt in solch einem Schallfeld ein einziges Hörereignis wahr, das keiner real existierenden Schallquelle zugeordnet werden kann. Es entsteht eine virtuelle Schallquelle bzw. eine Phantomschallquelle an Orten, an denen sich keine Schallquelle befindet bzw. die Ausdehnung des Hörereignisses nicht mit der Schallquellenausdeh-

nung übereinstimmt.²

Im Folgenden werden zwei Theorien erläutert, wie Hörereignisse durch Schallereignisse hervorgerufen werden.

2.1.1.1 Summenlokalisierung

Die frühest aufgestellte Theorie ist die der Summenlokalisierung. Es wird davon ausgegangen, dass der Mensch die Summensignale aus den Lautsprechersignalen nicht mehr in seine Komponenten trennen kann. Es wird vermutet, dass die Ohrsignale aus dem künstlichen Schallfeld gleichwertig zu denen eines natürlichen Schallfeldes sind. Und das obwohl sie eine völlig andere Struktur aufweisen. Dieser Widerspruch ist nur durch das Assoziationsmodell erklärbar.³

2.1.1.2 Assoziationsmodell

THEILE hat 1980 das Assoziationsmodell aufgestellt, welches alle wichtigen Phänomene des räumlichen Hörens erklärt.

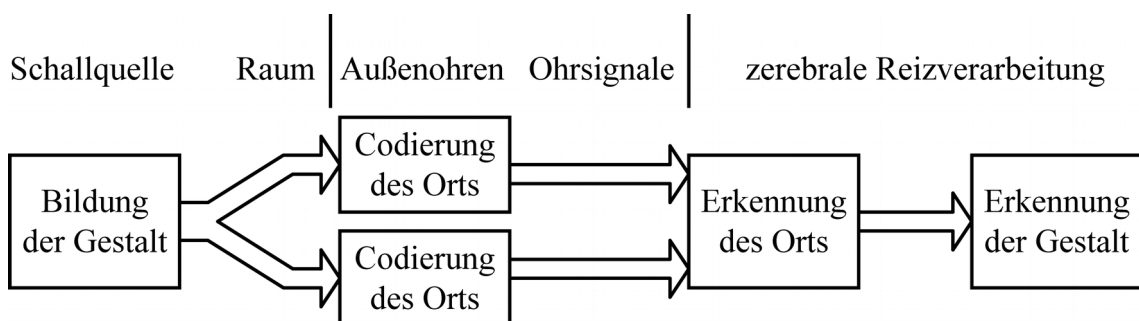


Abbildung 2: Assoziationsmodell der Hörwahrnehmung nach THEILE
(Theile: Tonaufnahme und Tonwiedergabe. In: Dickreiter et al. 2014, S.237)

Demnach ist jedem Schallereignis aus Erfahrung eine Gestalt zugeordnet. Die Gestalt kann z. B. eine Person sein und das Schallereignis deren Stimme. Auf dem akustischen Weg von der Schallquelle zu den Ohren wird das Quellsignal akustisch codiert. Die resultierenden Ohrsignale enthalten Orts-Informationen, welche die Position und Ausdehnung der Schallquelle enthalten, sowie die Information über die räumlichen Umgebung. Durch die Auswertung der beiden Ohrsignale wird zuerst die Orts-Information decodiert und anschließend die Gestalt erkannt.

In der Decodierung des Ortes und der Erkennung der Gestalt läuft eine spontane assoziative Mustererkennung im Gehirn ab. Bei dieser wird das Muster der Ohrsignale mit den im Gehirn gespeicherten Mustern abgeglichen. Dadurch können Informationen aus

² Vgl. Blauert, 1974, S.163 ff.

³ Vgl. Theile: Tonaufnahme und Tonwiedergabe. In: Dickreiter et al. (Hg.), 2014, S.235 ff.

den Ohrsignalen decodiert werden, die bereits durch Erfahrung bestätigt wurden. Dies ermöglicht auch, fehlende Informationen in den Ohrsignalen zu kompensieren. So ist es z. B. möglich bei einem beschnittenen Spektrum, wie es bei Telefonaten der Fall ist, die Stimme einer bekannten Person zu erkennen.⁴

Ist der Mensch über längere Zeit einer bestimmten Beschallungssituation ausgesetzt, so erstellt er daraus neue Muster, die noch währenddessen zum Vergleich herangezogen werden. Auf diese Weise kann der Mensch sich an Klangverfärbungen gewöhnen.

Zur Erzeugung eines Hörereignisses in einem künstlichen Schallfeld muss beachtet werden, dass die resultierenden Ohrsignale keine uneindeutigen Merkmale aufweisen. Denn können die Merkmale auf mehrere bekannte Muster angewandt werden, so zerfällt das Hörereignis in diese Muster und es wird an mehreren Orten lokalisiert. Dies gilt es zu verhindern.

2.1.2 Richtungshören in der Horizontalebene

In den folgenden Kapiteln soll die Funktion zur Lokalisation des Gehörs durch die Erkenntnisse aus Laterisationsversuchen erläutert werden. Diese Versuchsform sieht vor, dass einer Testperson auf Kopfhörern ein Signal dargeboten wird, welches nur auf einer Seite in dem zu untersuchenden Parameter verändert wird. Die Parameter sind hier Verzögerung und Dämpfung. Nur so ist es möglich, die Effekte von interauraler Laufzeitdifferenz und Pegeldifferenz getrennt zu betrachten. Im freien Schallfeld kommen sie immer gemeinsam vor.

In der Horizontalebene kann der Mensch drei mal schärfer Hörereignisse lokalisieren als in der Medianebene.⁵ Deswegen ist diese Ebene für die Beschallungstechnik die Relevantere.

2.1.2.1 Interaurale Laufzeitunterschiede

In der Horizontalebene ist der Weg vom Schallereignis zu beiden Ohren unterschiedlich lang (vgl. Abb. 3). Durch diesen Laufwegunterschied Δs entsteht ein Laufzeitunterschied Δt_s der eintreffenden Signale, da die Zeit proportional zum Weg ist (Formel 2.1-1).⁶

Aus Laterisationsversuchen (vgl. Kap. 2.1.2) wurde ermittelt, dass die Auslenkung des

4 Vgl. Theile: Tonaufnahme und Tonwiedergabe. In: Dickreiter et al. (Hg.), 2014, S.236 ff.

5 Vgl. Dickreiter: Schallquellen. In: Dickreiter et al. (Hg.), 2014, S.80

6 Vgl. Dickreiter & Goeres-Petri: Schallwahrnehmung. In: Dickreiter et al. (Hg.), 2014, S.129

Hörereignisses sein Maximum bei einem interauralen Laufzeitunterschied $\Delta t_s = 630 \mu\text{s}$ erreicht.⁷

Es stellt sich die Frage: Wie kann das Gehör eine interaurale Laufzeitdifferenz feststellen?

Es benötigt auswertbare Signalfanken, die nicht innerhalb von $630 \mu\text{s}$ doppeldeutig auftreten. Somit sind Impulse sehr gut lokalisierbar. Kontinuierliche Signale hingegen dürfen entweder keine relevanten Signalanteile oberhalb von $1,6 \text{ kHz}$ besitzen oder müssen Flanken aufweisen, welche das Gehör triggern kann. Diese Flanke kann z. B. der Einschwingvorgang bei Instrumenten sein oder die Konsonanten in der Sprache.⁸

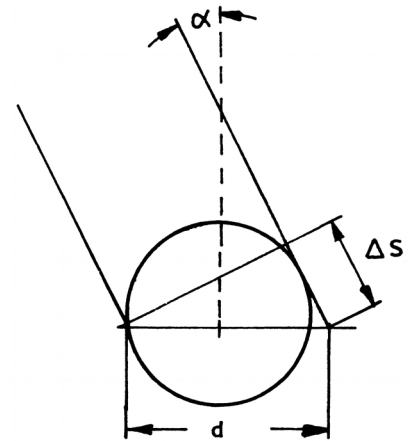


Abbildung 3: Interauraler Laufwegunterschied bei seitlichem Schalleinfall (Vgl. Dickreiter: Schallwahrnehmung. In: Dickreiter et al. (Hg.), 2014, S.129)

$$\Delta t_s = \frac{\Delta s}{c} \quad (2.1-1)$$

Gleichung der Schallgeschwindigkeit, umgestellt nach der Zeit. Δt_s : Laufzeitunterschied [s] Δs : Laufwegunterschied [m] c : Schallgeschwindigkeit [m/s]

Daher kann das Gehör alle periodischen Signale mit einer Frequenz $> 1,6 \text{ kHz}$ durch Laufzeitunterschiede nicht mehr lokalisieren.

2.1.2.2 Interaurale Pegeldifferenzen

Durch die unterschiedlich starke Verdeckung der Ohren erhält der Mensch bei seitlichem Schalleinfall zwei unterschiedliche Schalldruckpegel und Spektren an beiden Ohren. Da tieffrequente Wellen sich stärker beugen als hochfrequente, entsteht mit zunehmender Verdeckung eine steigende Tiefpass-Charakteristik auf dem akustischen Weg zwischen einfallendem Schall und resultierendem Ohrsignal.

Im Folgenden soll zur Vereinfachung nur der Schalldruckpegel betrachtet werden.

Die volle Auslenkung eines Hörereignisses bis zu einem Gehöreingang wird mit einem interauralen Pegelunterschied von ca. $8..10 \text{ dB}$ erreicht. Die Auslenkung eines Hörereignisses ist jedoch abhängig von der frequentiellen Zusammensetzung des Testsignals.

⁷ Vgl. Blauert, 1974, S.113 ff.

⁸ Vgl. Ebd. S.139

Signale unterhalb 1 kHz benötigen einen sehr hohen interauralen Pegelunterschied, mittige Signale bis 3 kHz den Geringsten und hochfrequente Signale einen mittleren Pegelunterschied.

Bezieht man diese Erkenntnisse auf das freie Schallfeld, so können tiefe Frequenzen schlecht bis gar nicht geortet werden, da sich die Beugungseigenschaft von Wellen mit sinkender Frequenz ausbaut, womit sich die interaurale Pegeldifferenz verringert.⁹

2.1.2.3 Zusammenwirken interauraler Pegel- und Zeitdifferenzen

Dass die beiden Auswertungsmechanismen unabhängig voneinander funktionieren, haben die letzten beiden Kapitel gezeigt. Daran anknüpfend wird beschrieben, wie die Mechanismen gemeinsam arbeiten.

Zum Einen gibt es die Erkenntnisse aus Laterisationsversuchen, bei denen es den Testpersonen möglich war, das durch Pegel- oder Zeitvarianz ausgelenkte Hörereignis, durch Einstellen des anderen Parameters wieder in der Medianebene zu platzieren. Diese Versuche werden Trading-Versuche genannt, da sie einen Aushandlungsprozess zwischen den Mechanismen bewirken. Die Auslenkung durch den einen Mechanismus wird mit der Auslenkung durch den anderen Mechanismus kompensiert.¹⁰

Das Erscheinen und die Möglichkeit zur gezielten Bewegung von zwei getrennten Hörereignissen ist durch WHITWORTH und JEFFRESS 1961 dokumentiert. Dazu kann es kommen, wenn die Versuchsbedingungen denen in einem natürlichem Schallfeld zu stark widersprechen. Das heißt, wenn die lokalisierten Positionen aus interauraler Laufzeit- und Pegeldifferenz völlig unterschiedlich sind.¹¹ Dieses Problem tritt auch in der Beschallungstechnik auf und führt zum Zerfall des Haas-Effektes (vgl. Kap. 2.2.2).

2.1.3 Richtungshören in der Medianebene

Das Richtungshören in der Medianebene ist für den Menschen durch die akustische Codierung bei Schalleinfall möglich. Diese wird maßgeblich durch die Form der Ohren, des Kopfes, und der Schultern bestimmt. Sie ist abhängig von der Schalleinfallrichtung. Durch die Welleneigenschaften des Schalles kommt es zu Reflexionen, Beugungen und Brechungen am Körper, die ein spezielles, frequentielles Muster je nach Einfallrichtung des Schalles aufweisen. Somit wird das einfallende Schallsignal an

9 Vgl. Blauert, 1974, S.126 ff.

10 Vgl. Ebd. S.132 ff.

11 Vgl. Ebd. S.136

beiden Ohren in seinem Spektrum verändert.

Die Spektren der Ohrsignale können so mit Mustern aus Erfahrungen verglichen werden und eine Schalleinfallrichtung abgeschätzt werden. Ist die Schallquelle bekannt, so ist das sofort möglich. Ist sie unbekannt, so benötigt das Gehirn die Verknüpfung von dessen spektraler Zusammensetzung und der Richtung, aus welcher der Schall einfällt. Das kann z. B. durch Sehen hergestellt werden. Durch diese Verknüpfung können dann auch die Muster angewandt werden, die beschreiben, wie sich das Spektrum verändert, wenn der Schall aus einer bestimmten Richtung einfällt.

Die Blauertschen Bänder drücken diese Muster grob aus. Sie geben Frequenzbereiche an, die bei Verstärkung bewirken, dass sich das Hörereignis in die jeweilige Richtung bewegt (Tab. 1). Die Unterteilung der Tabelle in Haupt- und Nebenbereich erfolgt anhand der Relevanz für die Auslenkung in die jeweilige Richtung.

Richtung des Hörereignisses	Hauptbereich	Nebenbereich
Vorn	3...4 kHz	270...550 Hz 4...5,5 kHz
Oben	7...9 kHz	
Hinten	700...1700 kHz	10...14 kHz

Tabelle 1: Blauertsche Bänder

Der Mustervergleich setzt breitbandige Signale voraus. Schmalbandige und impulshaltige Signale können nur schlecht lokalisiert werden.¹²

2.1.4 Entfernungshören

Im folgenden Abschnitt soll die dritte Dimension des räumlichen Hörens beschrieben werden. Sie gliedert sich in das Entfernungshören in reflexionsvoller und reflexionsarmer Umgebung. Letztgenannte beziehen sich auf das freie Schallfeld. Sie bildet die Grundlage des Entfernungshörens, welche durch die weiteren Phänomene von Raumreflexionen ergänzt werden. Diese Phänomene sollen im Anschluss behandelt werden.

Für das Entfernungshören im Freien Schallfeld hat BLAUERT drei Grundlagen definiert:

- (1) Schallquellenentfernung < 3 Meter bei Punktschallquellen*

¹² Vgl. Blauert, 1974, S. 80-94

* Eine Punktschallquelle ist eine ideale Schallquelle, welche über das gesamte Spektrum kugelförmig abstrahlt. Dadurch ergibt sich ein Pegelabfall von 6 dB pro Entfernungs-Verdopplung.

Die Krümmung der Schallwellen um den Kopf sind relevant. Mit Veränderung der Schallquellenentfernung verändert sich die durch den Kopf und die Ohren herbeigeführte akustische Codierung.

- (2) Schallquellenentfernung zwischen 3 und 15 Metern bei zeitlich stationärem Signal

Allein der Schalldruckpegel, der die Ohren erreicht, ist signifikant für die Entfernung des Hörereignisses. Dieser nimmt bei Punktschallquellen um 6 dB je Entfernungsverdopplung ab und ist in der angegebenen Entfernung als frequenzunabhängig zu betrachten.

- (3) Schallquellenentfernung über 15 Meter

Die in Grundlage (2) vernachlässigte frequenzabhängige Dämpfung kommt hier zum Tragen. Der Schalldruckpegel nimmt bei Punktstrahlern um 6 dB pro Entfernungsverdopplung ab und zusätzlich ist eine Dämpfung der hohen Frequenzen durch die Luft wahrnehmbar. Somit ist die Hörereignisentfernung abhängig von Schalldruckpegel und Spektrum.¹³

Aus der in Punkt 2 genannten Abhängigkeiten ergibt sich, dass das erfolgreiche Entfernungshören davon abhängt, ob ein Bezugspegel aus Erfahrungswerten zur Schallquelle besteht. Die frequentielle Abstrahlcharakteristik spielt ebenso eine Rolle. Die meisten natürlichen Klangquellen strahlen im höheren Frequenzbereich gerichtet ab, womit sich ein geringerer Pegelabfall bei Entfernungserhöhung abzeichnet als in den tiefen Frequenzen.

Die in Punkt 3 genannte frequenzabhängige Dämpfung ist neben der Schallquellenentfernung abhängig von Luftfeuchtigkeit und Windgeschwindigkeit.¹⁴

Zu beobachten ist die Abhängigkeit der Hörereignisentfernung von der Erwartungshaltung der Hörenden. So wird Flüstern immer näher, Schreien immer weiter entfernt wahrgenommen, als normale Sprache.¹⁵

Die bisherigen Betrachtungen können in einer reflexionsvollen Umgebung auf den Direktschall bezogen werden. Dieser ist, wie der Name schon sagt, der Anteil des am Ohr ankommenden Schalls, welcher nicht reflektiert wurde und somit dem Schall im Freifeld entspricht.

¹³ Vgl. Blauert, 1974, S.96

¹⁴ Vgl. Ebd. S.102

¹⁵ Vgl. Dickreiter & Goeres-Petri: Schallwahrnehmung. In: Dickreiter et al. (Hg.), 2014, S.132 ff.

In dieser Umgebung kann nun auch das Verhältnis zwischen Direktschall- und diffusem Schalldruckpegel ausgewertet werden. Der diffuse Schalldruckpegel stellt eine räumlich konstante Eigenschaft dar. Er beschreibt den Pegel des Nachhalls. Der Direktschalldruckpegel ist, wie in Blauerts zweiter Grundlage beschrieben, jedoch von Hörerentfernung zum Schallereignis abhängig. Der diffuse Schalldruckpegel stellt hier den Bezugswert dar. Hat man einmal einen Eindruck von dessen Verhältnis zum Direktschalldruckpegel für eine bekannte Entfernung, so kann dieses Verhältnis zur Einschätzung der Entfernung herangezogen werden.¹⁶

Des Weiteren ist der zeitliche Abstand zwischen Direktschall und ersten Reflexionen für die Entfernungswahrnehmung relevant. Dieser Abstand wird auch Initial Time Delay Gap (ITDG) genannt. Mit steigender Entfernung wird die ITDG größer, da der Weg des Direktschalls relativ klein gegenüber dem einer Reflexion ist. Die ITDG wirkt auch bei der Bildung eines Raumeindrucks mit. Umso größer die Raumdimensionen sind, desto länger ist der Laufweg des Schalles von der Quelle über die Reflexionsflächen zur Hörposition.¹⁷

Außerhalb der Einschätzung der Entfernung eines Schallereignisses ist die Tiefenstafflung von mehreren Schallquellen - besonders bei Orchesterkonzerten - interessant. Durch die Positionierung von virtuellen Schallquellen hintereinander kann die ursprüngliche Aufstellung nachgeahmt und somit ein transparentes Klangerlebnis ermöglicht werden (vgl. Kap. 3).

2.2 Zeitverhalten des Gehörs bei mehreren Schallquellen

Da der Aufbau von Beschallungssystemen zur Lokalisation virtueller Schallquellen grundlegend mit Laufzeitunterschieden zwischen Lautsprechern arbeitet, folgt nun eine genauere Auseinandersetzung dazu, wie das Gehör mit zeitlich versetzten Wellenfronten umgeht. Dabei werden die Effekte der Laufzeitunterschiede zwischen den Wellenfronten mindestens zweier Schallquellen an einer Hörposition analysiert.

Strahlen mindestens zwei Lautsprecher kohärente Signale ab, so bilden sie gemeinsam ein Hörereignis. Die Lautheit des Hörereignisses ergibt sich aus der Summe von

¹⁶ Vgl. Blauert, 1974, S.221 ff.

¹⁷ Vgl. Sengpiel, 1995

allen daran beteiligten Quellen. Dieses Kapitel soll die Grenzen dieser Hörereignisbildung untersuchen.¹⁸

Im Folgenden soll zunächst von zwei Lautsprechern ausgegangen werden. Diese bilden mit der Hörposition ein gleichseitiges Dreieck. Sie strahlen kohärente Signale mit gleichem Schalldruckpegel ab. Diese Signale können zueinander verzögert werden. Der zuerst abstrahlende Lautsprecher wird im Folgenden Primärquelle und der verzögert Abstrahlende Sekundärquelle genannt.

2.2.1 Summenlokalisierung

Durch die Summenlokalisierung von zwei Schallquellen entsteht ein Hörereignis als Phantom-Schallquelle zwischen der Primär- und Sekundärquelle. Ist die Verzögerung gleich Null, entsteht eine Phantomschallquelle in der Mitte zwischen den Lautsprechern. Mit steigender Verzögerung bewegt sich die Phantomschallquelle auf die Primärquelle zu. Erreicht die Verzögerungszeit 3 ms, so befindet sich die Phantomschallquelle auf der Position der Primärquelle.

Die Auslenkung des Hörereignisses zur Primärquelle hin kann durch Anheben des Pegels der Sekundärquelle kompensiert werden. Das zeigt die Parallele zu den Trading-Versuchen, welche in Kapitel 2.1.2.3 (Zusammenwirken interauraler Pegel- und Zeitdifferenzen) beschrieben wurden.

Durch die Summenlokalisierung kann lediglich eine Phantomschallquelle gebildet werden. Diese ist nicht stabil im Raum lokalisierbar, was bedeutet, dass sie sich mit wechselnder Hörposition im Raum verschiebt. Deswegen sollten zur Erzeugung einer virtuellen Schallquelle Laufzeitunterschiede < 3 ms zwischen den Wellenfronten vermieden werden (vgl. Kap. 3.5.1.1 Ort und Ausdehnung der virtuellen Schallquelle).¹⁹

2.2.2 Haas-Effekt

In der Natur ist der Mensch ständig mehreren Wellenfronten kohärenter Signale ausgesetzt. Sendet eine Quelle Schall aus, so erreicht der Direktschall zuerst das Gehör. Danach treffen die Reflexionen mit einer Verzögerung ein (vgl. Kap. 2.1.4 Entfernungshören). Der Haas-Effekt bewirkt, dass die Richtung des Direktschalles lokalisiert wird und

¹⁸ Vgl. Ahnert & Steffen, 1993, S.65 ff.

¹⁹ Vgl. Blauert, 1974, S.163-176

nicht die Richtung der Reflexionen.²⁰

Der Haas-Effekt wird auch als Precedence-Effekt oder Gesetz der ersten Wellenfront bezeichnet, da die Wellenfront, welche das Gehör zuerst erreicht, bestimmend für die Lokalisation des Hörereignisses ist.

Die INTERNATIONAL ELECTROTECHNICAL COMMISSION hat untersucht bis zu welcher Verzögerung zwischen zwei Impulsen die Gesamtenergie von beiden zu einem Lautstärkeindruck „verschmilzt“. Die so ermittelte Relaxionszeit beschreibt die Trägheit des Gehörs und entspricht 30 ms.²¹ Somit können mehrere Lautsprecher zusammen mit dem Originalschall der Quellen einen Richtungsbezug für das Publikum liefern. Die Umsetzung solcher Systeme wird in Kapitel 3 näher beschrieben.

Zunächst sollen die Grenzen des Kammfilter-Effektes und seine Wirkungen in Abhängigkeit des Laufzeitunterschiedes zwischen den Wellenfronten betrachtet werden.

Die untere Verzögerungsgrenze des Haas-Effektes ist klar durch die Summenlokalisierung definiert und liegt bei 3 ms. Auf die obere Grenze soll nun detaillierter eingegangen werden, da diese schwer zu bestimmen ist.

Umso größer die Verzögerung im Wirkungsbereich des Haas-Effektes ist, desto räumlicher klingt das Hörereignis. Ab 30...40 ms Verzögerungszeit ist die Sekundärwelle getrennt von der Primärquelle hörbar, wobei aber immer noch ein zusammengehörendes Hörereignis entsteht, das auf der Primärschallquelle lokalisiert wird. Ab 35...50 ms ist die Sekundärwelle als getrenntes Echo hörbar, doch bleibt der Fokus der Lokalisierung vorerst auf der Primärschallquelle bis mit steigender Verzögerung die Lokalisierung von Primär- und Sekundärwelle in ihre jeweiligen Richtungen auseinander brechen.

Die Wahrnehmbarkeit des Kammfilter-Effektes ist abhängig von der Pegeldifferenz zwischen Primär- und Sekundärschallquelle. BLAUERT hat diese Abhängigkeit in verschiedenen Wahrnehmbarkeitsschwellen beschrieben (Abb. 4).

²⁰ Vgl. Reichardt, 1971, S. 165 ff.

²¹ Vgl. Ahnert & Steffen, 1993, S.65

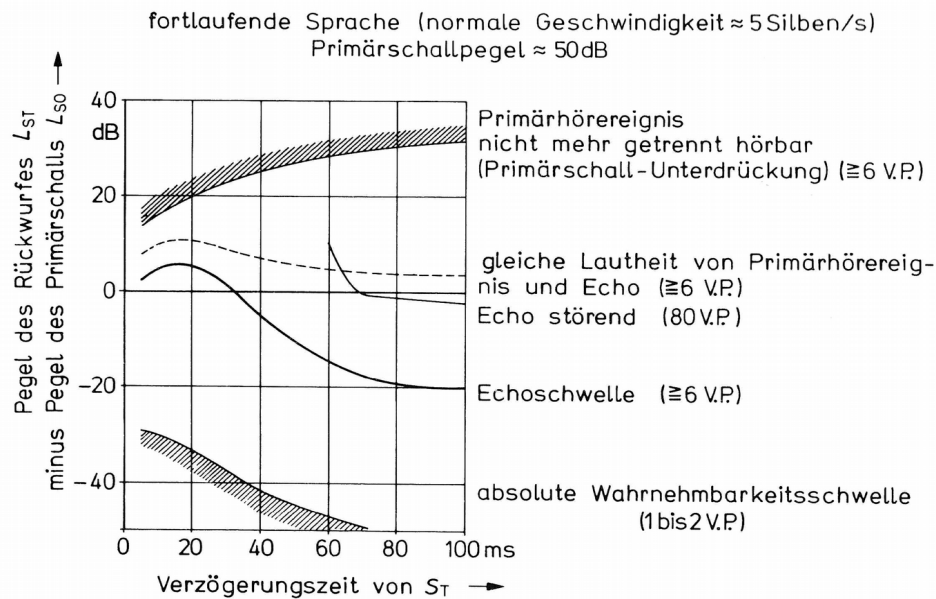


Abbildung 4: Schwellen des Haas-Effektes (Blauert, 1974, S.180)

V.P.: Anzahl der Versuchspersonen

Die absolute Wahrnehmbarkeitsschwelle beschreibt den Punkt, ab dem die Sekundärquelle zur Hörereignisbildung beiträgt. Sie verursacht eine Ausdehnung des Hörereignisses. Die Echoschwelle beschreibt den Punkt, ab dem die Sekundärschallquelle eigenständig lokalisiert werden kann. Das Hörereignis zerfällt in zwei Richtungen.

Allgemein kann festgehalten werden, dass sich mit steigender Pegelanhebung des Sekundärschalldruckpegels das Hörereignis zunächst ausdehnt. Danach bewirkt es einen Zerfall in zwei Hörereignisse und schließlich ist nur noch ein Hörereignis auf Position der Sekundärquelle lokalisierbar. Der Zerfall tritt jedoch mit sinkender Verzögerung bzw. sinkender Impulshaftigkeit des Signales weniger auf. Die beschriebene Ausdehnung des Hörereignisses ist abhängig vom Pegelunterschied, jedoch „weitgehend unabhängig“²² von der Verzögerung der Schallquellen.

Die verschiedenen Wahrnehmbarkeitsschwellen sind ebenso abhängig von der Art und Zusammensetzung des dargebotenen Signals. Es können nur Signale durch den Haas-Effekt erfasst werden, wenn sie auswertbare Flanken vorweisen, wie in Kapitel 2.1.2.1 beschrieben. Umso weniger auswertbar sie sind, desto mehr verschieben sich die Schwellen nach unten. So liegen die Schwellen hoch für Impulse und Sprache und niedrig für Sinustöne niedriger Frequenz und periodische Töne.²³

²² Blauert, 1997, S.53

²³ Vgl. Blauert, 1974, S.177-187

Mit unterschiedlichen Verzögerungszeiten verändert sich auch die Klangfarbe durch sich verändernde Kammfilter-Effekte (vgl. Kap. 2.3.2).

2.2.2.1 Maskierung von Echostörungen

Wie bereits beschrieben, wirkt der Haas-Effekt so lange, bis der Sekundärschall als Echo wahrgenommen wird. Dies ist neben den bisher genannten Faktoren aber auch abhängig vom Gesamtkontext, in dem der Haas-Effekt wirkt. Ob ein Echo wahrgenommen wird oder nicht, ist bis zu einem bestimmten Grad davon abhängig, wie die Situation mit bekannten Mustern vergleichbar ist.

Bewegt sich der Sekundärschall in einem Verzögerungsbereich, der aus Erfahrung nachvollziehbar ist in Bezug auf die räumliche Situation und auf die Position der Originalschallquelle, so ist dieser erst bei Überschreiten dieser Nachvollziehbarkeit hörbar. Bildet die Sekundärquelle eine Reflexion des Originalschalles im Raum nach, so ist die Sekundärwelle weniger als Echo wahrnehmbar. So kann schon durch die Dämpfung der hohen Frequenzen im Spektrum die Echoschwelle angehoben werden.²⁴

Die bisherigen Erkenntnisse können ebenso auf mehrere Lautsprecher angewandt werden. Durch das „Auffüllen“ der Lücke zwischen den Wellenfronten ist ein höherer Laufzeitunterschied zwischen erster und letzter Wellenfront möglich.²⁵

Die Einbindung von mehreren Lautsprechern in ein Beschallungssystem kann also von Vorteil sein. Es bietet sich die Möglichkeit für den gesamten Publikumsbereich Laufzeiten zwischen den Wellenfronten einzustellen, die in den Grenzen des Haas-Effektes liegen. Das hat auch den Vorteil, dass die Schalldruckpegel aller benutzten Lautsprecher zur Gesamtlautstärke des Hörereignisses beitragen können.

2.3 Wahrnehmbarkeit von Verzerrungen

Jedes Audio-Signal ist auf dem Weg von seiner Quelle zum Gehör signalverfälschenden Einflüssen ausgesetzt. Dieser Weg besteht z. B. in der analog/digitalen Übertragungskette, wie auch im akustischen Weg. Die dabei auftretenden Effekte werden als Verzerrungen bezeichnet.²⁶

Im Folgenden soll ein Überblick über die Verzerrungen geboten werden, welche für den

²⁴ Vgl. Blauert, 1997, S.49-62

²⁵ Vgl. Blauert, 1974, S.219

²⁶ Vgl. Ahnert & Steffen, 1993, S.69

Aufbau eines Systems zur Herstellung der Lokalisation virtueller Schallquellen relevant sind. Dabei soll der Fokus auf der Wahrnehmbarkeit der Verzerrungen liegen, da sie nicht zu verhindern sind, aber soweit eindämmbar, dass sie möglichst wenig wahrgenommen werden.

2.3.1 Lineare Verzerrungen

Lineare Verzerrungen beschreiben die Veränderung des Amplitudenfrequenzganges eines Signales. Die Amplitude von einzelnen Komponenten des Spektrums verändert sich. Dabei handelt es sich nicht um das Auftreten von neuen frequentiellen Anteilen, die als nichtlineare Verzerrung beschrieben werden. Vielmehr wird die Gewichtung der Frequenzen untereinander verschoben, so z.B. durch die Bearbeitung eines Signales mit einem Equalizer (EQ). Sind sie wahrnehmbar, so äußern sie sich im Hörereignis als Klangverfärbungen.²⁷

Wie in Kapitel 2.1.3 und 2.1.4 beschrieben, sind lineare Verzerrungen wichtig für die Ortung von Schallquellen in der Medianebene und der Entfernung. Diese Verzerrungen sind jedoch für den Menschen nicht wahrnehmbar, da sie von der Erfahrung und Erwartung an eine Schallquelle kompensiert werden. Somit werden lineare Verzerrungen erst dann wahrgenommen, wenn sie außerhalb des Bereiches der bekannten Muster auftreten.

Lineare Verzerrungen treten auch durch die Beschallungsanlage auf. Lautsprecher können in einer akustischen Umgebung installiert sein, die z. B. eine Tiefpasscharakteristik aufweist. Diese Verzerrungen müssen für das Publikum kompensiert werden, damit keine Klangverfärbungen zwischen den Lautsprechern wahrnehmbar sind.²⁸

2.3.2 Kammfilter-Effekt

In der Beschallungstechnik tritt der Kammfilter-Effekt immer dann auf, wenn ein Quellsignal über mindestens zwei Lautsprecher abgestrahlt wird. Er wird umso komplexer, je mehr Lautsprecher verwendet werden. Außerdem entsteht er auch in manchen Schaltungen im Signalweg, indem zwei zueinander verzögerte Signal gemischt werden (vgl. Kap. 3.5.2.1 Algorithmus der Konfigurations-Mischung). Der Kammfilter-Effekt verursacht eine Klangverfärbung des Ursprungssignales.

Da im Aufbau von Beschallungssystemen zur Lokalisation virtueller Schallquellen auf

²⁷ Vgl. Ahnert & Steffen, 1993, S.70

²⁸ Veit Mernitz, Technischer Leiter Theaterhaus Jena (persönl. Mitteilung 01.07.2018)

eine dezentrale Beschallung mit vielen Einzelausprechern nicht zu verzichten ist, muss man sich intensiv mit Kammfilter-Effekten auseinandersetzen.

2.3.2.1 Theoretische Grundlage

Addiert man kohärente, zueinander zeitversetzte Signale, so bildet sich ein frequenzabhängiger Phasenversatz zwischen den Signalen, der zu konstruktiver und destruktiver Interferenz führt. Die konstruktive Interferenz bewirkt eine Erhöhung, die destruktive Interferenz eine Absenkung des Pegels der jeweiligen frequenziellen Anteile des Spektrums. Die Orte an denen die Interferenzen ihr Maximum erreichen, werden im Folgenden durch den Ausdruck Mittenfrequenz beschrieben.

Zur Vereinfachung wird zunächst das theoretische Modell des Kammfilter-Effektes bei zwei kohärenten Signalen mit gleichem Pegel betrachtet.

Bei Frequenzen, bei denen die Verzögerung einen Phasenversatz von 180° hervorruft, geschieht ein Pegel einbruch durch destruktive Interferenz (Formel 2.3-1).

$$f_{dN} = (2N - 1) \frac{1}{2\Delta t} \quad N \in \mathbb{Z} > 0 \quad (2.3-1)$$

f_{dN}: N-te Mittenfrequenz der destruktiven Interferenzen [Hz], *Δt*: Verzögerungszeit [s], *N*: ganzzahliger Zähler der Einbrüche [1;2;3;...]

Somit treten destruktive Interferenzen bei jedem zweiten Vielfachen der Frequenz des ersten Einbruchs auf. Es ergibt sich bei diesen Frequenzen eine vollständige Auslöschung der Amplitude.

Bei konstruktiver Interferenz liegen die frequentiellen Komponenten des Spektrums in Phase, wodurch sie im Pegel um 6dB erhöht werden (Formel 2.3-2).

$$f_{kN} = 2N \frac{1}{2\Delta t} \quad N \in \mathbb{Z} > 0 \quad (2.3-2)$$

f_{kN}: N-te Mittenfrequenz der konstruktiven Interferenzen [Hz], *Δt*: Verzögerungszeit [s], *N*: ganzzahliger Zähler der Überhöhungen [1;2;3;...]

Somit wechseln sich Einbrüche und Überhöhungen immer mit dem frequentiellen Abstand der halben Mittenfrequenz des ersten Einbruchs ab. Das Spektrum bekommt das Aussehen eines Kammes. Dadurch kam der Kammfilter-Effekt zu seinem Namen (Abb. 5).²⁹

²⁹ Vgl. Ahnert & Steffen, 1993, S.71-77

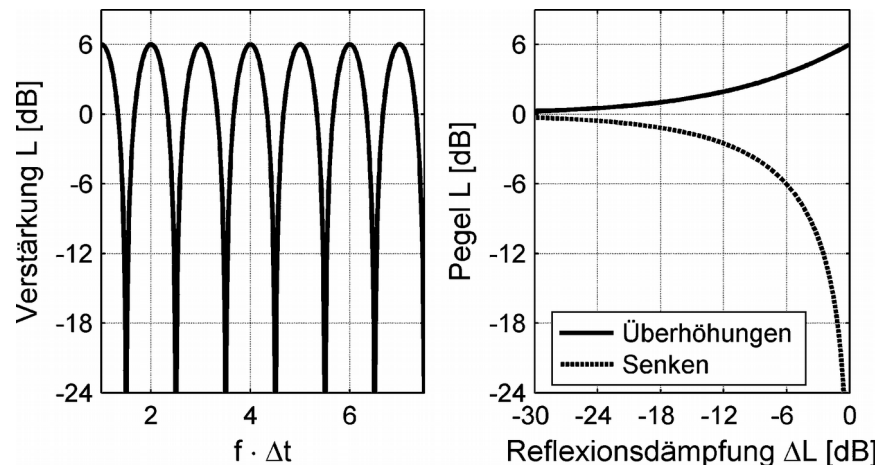


Abbildung 5: Kammfilter-Effekt: Theoretisches Modell mit auslöschenden Senken und Abhängigkeit der Interferenzwirkung bei Pegelunterschied zwischen den verzögerten Signalen (Maempel, Weinzierl & Kaminski: *Audiobearbeitung*.

In: Weinzierl (Hg.), 2008, S.749)

Die Bandbreite B der Einbrüche bleibt auf das gesamte Spektrum gesehen konstant. Sie entspricht der Frequenz des ersten Einbruches.³⁰ Durch Formel 2.3-1 mit $N = 1$ erhält man die Bandbreite B in Formel 2.3-3.

$$B = f_{d1} = \frac{1}{2 \Delta t} \quad (2.3-3)$$

B : Bandbreite [Hz], Δt : Verzögerungszeit [s]

Weisen die zueinander verzögerten Signale eine Pegeldifferenz auf, so entstehen weniger starke Einbrüche im Spektrum. Sie sorgen nicht für eine komplette Auslöschung an der Mittenfrequenz, da die Beträge der gegenphasigen Frequenzanteile nicht gleich sind und somit eine Differenz übrig bleibt. Abbildung 5 stellt die Stärke der Einbrüche und Überhöhungen in Abhängigkeit des Pegelunterschiedes dar. Wie sich dieser Fall auf das Spektrum auswirkt, veranschaulicht Abbildung 6.³¹

2.3.2.2 Auswirkungen des Kammfilter-Effektes

Die konstruktiven und destruktiven Interferenzen bilden zusammen ein Spektrum, welches an das eines harmonischen Tons erinnert. Die Spitzen des Spektrums bilden dabei eine harmonische Obertonfolge. Aus der Wissenschaft der Klangwahrnehmung ist bekannt, dass sich die empfundene Tonhöhe nach dem Abstand der Obertöne zueinander definiert. Selbst bei fehlendem Grundton, welcher auch Residualton genannt wird, empfindet man die ursprüngliche Tonhöhe des Klangs. Beim Kammfilter-Effekt ist

³⁰ Vgl. Sengpiel, 2000

³¹ Vgl. Ahnert & Steffen, 1993, S.71-77

der Frequenzbereich des Residualtones nicht klar abgegrenzt, da er unterhalb der ersten Auslöschung liegt (Abb. 6). Durch das oben angesprochene Phänomen wird aber der Residualton in seiner Tonhöhe trotzdem wahrgenommen. Er liegt bei der Frequenz, die der Periodendauer der Verzögerung entspricht (Formel 2.3-4).³²

$$f_R = \frac{1}{\Delta t} \quad (2.3-4)$$

Frequenz des Residualtones. f_R : Residualtonfrequenz [Hz], Δt : Verzögerungszeit [s]

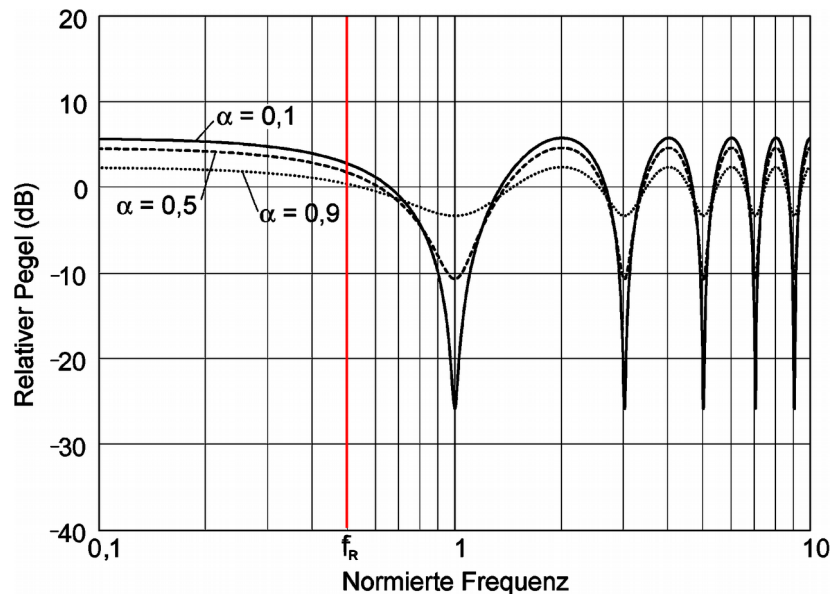


Abbildung 6: Kammfilter-Effekte für verschiedene Dämpfungsfaktoren des Gesamtpegels zwischen den Signalen.

α : Dämpfungsfaktor

f_R : Frequenz des entstehenden Residualtones

(modifiziert nach: Maier: Studioakustik. In: Weinzierl (Hg.), 2008, S.283)

Zur Bewertung der Wahrnehmbarkeit der Einbrüche muss die Güte Q dieser Einbrüche herangezogen werden (Formel 2.3-5).

$$Q = \frac{f_{dN}}{B} \quad (2.3-5)$$

Güte des Einbruches. Q : Güte, f_{dN} : N -te Mittenfrequenz der destruktiven Interferenzen [Hz] (vgl. Formel (2.3-1)), B : Bandbreite (vgl. Formel (2.3-3))

Diese wird bei konstanter Bandbreite und steigender Mittenfrequenz immer größer. Umso höher die Güte des Einbruches ist, desto weniger wird dieser wahrgenommen.

³² Vgl. Ellermeier & Hellbrück: Hören – Psychoakustik – Audiologie. In: Weinzierl (Hg.), 2008, S.65 ff.

Daher sind die Einbrüche mit steigendem Zähler N (Formel 2.3-1) immer weniger wahrnehmbar.³³

Die Wahrnehmbarkeit des Kammfilter-Effektes hängt zusammenfassend davon ab, wie gleichmäßig er sich auf den genutzten Frequenzbereich verteilt, ob der Residualton störend wirkt und wie unterschiedlich stark die Pegel der Wiederholungen zueinander stehen.

Da der erste Einbruch durch seine niedrige Güte und der Residualton die größte Aufmerksamkeit auf sich ziehen, sollten diese möglichst außerhalb des genutzten Frequenzbereiches liegen. Für die obere Grenze kann die Frequenz des Residualtons herangezogen werden, für die untere Grenze die Mittenfrequenz des ersten Einbruches, da sich der Residualton immer unter dem ersten Einbruch befindet.

AHNERT gibt an, dass der Kammfilter-Effekt mit einem Residualton von 3,3 kHz und höher „unhörbar“ wird.³⁴ Das entspricht nach Formel 2.3-4 einer maximalen Verzögerung von 300 μ s. Als untere Nutzfrequenzgrenze können 100 Hz angenommen werden.* Berechnet man für diese Frequenz die erste Mittenfrequenz der Einbrüche, so erhält man über Formel 2.3-1 eine minimale Verzögerung von 5 ms.

KUTTRUFF untersuchte 1973 die Wahrnehmbarkeitsschwelle des Kammfilter-Effektes auf Pegel- und Laufzeitabhängigkeit. Dabei stellte er fest, dass mit steigender Verzögerung der Pegel des verzögerten Signales stärker angehoben werden kann, bevor der Kammfilter-Effekt wahrnehmbar ist. Dies untermauert die oben beschriebene Erkenntnis, dass der erste Einbruch des Kammfilter-Effektes möglichst tieffrequent liegen muss. Damit erzeugt er schmalbandige Einbrüche in geringem Abstand zueinander, welche dann über das gesamte Spektrum gleichmäßig verteilt sind. Somit wird die Verzerrung weniger wahrgenommen. Überschreitet die Verzögerung jedoch eine Schwelle von ca. 25 ms, so wandelt sich der Kammfilter-Effekt in ein Rauigkeitsempfinden um. Die Rauigkeit ist eine Form der Klangverfärbung wie sie bei Flatterechos auftritt.³⁵

Das bedeutet, dass die Verzögerungszeiten zwischen den Wellenfronten für einen Frequenzbereich ab 100 Hz nicht zwischen 0,3 und 5 ms liegen sollten, da sonst der Kammfilter-Effekt sehr deutlich wahrnehmbar ist, und 25 ms möglichst nicht über-

³³ Vgl. Sengpiel, 2000

³⁴ Vgl. Ahnert & Steffen, 1993, S.218

³⁵ Vgl. Ebd. S.75 ff.

* 100 Hz ist eine häufig genutzte Crossoverfrequenz für die Trennung von Subwoofern und Topteilen in der Veranstaltungstechnik. Da der betrachtete Kammfilter-Effekt durch die Topteile erzeugt wird, ist diese Frequenz als Grenzfrequenz sinnvoll.

schreiten, da sonst der Faktor der Rauigkeit Einzug auf das Signal erhält. Diese Grenzen beschreiben nicht die absolute Wahrnehmbarkeit. Sie beschreiben lediglich Eckpunkte, die erklären, wie der Kammfilter-Effekt gleichmäßig über das Spektrum verteilt werden kann. Die Wahrnehmbarkeit hängt aber auch vom Pegel der Wiederholung ab.

Umso höher der Pegelunterschied zwischen dem Signal und seiner Wiederholung ist, desto weniger wird der Kammfilter-Effekt wahrgenommen, da er sich weniger stark ausbildet. Mit steigender Verzögerung kann ein geringerer Pegelunterschied eingestellt werden, da dann der Kammfilter-Effekt mit geringerer Bandbreite das gesamte Spektrum durchzieht.

Bisher wurde von einer einfachen Wiederholung und Addition ausgegangen. Betrachtet man aber den Fall, dass ein Signal periodisch wiederholt wird, wie zum Beispiel bei einer einfachen phasenstarrten Verzögerungsschaltung mit Feedbackschleife, so verstärkt sich der Kammfilter-Effekt dahingehend, dass die Pegel einbrüche steiler und breiter werden. Die Gegenphasigkeit tritt bei immer den selben Frequenzen auf. Die Bandbreite der Einbrüche vergrößert sich. Das kann damit erklärt werden, dass jede Wiederholung durch ihr periodisches Auftreten in die gleiche „Kerbe“ des Spektrums schlägt, da sie alle die identische Verzögerung zu ihrem Vorgängersignal haben. Wie zuvor schon beschrieben, steigt die Wahrnehmbarkeit des Kammfilter-Effektes mit der Breite der Einbrüche an.

Treten die Wiederholungen jedoch nicht periodisch auf, so verteilen sich die Interferenzen gleichmäßig über das Spektrum, da sich an mehreren unterschiedlichen Stellen Interferenzen ergeben. Das führt zu einer schwächeren Wahrnehmung des Kammfilter-Effektes.³⁶

2.3.2.3 Konsequenzen in der Beschallungsplanung

Aus dem vorherigen Kapitel zieht der Autor folgende idealisierende Schlussfolgerungen:

- Die Pegel der Wellenfronten sollten sich um einen möglichst hohen Wert unterscheiden.
- Die Zeitversätze zwischen allen Wellenfronten sollten möglichst ungleich sein.
- Sie sollten nicht mit einem zeitlichen Abstand zwischen 0,3 und 5 ms und größer 25 ms aufeinander folgen.

³⁶ Vgl. Ahnert & Steffen, 1993, S.71-77

Bei der Beschallungsplanung mit mehreren Lautsprechern wird ein komplexes Schallfeld erzeugt. Von jedem Lautsprecher gehen Wellenfronten aus. Der Zeitversatz zwischen diesen Wellenfronten ist durch die Laufzeitunterschiede von den Lautsprechern zur Hörposition bestimmt und somit ortsabhängig. Dadurch sind die drei Punkte in der Praxis nicht für den gesamten Zuschauerbereich umsetzbar, aber für den Großteil anstrebbbar.

Umso mehr diffuse Reflexionen der Raum zulässt, desto stärker wird der Kammfilter-Effekt maskiert, wenn sich die Reflexionen im Bereich der oben genannten Schlussfolgerungen bewegen. Sie bewirken eine gleichmäßige Verteilung über das Spektrum.

Die Ortsabhängigkeit des Kammfilter-Effektes bedeutet auch, dass er unterschiedliche Auswirkungen an beiden Ohren haben kann. Nun könnte angenommen werden, dass dieser Umstand Probleme bereitet und ein deutlicher Unterschied in der Klangfarbe zwischen den beiden Ohren wahrnehmbar ist. Wie das Assoziationsmodell von THEILE jedoch darlegt werden diese durch den Vergleich mit Mustern aus Erfahrung ausgeblendet und sind nicht wahrnehmbar (vgl. Kap. 2.1.1.2 Assoziationsmodell).

2.3.3 Doppler-Effekt

Der Doppler-Effekt entsteht in der Natur bei sich bewegenden Schallereignissen. Mit der Bewegung des Schallereignisses bewegt sich auch der Ausgangspunkt der Wellenfronten. Dadurch werden die Wellenfronten gestaucht, wenn sich die Schallquelle auf den Hörort zubewegt und gestreckt, wenn sie sich von ihm entfernt (Abb. 7). Das führt zu einer Veränderung der wahrgenommenen Tonhöhe des ausgesandten Signals.

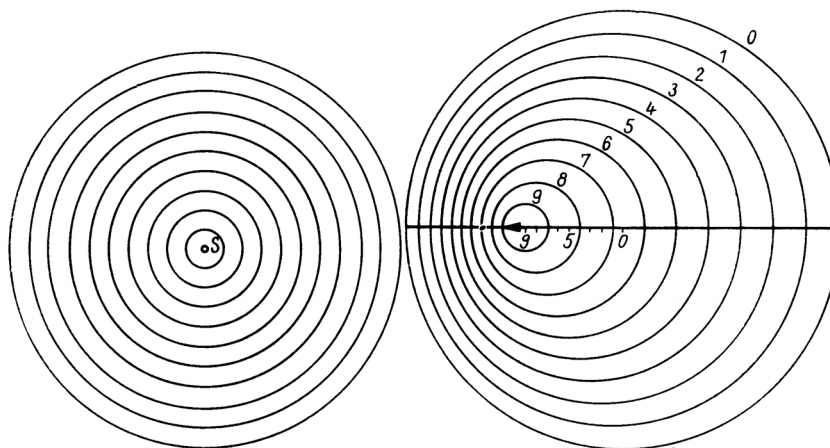


Abbildung 7: Vergleich der Schallausbreitung zwischen stationärer (links) und sich gleichförmig bewegender Quelle (rechts)

(Schröder, 1990, S.101)

Es soll zunächst davon ausgegangen werden, dass sich eine gleichförmig bewegende

Quelle mit der Geschwindigkeit $v = \text{konst.}$ auf einer Geraden zu dem Empfangsort bewegt. Sie sendet einen Sinus-Ton als Quellsignal mit der Frequenz f_Q aus. Die Geschwindigkeit v ist positiv, wenn sich die Quelle vom Empfangsort entfernt und negativ, wenn sie sich auf ihn zubewegt. Somit ergibt sich für den empfangenen Ton eine Frequenz f_D nach folgender Gesetzmäßigkeit:³⁷

$$f_D = \frac{c}{c+v} f_Q \quad (2.3-6)$$

f_D : resultierende Frequenz durch den Doppler-Effekt [Hz], f_Q : Quellfrequenz [Hz], c : Schallgeschwindigkeit [m/s], v : Geschwindigkeit der Schallquelle [m/s]

Der Doppler-Effekt kann ebenso durch die Veränderung der Verzögerung von örtlich stationären Schallquellen - wie Lautsprechern - entstehen. Dieser Fall soll im Folgenden genauer untersucht werden, da er äußerst relevant ist bei der Planung von Systemen, die bewegte virtuelle Schallquellen erzeugen wollen (vgl. 3.5.2 Bewegung von virtuellen Schallquellen).

Analog zur Geschwindigkeit der Schallquelle im vorherigen Beispiel, ist der Doppler-Effekt nun abhängig von einem Faktor, der im Folgenden Verzögerungsgeschwindigkeit v' genannt wird (Formel 2.3-7). Er ist ein Maß dafür, wie schnell sich die Verzögerungszeit verändert.

$$v' = \Delta t_v / t_A \quad (2.3-7)$$

v' : Maß der Verzögerungsgeschwindigkeit, Δt_v : Differenz der Start- und Endverzögerungszeit [s], t_A : Zeit, über welche die Differenz angeglichen wird [s]

Formel 2.3-6 ergibt danach abgewandelt:

$$f_D = \frac{1}{1+v'} f_Q \quad (2.3-8)$$

f_D : resultierende Frequenz durch den Doppler-Effekt [Hz], f_Q : Quellfrequenz [Hz], v' : Maß der Verzögerungsgeschwindigkeit [s/s]

Der Doppler-Effekt staucht oder streckt das Spektrum über die gesamte Frequenzachse linear mit dem Faktor $1/(1+v')$. Deswegen wird im Folgenden die Wahrnehmbarkeit der Tonhöenschwankung thematisiert.

Die menschliche Tonhöenempfindung entspricht einer logarithmischen, nicht einer linearen Wahrnehmung. Somit ist auch die Wahrnehmbarkeit der Tonhöenänderung

³⁷ Vgl. Schröder, 1990, S.101 ff.

„nicht von der absoluten Änderung, sondern von der relativen Änderung der Frequenzen abhängig“³⁸. Diese relative Änderung kann in Prozent als Wahrnehmbarkeitsschwelle angegeben werden.

Diese Schwelle stellt also das Verhältnis des Frequenzunterschiedes Δf zwischen Quellfrequenz f_Q und effektiver Frequenz f_D zu f_Q dar. Dieses Verhältnis soll im Folgenden Doppler-Verzerrungsmaß genannt werden und kann durch Umstellung und Einsetzen von Formel 2.3-8 in folgenden Zusammenhang gestellt werden:

$$D = \frac{|f_D - f_Q|}{f_Q} = \left(\frac{1}{1 + v'} - 1 \right) \quad (2.3-9)$$

*D: Doppler-Verzerrungsmaß, f_D : resultierende Frequenz durch den Doppler-Effekt [Hz],
 f_Q : Quellfrequenz [Hz], v' : Verzögerungsgeschwindigkeit*

Diese Wahrnehmbarkeitsschwelle ist Lautheits- und Frequenzabhängig. Mit der Lautheit steigt die Wahrnehmbarkeit der Tonhöhenänderung an. Im Frequenzbereich zwischen 1 und 4 kHz besitzt sie ihr Maximum und nimmt zu den höheren und tieferen Frequenzen hin ab. Somit liegt die Wahrnehmbarkeitsschwelle am Niedrigsten, wenn das Signal eine hohe Lautheit aufweist und im mittleren Frequenzbereich relevante Signalanteile besitzt.³⁹

Für die Beschallungstechnik sollten diese Voraussetzungen maßgebend sein, da das PA-System* in der Regel einen hohen Pegel im Zuschauerraum erzeugt und die übertragenen Signale wesentliche Anteile im Mittenbereich aufweisen.

Bei Sinustönen als Testsignal konnte von REICHARDT unter diesen Voraussetzungen eine Schwelle von 0,25...0,3 % ermittelt werden. DICKREITER nennt ohne konkrete Versuchsbedingungen eine Schwelle von 0,7 %⁴⁰, Ahnert nennt eine Schwelle von 2 % im Frequenzbereich 1...4 kHz.⁴¹ Das zeigt, wie stark die Schwellen unter verschiedenen Versuchsbedingungen schwanken können. Es sollte immer auf den konkreten Anwendungsfall in der Beschallung geprüft werden, ab welcher Schwelle die Tonhöhenänderung wahrnehmbar ist.

Um die maximale Verzögerungsgeschwindigkeit zu berechnen, kann die Formel 2.3-9

³⁸ Ahnert & Steffen, 1993, S.57 ff.

³⁹ Vgl. Reichardt, 1971, S.128

⁴⁰ Vgl. Dickreiter: Schallwahrnehmung. In: Dickreiter et al. (Hg.), 2014, S.124

⁴¹ Vgl. Ahnert & Steffen, 1993, S.59

* PA-System steht für Public-Address-System. Es bezeichnet Beschallungssysteme, die darauf ausgelegt sind, eine große Menge an Menschen zu beschallen.

nach v' umgestellt werden.

$$v' = \left| \frac{1}{D+1} - 1 \right| \quad (2.3-10)$$

D: Doppler-Verzerrungsmaß, v' : Verzögerungsgeschwindigkeit

Setzt man das kritische Verzerrungsmaß auf beispielsweise 0,7 % an, so kann durch Einsetzen von $D = 0,007$ eine maximale Verzögerungsgeschwindigkeit $v' \approx 0,007$ ermittelt werden. Das entspricht nach Formel 2.3-7 einer linearen Angleichung von $\Delta t = 7 \text{ ms}$ in $t_A = 1 \text{ s}$.

3 Umsetzung der Lokalisierung virtueller Schallquellen in der Beschallungstechnik

3.1 Einleitung in die Beschallungstechnik

Konventionelle Beschallung ist einkanalig und zentral aufgebaut. Zentrale Beschallung soll im Folgenden Aufbauten bezeichnen, bei denen die Lautsprecher an den Darbietungsbereich angrenzend angeordnet sind und weitestgehend kohärente Signale abstrahlen.⁴² Der Darbietungsbereich umfasst alle Bereiche, in denen sich relevante Darbietungen für die Veranstaltung abspielen. So erhalten z. B. Beschallungslösungen mit einem PA-System rechts und links von der Bühne einen Main Mix aus einem kanalbasiertem System (vgl. Kap. 3.2.2). Unter der Prämisse, das gesamte Publikum mit möglichst gleicher Wiedergabequalität zu versorgen, kann stereofone Beschallung nicht vorgenommen werden. Nur ein kleiner Bruchteil des Publikums befindet sich im „Sweet Spot“, dem Bereich in dem das Stereohören möglich ist. Deswegen kann mit solch einem Setup nur ein einkanaliger Mix für das gesamte Publikum fair sein. Das äußert sich so im Signalfluss, dass parallel vorliegende Quellsignale in einem Ausgangskanal summiert werden.

Steht die Beschallung nach oben beschriebenem Aufbau an der Vorderkante der Bühne, so tritt der Fall ein, dass der Schall der Originalquelle später beim Großteil des Publikums eintrifft, als das dazu kohärente Signal über das PA-System. Das hat zur Folge, dass das Gesetz der ersten Wellenfront (vgl. 2.2.2 Haas-Effekt) greift und das Hörereignis nicht auf Position der Originalschallquelle, sondern zwischen den PA-Systemen geortet wird. Wo genau ergibt sich durch die Laufzeit- und Pegelunterschiede zwischen den beiden PA-Systemen am Zuhörer_innenort* (vgl. 2.2.1 Summenlokalisierung).

Ist der Pegel des verstärkten Signales im Publikum höher als der des Originalschalles, was der übliche Fall ist, so wird das Hörereignis völlig unabhängig von der Position der Schallquelle lokalisiert. Stellt man sich diesen Effekt nun bei einer ganzen Band vor, so

42 Vgl. Ahnert & Steffen, 1993, S.253

* Der Autor möchte durch die Kombination der Geschlechterformen innerhalb eines Wortes die Vielfalt des sozialen Geschlechtes (Gender) ausdrücken. Sie soll sichtbar machen, dass die benannten Gruppen aus Personen mit individuellem Gender bestehen können. Diese Form der geschlechtergerechten Sprache wird in dieser Arbeit verwendet werden.

werden alle Instrumente akustisch von ihrer Bühnenaufstellung aufgelöst und in einer einzigen Phantomschallquelle gemischt lokalisiert.⁴³

In den folgenden Kapiteln sollen Möglichkeiten aufgezeigt werden, wie dieser Sachverhalt durch die im zweiten Kapitel gesammelten Grundlagen durchbrochen werden kann. Das Ziel besteht hierbei darin, ein möglichst transparentes Hörereignis einer Darbietung zu erreichen. Das bedeutet dass die Beschallung Hörereignisse erzeugt, welche einzeln lokalisiert werden können und eine Tiefenstafflung der Schallquellen ermöglicht.

Am Ende sollen bestehende Beschallungssysteme verglichen werden um einen Überblick über den aktuellen Stand der Entwicklung zu geben.

3.2 Grundlagen

3.2.1 Wirkung der Lokalisierbarkeit von Schallquellen in der Veranstaltungstechnik

Beschallungssysteme, die eine Lokalisation einzelner Quellen ermöglichen, verbessern die Sprachverständlichkeit stärker als konventionelle Systeme und sorgen für eine Transparenz des Klanggeschehens. Transparenz beschreibt hier genau den Sachverhalt, dass mehrere einzelne Hörereignisse an unterschiedlichen Orten lokalisierbar sind.

Faktoren wie das Verstärken des Schalldruckpegels und dem höherem Verhältnis von Direktschall zu Nachhall werden auch von konventionellen Systemen verbessert.⁴⁴ Der große Vorteil eines Systems, das virtuelle Schallquellen erzeugt, liegt in der Möglichkeit, den sogenannten Cocktailparty-Effekt nutzbar zu machen.

Ein komplexes Schallfeld aus mehreren ortsdifferenten Quellen, die inkohärente Signale abstrahlen, erzeugt beim Menschen ebenso viele Hörereignisse wie Schallquellen vorhanden sind. Diesen Hörereignissen werden eine Orts- und eine Gestaltsinformation zugeschrieben (vgl. 2.1.1.2 Assoziationsmodell). Diese Informationen machen es möglich, die Hörereignisse voneinander getrennt zu bewerten und sich auf Einzelne zu konzentrieren. Das Gehirn kann störende Hörereignisse in ihrer empfundenen Lautheit dämpfen, und sich auf relevante Hörereignisse konzentrieren, bzw. sie in der Lautheit

⁴³ Vgl. Ahnert & Steffen, 1993, S.281

⁴⁴ Vgl. Ebd. S.39

anheben. Das ermöglicht eine Steigerung der Transparenz des Schallgeschehens. Somit erzeugt der Effekt auch eine höhere Sprachverständlichkeit, da sich auf bestimmte Sprachquellen konzentriert werden kann und andere gedämpft werden können.⁴⁵

3.2.2 Formen der Audiowiedergabe

Die kanalbasierte Audiowiedergabe ist die Basis der Stereophonie. In ihr werden Quellsignale auf mehrere Lautsprecher-Kanäle gemischt. Dadurch kann dieser resultierende Mix nur auf einen bestimmten Lautsprecher-Aufbau angewandt werden. Die Bewegung von virtuellen- bzw. Phantomschallquellen wird nur durch Panning* erzeugt.⁴⁶

Die objektbasierte Audiowiedergabe versieht Audiosignale mit Metadaten. Diese enthalten mindestens die Position des Objektes, können aber auch die Ausdehnung umfassen. Auf Basis dieser Daten und den Einstellungen der Lautsprecher-Konfigurationen werden dann die Lautsprecher-Signale für jede Quelle zu jedem Lautsprecher einzeln berechnet. Das Ziel dieser Berechnungen ist es, Lautsprecher-Signale zu erzeugen, welche die Lokalisation einer virtuellen- bzw. einer Phantomschallquelle ermöglichen. Bewegungen der so erzeugten Schallquelle sind durch die Änderung der Metadaten möglich.

3.3 Einkanalige Verzögerungsverfahren

In der Einleitung des dritten Kapitels wurde gezeigt, dass unverzögerte zentrale Beschallungssysteme die zusammengemischten Quellsignale in eine einzige Phantomschallquelle verschieben. Dieser Effekt kann jedoch durch die Anwendung des Haas-Effektes (vgl. Kap. 2.2.2) aufgebrochen werden. Denn empfängt das Publikum von der Originalschallquelle die erste Wellenfront, so kann auf dessen reale Position lokalisiert werden. Das ist jedoch nur möglich, wenn zwei Bedingungen erfüllt werden.

Erstens muss das Signal über die Beschallung so verzögert werden, dass zwischen den Wellenfronten der Originalschallquelle und der Beschallung die Grenzen des Haas-Effektes im Publikumsbereich eingehalten werden. Somit wird die Originalschallquelle zur Primärquelle, und das PA-System zur Sekundärquelle. Als Richtwert kann aber eine Verzögerung von ca. 10...20 ms im Publikumsbereich angenommen werden,

⁴⁵ Vgl. Blauert, 1974, S.206; Sengpiel, 1999

⁴⁶ Vgl. Maempel: Klanggestaltung. In: Dickreiter et al. (Hg.), 2014, S.371

* Panning bezeichnet das Überblenden eines Eingangskanals über mindestens zwei Ausgangskanäle durch die Steuerung der Dämpfung an der Schnittstelle zwischen Eingangs- und Ausgangskanälen.

da bei dieser Verzögerung die Echoschwelle ihr Maximum besitzt (vgl. Abb. 4).

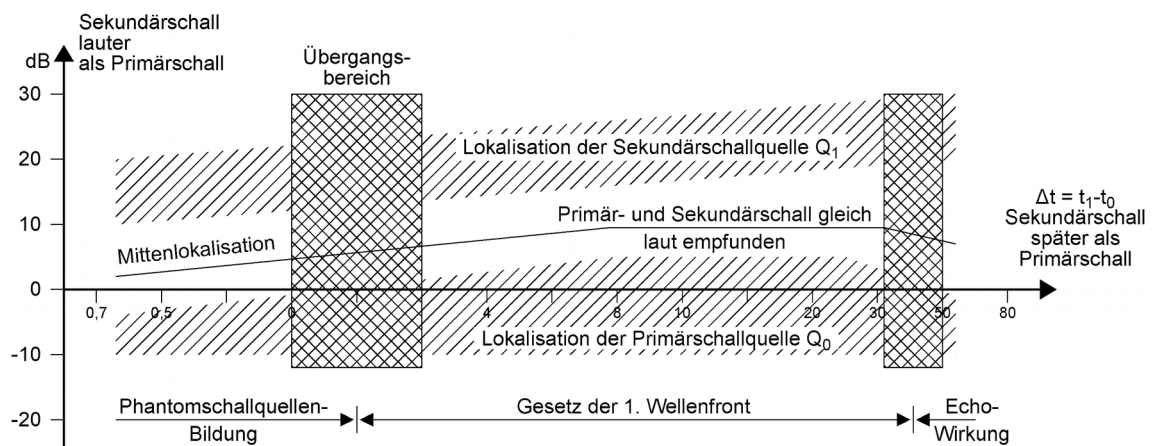


Abbildung 8: "Geltungsbereich von Phantomschallquellenbildung und Gesetz der ersten Wellenfront"

(Schullan, Zuleeg & Hoeg: Grundlegende Beschallungskonzepte. In: Dickreiter et al. (Hg.), 2014, S.581)

Zweitens darf das PA-System keine höhere Pegeldifferenz zur Primärquelle aufweisen, als die Echoschwelle zulässt. Andernfalls verschiebt sich die Lokalisation auf das PA-System. In Abbildung 8 ist die Echoschwelle als die obere Kante des unteren schraffierten Bereiches dargestellt. In diesem Bereich muss sich die Pegeldifferenz aufhalten. Dabei ist die Abhängigkeit der Schwelle in Bezug auf die Signalart zu beachten, wie auf Seite 13 beschrieben wurde.

Somit ist deutlich, dass dieses Konzept nur bei Veranstaltungen mit verhältnismäßig geringem Pegelunterschied zwischen Quellen und Beschallung funktioniert. So kann solch ein Aufbau bei kleinen bis mittelgroßen Rockkonzerten ein einfaches, gutes Ergebnis liefern, während schon bei kleinen Theateraufführungen oder Orchesterkonzerten der Pegel der Originalquellen nicht ausreichen könnte, um den Haas-Effekt wirken zu lassen.⁴⁷

Dieses Verfahren ist somit das mit dem niedrigsten Aufwand. Es kann schon über einen einfachen digitalen Mischer mit Verzögerungs-Modul in den Kanalzügen angewandt werden. Jedoch ist es auch das Verfahren mit den meisten Begrenzungen in der Gestaltung. Auch die Umsetzbarkeit ist begrenzt, wenn die Originalschallquellen einen zu geringen Schalldruckpegel abstrahlen. Bewegte Quellen können mit diesem System nicht abgebildet werden, es sei denn sie können selbst den Minimalpegel als erste Wellenfront aussenden.

⁴⁷ Vgl. Schullan et al.: Grundlegende Beschallungskonzepte. In: Dickreiter et al. (Hg.), 2014, S.581; Ahnert & Steffen, 1993, S.283

3.4 Mehrkanalige Intensitätsverfahren

Mehrere Lautsprechergruppen werden über dem Aktionsbereich einzeln ansteuerbar installiert. Die einzelnen Gruppen müssen dabei die gesamte Publikumsfläche versorgen. Je nach der Position, auf die lokalisiert werden soll, wird der Pegel der Lautsprechergruppe angehoben, welcher dieser Position am nächsten ist. Die Pegel der anderen Lautsprechergruppen werden gedämpft.⁴⁸

Im Gegensatz zur einkanaligen Schallverzögerung bietet sich die Möglichkeit auch Schallquellen, die kaum einen oder keinen Schalldruckpegel erzeugen, lokalisierbar abzubilden. Jedoch können die Audioquellen nur in Phantomschallquellen abgebildet werden. Eine Tiefenstafflung ist nicht möglich. Somit bietet dieses Verfahren allein ein Richtungsbezug für das Publikum.

3.5 Mehrkanalige Verfahren mit Verzögerungssystemen

Eine Erweiterung der einkanaligen Verzögerungsverfahren stellt die Verwendung von Stützlautsprechern dar. Bei stationären Quellen, wie zum Beispiel einem Redner_innenpult, kann ein Stützlautsprecher an der Position der Originalschallquelle installiert werden. Der Stützlautsprecher gibt dann unverzögert die erste Wellenfront zur Lokalisation der Originalschallquelle ab. Somit ergibt sich ein zentral gestützter Beschallungsaufbau. Eine Bewegung der lokalisierten Quelle ist nicht möglich, ohne den Stützlautsprecher zu verschieben.⁴⁹

Die flexible Positionierung einer virtuellen Schallquelle ist nur durch einen dezentralen Beschallungsaufbau zu erreichen. Dezentrale Beschallung bedeutet in dieser Arbeit, dass um bzw. im Darbietungsbereich eine Vielzahl an einzeln ansteuerbaren Lautsprechern installiert ist. Die einzelnen Lautsprecher können unterschiedlich zueinander konfiguriert werden, so dass flexible Beschallungslösungen möglich sind. Eine Vielzahl an Einzellautsprechern geringer Leistung ermöglicht die Aufgabe der Beschallung von großen Veranstaltungen.

Für diesen Zweck wurde das Deltastereofonie-System (DSS) entwickelt. Die Lokalisation virtueller Schallquellen ist dabei in Zonen über den Darbietungsbereich gerastert. In

⁴⁸ Vgl. Ahnert & Steffen, 1993, S.283 ff.

⁴⁹ Vgl. Ebd. S.253

diesem müssen einzeln ansteuerbare Lautsprecher dezentral installiert werden. Diese werden dann durch das DSS gespeist. Das System enthält Zonen-Konfigurationen, welche die Einstellungen aller Lautsprecherkanäle für die jeweiligen Zonen enthalten.

Das DSS kann kanal- und objektbasiert arbeiten. Bestehen Eingangskanäle, die fest auf die einzelnen Zonen geroutet sind, so kann kanalbasiert gearbeitet werden. Parallel dazu können Eingangskanäle bestehen, welche auf Grundlage von Metadaten die Lautsprechersignale so berechnen, dass die Eingangssignale objektbasiert wiedergegeben werden.

Eine Zonen-Konfiguration enthält immer Verzögerungs- und Dämpfungs-Parameter. Optional sind Equalizer-Parameter. Diese Parameter können dann für jeden Lautsprecherkanal eingestellt werden. So kann ein Quellsignal mit unterschiedlicher Verzögerung, Dämpfung und Equalizer-Einstellung auf jeden Ausgangskanal ausgegeben werden. Zusätzlich kann auch jede Zonen-Konfiguration einen Equalizer für die gesamte Zone enthalten. Mit diesem Zonen-Equalizer können alle Lautsprechersignale für diese Zone bearbeitet werden. Diese Zonen-Konfiguration unterscheidet sich von Zone zu Zone.⁵⁰

3.5.1 Aufbau

Im folgenden Kapitel soll zuerst darauf eingegangen werden, wie eine Zonen-Konfiguration eingerichtet werden muss, um eine virtuelle Schallquelle zu erzeugen. Dabei liegt der Schwerpunkt darauf, wie das Hörereignis einer realen Schallquelle an der gewünschten Position möglichst genau durch die virtuelle Schallquelle nachgebildet werden kann.

Aktuell werden Algorithmen entwickelt, die diese Einrichtung automatisch vornehmen. Diese erzielen teilweise so passable Ergebnisse, dass eine manuelle Anpassung der Einstellungen durch das Gehör kaum noch nötig ist (vgl. Kap. 3.7.2). Das bleibt jedoch bisweilen Ansichtssache der Tonmeister_innen. Es bleibt trotz dieser neuen Möglichkeiten wichtig, immer noch manuell in die Zonen-Konfiguration eingreifen zu können. Nur so können Anpassungen erfolgen, um z. B. die Dämpfung eines Lautsprecherkanals zu erhöhen, wenn ein mikrofonierter Darsteller nahe diesem eine Rückkopplungsgefahr auslöst oder wenn trotz Berechnungen einzelne Publikumsgebiete unterversorgt sind und auf sie ausgerichtete Lautsprecher weniger gedämpft werden müssen. Außer-

⁵⁰ Vgl. Ahnert & Steffen, 1993, S.284-291; Veit Mernitz, Technischer Leiter Theaterhaus Jena (persönl. Mitteilungen 01.06-01.07.2018)

dem sollte die Einrichtung der Klanggestalt immer noch durch das Gehör und nicht durch einen Algorithmus passieren (vgl. Kap. 3.5.1.2 Klanggestaltung).⁵¹

Die Einrichtung basiert vor allem auf Einstellung der Laufzeitunterschiede zwischen den Wellenfronten. Diese Laufzeiten sind abhängig von der Schallgeschwindigkeit. Diese Schwankt wiederum mit der Witterung. Das hat zur Folge dass sich die Eigenschaften einer virtuellen Schallquelle verändern. Somit müssen nach Witterungsänderung die Zonen-Konfigurationen kritisch überprüft werden.⁵² Die automatischen Algorithmen zur Einrichtung sollten also die Witterungsbedingungen mit einbeziehen, oder eine manuelle Korrektur zulassen.

3.5.1.1 Ort und Ausdehnung der virtuellen Schallquelle

Einer der im Bereich einer Zone installierten Lautsprecher dient als Bezugslautsprecher und soll die erste Wellenfront für diese Ortungszone abstrahlen. Dafür wird von ihm ausgehend eine Verzögerungskette zu den umliegenden Lautsprechern aufgebaut. Durch den somit ausgenutzten Haas-Effekt (vgl. Kap. 2.2.2) ist es möglich, die Pegel aller im Darbietungsbereich installierten Lautsprecher zu nutzen, um ein einziges lokalisierbares Hörereignis in Form einer virtuellen Schallquelle zu erzeugen. Dabei können die verketteten Lautsprecher einen bis zu 10 dB höheren Pegel als der Bezugslautsprecher abstrahlen, ohne dass die Lokalisation instabil wird.

Der Bezugslautsprecher ist in der Regel unverzögert. Von ihm ausgehend müssen alle anderen Lautsprecher mindestens die Verzögerungszeit erhalten, welche der Laufzeit des Bezugslautsprechers zu den jeweiligen Lautsprechern entspricht. Nach dieser Regel sind alle sonstigen Lautsprecher an ihrer Position mit dem Bezugslautsprecher in Phase. In Phase sein beschreibt hier das zeitliche Verhältnis zweier kohärenter Signale, welche auf die Phase genau zeitlich übereinstimmen.

Abbildung 9 zeigt die Einrichtung einer Zone mit zwei Lautsprechern nach eben genannter Regel. Der Bezugslautsprecher strahlt das Quellsignal unverzögert ab. Der verkettete Lautsprecher hingegen strahlt das Signal mit einer Verzögerung ab, welche der Laufzeit zwischen ihm und dem Bezugslautsprecher entspricht.

Wird ein System allein nach dieser Regel eingerichtet, so trifft die Wellenfront des Bezugslautsprechers immer als erstes in allen Publikumspositionen ein, jedoch können die Wellenfronten der anderen Lautsprecher mit ihr zeitgleich eintreffen oder kurz nach

51 Omar Samhoun, Projekt-Manager Neumann&Müller Dresden (persönl. Mitteilung, 20.11.18)

52 Alwin Bösch, Tonmeister Seebühne Bregenz (persönl. Mitteilung, 14.11.18)

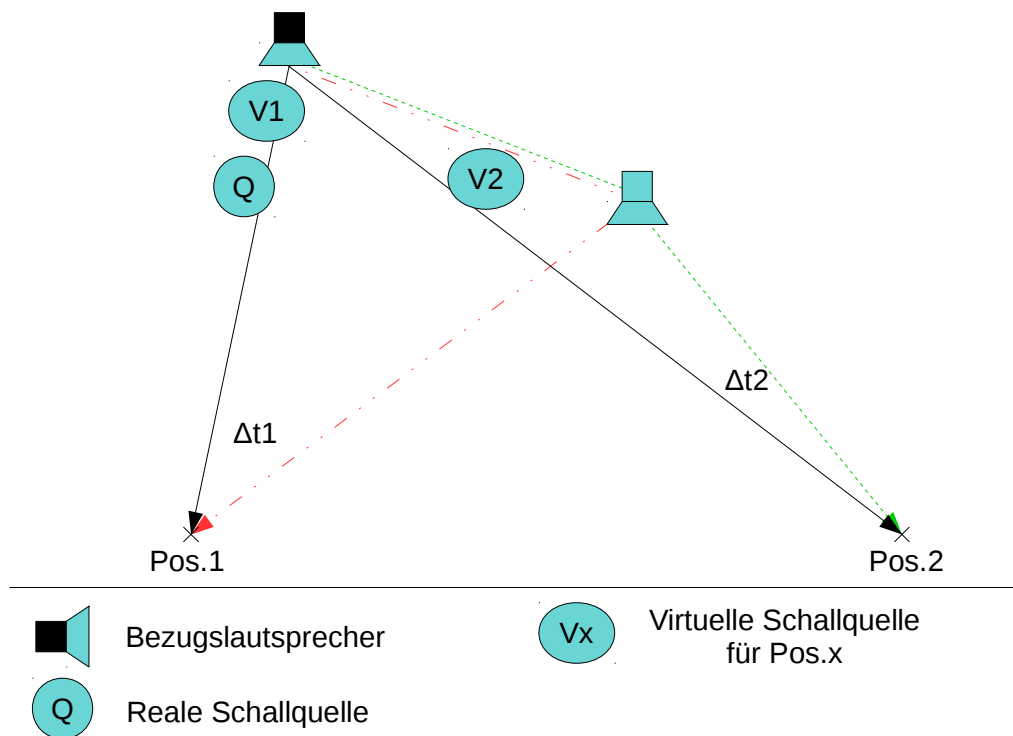


Abbildung 9: Einrichtung der Verzögerungszeiten auf Grundlage der Laufzeitunterschiede des Bezugslautsprechers zu einem weiteren Lautsprecher

ihr. So treffen an Position 1 (Pos.1) die Wellenfronten mit einem relativ hohen Laufzeitunterschied (Δt_1) ein. Die virtuelle Schallquelle (V1) wird stabil auf dem Bezugslautsprecher abgebildet. An Position 2 (Pos.2) ist der Laufzeitunterschied (Δt_2) so gering, dass durch Summenlokalisierung eine Phantomschallquelle (V2) zwischen dem Bezugslautsprecher und dem dazu verketteten Lautsprecher entsteht. Das führt in diesem Beispiel zu einer inkorrekten und instabilen Lokalisation des Hörereignisses.

Instabil bedeutet hier, dass die Position des Hörereignisses abhängig von der Hörerinnenposition im Publikum ist. Inkorrekt bedeutet dass das Hörereignis nicht dort lokalisiert wird, wo es lokalisiert werden soll.

Um das zu verhindern, muss der Laufzeitunterschied zwischen den Wellenfronten mindestens 3 ms betragen. Das muss auf den gesamten Publikumsbereich angewandt werden. Nur so ist sichergestellt, dass es keinen Ort gibt, an dem ein Hörereignis durch Summenlokalisierung lokalisiert wird (vgl. Kap. 2.2.1).

Die Einstellung der passenden Verzögerungszeit kann in Millisekunden-Schritten stattfinden, da der Bereich, in dem der Haas-Effekt wirkt, 20 ms umfasst.

Wie in der Einleitung des Kapitels 2.1 Räumliches Hören schon angedeutet, muss bei der Einrichtung einer virtuellen Schallquelle bedacht werden, was eine reale Schallquelle für Ohrsignale hervorrufen würde und insbesondere, welche sie nicht hervorrufen würde.

Weicht der Ort, an dem ein Lautsprecher installiert ist, von dem Ort, an dem die virtuelle Schallquelle erzeugt werden soll, ab, so erzeugt dieser Lautsprecher ein unerwartetes Spektrum im Ohrsignal. Denn wird auf die Quelle, von der die erste Wellenfront ausgeht, lokalisiert, so wird auch das Spektrum erwartet, welches ein Signal aus dieser Richtung aufweist. Strahlt der Lautsprecher aus einer anderen Richtung, so erzeugt er ein anderes Spektrum im Ohrsignal, als erwartet.

Um das zu korrigieren, enthält die Zonen-Konfiguration für jeden Lautsprecher Equalizer-Parameter. Mit ihnen kann die Tiefpasscharakteristik bei seitlichem Schalleinfall einer Reflexion nachgeahmt werden (vgl. Kap. 2.1.2.2, 2.2.2.1) und die Wirkung der Blauertschen Bänder (vgl. Kap. 2.1.3) kompensiert werden.⁵³

Neben dem Ort des Hörereignisses kann ebenso die Ausdehnung der virtuellen Schallquelle gezielt eingerichtet werden. Umso kleiner die Verzögerung der an den Bezugslautsprecher angrenzenden Strahlern ist, desto größer erscheint die Ausdehnung des Hörereignisses und umgekehrt.⁵⁴

3.5.1.2 Klanggestaltung

Eine Aufgabe der Klanggestaltung ist es mit dem Kammfilter-Effekt umzugehen. Dieser muss einerseits maskiert werden (vgl. Kap. 2.3.2.3 Konsequenzen in der Beschallungsplanung), andererseits kann er auch genutzt werden um einen gewünschte Klangfarbe einer Zone einzustellen. Durch die Anpassung der Verzögerungszeiten im Bereich der Zehntel-Millisekunden kann das geschehen. Diese Aufgabe für einen großen Publikumsbereich zu erfüllen, erfordert meisterhafte Fähigkeiten.

Erst nach ausreichender Maskierung des Kammfilter-Effektes sollte der Zonen-Equalizer eingesetzt werden. Da die Einbrüche im Spektrum durch Gegenphasigkeit entstehen, sind sie nur schlecht durch einen EQ zu kompensieren und sollten stattdessen maskiert werden.

Die Hauptsache bei dieser Feineinstellung des Klangs ist jedoch die Anforderung, dass

⁵³ Veit Mernitz, Technischer Leiter Theaterhaus Jena (persönl. Mitteilungen 01.06-01.07.2018); Vgl. Ahnert & Steffen, 1993, S.284-291

⁵⁴ Alwin Bösch, Tonmeister Seebühne Bregenz (persönl. Mitteilung, 14.11.18)

die Zonen untereinander gleich klingen, von denen es erwartet wird. So sollten benachbarte Zonen zwischen denen Schauspieler hin und her gehen möglichst gleich klingen. An Klangfärbung gewöhnt sich der Mensch (vgl. 2.1.1.2 Assoziationsmodell), indem er sie durch Adaption gespeicherter Muster kompensiert. Kann aber diese Kompensation nicht auf alle Zonen-Einmessungen gleich angewandt werden, so fallen die unterschiedlichen Klangfärbungen bei jedem Wechsel der Zone auf.

Zonen die z. B. für Gesangsdarbietung eingerichtet sind können und sollten sich jedoch von den anderen Zonen in ihrem Klang abheben um der künstlerischen Darbietungsform gerecht zu werden.⁵⁵

3.5.2 Bewegung von virtuellen Schallquellen

Die Bewegung von virtuellen Schallquellen zwischen den Zonen erfordert eine Anpassung der Zonen-Konfigurationen aneinander. Das kann über Gewichtungsfaktoren erreicht werden. Diese beschreiben die relative Position eines Objektes zu den Zonen. Die Angleichung von EQ- und Dämpfungsfaktoren über die Zeit stellen kein Problem dar. Der Knackpunkt ist die Angleichung der Verzögerungszeit zwischen den Zonen. Dazu stellt der Autor zwei verschiedene Herangehensweisen vor.

Der erste Algorithmus wird im Folgenden Konfigurations-Mischung genannt. Er schafft allein durch Dämpfungsglieder einen Übergang zwischen den Konfigurationen. Diese Dämpfungsglieder sind von den Gewichtungsfaktoren abhängig. Der zweite Algorithmus wird Konfigurations-Angleichung genannt werden. Durch ihn werden die Parameter der Konfigurationen kontinuierlich angepasst. Im Anschluss soll aufgezeigt werden, wie eine Kombination aus beiden Verfahren die gegenseitigen Nachteile kompensieren kann.

Alternativ kann auch ein harter Parameterwechsel bei Übertreten eines Grenzbereiches zwischen den Zonen realisiert werden. Der dabei auftretende Parameter-Sprung kann geglättet werden, um keine Artefakte entstehen zu lassen. Artefakte bezeichnen hier hörbare Verzerrungen in Form von plötzlichen Spitzen oder Einbrüchen im Pegel der Signale. Bei dieser Form der Angleichung springt jedoch die virtuelle Schallquelle von einer Zone in die andere. Sie kann keine Bewegungen abbilden und wird daher im weiteren Verlauf nicht näher erläutert.

Zunächst soll jedoch geklärt werden, worauf die Überblendung fußt.

⁵⁵ Veit Mernitz, Technischer Leiter Theaterhaus Jena (persönl. Mitteilung 01.07.2018); Alwin Bösch, Tonmeister Seebühne Bregenz (persönl. Mitteilung, 14.11.18)

Die Einteilung in Zonen ergibt ein Netz, welches über dem gesamten Darbietungsbe-
reich liegt. So wird die Gewichtung immer zwischen maximal drei Zonen vorgenom-
men, da das Dreieck, welches durch diese Zonen aufgespannt wird, die kleinste geo-
metrische Form im Zonen-Netz ist. So ergeben sich für jede Position eines Objektes in
diesem Netz drei Gewichtungs-Faktoren $g_1 \dots 3$ für die drei Zonen, zwischen denen sich
das Objekt befindet.

Sie werden aus der relativen Position eines Objektes zu den Positionen der Zonen be-
rechnet. Die Summe aus allen Gewichtungs-Faktoren ergibt immer 100%. Diese Fak-
toren werden je nach Position des Objektes den Zonen zugewiesen, zwischen denen
sich das Objekt bewegt.

Kann ein Objekt genau einer Zone zugeordnet werden, so beträgt deren Gewichtungs-
faktor 100%, und die anderen Faktoren 0%. Befindet sich ein Objekt zwischen zwei Zo-
nen, so verteilt sich die Gewichtung auf die Faktoren der beiden Zonen. Der dritte Fak-
tor beträgt 0%. Tritt das Objekt in den Raum zwischen drei Zonen, so geschieht die
Verteilung auf alle drei Faktoren. Die Faktoren sind nach diesen Regeln proportional zu
den Abständen des Objektes von den Zonen.

Ist zum Beispiel Zone 1 der Gewichtungs-Faktor g_1 zugeordnet und der Zone 2 der
Gewichtungs-Faktor g_2 , so nimmt g_1 , bei einer Objektbewegung von Zone 1 in Zone 2,
ab, während g_2 zunimmt.⁵⁶

3.5.2.1 Algorithmus der Konfigurations-Mischung

Beim Algorithmus der Konfigurations-Mischung bestehen die Zonen-Konfigurationen
als Module parallel im Signalfuss. Es werden nicht die Parameter der Konfiguration an-
einander angeglichen, sondern lediglich das Verhältnis der Konfigurationen untereinan-
der gewichtet. Das erfolgt durch die Gewichtungs-Faktoren, welche eine Dämpfung
der Signale nach der Modulkette der Zonen-Konfiguration hervorrufen. Abbildung 10
stellt den Algorithmus als Schema dar.

Dieser Algorithmus benötigt wenig Rechenleistung, ist einfach nachzuvollziehen und
einfach zu programmieren, jedoch weniger übersichtlich. Somit ist er der Niederschwel-
ligere von beiden. Jedoch erzeugt er eine sehr starke, schlecht kompensierbare
Kammfilter-Verzerrung. Diese ist unabhängig von oben genannten Kammfilter-Effekten,
die auf akustischem Weg zwischen den Lautsprechersignalen entstehen. Diese hier

⁵⁶ Vgl. Fraunhofer-Gesellschaft zur Förderung der angewandten Forschung e.V. [FH-G], 2009, S.10 ff.

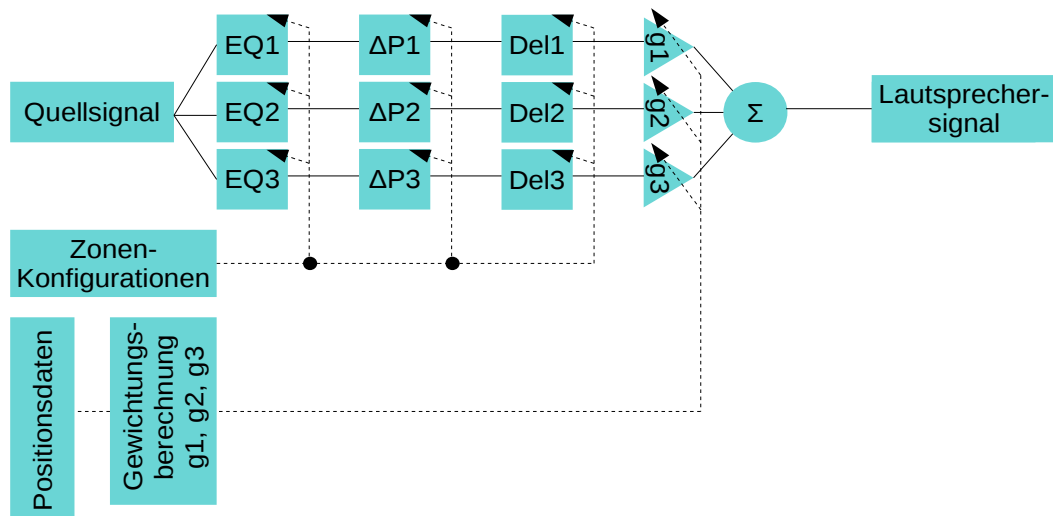


Abbildung 10: Schema Konfigurations-Mischung für den Signalfluss eines Quellsignals auf einen Lautsprecherkanal

Zonen-Konfigurationen: enthalten alle Parameter von allen Zonen für EQ, Delay und Skalierung; EQ: Equalizer-Modul; ΔP : Dämpfungs-Modul; Del: Delay-Modul; Σ : Summierung der Signale; Dreiecke: gesteuerte Dämpfung; durchgezogene Linien: Audosignalweg von links nach rechts; gestrichelte Linien: Datenfluss

entstehen im digitalen Signalweg beim Summieren der unterschiedlich verzögerten Signale. Die Auswirkungen sind aus dem Kapitel 2.3.2 bekannt.

Bei gleichem Pegel der beiden zueinander verzögerten kohärenten Signale, erreicht der Kammfilter-Effekt sein Maximum. Im Spektrum äußert sich das in einer vollständigen Auslöschung des Pegels im Bereich der Einbrüche und zu einem Pegelanstieg von +6 dB im Bereich der Überhöhungen.

Im Allgemeinen tritt dieser Fall bei jeder Blende in allen von den Zonen gemeinsam benutzten Lautsprecherkanälen auf. Mit Beginn der Blende schwillt der Effekt an, erreicht sein Maximum, und schwillt bis zum Ende der Blende wieder ab.⁵⁷

Dieser Effekt kann durch eine sorgfältige Beachtung der in Kapitel 2.3.2.3 genannten Schlussfolgerungen gedämpft werden. Jedoch würde das bedeuten, alle aneinander grenzenden Zonen diesen Beachtungen zu unterziehen, was praktisch nicht umsetzbar ist und auch die Freiheit in der Gestaltung der Zonen zu stark einschränken würde.

3.5.2.2 Algorithmus der Konfigurations-Angleichung

Beim Algorithmus der Konfigurations-Angleichung werden alle Parameter der Zonen-

⁵⁷ Vgl. FH-G, 2009, S.12 ff.

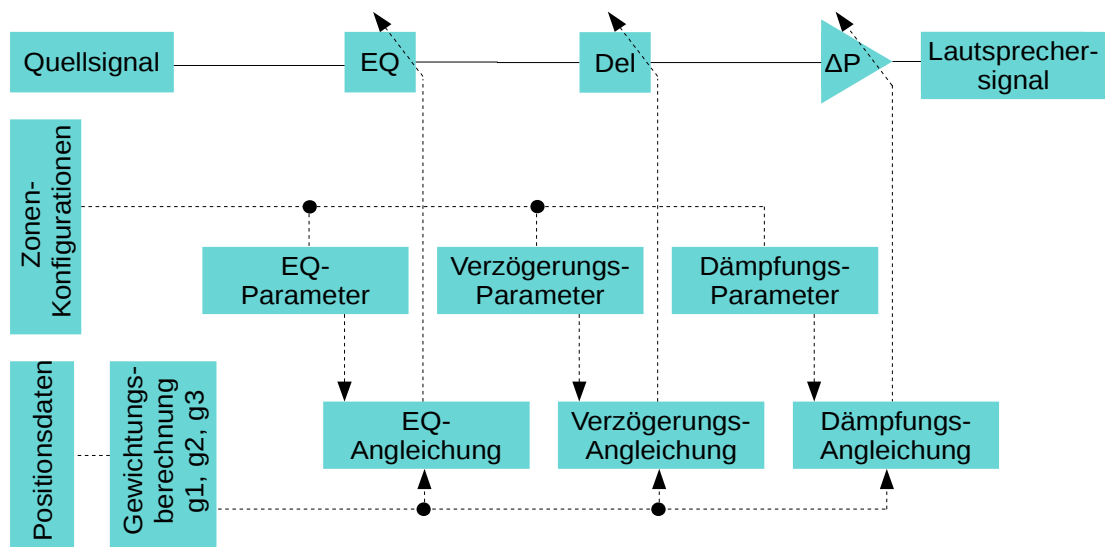


Abbildung 11: Schema Konfigurations-Angleichung für den Signalfluss eines Quellsignales auf einen Lautsprecherkanal

Zonen-Konfigurationen: Enthalten alle Parameter von allen Zonen für EQ, Verzögerung und Dämpfung;
 EQ: Equalizer; Del: Verzögerungs-Schaltung; Σ : Summierung der Signale; Dreiecke: gesteuerte Dämpfung;
 durchgezogene Linien: Audiosignalweg von links nach rechts; gestrichelte Linien: Datenfluss

Konfiguration kontinuierlich angeglichen. Somit ergibt sich eine sehr zentrale Struktur in Form eines Kontrollalgorithmus. In ihm werden die Zonen-Konfigurationen und die Positionsdaten eingespeist und zu Echtzeit-Parametern für die Module im Audiosignalfluss verarbeitet (Abb. 11). Um Artefakte zu verhindern, müssen die Parameter mindestens 40 mal pro Sekunde angepasst werden.⁵⁸

Dieser Algorithmus benötigt eine hohe Rechenleistung, ist aufwendig zu programmieren und durch die zentrale Struktur sehr übersichtlich, jedoch auch weniger nachvollziehbar in seiner Arbeitsweise.

Durch die kontinuierliche Anpassung des Verzögerungs-Parameters entsteht der Doppler-Effekt (vgl. Kap. 2.3.3). Dieser ruft eine Tonhöenschwankung hervor. Diese ist umso stärker, je schneller der Verzögerungs-Parameter angeglichen wird. Ab wann der Doppler-Effekt wahrnehmbar ist, schwankt stark mit der Lautheit und der Signalart. Es ist somit bei jedem konkreten Anwendungsfall kritisch zu prüfen, ab wann der Effekt wahrnehmbar wird.

Benutzt man eine lineare Funktion zum Angleichen der Verzögerung über die Zeit, so tritt die Tonhöenschwankung mit Start der Überblendung schlagartig ein und fällt

⁵⁸ René Rodigast, Business Manager am Fraunhofer Institut für digitale Medientechnologie [IDMT] Ilmenau (persönl. Mitteilung, 08.10.18)

ebenso mit dem Ende der Überblendung wieder ab. Dies ermöglicht dem Gehör den direkten Vergleich und macht dadurch die Tonhöenschwankung einfacher wahrnehmbar, als bei einer an- und abschwellenden Tonhöenschwankung. Wenn der Anfang und das Ende der Überblendung flacher gestaltet werden könnte, würde sich der Effekt nur langsam auf- und wieder abbauen und somit weniger wahrnehmbar werden. Das würde eine Schwankung der Verzögerungsgeschwindigkeit hervorrufen, was wiederum zu einem nicht-linearen Bewegungsablauf der virtuellen Schallquelle führen könnte. Ob das als störend aufgefasst werden kann, gilt es zu überprüfen.

Wird der Effekt wahrnehmbar, so muss schlussendlich die Verzögerungsgeschwindigkeit an der Wahrnehmbarkeitsschwelle begrenzt werden. Das hätte zur Folge, dass sich die virtuellen Schallquellen nur begrenzt schnell bewegen könnten.⁵⁹

Desweiteren erfolgt durch die kontinuierliche Anpassung des Verzögerungs-Parameters auch eine kontinuierliche Verschiebung der Kammfilter-Interferenzen. Dies stellt jedoch nach der Einschätzung von BÖSCH und RODIGAST in der Praxis keine Probleme dar.⁶⁰

3.5.2.3 Kombination der Algorithmen

Es wurde festgestellt, dass der Algorithmus der Konfigurations-Mischung Kammfilter im Signalweg entstehen lässt. Diese sind deutlich wahrnehmbar. Ihre Ausprägung ist jedoch unabhängig von der Geschwindigkeit der Überblendung. Umso schneller die Überblendung geschieht, desto weniger Zeit hat das Gehör, einen Klangunterschied festzustellen. Deswegen führt dieser Algorithmus zum besseren Ergebnis bei schnellen Überblendungen.

Im Gegensatz dazu lässt der Algorithmus der Konfigurations-Angleichung bei langsamen Überblendungen keine wahrnehmbaren Verzerrungen entstehen, jedoch bei schnellen Überblendungen sehr deutliche. Somit ist dieser Algorithmus die Wahl bei langsamen Überblendungen.

Auf diese Weise können sich die Schwachstellen beider Algorithmen gegenseitig kompensieren. Dafür müssen die beiden Algorithmen für die Verzögerung parallel im Audio-Signalfuss stehen. Je nach Geschwindigkeit der Überblendung kann dann zwischen ihnen umgeschaltet werden (Abb. 12). Diese Umschaltung darf aber nicht hart,

59 Vgl. FH-G, 2009, S. 13

60 Alwin Bösch, Tonmeister Seebühne Bregenz (persönl. Mitteilung, 14.11.18); René Rodigast, Business Manager am Fraunhofer IDMT Ilmenau (persönl. Mitteilung, 08.10.18)

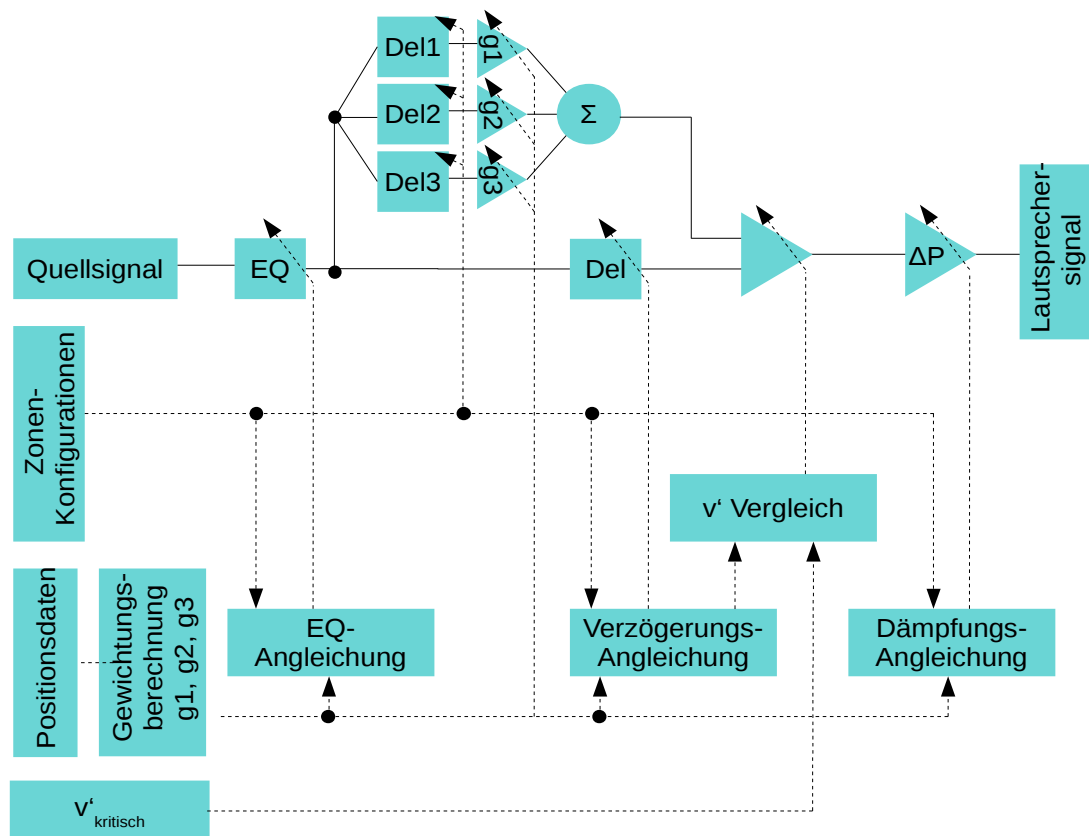


Abbildung 12: Kombination der Algorithmen der Konfigurations-Mischung und der Konfigurations-Angleichung zur Kompensation des Kammfilter- und Doppler-Effektes

von einem Sample auf das andere, erfolgen, da dadurch Artefakte entstehen würden. Es muss zwischen ihnen eine Überblendung erfolgen, was durch einen einfachen Mischer realisiert werden kann.

Diese Umschaltung kann über einen konstanten Zeitwert erfolgen. Er muss kurz genug sein, um bei sehr schnellen Überblendungen rechtzeitig den Algorithmus zu wechseln, bevor Doppler-Verzerrungen wahrnehmbar sind. Und er muss gerade so lang sein, dass keine Artefakte entstehen.

Der Punkt, an dem zwischen den Algorithmen umgeschaltet wird, ist definiert durch die Wahrnehmbarkeitsschwelle des Doppler-Verzerrungsmaßes (vgl. Kap. 2.3.3 Doppler-Effekt). Wie schon in diesem Kapitel beschrieben, sollte diese Schwelle immer auf den konkreten Beschallungsfall geprüft werden, da sie mit der Lautheit und Signalart stark schwankt. Somit sollte im Algorithmus die Möglichkeit bestehen, diesen Wert durch den Nutzer anzupassen.

Ist ermittelt worden, ab welcher Verzögerungsgeschwindigkeit der Effekt wahrnehmbar

ist, kann diese als kritische Verzögerungsgeschwindigkeit in den Algorithmus eingegeben werden.

Der Algorithmus muss dann die Echtzeit-Verzögerungsgeschwindigkeit kontinuierlich berechnen und diesen Wert mit der kritischen Verzögerungsgeschwindigkeit vergleichen. Überschreitet die Echtzeit-Verzögerungsgeschwindigkeit den Wert der kritischen Verzögerungsgeschwindigkeit, so muss vom Algorithmus der Konfigurations-Angleichung auf den der Konfigurations-Mischung umgeschaltet werden. Unterschreitet sie den kritischen Wert, muss umgekehrt geschaltet werden.⁶¹

3.5.3 Anwendung

Mehrkanalige Verfahren mit Verzögerungssystemen sind vor allem im Theater- und Taugungsbereich anzutreffen. In beiden Bereichen ist eine gute Sprachverständlichkeit und - insbesondere bei großen Bühnen - ein akustischer Überblick nötig. Beispiele hierfür ist der Einsatz des DSS bei den *Domstufenfestspielen* in Erfurt, der *Seebühne Bregenz*, und dem *Sommerspektakel* des Theaterhauses Jena.

Mit Einzug von Algorithmen zur Konfigurations-Berechnung wird das DSS auch im Konzertbereich angewandt. Durch die Algorithmen kann es auch bei zeitlich engen Produktionen eingesetzt werden. Das macht den Einsatz auch bei einmaligen Veranstaltungen rentabel.⁶²

Der Autor sieht ein Problem des DSS in der Abbildung von ausgedehnten, bzw. stereofonen Schallquellen, wie es auch in der Schallfeldsynthese besteht (vgl. Kap. 3.6.1.1). Das z. B. durch einen Chor hervorgerufene Hörereignis besteht aus vielen räumlich differenzierten Schallquellen. Dieses Hörereignis kann nicht durch eine virtuelle Schallquelle erzeugt werden. Die einzelnen Stimmen bzw. Stimmgruppen könnten einzeln mikrofoniert und über getrennte Zonen wiedergegeben werden. Doch durch das relativ grobe Raster würde dabei wohl eher ein schlechteres Ergebnis zu erwarten sein als bei der Schallfeldsynthese (SFS). Schon bei der SFS könne jedoch kein besseres Ergebnis erreichbar sein, als durch eine stereofonen Wiedergabe.⁶³

Es stellt sich hier die Frage wie stereofone Signale über das DSS wiedergegeben werden können. Es wird hier davon ausgegangen, dass die stereofonen Signale Kohärenz

61 Vgl. FH-G, 2009, S. 13 ff.

62 René Rodigast, Business Manager am Fraunhofer IDMT Ilmenau (persönl. Mitteilung, 08.10.18)

63 Vgl. Theile: Tonaufnahme und Tonwiedergabe. In: Dickreiter et al. (Hg.), 2014, S.357

in den Kanälen aufweisen. So z. B. ein mittiges Signal in einer zweikanaligen Stereofonie-Aufnahme. Dieses mittige Signal ist dann nämlich in beiden stereofonen Kanälen vertreten. Bei der Wiedergabe über zwei benachbarte Zonen entsteht dadurch ein Kammfilter-Effekt im Signalweg der Lautsprecher, welche von beiden Zonen mit unterschiedlicher Verzögerung angesteuert werden (vgl. Kap. 3.5.2.1 Algorithmus der Konfigurations-Mischung). Somit sollten stereofone Signale entweder nur gemischt monophon über eine Zone übertragen werden, oder stereophon über zwei Zonen die nicht die selben Lautsprecher mit unterschiedlicher Verzögerungs-Konfiguration nutzen.

Im Folgenden sind die Vor- und Nachteile des DSS zusammengefasst.

Vorteile	Nachteile
<ul style="list-style-type: none"> • Flexibler Eingriff in die Einrichtung möglich • Ausdehnungs- und Klanggestaltung der Zonen unabhängig von der Versorgung des Publikums mit gleichmäßigem Schalldruckpegel einrichtbar • Relativ* geringer Aufwand an Material und Rechenleistung 	<ul style="list-style-type: none"> • Positionierung der Objekte in Zonen-Raster • Ideale Hörereignisbildung besteht nur, wenn Objekt sich in Zone befindet • Hohes Know-How in der Einrichtung notwendig, wenn automatische Einrichtung nicht zur Verfügung steht bzw. korrigiert werden muss • Abbildung ausgedehnter Schallquellen nicht möglich

Tabelle 2: Deltastereofonie: Vor- und Nachteile

3.6 Schallfeldsynthese

Die Schallfeldsynthese (SFS) hat das Ziel, ein natürliches Schallfeld zu synthetisieren. Durch dessen Nachbildung wird das psychoakustische Verhalten des Menschen auf natürliche Weise getriggert, wie es auch bei einem natürlichem Schallfeld der Fall wäre. Somit werden nicht die psychoakustischen Mechanismen des Menschen ausgenutzt, um virtuelle Schallquellen zu erzeugen. Das Hörereignis einer virtuellen Schallquelle entsteht auf der natürlichen Funktion der Schallwahrnehmung eines synthetisierten Schallfeldes. Dadurch ergibt sich eine stabile Lokalisation der erzeugten virtuellen Schallquellen, unabhängig davon, wo man sich im Wiedergaberaum befindet. Sie ist die einzige Wiedergabetechnik, mit der man eine virtuelle Schallquelle vor der Lautsprecheraufstellung, also im Raum, positionieren kann.

Die Grundlage für dieses Konzept legt die Wellenfeldsynthese (WFS). Diese hat jedoch

* Relativ bedeutet hier, mit der Schallfeldsynthese verglichen.

durch ihren hohen Aufwand kaum einen Weg aus dem Laborstadium in die Veranstaltungstechnik gefunden. Auf der Grundlage der WFS wurde die Local Wave Field Synthesis (LWFS) entwickelt. Sie scheint den Schritt der SFS in die Beschallungstechnik greifbar zu machen. Sie verringert den Aufwand, schränkt jedoch auch den Publikumsbereich ein, in dem eine korrekte Lokalisation möglich ist, da sie die SFS auf einen kleineren Bereich optimiert. Die SFS soll hier den Überbegriff über die beiden verwandten Verfahren darstellen.⁶⁴

3.6.1 Theorie der Wellenfeldsynthese

Die Synthetisierung basiert physikalisch auf dem Huygens-Fresnel-Prinzip. Danach kann jede Form einer Wellenfront als Summe von unendlich vielen Elementarwellen betrachtet werden, die sich kugelförmig ausbreiten. Abbildung 13 stellt den Sachverhalt dar.

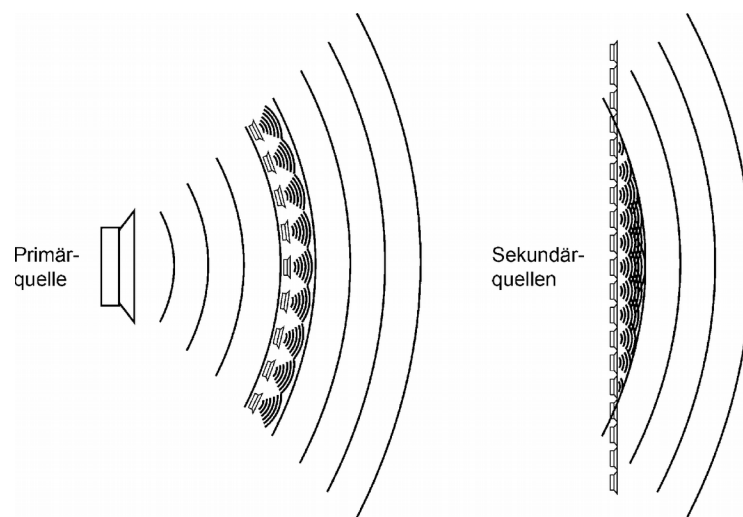


Abbildung 13: Huygens-Fresnel-Prinzip

Nachbildung des Wellenfeldes einer Primärquelle durch viele einzelne Sekundärquellen

(Slavik & Weinzierl: Wiedergabeverfahren. In: Weinzierl (Hg.), 2008, S.666)

Mathematisch stellt das Kirchhoff-Helmholtz-Integral den Zusammenhang zwischen dem Schallfeld in einem Volumen und den Zuständen an dessen Oberfläche dar. So kann mit ihm für jeden Punkt im Volumen der Schalldruck berechnet werden, wenn der Schalldruck und die Schallschnelle auf dessen Oberfläche bekannt sind.

Will man ein Audio-Objekt positionieren, so können aus dem Audiosignal, unter Angabe der Position im Raum, die Lautsprechersignale berechnet werden. Diese rufen an der

64 Winter, Hahn und Spors, 2017, S.1-4

Oberfläche des Volumens den Schalldruck und die Schallschnelle hervor, welche eine reale Quelle an der Position des Audio-Objektes hervorrufen würde. Somit ruft keine Schallquelle ein Wellenfeld hervor, sondern das synthetisierte Wellenfeld ruft eine virtuelle Schallquelle hervor.⁶⁵

Vereinfacht gesagt, berechnet der Algorithmus für jede Lautsprecherposition die Amplitude und die Phase, welche durch eine reale Schallquelle hervorgerufen werden würde.⁶⁶

3.6.1.1 Grenzen in der Praxis

In der Praxis stellen sich der Theorie jedoch Grenzen der Realisierung entgegen. Vier davon sollen hier erläutert werden:

1. *Spatial Aliasing*

Der Einsatz unendlich vieler Lautsprecher, um unendlich viele Elementarwellen zu bilden, ist nicht umsetzbar. Da Lautsprecher immer einen diskreten Abstand zueinander haben, kann nie ein perfektes Wellenfeld synthetisiert werden.

Bis zu der Aliasing-Frequenz ist die korrekte Synthetisierung eines Schallfeldes trotzdem möglich. Diese ist abhängig vom Lautsprecherabstand. Oberhalb dieser Frequenz treten räumliche und spektrale Fehler auf. Die spektralen Fehler äußern sich in einem Kammfilter-Effekt (vgl. Kap. 2.3.2) oberhalb der Aliasing-Frequenz und in einer Anhebung des Pegels im Frequenzbereich unterhalb der Aliasingfrequenz. Letzteres kann durch einen Hochpassfilter entzerrt werden.⁶⁷ Der Kammfilter-Effekt kann nur auf einen begrenzten räumlichen Bereich reduziert werden (vgl. Kap. 3.6.2).

Räumliche Fehler bedeuten, dass nur der Frequenzbereich unterhalb der Aliasing-Frequenz genutzt werden kann, um virtuelle Schallquellen zu erzeugen und zu lokalisieren.⁶⁸

Diese Frequenz kann nach folgender Formel abgeschätzt werden. Genau ist sie jedoch davon abhängig, wie sich Hörer_in, virtuelle Schallquelle und das Lautsprecher Array zueinander im Raum befinden. Sie ist somit ortsabhängig.

65 Vgl. Slavik & Weinzierl: Wiedergabeverfahren. In: Weinzierl (Hg.), 2008, S.665 ff.

66 Vgl. FH-G, 2008, S.4

67 Vgl. FH-G, 2010, S.4

68 Vgl. Theile: Tonaufnahme und Tonwiedergabe. In: Dickreiter et al. (Hg.), 2014, S.357 ff.

$$f_{\text{Aliasing}} = \frac{c}{2 \Delta x} \quad (3.6-1)$$

f_{Aliasing} : Aliasing-Frequenz[Hz], c : Schallgeschwindigkeit [m/s], Δx : Lautsprecherabstand [m]

Nach dieser Formel ergibt sich für einen üblichen Abstand von 20 cm eine Grenzfrequenz von ca. 850 Hz. Das ermöglicht laut SLAVIK UND WEINZIERL eine ausreichende Lokalisation von „Signale[n] mit üblicher spektraler Zusammensetzung (Sprache, Musik)“. ⁶⁹

2. Spatial Truncation

Kann die Lautsprecheranordnung den Publikumsbereich nicht umschließen, so besitzt es eine begrenzte Länge, wodurch Beugungs-Effekte an den Arrayrändern auftreten. Diese Effekte bewirken Echobildung und Klangverfärbungen. Die dafür bekannten Methoden zur Kompensation verkleinern jedoch den Bereich, in dem das Schallfeld korrekt synthetisiert werden kann. ⁷⁰ Somit muss das Array immer über den Publikumsbereich hinaus ragen, wenn dieser vollständig korrekt versorgt werden soll. ⁷¹

3. Spatial Interference

In der Theorie wird von der Anwendung im Freifeld ausgegangen. Wird nun das System aber z. B. in einem geschlossenen Raum angewandt, so wird die Synthese des Schallfeldes durch die dabei auftretenden Reflexionen an den Wänden gestört. Das wirkt sich negativ auf „die Wahrnehmung von Entfernungen, der räumlichen Tiefe sowie des Raumeindrucks“ ⁷² aus. So muss der Wiedergaberaum möglichst reflexionsarm sein. ⁷³

Können jedoch Reflexionen im Raum nicht vermieden werden, so gibt es auch Verfahren, durch die das WFS-System diese Reflexionen dämpfen kann. ⁷⁴

4. Abbildung ausgedehnter Schallquellen (vgl. Kap. 3.5.3)

Ausgedehnte Schallquellen, welche sich aus vielen einzelnen Teil-Schallquellen zusammensetzen (z. B. ein Chor), können nicht in Form einer virtuellen Schallquelle abgebildet werden (vgl. Kap. 3.5.3). Ist die Übertragung aller einzelnen Teil-Quellen mög-

69 Vgl. Slavik & Weinzierl: Wiedergabeverfahren. In: Weinzierl (Hg.), 2008, S.669

70 Vgl. Theile: Tonaufnahme und Tonwiedergabe. In: Dickreiter et al. (Hg.), 2014, S.357

71 René Rodigast, Business Manager am Fraunhofer IDMT Ilmenau (persönl. Mitteilung, 08.10.18)

72 Theile: Tonaufnahme und Tonwiedergabe. In: Dickreiter et al. (Hg.), 2014, S.357

73 Vgl. Ebd.

74 Vgl. FH-G, 2006, S.19 ff.

lich, so könnten diese zwar als einzelne virtuelle Schallquellen abgebildet werden, jedoch „würde [die Qualität] im Vergleich zu einer stereofonen Aufnahme nicht wachsen“⁷⁵. Außerdem wäre dafür ein hoher Aufwand in Form von Übertragungskanälen und Rechenleistung notwendig.⁷⁶

3.6.2 Local Wave Field Synthesis (LWFS)

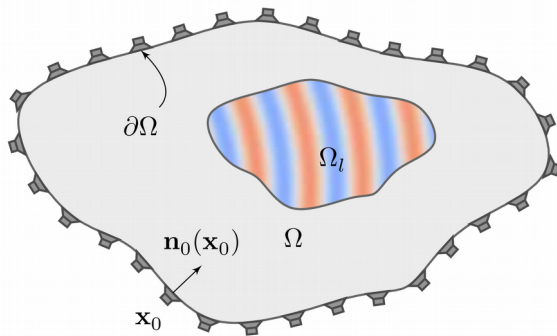


Abbildung 14: LWFS-Bereich (Ω_l) ist ein Teilbereich der von den Lautsprechern umschlossenen Fläche (Ω)

(Winter et al. 2017, S.2)

Die LWFS ist eine in der letzten Dekade entwickelte Technik. Sie optimiert die Technik der WFS auf einen Teil des Hörbereiches (vgl. Abb. 14). So erreicht sie in diesem eine genauere räumliche Auflösung des Schallfeldes und ein gleichmäßigeres Spektrum (Abb. 15). Das hier dargestellte Spektrum kann jedoch auch nur an einem optimalen Punkt im LWFS-Bereich hergestellt werden. An diesem Punkt kommen die Wellenfronten aller Lautsprecher gleichzeitig an. Da kein Zeitversatz an diesem Punkt herrscht entsteht auch kein Kammfilter-Effekt. Er tritt dann trotzdem mit steigender Entfernung von diesem Punkt wieder auf, jedoch trotzdem schwächer als bei herkömmlicher WFS.

Das Spatial Aliasing kann durch die Begrenzung der räumlichen Ausdehnung des zu synthetisierenden Schallfeldes reduziert werden. Der Fokus liegt insbesondere auf der korrekten Synthese der ersten Wellenfront, da diese für die Richtungswahrnehmung entscheidend ist (vgl. Kap. 2.2.2 Haas-Effekt).

Durch die Reduzierung des Spatial Aliasing könnten größere Lautsprecher-Abstände realisiert werden, ohne dass die Bildung von lokalisierbaren Hörereignissen darunter stark leidet. Das schafft jedoch auch eine verkleinerte, priorisierte Zuhörer_innen-Fläche. Diese ist jedoch nicht mit dem „Sweet Spot“ der stereofonen Beschallung zu ver-

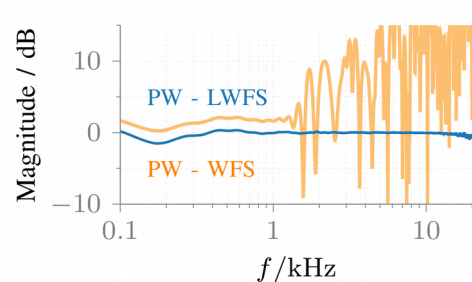


Abbildung 15: Vergleich Spektrum WFS - LWFS

(modifiziert nach Winter et al. 2017, S.5)

75 Theile: Tonaufnahme und Tonwiedergabe. In: Dickreiter et al. (Hg.), 2014, S.357

76 Vgl. Ebd.

gleichen. In diesem Fall handelt es sich eher um eine „Sweet Area“.⁷⁷

3.6.3 Aufbau und Gestaltung

In allen Richtungen, in denen virtuellen Schallquellen lokalisiert werden sollen, müssen die Lautsprecher angeordnet werden. So reicht eine linienförmige Anordnung für eine korrekte Richtungs- und Tiefen-Lokalisation. Wird jedoch ein 3D-Hörerlebnis gewünscht, so müssen die Lautsprecher halbkugelförmig um den Publikumsbereich angeordnet werden. Je nach Aufbau müssen die exakten Lautsprecherpositionen in das zentrale SFS-Modul eingegeben werden.

An diesem Modul liegen auch die Audio-Quellsignale an. Die SFS ist grundlegend ein objektbasiertes Wiedergabeverfahren. Dadurch sind den Audio-Quellsignalen Metadaten zugeordnet, die sie in ihrer Position und Ausdehnung definieren. Die Position beschreibt die Lage des Ausgangspunktes der virtuellen Schallquelle. Die Ausdehnung beschreibt die Form der Wellenfront, die sie aussendet.⁷⁸

So kann von einer Punkt- bis zu einer ebenen Welle die Form der Wellenfront stufenlos gewählt werden. Die Punktquelle entspricht der kleinsten Ausdehnung und kann am genauesten lokalisiert werden. Sie breitet sich kugelförmig von der Ursprungsposition in alle Richtungen aus. Dadurch besitzt sie einen Pegelabfall von 6 dB pro Entfernungsverdopplung (vgl. Kap. 2.1.4 Entfernungshören). Die ebene Welle besitzt parallele Wellenfronten. Diese lassen das Hörereignis breit ausgedehnt wirken. Dadurch lässt sie sich nicht konkret lokalisieren. Nur die Richtung aus der sie strahlt, kann vom Gehör erfasst werden. Sie nimmt in der Theorie bei Entfernungszunahme im Pegel nicht ab. In der Praxis ergibt sich je nach Lautsprecheranordnung ein Pegelabfall von bis zu 3 dB pro Entfernungsverdopplung.⁷⁹

In die Berechnung der Ausgangssignale kann davon abgesehen nicht eingegriffen werden. Das ist dahingehend problematisch, weil bei mit Schalldruckpegel unterversorgten Gebieten im Publikumsbereich keine Anpassung erfolgen kann, außer durch die Einstellung der Ausdehnung. Dies schränkt jedoch die gestalterische Freiheit ein. Das Wellenfeld, das die virtuelle Quelle an ihrer Position mit ihrer Ausdehnung hervorruft, muss so angenommen werden, wie der Algorithmus es berechnet.⁸⁰

77 Vgl. Winter et al. 2017, S.1-5

78 René Rodigast, Business Manager am Fraunhofer IDMT Ilmenau (persönl. Mitteilung, 08.10.18)

79 Vgl. Theile: Tonaufnahme und Tonwiedergabe. In: Dickreiter et al. (Hg.), 2014, S.357

80 Alwin Bösch, Tomeister Seebühne Bregenz (persönl. Mitteilung, 14.11.18)

3.6.4 Verzerrungen bei der Bewegung virtueller Quellen

Bei Objektbewegung verschiebt sich die Aliasing-Frequenz. Mit ihr werden die Kammfilter und die Betonung der tiefen Frequenzen (vgl. Kap. 3.6.1.1) verschoben. Das führt zu Klangverfärbungen.

Die Entzerrungsmethode durch den Hochpass muss somit dynamisch angewandt werden. Die Fraunhofer-Gesellschaft hat dafür bereits Methoden entwickelt.⁸¹

Durch die Bewegung verändern sich auch die Laufzeiten von der Objektposition zu den Lautsprecher-Positionen. Um die Bewegung flüssig zu gestalten, müssen diese Laufzeiten kontinuierlich angepasst werden. Auch hier wird der Doppler-Effekt bei schnellen Objektbewegungen wahrnehmbar. Die Fraunhofer-Gesellschaft hat dafür Methoden entwickelt, jedoch sind sie dem Autor nicht bekannt.⁸² Der Autor vermutet, dass ein Algorithmus ähnlich dem der Deltastereofonie in Kapitel 3.5.2.3 verwendet wird.

3.6.5 Anwendung

Anwendung findet die SFS unter anderem in den Kinos *Lindenlichtspielen* in Ilmenau, *Cinémathèque française* in Paris und dem *Erlebniskino* in der Bavaria Filmstadt bei München. Auch in den Planetarien in Jena und Hamburg ist das System im Einsatz. Im Rahmen der Forschung, aber auch für öffentliche Veranstaltungen und Vorlesungen ist in der Technischen Universität Berlin und der Fachhochschule Düsseldorf ebenfalls ein SFS-System installiert. Außerdem ist sie in Oper- und Theaterbetrieben im Einsatz, wie im *Opernhaus Zürich* und der *Seebühne Bregenz*.

Aus wirtschaftlichen, sowie bühnentechnischen Gründen hat sich die WFS jedoch nicht oft in der Beschallungstechnik durchgesetzt. Sie ist wirtschaftlich durch ihren hohen Aufwand selten rentabel und durch die engen, möglichst regelmäßigen Lautsprecherabstände ist sie nur schwer in ein Bühnenbild zu integrieren.⁸³

Um die SFS in die Veranstaltungsbranche zu bringen, haben die Fraunhofer Gesellschaft und die daraus hervorgegangene IOSONO GmbH Möglichkeiten gefunden, wie die SFS auf Lautsprecherabstände größer als zwei Meter angewandt werden kann. Dabei handelt es sich laut Stephan Mauer, Head of Professional Audio bei Iosono,

81 Vgl. FH-G, 2010, S.7

82 René Rodigast, Business Manager am Fraunhofer IDMT Ilmenau (persönl. Mitteilung, 08.10.18)

83 Vgl. Slavik & Weinzierl: Wiedergabeverfahren. In: Weinzierl (Hg.), 2008, S.670

“physikalisch betrachtet, [um] keine korrekte Wellenfeldsynthese“⁸⁴.

Die großen Lautsprecherabstände in deren Systemen verursachen lediglich eine größere Ausdehnung der virtuellen Schallquellen und damit eine ungenauere Lokalisierbarkeit. So wird die mathematische Grundlage der WFS verwendet, um die Lautsprecher-signale zu berechnen, jedoch können durch die großen Lautsprecherabstände keine „komplexen Schallfelder“⁸⁵ erzeugt werden. Die auf der WFS basierenden „Algorithmen und Systeme [werden] auf die menschliche Wahrnehmung hin optimiert“⁸⁶, sagt Stephan Mauer, und erreichen somit eine stabile Lokalisation, auch bei niedrigen Aliasing-Frequenzen.⁸⁷ Weitere Informationen blieben ihm verschlossen. Der Autor vermutet den Einsatz der LWFS-Technik.

Die folgende Tabelle stellt die Vor- und Nachteile der SFS im Allgemeinen heraus:

Vorteile	Nachteile
<ul style="list-style-type: none"> • Freie Positionierung der virtuellen Quelle möglich, auch vor der Lautsprecheraufstellung • Wenig Aufwand und Know-How in der Einrichtung notwendig – Angabe der Lautsprecherpositionen genügen in der Regel 	<ul style="list-style-type: none"> • Flexible Anpassung der Beschallung an örtliche Gegebenheiten wenig möglich • Punktquellen haben hohen Pegelabfall mit der Entfernung → lokalisierbar, aber schlechte Versorgung des Publikumsbereiches mit gleichmäßigem Schalldruckpegel • Hohe Rechenleistung notwendig • Abbildung von ausgedehnten Schallquellen nicht möglich

Tabelle 3: Schallfeldsynthese: Vor- und Nachteile

3.7 Produkte in der Anwendung

Im folgenden Kapitel sollen Produkte vorgestellt werden, welche die Erzeugung von virtuellen Schallquellen in der Beschallungstechnik ermöglichen. Dabei wurde eine Auswahl getroffen, die möglichst gut die Bandbreite der aktuellen Forschung und Produktentwicklung darstellt.

Das Produkt L-ISA von L-Acoustics und die Produkte der IOSONO GmbH kommen im Vergleich nicht vor, sind jedoch relevante Produkte auf dem Markt. Sie wurden ausge-

84 Zahn, n.d., Immersive Sound: Raumsound in der Festinstallation

85 René Rodigast, Business Manager am Fraunhofer IDMT Ilmenau (persönl. Mitteilung, 08.10.18)

86 Zahn, n.d., Immersive Sound: Raumsound in der Festinstallation

87 René Rodigast, Business Manager am Fraunhofer IDMT Ilmenau (persönl. Mitteilung, 08.10.18)

schlossen, da L-ISA mit Soundscape vergleichbar ist und die Produkte der IOSONO GmbH mit der Spatial Sound Wave Technologie.

Im Folgenden soll der Fokus darauf liegen, wie die Produkte Lautsprecher-signale erzeugen, um virtuelle Schallquellen hervorzurufen. Qualitativ kann hier jedoch nur bewertet werden, was die Hersteller über ihr System preisgeben und wie groß die Möglichkeiten sind, die Systeme an örtliche Gegebenheiten anzupassen.

Der Workflow der Produkte ist für die Anwendung in der Praxis äußerst relevant, jedoch soll er hier weniger beleuchtet werden. Er kann auch gut über die Dokumentationen der Hersteller_innen nachvollzogen werden ist.

Im Anschluss soll eine Übersicht erfolgen, in der die Systeme anhand von technischen Daten und dem Listenpreis verglichen werden.

3.7.1 d&b: Soundscape

Soundscape ist der Überbegriff für die Entwicklung von oben beschriebenen Systemen im Hause d&b. Er versammelt die Produkte DS100, die DSP*-Hardware, *en Scene*, die Software für objektbasierte Audiowiedergabe, und *en Space*, die Software zur Erzeugung von virtueller Akustik**, unter sich.

Zur Erzeugung einer virtuellen Schallquelle wird ausschließlich ein Matrixmischer*** im DS100 verwendet, an dessen Crosspoints sich Dämpfung und Verzögerungszeit einstellen lassen. Diese Einstellung kann manuell erfolgen, ist dann jedoch auch nur kanalbasiert anwendbar. Erst durch *en Scene* ist eine objektbasierte Audiowiedergabe möglich. In dieser Software können die Metadaten der Audio-Objekte empfangen oder selbst erzeugt und in Szenen abgespeichert werden. Diese umfassen Position und Ausdehnung des Objektes.

Anhand der Objektausdehnung und der Lautsprecher- und Objektposition errechnet ein Algorithmus in Echtzeit die Parameter für die Crosspoints eines Inputsignales. Dabei arbeitet er mit den geometrischen Daten, sowie mit der „psychoakustischen Erwartungshaltung an natürliche Schallereignisse“⁸⁸, was auf das Konzept der Deltastereofo-

88 Matthias Wehde, Ansprechpartner Education & Application Support d&b (persönl. Mitteilung, 03.12.18)

* DSP steht für Digital Sound Processor. Auf der DSP-Hardware läuft hier die digitale Audioverarbeitung, sowie alle anderen Algorithmen ab, welche zur Erzeugung und Bewegung virtueller Schallquellen nötig sind.

** Virtuelle Akustik beschreibt die Synthetisierung einer künstlichen akustischen Umgebung im Publikumsbereich.

*** Ein Matrixmischer ist hier eine Audiosignal-Schaltung bei der mehrere Inputkanäle auf mehrere Outputkanäle gemischt werden können. Die Crosspoints beschreiben die Verbindungsstelle der Input- zu den Outputkanälen. An ihnen können Dämpfung und Verzögerungszeit des Inputkanals auf den Outputkanal eingestellt werden.

nie hinweist (vgl. Kap. 3.5). Nur gibt es in diesem Fall keine fest eingerichteten Zonen. Es erfolgt die kontinuierliche Anpassung der Parameter einzelner Objekte nach den Regeln der Deltastereofonie. Bei schnellen Objektbewegungen tritt ein wahrnehmbarer Doppler-Effekt auf, was auf den Algorithmus in Kapitel 3.5.2.2 hinweist. Eine Masterarbeit über dieses Thema wurde in der Bearbeitungszeit dieser Bachelorarbeit bei d&b geschrieben, befindet sich jedoch unter Verschluss.

Die Positionierung der virtuellen Schallquelle kann auch ausschließlich auf durch Dämpfungsberechnung erfolgen (vgl. Kap. 3.4 Mehrkanalige Intensitätsverfahren). Das bringt eine Lösung für den Doppler-Effekt bei schnellen Bewegungen und ebenso für die Abbildung von ausgedehnten Schallquellen (vgl. Kap. 3.5.3).⁸⁹

Soundscape ist ein sehr niederschwelliges System. Es wird wenig Zeit zur Einrichtung benötigt und kann bei Produktionen auch schon im Voraus konfiguriert werden. Benutzt man es objektbasiert via *en Scene* ist es eine Blackbox, in deren Berechnungen nicht eingegriffen werden kann. Somit ergibt sich immer die Gefahr, dass das System in bestimmten Situationen nicht klingt und nicht angepasst werden kann.

3.7.2 Out board: TiMax SoundHub

Der *TiMax SoundHub* erzeugt virtuelle Schallquellen in einem Zonen-Raster durch Dämpfungs- und Verzögerungs-Parameter an den Crosspoints eines Matrixmischers. Es handelt sich hier also hier um ein System der Deltastereofonie.

Nach Eingabe der Lautsprecherpositionen und Angabe über die Zonenpositionen und Zonenausdehnungen werden unter Beachtung der Lufttemperatur die Zonen-Konfigurationen berechnet. Diese umfassen hier Dämpfung und Verzögerung. Nach der Berechnung können manuell die Konfigurationen der Zonen angepasst werden. Die Berechnung hat mit der aktuellen Version der Hardware eine Qualität erreicht, die es jedoch kaum noch erfordert, die Konfigurationen zu korrigieren. Des Weiteren kann die Zonen-Konfiguration durch einen EQ für die gesamte Zone erweitert werden.⁹⁰

Der *TiMax SoundHub* ist in verschiedenen Versionen erhältlich. Die R-Version ist eine DSP-Hardware auf Basis von kanalbasierter Audiowiedergabe. Die S-Version ermöglicht ein Upgrade der R-Version zu einem objektbasierten System. Die M-Version ist

89 Matthias Wehde, Ansprechpartner Education & Application Support d&b (persönl. Mitteilung, 03.12.18)

90 Omar Samhoun, Projekt-Manager Neumann&Müller Dresden (persönl. Mitteilung, 20.11.18)

eine DSP-Hardware zur objektbasierten Audioplayback-Wiedergabe.⁹¹

Der *TiMax SoundHub* ist ebenso niederschwellig wie *Soundscape*, besitzt jedoch mehr Stellschrauben in der Einrichtung. Durch diese behält der_ die erfahrene Tonmeister_in immer noch die volle Kontrolle über die Zonen-Konfigurationen und kann manuell die Beschallung auf die örtlichen Umstände anpassen (vgl. Kap. 3.5.1).

3.7.3 Müller BBM Group: Vivace

Die Müller BBM Group setzt je nach Anwendungszweck und Budget ein *Vivace*-System auf Anfrage zusammen. Mit dem Budget steigt die zur Verfügung stehende Rechenleistung und damit auch die mögliche Komplexität der Algorithmen. Das System ist neben der Erzeugung virtueller Schallquellen ebenso ein Produkt zur Erzeugung virtueller Akustik.

Auf Grundlage der Deltastereofonie ruft das System virtuelle Schallquellen hervor. Durch Eingabe der Lautsprecher- und Zonenpositionen errechnet das System rein geometrisch eine grobe Zonen-Konfiguration für Dämpfung und Verzögerung. Diese können danach manuell angepasst werden. Die Berechnung stellt hier nur eine Hilfe dar.

Zusätzlich können noch EQs für jedes Objekt, jede Zone und jeden Lautsprecher eingestellt werden. Aktuell ist auch geplant, ein individuelles EQ-Modul für jeden Lautsprecherkanal pro Zone bereitzustellen, das automatisiert den Signalfluss filtern soll.

Bei geringer zur Verfügung stehender Rechenleistung wird für Objektbewegungen der Algorithmus der Konfigurations-Mischung (vgl. Kap. 3.5.2.1) angewandt. Steht jedoch genug Rechenleistung zur Verfügung, wird der Algorithmus der Konfigurations-Angleichung angewandt (vgl. Kap. 3.5.2.2). Bei Letzterem wird eine Maskierung des Doppler-Effektes vorgenommen, sodass schnelle Objektbewegungen verzerrungsfrei möglich sind. Wie die Maskierung erfolgt, blieb dem Autor verschlossen.⁹²

Vivace gibt eine Hilfestellung für die Einrichtung des Systems, welche jedoch mit dem Gehör nachjustiert werden muss. Dadurch sind mehr Kenntnisse in der Benutzung notwendig als bei den beiden bisherigen Produkten. Dafür behält man auch hier die volle Kontrolle über die Zonen-Konfigurationen.

91 Matthias Ziegenberg, Ansprechpartner Pro Audio-Technik Limited (persönl. Mitteilung, 30.01.2019)

92 Gunther Engel, Projektleiter Müller BBM GmbH (persönl. Mitteilung, 26.11.18)

3.7.4 Fraunhofer IDMT: Richtungsmischer (Rimi)

Der *Rimi* wurde speziell für die Bregenzer Seebühne vom Fraunhofer IDMT in Ilmenau entwickelt. Seine Technologie wurde für keinen Anbieter auf dem Markt lizenziert und kommt somit auch nicht als Produkt auf diesem vor.

Das System basiert auf der Deltastereofonie und arbeitet mit einem Raster aus Zonen, zwischen denen überblendet werden kann. Dabei besitzt man alle Konfigurations-Möglichkeiten, die in Kapitel 3.5.1 beschrieben sind. Somit bietet er als einziges Produkt in diesem Vergleich, alle beschriebenen Möglichkeiten für den die Nutzer_in, um virtuelle Schallquellen in Form von Zonen zu gestalten. Besonders ist auch die Möglichkeit, mehrere Zonen am selben Ort gestalten zu können. Das kann nützlich sein, um z. B. bei Gesangsdarbietung eines_r Schauspieler_in eine Zone voluminöser zu gestalten, als sie im sonstigen Schauspiel am selben Ort ist.

Ein Algorithmus zur automatischen Berechnung der Dämpfungs- und Verzögerungsparameter der Zonen wurde zwar entwickelt, wird jedoch von den Tonmeistern nicht benutzt. Diese sehen ihn als doppelten Aufwand in der Einmessung, da erst alle Lautsprecher-Positionen angegeben und zusätzlich korrigiert werden müssen.

Bei Objektbewegung benutzt das System die Kombination der Algorithmen, wie in Kapitel 3.5.2.3 beschrieben. So sind schnelle wie langsame Objektbewegungen ohne wahrnehmbare Verzerrungen möglich.⁹³

Der *Rimi* ist somit das mächtigste Werkzeug in diesem Vergleich zur Umsetzung der Deltastereofonie. Dieses Produkt zu beherrschen benötigt ein sehr hohes Level an Fähigkeiten, da solch eine Vielzahl an Stellschrauben und so wenig Automatismus auch die Gefahr birgt, das System nicht unter Kontrolle zu behalten.

3.7.5 Fraunhofer IDMT: Spatial Sound Wave

Die vom Fraunhofer IDMT entwickelte *Spatial Sound Wave* (SSW) Technologie ist für verschiedene Firmen, wie z.B. Astro Spatial Audio lizenziert und wird durch diese z.B. im Produkt *SARA II* vertrieben.

Das System basiert auf Algorithmen der SFS (vgl. Kap. 3.6). Es ist für relativ große Lautsprecher-Abstände optimiert. Da in der Einrichtung eine „Sweet Area“ angegeben werden muss, liegt die Vermutung nahe, dass die LWFS (vgl. Kap. 3.6.2) angewandt

⁹³ René Rodigast, Business Manager am Fraunhofer IDMT Ilmenau (persönl. Mitteilung, 08.10.18); Alwin Bösch, Tonmeister Seebühne Bregenz (persönl. Mitteilung, 14.11.18)

wird. Dadurch kann der auftretende Kammfilter-Effekt in einem Teilbereich der beschallten Fläche minimiert werden. Die Technologie lässt zu, dass trotz großer Lautsprecher-Abstände virtuelle Schallquellen stabil lokalisiert werden können. Bei Objektbewegung wird der auftretende Doppler-Effekt maskiert.

Das Produkt enthält ein objektbasiertes Programm zur Audioplayback-Wiedergabe und die Möglichkeit zur Erzeugung virtueller Akustik.⁹⁴

Dieses Produkt ist niederschwellig zu bedienen, da es lediglich die Lautsprecher-Abstände als Konfiguration verlangt. In den Algorithmus zur Berechnung der Lautsprechersignale kann jedoch als Nutzer_in nicht eingegriffen werden, was es nicht möglich macht, die Beschallung an örtliche Gegebenheiten bei wechselnden Beschallungsorten anzupassen.

3.7.6 Übersicht

In folgender Tabelle soll eine Übersicht über die in diesem Kapitel beschriebenen Produkte dargestellt werden. Sie soll keinen zusammenfassenden Charakter haben. Vielmehr soll sie anhand von Kategorien, die für Nutzer_innen relevant sind, die Produkte vergleichbar machen.

Die in der Tabelle kursiv geschriebenen Punkte sind von den Erfinder_innen geplante Entwicklungen, die sich während der Schreibphase dieser Arbeit noch nicht in den veröffentlichten Systemen befanden.

94 René Rodigast, Business Manager am Fraunhofer IDMT Ilmenau (persönl. Mitteilung, 08.10.18)

	Soundscap⁹⁵	TiMax⁹⁶	Vivace⁹⁷	Rimi⁹⁸	SSW (SARA II)⁹⁹
Schnittstellen zur Bewegungssteuerung und -kontrolle	<ul style="list-style-type: none"> •GUI (Cues, Touchscreen)* •OSC •Trackingsysteme via OSC 	<ul style="list-style-type: none"> •GUI (Cues, Touchscreen) •OSC •MIDI •GPIO •XML •Trackingsysteme via MIDI 	<ul style="list-style-type: none"> •GUI (Cues, Touchscreen) •OSC •MIDI •MMC •Trackingsysteme 	<ul style="list-style-type: none"> •GUI (Cues) •Desktop •Hardware Controller •Trackingsystem 	<ul style="list-style-type: none"> •GUI (Cues, Touchscreen) •OSC •RS232 •GPIO •Trackingsysteme
Max. Kanäle I/O	64/64	64/64, Kaskadierbar	128/192	64/128	64/128
Mögliche Audioschnittstellen	<ul style="list-style-type: none"> •Dante 	<ul style="list-style-type: none"> •Dante •Analog •AES3 •Cobranet •MADI 	<ul style="list-style-type: none"> •Dante •MADI 	<ul style="list-style-type: none"> •MADI 	<ul style="list-style-type: none"> •Dante •MADI
Latenz	1,5 ms (Dante I/O)	< 2 ms (analog I/O)	< 5 ms (analog I/O)	< 5 ms (analog I/O)	< 5 ms (analog I/O)
Listenpreis	<ul style="list-style-type: none"> •DS100: 19 k€ •en Scene/ en Space: 9 k€ 	<ul style="list-style-type: none"> •R-Version: 12...39 k€ •S-Version: 2...5 k€ •M-Version: 8...23 k€ 	Keine vergleichbare Angabe möglich	Keine vergleichbare Angabe möglich	•40...80 k€

Tabelle 4: Übersicht Produkte in der Anwendung

95 [Systemprofil DS100], n.d.; Matthias Wehde, Ansprechpartner Education & Application Support d&b (persönl. Mitteilung, 03.12.18)

96 [TiMax2 Soundhub Brochure], n.d.; Matthias Ziegenberg, Ansprechpartner Pro Audio-Technik Limited (persönl. Mitteilung, 30.01.2019)

97 [Vivace Brochure], n.d.

98 René Rodigast, Business Manager am Fraunhofer IDMT Ilmenau (persönl. Mitteilung, 08.10.18)

99 [Product Information: SARA II Premium Rendering Engine], n.d.

* Das Graphical User Interface (GUI) stellt die Benutzer*innenschnittstelle zwischen Mensch und Maschine dar. Sie besteht, wenn nicht anders ausgewiesen, über eine IP-basierte Netzwerk-Schnittstelle der Produkte.

Cues sind Trigger-Befehle. Sie lösen hier die Veränderung der Objekt-Metadaten aus, können also die Objektbewegung steuern. Für eine Show können in Cues somit feste Bewegungsabläufe programmiert werden.

Touchscreen soll darauf hinweisen, dass über die GUI manuell Objekte bewegt werden können und das für Touchscreens optimiert ist.

4 Fazit

Die Arbeit hat aufgezeigt, dass der aktuelle Stand der Forschung viel Potential in der Beschallungsplanung bietet, um einem Publikum differenziert lokalisierbare Hörereignisse zu ermöglichen.

Dies ist unter Umständen schon durch ganz einfache Mittel bei zentraler Beschallung möglich, wird jedoch aktuell nur selten umgesetzt.

Die Realisierung durch eine dezentrale Beschallung ist dagegen relativ aufwendig, sie bietet jedoch auch alle Möglichkeiten, virtuelle Schallquellen zu erzeugen. Damit ist sie schon jetzt auf jede Veranstaltungsgröße anwendbar. Neben dem Aufwand in der Einrichtung wird eine zusätzliche Arbeitsstelle geschaffen, die ausschließlich für die Objektbewegung während der Veranstaltung zuständig ist.

Die Entwicklungen von Algorithmen zur Berechnung der Lautsprecher-Konfigurationen ermöglichen den Einsatz der Systeme im Tourbetrieb. Sie kürzen die Zeit für die Einrichtung deutlich ab, sodass sie auch in enge Produktionsabläufe passen. Mit dem Fortschritt in der Entwicklung stabiler Trackingsysteme kann den Techniker_innen fortlaufend Arbeit abgenommen werden.

Das nächste Level an Sprachverständlichkeit und Transparenz der Darbietungen ist möglich. Das Publikum kann dadurch ein völlig neues Live-Erlebnis erfahren. Ist das zur Verfügung stellen solch eines Hörerlebnisses bisher noch die Ausnahme, so wird es in Zukunft zu den normalen Erwartungen an eine professionelle Beschallung gehören. Es ist abzusehen, dass die zentrale Aufgabe der Beschallung um den Faktor der Lokalisation virtueller Schallquellen auf lange Sicht hin erweitert werden muss.

Literaturverzeichnis

AHNERT, W. & STEFFEN, F. (1993) Beschallungstechnik: Grundlagen und Praxis. Stuttgart, Leipzig: S. Hirzel Verlag

BLAUERT, J. (1974) Räumliches Hören. Stuttgart: S. Hirzel Verlag

BLAUERT, J. (1997) Räumliches Hören: 2. Nachschrift Neue Ergebnisse und Trends seit 1982. Stuttgart, Leipzig: S. Hirzel Verlag

DICKREITER, M. (2014) Schallquellen. In: M. Dickreiter, V. Dittel, W. Hoeg, M. Wöhr (Hg.), Handbuch der Tonstudioteknik (8., überarbeitete und erweiterte Aufl. S.66-114). Berlin, Boston: De Gruyter.

Dickreiter, M. (2014) Schallwahrnehmung. In: M. Dickreiter, V. Dittel, W. Hoeg, M. Wöhr (Hg.), Handbuch der Tonstudioteknik (8., überarbeitete und erweiterte Aufl. S.115-135). Berlin, Boston: De Gruyter.

ELLERMEIER, W. & HELLBRÜCK, J. (2008) Hören – Psychoakustik – Audiologie. In: S. Weinzierl (Hg.), Handbuch der Audiotechnik (S.41-86). Berlin, Heidelberg: Springer-Verlag. Verfügbar unter: <http://dx.doi.org/10.1007/978-3-540-34301-1>

FRAUNHOFER-GESELLSCHAFT ZUR FÖRDERUNG DER ANGEWANDTEN FORSCHUNG E.V. (2006) Vorrichtung und Verfahren zur Ansteuerung einer Beschallungsanlage und Beschallungsanlage. Erfinder_innen: R. Rodigast & M. Strauss. 08.06.2006. WO 2006/058602 A1

FRAUNHOFER-GESELLSCHAFT ZUR FÖRDERUNG DER ANGEWANDTEN FORSCHUNG E.V. (2008) Vorrichtung und Verfahren zum Ansteuern einer Mehrzahl von Lautsprechern mittels DSP. Erfinder_innen: J. Deguara, K. Reichelt & G. Gatzsche. 13.02.2008. EP 1 782 658 B1

FRAUNHOFER-GESELLSCHAFT ZUR FÖRDERUNG DER ANGEWANDTEN FORSCHUNG E.V. (2009) Vorrichtung und Verfahren zum Steuern einer Mehrzahl von Lautsprechern mittels einer grafischen Benutzerschnittstelle. Erfinder_innen: M. Strauss, M. Beckinger, T. Röder, F. Melchior, G. Gatzsche. & K. Reichelt et. al. 21.01.2009. EP 1 872 620 B1

FRAUNHOFER-GESELLSCHAFT ZUR FÖRDERUNG DER ANGEWANDTEN FORSCHUNG E.V. (2010) Vorrichtung und Verfahren zur Simulation von WFS-Systemen und Kompensation von klangbeeinflussenden WFS-Eigenschaften. Erfinder_innen: J. Deguara & R. Rodigast. 22.12.2010. EP 1 972 181 B1

MAEMPEL, H. J. (2014) Klanggestaltung. In: M. Dickreiter, V. Dittel, W. Hoeg, M. Wöhr (Hg.), Handbuch der Tonstudioteknik (8., überarbeitete und erweiterte Aufl. S.370-421). Berlin, Boston: De Gruyter.

MAEMPEL, H. J., WEINZIERL, S. & KAMINSKI, P (2008) Audiotbearbeitung. In: S. Weinzierl (Hg.), Handbuch der Audioteknik (S.719-784). Berlin, Heidelberg: Springer-Verlag. Verfügbar unter: <http://dx.doi.org/10.1007/978-3-540-34301-1>

MAIER, P. (2008) Studioakustik. In: S. Weinzierl (Hg.), Handbuch der Audioteknik (S.267-312). Berlin, Heidelberg: Springer-Verlag. Verfügbar unter: <http://dx.doi.org/10.1007/978-3-540-34301-1>

[Product Information: SARA II Premium Rendering Engine]. (n.d.) Verfügbar unter: https://www.astroaudio.eu/downloads/pdf/products/product_sheet_sara2_hardware.pdf

SCHRÖDER, E. (1990) Mathematik im Reich der Töne (4. Aufl.). Leipzig: Springer Fachmedien Wiesbaden

SENGPIEL, E. (1995) Die Anfangszeitlücke (Initial Time Delay Gap ITDG) und der Näheeeindruck. Verfügbar unter: <http://www.sengpielaudio.com/DieAnfangszeitlueckeNaeheeindruck.pdf>

SENGPIEL, E. (2000) Kammfiltereffekt bei der Tonaufnahme. Verfügbar unter: <http://www.sengpielaudio.com/KammfiltereffektBeiDerAufnahme.pdf>

SENGPIEL, E. (1999) Selektives Hören oder "intelligentes Hören". Verfügbar unter: <http://www.sengpielaudio.com/SelektivesHoerenOderIntelligentesHoeren.pdf>

[Systemprofil DS100] (n.d.) Abgerufen von: <https://www.dbsoundscape.com/global/de/systemprofil/ds100/>

SLAVIK, K. M. & WEINZIERL, S. (2008). Wiedergabeverfahren. In: S. Weinzierl (Hg.), Handbuch der Audioteknik (S.609-686). Berlin, Heidelberg: Springer-Verlag. Verfügbar unter: <http://dx.doi.org/10.1007/978-3-540-34301-1>

THEILE, G. (2014) Tonaufnahme und Tonwiedergabe. In: M. Dickreiter, V. Dittel, W. Hoeg, M. Wöhr (Hg.), Handbuch der Tonstudioteknik (8., überarbeitete und erweiterte Aufl. S.217-369). Berlin, Boston: De Gruyter.

[TiMax2 Soundhub Brochure] (n.d.) Verfügbar unter: <http://www.outboard.co.uk/assets/timax2-soundhub-uk-brochure-web.pdf>

[Vivace Brochure] (n.d.) Verfügbar unter: https://www.mbbm-aso.com/fileadmin/user_upload/asg/Pictures/Vivace_Seite/Vivace_brochure_en.pdf

WINTER, F., HAHN, N., SPORS, S. (2017) Time-Domain Realisation of Model-Based Rendering for 2.5D Local Wave Field Synthesis Using Spatial Bandwidth-Limitation. Verfügbar unter: <https://www.eurasip.org/Proceedings/Eusipco/Eusipco2017/papers/1570346165.pdf>

ZAHN, T. (n.d.) Immersive Sound: Raumsound in der Festinstallation. Abgerufen von: <https://www.professional-system.de/basics/immersive-sound-raumsound-in-der-festinstallation/> (Letzter Zugriff: 05.01.2019)

Eigenständigkeitserklärung

Hiermit erkläre ich, dass ich die vorliegende Arbeit selbstständig und nur unter Verwendung der angegebenen Literatur und Hilfsmittel angefertigt habe. Stellen, die wörtlich oder sinngemäß aus Quellen entnommen wurden, sind als solche kenntlich gemacht. Diese Arbeit wurde in gleicher oder ähnlicher Form noch keiner anderen Prüfungsbehörde vorgelegt.

Jena, den 06. Februar 2019

Jonas Rein