

Bachelorarbeit im Studiengang Audiovisuelle Medien

3D-Audio für Museen und Ausstellungen

vorgelegt von Daniel Hartstern

Matrikelnr.: 28105

an der Hochschule der Medien Stuttgart

am 30. August 2017

zur Erlangung des akademischen Grades Bachelor of Engineering

Erstprüfer: Prof. Oliver Curdt

Zweitprüfer: Prof. Jens-Helge Hergesell

A. ZUSAMMENFASSUNG

Die vorliegende Arbeit untersucht das Potential von räumlichen Audiowiedergabeverfahren für den Einsatz im Museum. Nachdem die Grundlagen des menschlichen Richtungshörens beschrieben wurden, ermittelt diese Arbeit museale Mechanismen und Zielsetzungen, aufgrund derer der pädagogische Mehrwert für informelle Bildungseinrichtungen durch den Einsatz von Spatial Audio bestimmt wird. Dabei werden Faktoren wie die Institutionsstruktur und Ausstellungsgestaltung berücksichtigt. Anschließend werden einzelne Spatial Audio Verfahren vorgestellt und schließlich der Einsatz von Binauraltechnik in Mixed Reality Anwendungen genauer beleuchtet.

B. ABSTRACT

This bachelor thesis examines the potential of Spatial Audio in a museum context. Background information is provided about the human ability of sound localization. In order to determine the positive effects of Spatial Audio on informal learning, this work investigates the principal mechanisms and objectives of modern museums. The influence of factors such as institutional structures and exhibition design is considered. Subsequently several Spatial Audio techniques are presented, eventually concentrating on binaural sound synthesis for mixed reality applications.

Author Keywords: Spatial Audio; Museum; Audioguide; Mixed Reality; Augmented Reality; Virtual Reality; Binaural Sound Synthesis.

C. EIDESSTATTLICHE ERKLÄRUNG

Hiermit versichere ich, Daniel Hartstern, ehrenwörtlich, dass ich die vorliegende Bachelorarbeit mit dem Titel: „3-D Audio für Museen und Ausstellungen“ selbstständig und ohne fremde Hilfe verfasst und keine anderen als die angegebenen Hilfsmittel benutzt habe. Die Stellen der Arbeit, die dem Wortlaut oder dem Sinn nach anderen Werken entnommen wurden, sind in jedem Fall unter Angabe der Quelle kenntlich gemacht. Die Arbeit ist noch nicht veröffentlicht oder in anderer Form als Prüfungsleistung vorgelegt worden.

Ich habe die Bedeutung der ehrenwörtlichen Versicherung und die prüfungsrechtlichen Folgen (§ 24 Abs. 2 Bachelor-SPO (7 Semester) der HdM) einer unrichtigen oder unvollständigen ehrenwörtlichen Versicherung zur Kenntnis genommen.

Daniel Hartstern, Matrikelnr.: 28105, Stuttgart, den 30.08.2017

D. INHALTSVERZEICHNIS

1	Einführung	2
1.1	Spatial Audio und das Museum.....	2
1.2	Gliederung	2
2	Räumliche Wahrnehmung von Schallereignissen	3
2.1	Grundlagen	3
2.2	Das Kopfbezogene Koordinatensystem	3
2.3	Lokalisierung in der Horizontalebene.....	4
2.4	Lokalisierung in der Medianebene	6
2.5	Wahrnehmung des Abstands.....	7
2.6	Multiple Schallquellen	7
2.7	Head-Related Transfer Functions (HRTFs)	8
3	Spatial Audio im Museum	10
3.1	Das Museum.....	10
3.2	Das Museum als Medium	10
3.3	Medientechnik im Museum	12
3.4	Eigenschaften von Spatial Audio	14
3.5	Museumskategorien	16
3.6	Ausstellungsgenres.....	18
3.7	Museumspädagogischer Mehrwert.....	20
4	Spatial Audio Verfahren	24
4.1	Einführung	24
4.2	Kanalbasierte Verfahren.....	24
4.3	Objektbasierte Verfahren.....	27
4.4	High Order Ambisonics (HOA).....	28
4.5	Wellenfeldsynthese	30
4.6	Binaurale Verfahren	32
4.7	Wiedergabeverfahren	35

5	Binauraltechnik im Museum	38
5.1	Virtual und Mixed Reality	38
5.2	Spatial Audioguides	38
5.3	Binaurale Signalverarbeitung	39
5.4	Besucher-Tracking	44
5.5	Entwicklungswerkzeuge für Spatial Audio Anwendungen.....	46
5.6	Probleme und Optimierungsmöglichkeiten.....	49
6	Fazit	53
	Index	54
	Literaturverzeichnis.....	56

E. ABKÜRZUNGSVERZEICHNIS

API	<i>Application Programming Interface (Programmierschnittstelle)</i>
AR	<i>Augmented Reality (Erweiterte Realität)</i>
CPU	<i>Central Processing Unit (Hauptprozessor)</i>
GPGPU	<i>General Purpose Computation on Graphics Processing Unit (Allzweck-Berechnung auf Grafikprozessoreinheit)</i>
GPS	<i>Global Positioning System (Globales Positionsbestimmungssystem)</i>
GPU	<i>Graphics Processing Unit (Grafikprozessor)</i>
HOA	<i>High Order Ambisonics</i>
HRIR	<i>Head-Related Impulse Response (Außenohrimpulsantwort)</i>
HRTF	<i>(Head-Related Transfer Function (Außenohrübertragungsfunktion)</i>
ICOM	<i>International Council of Museums (Internationaler Museumsrat)</i>
ILD	<i>Interaural Level Difference (Interaurale Pegeldifferenz)</i>
IMU	<i>Inertial Measurement Unit (Inertiale Messeinheit)</i>
ITD	<i>Interaural Time Difference (Interaurale Laufzeitdifferenz)</i>
MR	<i>Mixed Reality (Gemischte Realität)</i>
RFID	<i>Radio-Frequency Identification (Radiofrequenz Identifikation)</i>
RTLS	<i>Real-Time Locating System (Echtzeit-Lokalisierungs-System)</i>
SDK	<i>Software Development Kit (Softwareentwicklungssystem)</i>
VBAP	<i>Vector Base Amplitude Panning (vektorbasierte Lautstärkenpanoramierung)</i>
VR	<i>Virtual Reality (Virtuelle Realität)</i>
WFS	<i>Wave Field Synthesis (Wellenfeldsynthese)</i>

F. ABBILDUNGSVERZEICHNIS

Abbildung 1 - Das kopfbezogene Koordinatensystem	4
Abbildung 2 - Blauertsche Bänder	6
Abbildung 3 - Virtuelles Kontinuum	14
Abbildung 4 - Das Stereodreieck	25
Abbildung 5 - 5.1 Lautsprecher-Setup nach ITU-R BS.775	26
Abbildung 6 - Wellenfeldsynthese mit virtuellen Schallquellen	31
Abbildung 7 - Rendering Pipeline: Direktschall	40
Abbildung 8 - Rendering Pipeline: Geometrische Verfahren	43

1 EINFÜHRUNG

1.1 SPATIAL AUDIO UND DAS MUSEUM

Das Gehör liefert dem Menschen zahlreiche Informationen bezüglich seiner Umgebung. Es kann sowohl die Position von Schallquellen als auch die Größe und Beschaffenheit des den Hörer umgebenden Raumes bestimmen. Der Begriff 3D-Audio beschreibt eine Gruppe von Audioaufnahme- und Wiedergabeverfahren, die das Ziel verfolgen, diese dreidimensionalen Positionsinformationen akkurat aufzuzeichnen oder auch nachzubilden. Werden sowohl die Positions- als auch die Rauminformationen berücksichtigt, spricht man auch von Spatial Audio.¹

Räumlichkeit ist wiederum von zentraler Bedeutung für Museen. Der Ausstellungsraum ist Bühne der musealen Inszenierung von Objekten, zugleich Kompositions- und Interpretationsraum. Er ist sowohl Grundlage der Bedeutungskonstruktion durch die Kuratoren als auch Basis des Erkenntnisgewinns der Rezipienten oder in anderen Worten: ohne Raum kein Museum!²

Es bieten sich also reichlich Schnittmengen zwischen Museen und dem Ansatz von Spatial Audio. Inwiefern lassen sich jedoch Museumsauftrag und –selbstverständnis mit den technischen Gegebenheiten und Schwierigkeiten der anspruchsvollen Spatial Audio Verfahren verbinden? Welche Gestaltungsmöglichkeiten und welcher pädagogische Mehrwert entstehen daraus? Welche technischen Anforderungen ergeben sich?

1.2 GLIEDERUNG

Diese und weitere Fragen sollen in der folgenden Bachelorarbeit untersucht werden. Dazu wurde Fachliteratur aus den Bereichen Museologie, Tontechnik und Informatik herangezogen.

Als Grundlage der Arbeit soll zunächst die räumliche Wahrnehmung des menschlichen Gehörs untersucht werden. Im Anschluss werden diejenigen Parameter erarbeitet, die den Einsatz von Medientechnik im Museum bedingen, um diese daraufhin auf Spatial Audio anwenden zu können. Aus technischer Sicht werden verschiedene Spatial Audio Verfahren vorgestellt, wobei auf die Binauraltechnik und ihre besonderen Einsatzmöglichkeiten im Museum noch einmal separat eingegangen wird. Zum Abschluss sollen die in dieser Arbeit erlangten Erkenntnisse noch einmal gegenübergestellt und bewertet werden.

¹ Vgl. (Rumsey, 2001) S. 1 ff.

² Vgl. (Thiemeyer, 2016) S. 18

2 RÄUMLICHE WAHRNEHMUNG VON SCHALLEREIGNISSEN

2.1 GRUNDLAGEN

Die räumliche Wahrnehmung des Gehörs liefert Informationen über Richtung, Entfernung und Räumlichkeit einer Schallquelle. Als Schallereignisrichtung bezeichnet man dabei die Richtung aus der ein Schallereignis abgestrahlt wird. Das Gehör bildet aus dieser Schallereignisrichtung wiederum eine Hörereignisrichtung. Dieser Vorgang wird als Lokalisation bzw. Richtungswahrnehmung bezeichnet. Die Lokalisation ist ein komplizierter Prozess bei dem Schall- und Hörereignisrichtung nicht immer übereinstimmen.

Die wahrgenommene Räumlichkeit beschreibt dabei nicht die tatsächliche räumliche Ausdehnung der Schallquelle, sondern den Eindruck eines schallerfüllten Raumes um die Quelle. Die empfundene Ausdehnung hängt sowohl von der Lautstärke der Schallquelle als auch von der Stärke seitlicher Raumreflexionen ab.³

2.2 DAS KOPFBEZOGENE KOORDINATENSYSTEM

Um die Position eines Hörereignisses beschreiben zu können, wird ein auf den Kopf des Hörers bezogenes Koordinatensystem verwendet (siehe Abbildung 1 - Das kopfbezogene Koordinatensystem). Der Ursprung des Koordinatensystems liegt mittig zwischen beiden Ohren, auf Höhe der Oberkante der Gehörgangsöffnungen. Durch den Koordinatenursprung und die Unterkante der Augen verläuft die Horizontalebene. Orthogonal dazu liegt die Medianebene. Sie trennt den Kopf in eine linke und eine rechte Kopfhälfte. Die Frontalebene liegt orthogonal zu beiden vorherigen Ebenen und unterteilt den Hörbereich in ein „Vorne“ und ein „Hinten“.⁴

Die Position einer Schallquelle wird mithilfe der Polarkoordinaten Azimut φ , Elevation δ und Entfernung r angegeben. Azimut und Elevation beschreiben dabei den horizontalen bzw. vertikalen Auslenkungswinkel gegenüber den Koordinatenachsen.⁵

³ (Dickreiter & Goeres-Petri, 2014) S. 127

⁴ (Blauert & Braasch, 2008) S. 87 f.

⁵ (He, 2017) S. 11

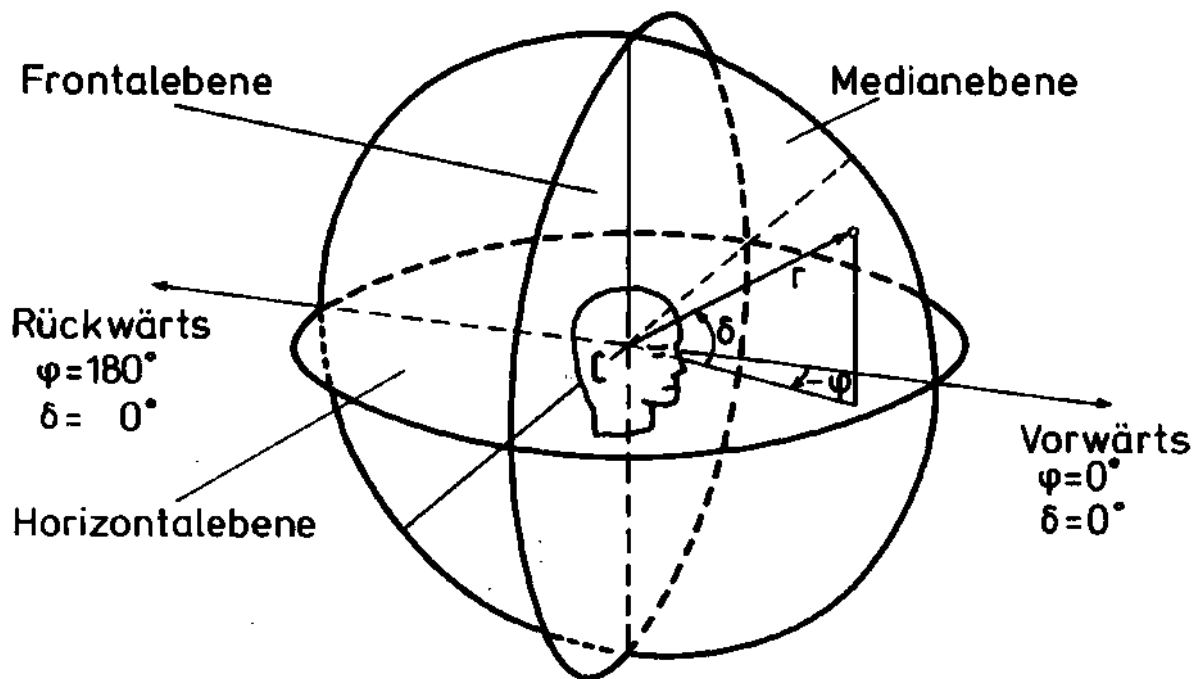


Abbildung 1 - Das kopfbezogene Koordinatensystem⁶

Die Bildung einer Hörereignisrichtung ist ein komplexer Prozess auf den viele Faktoren Einfluss nehmen. Daher wird zunächst der einfachste Fall von nur einer Schallquelle im freien Schallfeld betrachtet. Als freies Schallfeld bezeichnet man eine Situation, in der sich der Schall ungestört ohne etwaige Reflektionen z.B. durch Raumwände ausbreiten kann.

2.3 LOKALISIERUNG IN DER HORIZONTALLEBENE

Räumliches Hören in der Horizontalebene erfolgt binaural. Das Gehirn vergleicht also beide Ohrsignale miteinander und leitet daraus eine Hörereignisrichtung ab. Dabei erkennt es sowohl Laufzeit- als auch Pegeldifferenzen. Beide treten dann auf, wenn sich die Schallquelle außerhalb der Vorne-Richtung (d.h. $\varphi \neq 0^\circ$) befindet.⁷

⁶ Aus (Blauert & Braasch, 2008) S. 88. Copyright 2008 Springer-Verlag.

⁷ (Garas, 2000) S. 11 f.

Laufzeitdifferenzen

Laufzeitdifferenzen (auch Interaural Time Difference oder ITD) entstehen, sobald Schallwellen das zugewandte Ohr zeitlich vor dem abgewandten Ohr erreichen. Das Gehirn schließt dann aus dem Phasenversatz der beiden Ohrsignale auf den Auslenkungswinkel der Schallquelle.

Zur Berechnung von ITDs wird von einem durchschnittlichen Ohrabstand von 17 cm ausgegangen. Daraus ergibt sich ein maximaler Schallweg von 21 cm bei einem Einfallswinkel von 90° . Dem entspricht eine Laufzeitdifferenz von maximal 0,6 ms. Die kleinste wahrnehmbare Laufzeitdifferenz beträgt 0,01 ms, was einer Richtungsänderung von ca. $\pm 1^\circ$ entspricht.⁸

Für quasistationäre Töne, z.B. Sinusschwingungen, kann eine Lokalisation nur bis zu Frequenzen von ca. 1600 Hz erfolgen. Darüber ist keine eindeutige Auswertung möglich, da die Periodendauer bei höheren Frequenzen kürzer als die Laufzeitdifferenz zwischen beiden Ohren ist. Bei zeitveränderlichen Schallereignissen kann auch bei höheren Frequenzen eine Auswertung über die Hüllkurve erfolgen.⁹

Pegeldifferenzen

Pegeldifferenzen (auch Interaural Level Difference oder ILD) zwischen den beiden Ohrsignalen entstehen durch hohe Frequenzen, die bei seitlichem Schalleinfall am Kopf reflektiert werden. Dadurch bildet sich an dem der Schallquelle zugewandten Ohr ein Druckstau, während am abgewandten Ohr ein Schallschatten entsteht. Da sich tiefe Frequenzen, also lange Wellenlängen, um den Kopf beugen anstatt reflektiert zu werden, können Pegeldifferenzen für Frequenzen unter 2 kHz nur bedingt ausgewertet werden.¹⁰

Lokalisationsmechanismen

Die Schalllokalisierung erfolgt stets aufgrund eines Zusammenspiels von Laufzeit- und Pegeldifferenzen. Dabei sind zwei voneinander unabhängige Mechanismen zu erkennen: Bei Schallereignissen ohne Frequenzkomponenten über 1600 Hz wertet das Gehirn nur Laufzeitdifferenzen aus. Sobald Frequenzanteile über 1600 Hz Bestandteil des Signals sind, werden sowohl Laufzeit- als auch Pegeldifferenzen ausgewertet. Bei natürlichen, breitbandigen Schallereignissen wie z.B. Sprache und Musik kommt daher vorrangig dieser zweite Mechanismus zum Einsatz.¹¹

⁸ (Görne, 2015) S. 127

⁹ (Dickreiter & Goeres-Petri, 2014) S. 129

¹⁰ (Görne, 2015) S. 127

¹¹ (Begault, 2000) S. 33

Die Lokalisationsunschärfe, die kleinste wahrnehmbare Positionsänderung einer Schallquelle, ist abhängig von mehreren Faktoren. Schallquellen, die nur geringfügig von der Mittelachse abweichen, lassen sich genauer bestimmen als Schallquellen, die sich weiter seitlich befinden. Zudem hat auch die Zusammensetzung des Signals Einfluss auf seine Lokalisation. Breitbandige sowie impulsive Schallereignisse lassen sich präziser lokalisieren.¹²

2.4 LOKALISIERUNG IN DER MEDIANEBENE

Für Schalleinfall aus der Vertikalen, der Medianebene, ergeben sich keine Unterschiede zwischen den beiden Ohrsignalen. Daher ist in diesen Fällen auch eine monaurale Lokalisation der Schallquelle möglich. Durch Form und Beschaffenheit der Ohren und des Kopfes entstehen Klangverfärbungen in Abhängigkeit von der Schallereignisrichtung (siehe Abbildung 2 - Blauertsche Bänder). Diese Verfärbungen sind nicht bewusst wahrnehmbar, können jedoch einem bestimmten Einfallswinkel zugeordnet werden.¹³

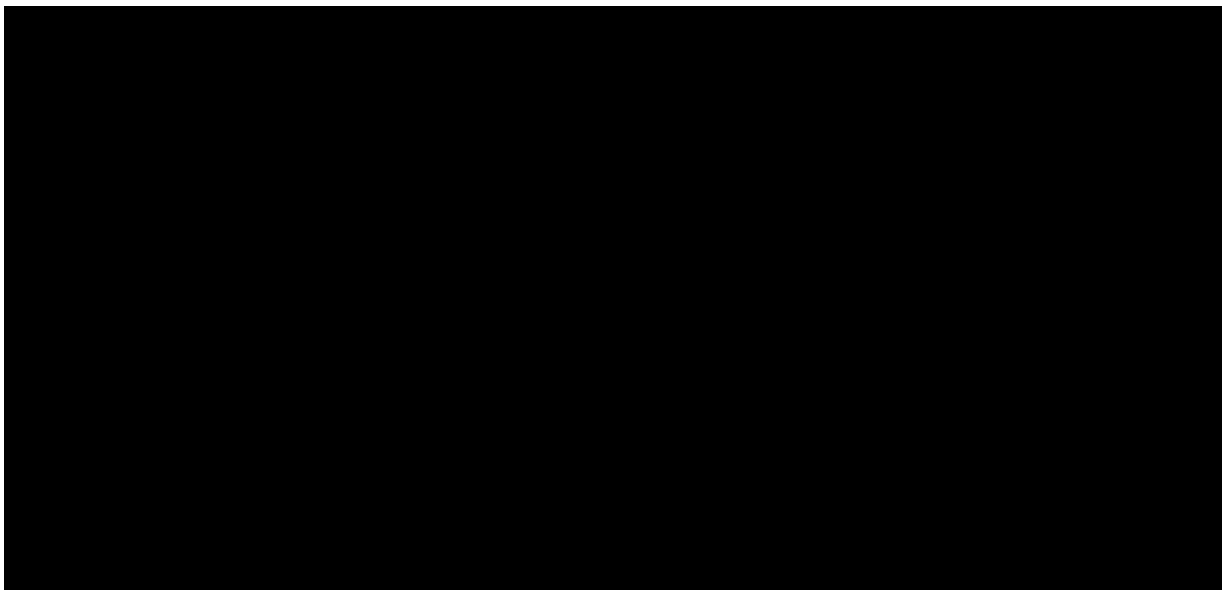


Abbildung 2 - Blauertsche Bänder¹⁴

Die Lokalisation ist in hohem Maße vom jeweiligen Signal abhängig. Zum einen muss das Signal ausreichend breitbandig sein um überhaupt die relevanten Frequenzbereiche abdecken zu können, zum anderen muss dem Gehör die Zusammenstellung des Signals bekannt sein, um Klangverfärbungen

¹² (Dickreiter & Goeres-Petri, 2014) S. 131

¹³ (Blauert & Braasch, 2008) S. 94 f.

¹⁴ Aus (Blauert & Braasch, 2008) S. 94. Copyright 2008 Springer-Verlag.

überhaupt erkennen zu können. Lerneffekte spielen hierbei eine wichtige Rolle. Die Lokalisationsunschärfe in der Medianebene ist im Vergleich zur Horizontalebene mit max. 10° deutlich größer.¹⁵

2.5 WAHRNEHMUNG DES ABSTANDS

Um die Entfernung eines Schallereignisses bestimmen zu können, wertet das Gehör Klangverfärbungen und Pegelabsenkungen aus. Die Entfernungslokalisierung beruht dabei sehr stark auf Erfahrung, da Lautstärke und Klangfarbe der Schallquelle in einem gewissen Abstand zunächst bekannt sein müssen, um Veränderungen als solche identifizieren zu können.¹⁶

Bei Kugelstrahlern entspricht eine Abstandsverdoppelung einer Pegelabsenkung von 6 dB. Bei einer Schallausbreitung als ebene Welle fällt diese Absenkung geringer aus. Dies führt zu Klangverfärbungen, da tiefe Frequenzen vorrangig kugelförmig abgestrahlt werden, während hohe Frequenzen sich vermehrt als ebene Wellen ausbreiten. Bei sehr kurzen Entfernungen von weniger als 25 cm entstehen zudem interaurale Pegelabsenkungen durch Schallreflektionen am Kopf.¹⁷

In geschlossenen Räumen werden außerdem Intensitätsverhältnisse und Laufzeitdifferenzen zwischen Direktschall und Wandreflektionen ausgewertet. Auch hier sind Kenntnisse der raumakustischen Gegebenheiten erforderlich um die Intensitätsverhältnisse richtig interpretieren zu können.¹⁸

Die Entfernungsunschärfe ist recht groß und steigt mit zunehmendem Abstand. Tendenziell werden Hörereignisse näher als ihre tatsächliche Entfernung wahrgenommen. Problematisch sind zudem Schallquellen die nicht mit konstanter Schallleistung abstrahlen, da hier Pegelveränderungen ggf. falsch interpretiert werden können. Die Entfernungswahrnehmung beruht daher unter normalen Umständen vorrangig auf dem wesentlich präziseren visuellen Eindruck.¹⁹

2.6 MULTIPLE SCHALLQUELLEN

In natürlicher Hörumgebung erreichen neben dem Direktschall auch Schallreflektionen das Gehör. Um deren Auswirkungen bei der Lokalisation bestimmen zu können, wird gewöhnlich das Modell der Spiegelschallquellen verwendet.

¹⁵ (Dickreiter & Goeres-Petri, 2014) S. 132

¹⁶ (Garas, 2000) S. 14

¹⁷ (Blauert & Braasch, 2008) S. 98 f.

¹⁸ (Rumsey, 2001) S.35 f.

¹⁹ (Dickreiter & Goeres-Petri, 2014) S. 132 f.

Eine Spiegelschallquelle ist dabei eine imaginäre Kopie der Originalschallquelle deren Position durch Spiegelung an der Reflektionsfläche bestimmt wird. Entsprechend setzen sich in diesem Modell die Ohrsignale anteilig aus Original- und Spiegelschallquellen zusammen.

Das Signal der Spiegelschallquelle entspricht dem der Originalschallquelle, erfährt jedoch durch die Absorptionswirkung der Reflektionsfläche und den längeren Ausbreitungsweg eine Pegelabsenkung. Dieser Abstandsunterschied führt zusätzlich zu einer Laufzeitdifferenz zwischen den Signalen. Diese Laufzeitdifferenz beeinflusst maßgeblich die Lokalisierung des Hörereignisses.²⁰

Fällt diese Laufzeitdifferenz kürzer als 1 ms aus, kommt es zur Summenlokalisierung. Dabei wird das Hörereignis, entsprechend der Pegel- und Laufzeitdifferenz, anteilig zwischen den Schallereignisrichtungen gebildet. Es entsteht eine Phantomschallquelle. Dieser Fall wird in der Tontechnik beim Stereophonie-Verfahren genutzt.

Bei Laufzeitdifferenzen von mehr als 1 ms wirkt der Präzedenzeffekt auch Gesetz der ersten Wellenfront genannt. Das Hörereignis wird in der Schallereignisrichtung der zuerst eintreffenden Wellenfront gebildet. Das verzögerte Signal der Phantomschallquellen hat auf das Hörereignis keinen Einfluss mehr.²¹

Überschreitet die Laufzeitdifferenz gar die sogenannte Echschwelle, so wird jeder Schallereignisrichtung ein eigenes Hörereignis zugeordnet. Die Echschwelle bewegt sich bei natürlichen Signalen im Bereich von 5 ms bis zu mehreren 100 ms und ist abhängig von der Pegeldifferenz sowie der spektralen Zusammensetzung der Signale.²²

2.7 HEAD-RELATED TRANSFER FUNCTIONS (HRTFs)

Die vom Gehör zur Lokalisation angewandten Mechanismen lassen sich zwar, wie oben geschehen, generell beschreiben, jedoch sind die spezifischen Laufzeitdifferenzen, Pegelunterschiede und besonders die Klangverfärbungen stark vom individuellen Gehörgang des jeweiligen Hörers abhängig. Einfluss auf die Ohrsignale haben dabei speziell Korpus, Schulter, Kopf, Ohrmuschel sowie der Ohrkanal.²³

Um den Einfluss des Gehörgangs erfassen und später auch reproduzieren zu können, werden sogenannte Außenohrübertragungsfunktionen oder HRTFs (head-related transfer functions) ermittelt.

²⁰ (Kuttruff & Mommertz, 2004) S. 333 f.

²¹ (Begault, 2000) S. 36 f.

²² (Blauert & Braasch, 2008) S. 103 ff.

²³ (Blauert & Braasch, 2008) S. 89 f.

Dazu werden im Messlabor bekannte Schallimpulse von einer festgelegten Raumposition abgespielt und durch in den Gehöröffnungen der Versuchsperson platzierte Mikrofone aufgenommen. Anschließend wird das aufgenommene Signal von Verzerrungen durch Abspiellautsprecher und Aufnahmemikrofon bereinigt.

Die so erhaltene Messung beschreibt die Impulsreaktion des individuellen Gehörgangs oder HRIR (head-related impulse responses) für diese spezielle Schallereignisrichtung. Die Messung muss für jede gewünschte Schallereignisrichtung wiederholt werden. Aus den HRIRs lässt sich anschließend für jede Schallereignisrichtung ein individuelles Paar HRTFs, jeweils für das rechte und das linke Ohr, bestimmen.²⁴

HRTFs bzw. HRIRs können dazu verwendet werden einem einfachen Mono-Signal Richtungsinformationen hinzuzufügen. Die entsprechenden Ohrsignale werden gebildet indem das Signal jeweils mit der HRTF für das rechte sowie das linke Ohr gefaltet wird.²⁵

²⁴ (Sodnik & Tomažič, 2015) S. 18 ff.

²⁵ (Garas, 2000) S. 27 f.

3 SPATIAL AUDIO IM MUSEUM

3.1 DAS MUSEUM

Der Internationale Museumsrat ICOM definiert ein Museum wie folgt:

„Ein Museum ist eine gemeinnützige, auf Dauer angelegte, der Öffentlichkeit zugängliche Einrichtung im Dienste der Gesellschaft und ihrer Entwicklung, die zum Zwecke des Studiums, der Bildung und des Erlebens materielle und immaterielle Zeugnisse von Menschen und ihrer Umwelt beschafft, bewahrt, erforscht, bekannt macht und ausstellt.“²⁶

Da der Begriff „Museum“ in Deutschland nicht geschützt ist, wird er im Allgemeinen recht lose und auch von Institutionen und Ausstellungen verwendet, die nicht der obenstehenden Definitionen entsprechen. Also beispielsweise auch von solchen Institutionen, die sich nicht an der Forschung beteiligen. An der sich daran entfachenden Diskussion über die Eingrenzung des Museumsbegriffs wird sich diese Arbeit nicht beteiligen.²⁷

Für den Einsatz von Spatial Audio in Ausstellungen ist es irrelevant, ob die jeweils verantwortliche Institution die Definition der ICOM vollumfänglich erfüllt. Die in dieser Arbeit verwendeten Begriffe Museum und Ausstellung umschließen daher auch solche Institutionen, die nur teilweise dieser Definition entsprechen, also zum Beispiel nur „ausstellen“ und „bekannt machen“ und nur temporär existieren.

Die Einsatzmöglichkeiten von Spatial Audio richten sich vielmehr nach der institutionellen Zielsetzung des Museums und der jeweiligen Ausstellungsstrategie. Diese Arbeit wird sich in der Folge auf diese Aspekte konzentrieren.

3.2 DAS MUSEUM ALS MEDIUM

Um die Einsatzmöglichkeiten von Medientechnik im Allgemeinen und Spatial Audio im Speziellen bestimmen zu können, gilt es zunächst die grundlegende Funktionsweise von Museen und Ausstellungen zu verstehen.

²⁶ (ICOM Deutschland – Internationaler Museumsrat, 2010) S. 15

²⁷ Vgl. (Gurian, 2002) S. 77 f., (Baur, 2010) und (Wohlfromm, 2001) S. 41 ff.

Das Museum fungiert als ein Kommunikationsmedium zwischen Kurator (Sender) und Besucher (Empfänger). In einer Ausstellung wird versucht, dem Besucher durch die Präsentation von Objekten eine bestimmte Botschaft zu vermitteln.

Bei der Konstruktion von Bedeutung, Botschaft und Geschichte stützt sich das Museum auf die Anziehungskraft, die das physische Erlebbarmachen von Objekten auf ein Publikum ausübt. Durch Auswahl, Sortierung und Präsentation dieser Objekte wird Bedeutung und Botschaft einer Ausstellung konstruiert. Museen und Ausstellungen sind demnach nicht objektiv, sondern Ausdruck einer bestimmten Sichtweise und müssen daher im kulturellen Kontext ihrer Entstehung betrachtet werden.²⁸

Die Botschaft einer Ausstellung entsteht vorrangig aus dem Zusammenspiel von vier Faktoren. Die Grundlage einer jeden Ausstellung ist das Objekt. Da die Bedeutung von Objekten stets mehrschichtig ist und sich im Laufe der Zeit auch verändern kann, übt jedes Objekt einen großen Einfluss auf die Botschaft der gesamten Ausstellung aus.

In Museen werden Objekte unter anderem verglichen, gegenübergestellt oder chronologisch geordnet präsentiert. Durch diese Kontextualisierung wird eine weitere Bedeutungsverschiebung erreicht. Indem die Objekte aus ihrem natürlichen Kontext gerissen und in das Museum gestellt werden, ergeben sich weiterführende Erkenntnisgewinne.

Objekte sind nicht selbsterklärend und können das durch Kontextualisierung auch nur begrenzt werden. Daher ist die Entwicklung einer kommunikativen Strategie, in Abhängigkeit von Art und Thema der Ausstellung, notwendig. Eine Abkehr von rein textbasierten kommunikativen Strategien ist längst zu erkennen.

Zuletzt ist der Besucher als Adressat der Botschaft von übergeordneter Wichtigkeit. Die Zielgruppe einer Ausstellung muss bei der Definition aller vorhergegangenen Faktoren immer in Betracht gezogen werden. An der Individualität des Rezipienten stößt der Versuch der Bedeutungskonstruktion durch die Kuratoren an ihre Grenzen. Die Rezipienten werden aufgrund ihrer persönlichen Kenntnisse und Interessen immer eine eigene Sichtweise der Ausstellung entwickeln.²⁹

²⁸ (Wohlfromm, 2001) S.15

²⁹ (Wohlfromm, 2001) S.22 ff.

3.3 MEDIENTECHNIK IM MUSEUM

Medientechnik kann unterschiedliche Funktionen im Aufgabenfeld von Museen erfüllen. In den Bereichen Sammeln, Forschen und Bewahren spielen Foto-, Video sowie Tonaufzeichnungen eine zentrale Rolle. Besonders interessant, weil vielfältig, ist aber der Einsatz von Medientechnik im musealen Kernbereich: der Ausstellung.³⁰

Im Museum können Medien zweierlei Funktionen bei der Ausstellungsgestaltung, d.h. bei der Konstruktion der Ausstellungsbotschaft, einnehmen. Zum einen können sie Ausstellungsobjekt, zum anderen Kommunikationsmedium sein.

Als Kategorie der Medienkunst beschäftigt sich die sogenannte Klangkunst mit den gestalterischen Möglichkeiten und speziell den räumlichen Aspekten der Tonaufzeichnung und Wiedergabe. Während in der Vergangenheit vor allem mit kanalbasierten Verfahren (Kapitel 4.2) experimentiert wurde, rücken heutzutage Verfahren wie die Wellenfeldsynthese und die Binauraltechnik (Kapitel 4.5 und 4.6) in den Fokus dieser Kunstform³¹.

Häufiger erfüllt die Medientechnik jedoch ihren Zweck als Kommunikationsmedium und ist dabei sehr flexibel einsetzbar. Bell nennt in diesem Bereich vier Einsatzmöglichkeiten:

Das Museumserlebnis erweitern

Medientechnik kann bekannte Museumselemente verbessern und erweitern. So sind z.B. elektronische Audioguides eine flexiblere und personalisierte Variante der klassischen Museumsführung durch einen Angestellten.³²

Speziell in diesem Bereich bietet Spatial Audio in Kombination mit anderen Technologien besondere Möglichkeiten. Beispielsweise können klassische elektronische Audioguides durch Spatial Audio und intelligentes Positions-Tracking benutzerfreundlicher gemacht werden.

Dabei können einzelne Tonaufnahmen eindeutig einer Position im Raum, beispielsweise einem Objekt, zugeordnet werden. In Abhängigkeit von der Position des Besuchers werden dann die entsprechenden Tonaufnahmen aus Richtung des Objekts abgespielt. Der Besucher wird also vom Objekt angesprochen, anstatt aufwendig die entsprechende Kennziffer eingeben zu müssen. Auch bei mehreren parallelen Klangereignissen bleiben diese aufgrund ihrer räumlichen Position unterscheidbar.

³⁰ Vgl. (Deutscher Museumsbund e. V., 2017)

³¹ (Weinzierl & Tazelaar, Raumsimulation und Klangkunst, 2008) S. 2 ff.

³² (Bell, 2002) S. 12 f.

Weiterführend ist denkbar, aus den individuellen Ausstellungspfaden ein persönliches Benutzerprofil zu erstellen, anhand dessen der Audioguide an die Interessen des Besuchers angepasst werden kann. In Kombination mit Spatial Audio ergibt sich die Möglichkeit, den Besucher, durch eine subtile Erhöhung der Lautstärke, zu für ihn interessanten Objekten zu navigieren und ihm somit ein individuelles Nutzungserlebnis zu ermöglichen.

Kommunikation mit dem Museum

Medientechnik bietet neue Möglichkeiten für den Austausch zwischen Museum und Besucher: beispielsweise kann das Besucherfeedback digital einfacher erfasst und ausgewertet werden.³³

Zur Umsetzung des oben beschriebenen Spatial Audioguides werden verfahrensbedingt die Position, der Ausstellungspfad und die Verweildauer der Museumsbesucher aufgezeichnet und ausgewertet. Diese Daten können im Anschluss statistisch ausgewertet werden. Für die Kuratoren ergeben sich daraus wichtige Erkenntnisse für die Ausstellungsgestaltung. Eine Nutzung der Daten in der wissenschaftlichen Besucherforschung ist ebenso denkbar.

Museumsbesuche verlängern

Medientechnik bietet außerdem die Möglichkeit den Lernprozess über den Museumsbesuch hinaus zu verlängern, indem weiterführende Informationen zu einer Ausstellung aufbereitet und etwa online verfügbar gemacht werden.³⁴

So kann der Museumsbesuch beispielsweise anhand der oben erfassten Daten wiedererlebbar gemacht werden. Aus den Positionsdaten sowie den vorliegenden Audiodateien ließe sich der individuelle Museumsbesuch für eine Virtual Reality Anwendung rekonstruieren. Auch zur thematischen Ergänzung sind Spatial Audio Tondateien die nach dem Museumsbesuch online verfügbar gemacht werden, ohne größeren Aufwand realisierbar.³⁵

Neue Erfahrungen dank neuer Technologie

Ein breiter und bisher nur wenig genutzter Einsatzbereich für Spatial Audio ist die Gestaltung vollkommen neuer Besuchererfahrungen, die erst durch den aktuellen technischen Fortschritt möglich werden. Besonders Mixed Reality Anwendungen sind in diesem Bereich von Interesse.³⁶

Dabei beschreibt der Begriff Mixed Reality eine Anwendung, die mit Hilfe von moderner Technik die reale Welt mit einer virtuellen Welt verschmelzen lässt. Der Grad der Immersion, d.h. Verschmelzung,

³³ (Bell, 2002) S. 13 f.

³⁴ (Bell, 2002) S. 13

³⁵ Vgl. (Fugal & Nair, 2017)

³⁶ (Bell, 2002) S. 14

lässt sich anhand des sogenannten virtuellen Kontinuums bestimmen, dessen beide Extreme die reale Welt und die Virtuelle Welt bilden (siehe Abbildung 3 - Virtuelles Kontinuum).

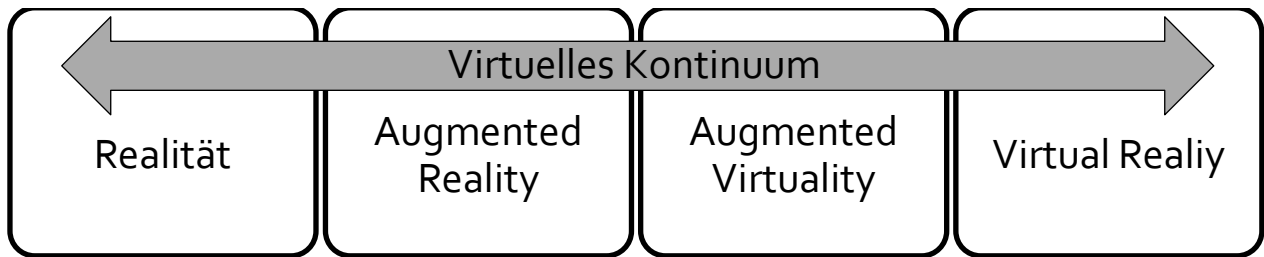


Abbildung 3 - Virtuelles Kontinuum³⁷

Entlang dieses virtuellen Kontinuums lassen sich unter anderem Augmented Reality und Augmented Virtuality unterscheiden. Eine Augmented Reality Anwendung erweitert also reale Objekte um eine virtuelle Komponente, während eine Augmented Virtuality Anwendung eine virtuelle Welt um eine reale Komponente erweitert. Virtual Reality Anwendungen erreichen wiederum einen derart hohen Grad an Immersion, so dass die reale Welt im Bewusstsein des Nutzers vollkommen in den Hintergrund tritt.³⁸

Eine Virtuell Spatial Audio Anwendung könnte den Besucher also in eine virtuelle Geräuschkulisse versetzen, die so heutzutage nicht mehr erlebbar ist, wie etwa ein antikes griechisches Theater. Eine Augmented Spatial Audio Anwendung dahingegen könnte beispielsweise einer nicht mehr funktionsfähigen Dampflock neues Leben einhauchen.

3.4 EIGENSCHAFTEN VON SPATIAL AUDIO

Um die Einsatzmöglichkeiten von Spatial Audio im Museum weiter beleuchten zu können, sollen im Folgenden zunächst die drei für diesen Einsatzzweck wichtigsten Eigenschaften der räumlichen Klangwiedergabe vorgestellt werden.

Informationsquelle

Das Gehör ist für den Menschen eine der wichtigsten Informationsquellen bei der Interaktion mit seiner Umwelt. Es liegt also nahe, Tonaufzeichnungen als Medium zur Übermittlung von Informationen zu verwenden. Spatial Audio Verfahren ermöglichen zusätzlich die Positionierung von

³⁷ Aus (Milgram & Kishino, 1994) S. 1323. Copyright 1994 Paul Milgram

³⁸ (Milgram & Kishino, 1994) S. 1322 f.

Schallquellen im Raum. Neben dem Informationsgehalt der Aufzeichnung, kann zusätzlich die Hörereignisrichtung zur Codierung von Informationen genutzt werden.³⁹

Spatial Audio Mensch-Maschine Interfaces nutzen beispielsweise die Hörereignisrichtung eines Schallereignisses als Kanal für die Übermittlung von Informationen zwischen Mensch und Maschine.⁴⁰

Versuche zeigen, dass durch den Einsatz von Spatial Audio die Auffassungsgabe und Gedächtnisleitung von Menschen verbessert werden kann. Im Vergleich zur normalen Audiowiedergabe verbesserte sich die Konzentrationsfähigkeit der Probanden. Infolgedessen konnten sich die Versuchsteilnehmer an mehr Details erinnern.⁴¹

Immersion

Wenn Spatial Audio dazu eingesetzt wird ein möglichst realistisches Klangerlebnis zu erzeugen, kann ein hoher Grad an Immersion erzeugt werden. Immersion oder Eintauchen in ein virtuelles Erlebnis ist dann möglich, wenn die visuellen oder auditiven Stimuli derart überzeugend sind, dass das Bewusstsein das Wissen über deren artifizielle Natur ausblendet und sie somit als legitime bzw. reale Quelle für den Wahrnehmungsapparat akzeptiert.⁴²

Unterhaltungspotential

Die Positionierung von virtuellen Schallquellen im Raum birgt das Potential zur spielerischen Interaktion. Dabei können zwei Arten unterschieden werden: eine offene Herangehensweise mit der z.B. Kinder die Elastizität und Sprungkraft eines Gummiballs erforschen, und eine strukturierte, festen Spielregeln folgende Herangehensweise, wie sie z.B. der Gebrauch des Balls beim Fußballspiel mit sich bringt.⁴³

³⁹ (Papadopoulos, Kyriakakis, Sawchuk, & He, 2004) S. 94

⁴⁰ (Sodnik & Tomažič, 2015) S. 42

⁴¹ (Baldis, 2001) S. 166 ff.

⁴² Vgl. (Grau, 2003) S. 13 ff.

⁴³ (Wakkary & Hatala, 2007) S. 171

3.5 MUSEUMSKATEGORIEN

Die institutionelle Struktur eines Museums beeinflusst die Einsatzmöglichkeiten und –grenzen für Spatial Audio Verfahren. Gurian untersucht die institutionelle Zielsetzung von Museen und entwickelte daraus fünf unterschiedliche Museumstypen: Objektbasierte Museen, erzählungs-basierte Museen, besucherzentrierte Museen, Gemeindemuseen und Nationalmuseen.⁴⁴

Objektbasierte Museen

Objektbasierte Museen funktionieren nach dem Prinzip von Schatzkammern und stellen eine große Sammlung von Objekten einer bestimmten Kategorie zur Schau. Objekte werden der Objekte willen gesammelt, bewahrt und präsentiert.⁴⁵

In diesem Kontext wird Spatial Audio vor allem als Kommunikationsmedium eingesetzt um den Besuchern Zusatzinformationen über die ausgestellten Objekte zu liefern. Eine Erweiterung des klassischen Audioguide Konzepts bietet sich in diesem Fall an. Ein zu hohes Maß an Immersion und Verspieltheit sind nicht erwünscht, da das Kommunikationsmedium keinesfalls vom Ausstellungsobjekt ablenken darf.

Erzählungs-basierte Museen

Erzählungs-basierte Museen zielen darauf ab dem Besucher eine bestimmte Geschichte zu vermitteln. Objekte ordnen sich in diesen Museen der Kontextualisierung unter. Sie fungieren als Aufhängungspunkte einer Geschichte.⁴⁶

Immersion ist zentraler Bestandteil narrativer Medien wie Filme und Computerspiele. Für erzählungs-basierte Museen liegt in dieser Eigenschaft von Spatial Audio ebenfalls das größte Potential. Durch einen hohen Grad an Immersion lassen sich Besucher gezielter und tiefer in die Narration einer Ausstellung einbinden.

Besucherzentrierte Museen

Besucherzentrierte Museen richten sich mit ihrem Angebot an eine bestimmte Zielgruppe. In vielen Fällen sind das Kinder und Familien. Bei der Ausstellungsgestaltung wird dabei besonders Rücksicht auf die Bedürfnisse der Zielgruppe genommen.⁴⁷

⁴⁴ (Gurian, 2002) S.75 f.

⁴⁵ (Gurian, 2002) S. 79 f.

⁴⁶ (Gurian, 2002) S. 80 f.

⁴⁷ (Gurian, 2002) S. 81 f.

In besucherzentrierten Museen, speziell solchen, die sich an Kinder und Familien richten, lassen sich spielebasierte, räumliche Lernmethoden mithilfe von Spatial Audio realisieren. Auch die immersiven, narrativen Fähigkeiten von Spatial Audio kommen zur Anwendung. Jedoch sollte der Gebrauch von Spatial Audio auch der Besuchergruppe angemessen sein. Gerade für jüngere Altersklassen muss der Grad an Technisierung angepasst werden.

Gemeindemuseen

Gemeindemuseen sind Ausdruck der Identität einer bestimmten sozialen Gruppe. Sie haben daher meist einen regionalen Charakter und dienen der Identitätsstiftung und -erhaltung. Oftmals beschränkt sich das Tätigkeitsfeld dieser Institutionen nicht auf das Ausstellen von Objekten, sondern umfasst gleichzeitig die Austragung von kulturellen Events mit besonderer Bedeutung für die Gemeinschaft.⁴⁸

Aus institutioneller Sicht gibt es für den Einsatz von Spatial Audio in Gemeindemuseen keine Einschränkungen. Jedoch sind in diesem Fall hohe Anschaffungs- und Wartungskosten sowie das benötigte technische Knowhow besonders kritisch. Derartige Anforderungen können von Institutionen mit einem begrenzten Budget und einer ehrenamtlicher Struktur nur schwer erfüllt werden.

Nationalmuseen

Nationalmuseen wiederum verfolgen dieselben Ziele wie Gemeindemuseen jedoch auf einer nationalen Ebene. Da diese Institutionen meist von offizieller Seite betrieben werden, verfügen sie über große finanzielle und menschliche Ressourcen, sind aber in ihrer Freiheit bezüglich Themenwahl und Ausstellungsgestaltung eingeschränkt.⁴⁹

Diese Museen bilden in vielen Fällen die Prunkstücke der lokalen Museumslandschaft und verfügen über ausreichend finanzielle Spielräume, die den Einsatz von aufwendigen Spatial Audio Verfahren realisierbar machen. Auch wenn die Strukturen dieser Einrichtungen wenig Flexibilität in der Themenwahl zulassen, stehen dem Einsatz von neuen, publikumswirksamen Kommunikationsmethoden keine Hindernisse im Weg.

Probleme einer Kategorisierung

Anzumerken bleibt, dass die obige Kategorisierung weder vollständig ist, noch sein kann. Keine Einteilung⁵⁰ kann der großen Vielfalt der Museumslandschaft gerecht werden. Immer wieder entstehen

⁴⁸ (Gurian, 2002) S. 82 f.

⁴⁹ (Gurian, 2002) S. 83 f.

⁵⁰ Für weitere Kategorisierungen siehe (Bugg, 2011) S. 69 f., (Bell, 2002) S. 5 und (Walz, 2016) S. 78 ff.

im Zuge von Modernisierungsprozessen neue Museumsformen, die durch derartige Klassifizierungen nicht abgedeckt werden.

Jedoch kann anhand dieser Kategorisierung, so ungenau sie auch sein mag, der Einfluss der institutionellen Strukturen eines Museums auf die Einsatzbereiche von Spatial Audio beispielhaft dargestellt werden.

3.6 AUSSTELLUNGSGENRES

Eine Kategorisierung von Museen ist auch deshalb so schwierig, weil der pädagogische Ansatz, der einer Ausstellung zugrunde liegt, nicht für die Bewertung einer ganzen Institution herangezogen werden kann. Zum Teil kommen in nur einem Museum sehr unterschiedliche Kommunikationsstrategien in verschiedenen oder sogar derselben Ausstellungen zum Einsatz.⁵¹

Die genauere Betrachtung der Kommunikationsstrategie einer Ausstellung ist aber gerade deshalb interessant, weil speziell in diesem Bereich der Einsatz von Spatial Audio einen besonders großen Mehrwert verspricht. Im Verhältnis der ausgestellten Objekte zur verwendeten Kommunikationsstrategie lassen sich Gestaltungsansätze beobachten, anhand derer sich Einsatzmöglichkeiten für Spatial Audio bestimmen lassen.⁵²

Wissenschaftliche Ausstellungen

Wissenschaftlich orientierte Ausstellungen sprechen den Ausstellungsobjekten eine inhärente Aussagekraft zu, die durch die Bereitstellung von weiterführenden Informationen noch zusätzlich unterstützt werden kann. Ein Gemälde lässt sich demnach schon für sich allein genommen, nur durch Betrachtung verstehen. Zusatzinformationen, wie etwa die Entstehungsgeschichte des Werks, können die Aura des Ausstellungsobjektes aber darüber hinaus verstärken.⁵³

Das Objekt hat in diesem Konzept absoluten Vorrang vor dem Kommunikationsmedium. Beim Einsatz von Spatial Audio muss darauf geachtet werden, dass die Technik keine Aufmerksamkeit von den Ausstellungsobjekten nimmt. Eine im Ausstellungskontext dezente Implementierung ist zu empfehlen.

⁵¹ Vgl. (Gurian, 2002) S. 75

⁵² (Wohlfromm, 2001) S. 30

⁵³ (Wohlfromm, 2001) S. 30 f.

Auch wenn Spatial Audio in diesem Fall sein volles immersives und spielerisches Potential nicht entfalten kann, bietet es dennoch einen Mehrwert für wissenschaftliche Ausstellungen. Beispielsweise lässt sich im Fall eines Spatial Audioguide bei entsprechender Implementierung die zum Textverständnis benötigte Aufmerksamkeit verringern.⁵⁴ Oder die Bedienung des Audioguides kann durch ein Spatial Audio Interface vereinfacht werden und somit gegenüber den Ausstellungsobjekten weiter in den Hintergrund treten.⁵⁵

Pädagogische Ausstellungen

In pädagogisch orientierten Ausstellungen hat die Vermittlung einer feststehenden Bedeutung oberste Priorität. Dementsprechend wird besonderer Wert auf funktionierende Kommunikationsstrategien gelegt. Zugunsten der Verständlichkeit werden komplexe Zusammenhänge jedoch häufig vereinfacht dargestellt und offene Fragen, die Interpretationsfreiraum bieten, weitestgehend vermieden.⁵⁶

In pädagogischen Ausstellungen kann sich das Potential von Spatial Audio im vollen Umfang entfalten. Wie bereits beschrieben kann es auch hier zur strukturierten Präsentation von Informationen dienen. Durch Immersion kann die Identifikation und das Interesse für das Thema verstärkt werden und das dem Verfahren innewohnende spielerische Potential vermag den Lerneffekt zu erhöhen. Spatial Audio ist in diesem Ansatz variabel einsetzbar und ermöglicht eine abwechslungsreiche Ausstellungsgestaltung.

Assoziativ-Narrative Ausstellungen

Der assoziativ-narrative Ansatz zur Ausstellungsgestaltung grenzt sich von den vorhergegangenen Ansätzen ab indem er explizit Interpretationsräume für die Besucher schafft. Der Besucher wird dem Objekt weitestgehend frei ausgesetzt und die Bedeutungsfindung bleibt ihm selbst überlassen. Dieser Ansatz fordert eine aktive Haltung der Besucher.⁵⁷

Ausstellungen, die einen assoziativen Ansatz verfolgen, bieten normalerweise keinen Platz für Audioguides, da sie bewusst auf sprachbasierte Informationsübermittlung verzichten. Die Kommunikation zwischen Objekt und Besucher soll möglichst ohne Kommunikationsmedium direkt erfolgen.

⁵⁴ (Baldis, 2001) S. 172 f.

⁵⁵ (Kaghat & Cubaud, 2010) S. 163

⁵⁶ (Wohlfromm, 2001) S. 31

⁵⁷ (Wohlfromm, 2001) S. 31

Dahingegen können die Möglichkeiten zur Immersion und zur experimentellen Erforschung von Raum und Klang für assoziativ-narrative Ausstellungen durchaus von Interesse sein. Die Interaktion mit Ausstellungsobjekten kann durch sie stimuliert werden. Die Grenzen zwischen Objekt und Kommunikationsmedium verschwimmen: die Anwendung nähert sich der Klangkunst an.

Massenausstellungen

Massenorientierte Ausstellungen stellen das Erlebnis und somit die Unterhaltung der Zuschauer in den Vordergrund. Ein Lernerfolg ist dabei allenfalls ein Bonus, jedoch keineswegs ein Muss.⁵⁸

Dem Einsatz von Spatial Audio sind in diesem Ansatz keine inhaltlichen Grenzen gesetzt. Allein der Unterhaltungswert, ob formell oder informell, muss gegeben sein. Bei sehr großen Besucherzahlen ist allerdings der wachsende technische Aufwand zu bedenken.

Sicherlich ist keiner dieser Gestaltungsansätze ohne weiteres universal einsetzbar, sondern stets von den vielen Faktoren der Ausstellungsgestaltung abhängig. Eine Kombination der Prinzipien ist ebenso denkbar.

3.7 MUSEUMSPÄDAGOGISCHER MEHRWERT

In den vorangegangenen Kapiteln wurden die vielfältigen Einsatzmöglichkeiten für Spatial Audio im Museum beleuchtet. In diesem Abschnitt soll nun geklärt werden ob sich durch den Einsatz auch ein pädagogischer Mehrwert für Ausstellungen ergeben kann.

Dazu ist zunächst ein Perspektivwechsel weg vom Blickwinkel der Ausstellungsgestaltung hin zum Standpunkt des Rezipienten notwendig. Um Wissen effektiv vermitteln zu können, muss zunächst geklärt werden, wie Besucher Informationen in der Museums Umgebung aufnehmen. Anschließend soll untersucht werden, welche Faktoren den Lerneffekt beim Museumsbesuch verbessern und inwiefern Spatial Audio dazu verwendet werden kann.⁵⁹

Liminalität

Museen sind informelle Bildungseinrichtungen. Im Gegensatz zu den formellen Einrichtungen wie beispielsweise Schulen stehen dem Museum daher andere pädagogische Möglichkeiten offen. Dabei

⁵⁸ (Wohlfromm, 2001) S. 31

⁵⁹ Vgl. (Bell, 2002) S. 3 f.

ist jedoch zu beachten, dass für eine Großzahl der Museumsgäste nicht der Lerneffekt im Vordergrund ihres Besuches steht, sondern vielmehr der Wunsch nach Unterhaltung und Sozialisierung.⁶⁰

Museumsbesucher entscheiden sich bewusst für den Besuch eines Museums, selbst Schüler auf einem unfreiwilligen Schulausflug empfinden das Museum zumindest als erfreuliche Abwechslung gegenüber der formellen Schulumgebung. Der Museumsbesuch wird als etwas außergewöhnliches, als Ausflug aus dem Alltag empfunden. Diese Eigenschaft von Museen wird als Liminalität bezeichnet.⁶¹

In der Ausstellungsgestaltung gilt es diese grundsätzliche Motivation der Rezipienten anzusprechen und zu fördern. Sie ist die Grundlage des musealen Lernprozesses. Sowohl methodische als auch thematische Faktoren sind dazu in der Lage.

Individualität

Der freiwillige Charakter des Museumsbesuches sollte möglichst durch die Ausstellung aufgegriffen werden, indem dem Besucher auch innerhalb der Ausstellung freie Wahlmöglichkeiten gelassen werden. So sollte der Besuch und die Reihenfolge der Ausstellungsstationen nicht oder nur bedingt vorgegeben sein. Dadurch kann beim Rezipienten ein positives und motivierendes Gefühl von Autorschaft am Lernprozess erzeugt werden.⁶²

Das Gefühl von Partizipation und Individualität kann mithilfe von Spatial Audio auf einfachste Weise erreicht werden. Eine adaptive Spatial Audio Implementierung passt das Gehörte an die Position und Orientierung des Hörers an. Es bleibt dem Besucher dadurch selbst überlassen, was er wie und wann hört.

Herausforderung

Informationen können für den Besucher dadurch aufgewertet werden, dass sie nicht frei zugänglich sind sondern sich erst durch eigene Leistung offenbaren. Eine durch Lösung eines Rätsels erhaltene Information hat eine höhere Wahrscheinlichkeit im Gedächtnis zu bleiben, als eine beiläufig auf einem Schild gelesene Notiz. Dabei muss die Aufgabe keinesfalls einen hohen Schwierigkeitsgrad aufweisen. Allein das Erfolgserlebnis des LöSENS eines noch so einfachen Rätsels wertet jede Information auf.⁶³

Eine breite Palette auditiver Spiele und Rätsel ist denkbar, die sich auf räumliches Hören stützt. Von einer Schnitzeljagd nach Geräuschquellen bis hin zu auditiven Wimmelbildern.

⁶⁰ (Bugg, 2011) S. 70 ff.

⁶¹ (Bell, 2002) S. 6

⁶² (Stocklmayer, Rennie, & Gilbert, 2010) S. 25

⁶³ (Fellows, 2011) S. 129

Eine weitere Möglichkeit den Lernprozess nach dem Belohnungsprinzip zu verbessern, sind Ausstellungselemente, die es den Besuchern ermöglichen, selbst in die Rolle des forschenden Wissenschaftlers zu schlüpfen. Derartige Elemente fordern ein hohes Maß an Engagement von den Besuchern und tragen auch so zu einem gesteigerten Bewusstsein des Gelernten bei.

Affektion

Der Lernprozess im informellen Umfeld enthält stets eine emotionale Komponente. Informationen sollten so präsentiert werden, dass sie bei den Besuchern Verwunderung, Entzücken oder auch Ehrfurcht hervorrufen. Das Erleben der Ausstellungsobjekte muss für die Rezipienten unterhaltsam, interessant oder amüsant gestaltet werden. Sind mit der Informationsaufnahme derartige Gefühle verbunden, steigert dies den Lerneffekt.⁶⁴

Narration

Museen sind als Kommunikationsmedien dazu prädestiniert Geschichten zu erzählen. Darin besteht eine Möglichkeit den Lernprozess für Rezipienten attraktiver und somit effektiver zu gestalten. Narrationen können den Besucher emotional in die Ausstellung einbinden und zudem eine Brücke zwischen Ausstellungstationen und –themengebieten schlagen. Ein Handlungsbogen, der sich über die gesamte Ausstellung erstreckt, motiviert die Besucher zum Weitermachen und kann unter optimalen Bedingungen zudem eine kathartische Wirkung entfalten.⁶⁵

In den vorangegangenen Kapiteln wurde bereits beleuchtet, welche Vorteile Spatial Audio durch Immersion und Realitätsnähe für Narrationen entwickeln kann. Jedoch sollte abermals darauf hingewiesen werden, dass die Konstruktion von Handlungsbögen keinesfalls für alle Museums- und Ausstellungstypen attraktiv ist.

Inhaltliche Faktoren

Es existieren weitere Faktoren, die den Lernprozess in informellen Bildungseinrichtungen verbessern können. Diese sind allerdings eher thematischer Natur und somit weniger von der eingesetzten Medientechnik abhängig. Da sie jedoch auch bei der Gestaltung der Medieninhalte für Spatial Audio Installationen eingehalten werden sollten, sollen sie im Folgenden kurz dargestellt werden:

Für das in der Ausstellung präsentierte Wissen sollte möglichst ein holistischer d.h. ganzheitlicher Ansatz gewählt werden. Stark einseitige Schwerpunkte sind weniger interessant als multidisziplinäre Themengebiete. Die breite Masse nicht wissenschaftlich orientierter Besucher interessiert sich vor

⁶⁴ (Stocklmayer, Rennie, & Gilbert, 2010) S. 25

⁶⁵ (Fellows, 2011) S. 130 f.

allem für ein nützliches und transferierbares Wissen. Aus diesem Grund sollten sich die Inhalte außerdem einer aktiven Formulierung bedienen und auf Fachsprache verzichten.

Für die Besucher ist die Entdeckungsgeschichte einer antiken Vase genauso interessant wie deren Entstehungsgeschichte oder Verwendungszweck. Das Museum bietet die Möglichkeit neben dem konkreten Objekt auch die sich mit ihm beschäftigende Wissenschaft zu präsentieren. Durch die Anekdoten und Erfahrungsberichte von Experten kann der Wissenschaft ein Gesicht gegeben werden. Durch diese Personifizierung können Besucher nachhaltig für Wissenschaft begeistert werden.⁶⁶

Soziale Interaktion

Das Museum fungiert für seine Besucher zunehmend auch als sozialer Treffpunkt. Die Möglichkeit zur Sozialisierung ist für viele Teil der Motivation ihres Museumbesuchs. Die Institutionen reagieren auf diese Entwicklung unter anderem mit der Schaffung von Museumscafés.⁶⁷ Zudem sind derartige soziale Interaktionen auch Teil des Reflektionsprozesses und unterstützen somit den Bildungsauftrag des Museums.⁶⁸

Bei der Konzipierung von Spatial Audio Einrichtungen ist deshalb darauf zu achten, dass soziale Interaktionen nicht zu sehr gehemmt werden. Insbesondere bei kopfhörerbasierten Implementierungen ist dies jedoch naturgemäß der Fall. Abhilfe können sowohl mit anderen Besuchern geteilte Hörerlebnisse als auch Ruhezeiten schaffen, in denen kein Spatial Audio angeboten wird und Besucher die Kopfhörer abnehmen und ungestört kommunizieren können.⁶⁹

⁶⁶ Vgl. (Wakkary & Hatala, 2007) S. 284

⁶⁷ (Wohlfromm, 2001) S. 48 f.

⁶⁸ (Stockmayer, Rennie, & Gilbert, 2010) S.25

⁶⁹ Vgl. (Heller, Knott, Weiss, & Borchers, 2009) S. 4492 f. und (Grinter, et al., 2002) S. 146 f.

4 SPATIAL AUDIO VERFAHREN

4.1 EINFÜHRUNG

Wird eine Schallquelle aufgezeichnet und anschließend über einen Lautsprecher wiedergegeben, so verortet das menschliche Gehör das Schallereignis direkt im Lautsprecher. Zur Darstellung von Schallquellen an einer bestimmten Raumposition ist ein zusätzlicher technischer Aufwand nötig. Im Laufe der Zeit sind zu diesem Zweck eine Reihe unterschiedlicher Verfahren entwickelt worden. Im nachfolgenden Kapitel sollen die aktuell relevantesten Verfahren vorgestellt werden.

4.2 KANALBASIERTE VERFAHREN

Es existieren zahlreiche kanalbasierte Verfahren zur räumlichen Darstellung von Schallereignissen. Die Zwei-Kanal-Stereofonie ist darunter das einfachste Verfahren und dient allen weiteren als Grundlage.⁷⁰

Zwei-Kanal-Stereofonie

Bei der Zwei-Kanal-Stereofonie (auch 2.0-Stereo) werden ein rechter und ein linker Kanal zur räumlichen Darstellung von Schallereignissen verwendet. Die Wiedergabe erfolgt im sogenannten Stereodreieck (siehe Abbildung 4 - Das Stereodreieck). Das Verfahren basiert auf Laufzeit- oder Pegeldifferenzen zwischen beiden Kanalsignalen. Auch eine Mischung der beiden ist möglich. Entsprechend ist von Laufzeit-, Intensitäts- oder Äquivalenzstereofonie die Rede.⁷¹

⁷⁰ (Rumsey, 2001) S. 52

⁷¹ (Görne, 2015) S. 126 f.

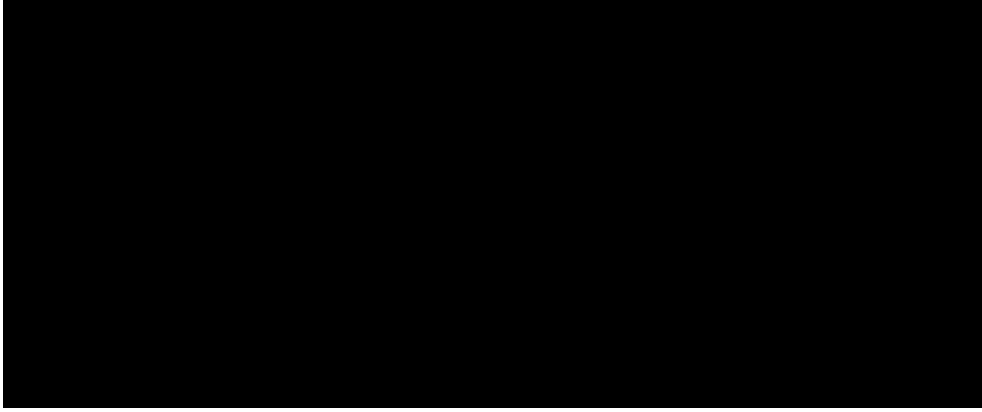


Abbildung 4 - Das Stereodreieck⁷²

Aufgrund von Summenlokalisierung lassen sich Phantomschallquellen entlang der Stereobasis erzeugen. Die räumliche Abbildung erfolgt zweidimensional: In der Horizontalen und der Entfernung. Allerdings ist die Abbildung bei normalem Stereo-Basiswinkel auf 60° beschränkt.⁷³

Mehrkanalverfahren

Das 5.1-Format ist eine Weiterentwicklung von 2.0-Stereo und zielt darauf ab dessen begrenzten Abbildungswinkel zu erweitern. Dazu führt das Verfahren zwei Surround-Lautsprecher schräg hinter dem Hörer und einen sogenannten Center-Lautsprecher zwischen den beiden ursprünglichen Seitenkanälen ein (siehe Abbildung 5 - 5.1 Lautsprecher-Setup nach ITU-R BS.775).⁷⁴

⁷² Aus (Blauert & Braasch, 2008) S. 101. Copyright 2008 Springer-Verlag.

⁷³ (Breebaart & Faller, 2007) S. 6

⁷⁴ (He, 2017) S. 16



Abbildung 5 - 5.1 Lautsprecher-Setup nach ITU-R BS.775⁷⁵

Mithilfe der zusätzlichen Surround-Lautsprecher ist die Abbildung von Schallquellen nun auch hinter dem Hörer möglich. Der Center-Lautsprecher verbessert die ansonsten sehr positionsabhängige Lokalisation von Phantomschallquellen in der Mitte-Richtung indem er die 60°-Stereobasis in zwei 30°-Teilbereiche unterteilt.⁷⁶

Steigende Kanalzahlen wie z.B. bei 7.1, 9.1 und bis hin zum 22.2-Format dienen in erster Linie der Verbesserung der Stabilität und Qualität der Phantomschallquellen. Ab dem 9.1-Format ist eine dreidimensionale Abbildung möglich. Durch die Einführung von Lautsprechern über Kopfhöhe lassen sich sowohl Phantomschallquellen mit Elevation versehen, als auch die Darstellung von Räumlichkeit und Umhüllung verbessern.⁷⁷

Vor- und Nachteile

Bei allen kanalbasierten Verfahren werden die Kanalsignale bereits während der Produktion abgemischt. Dies hat den Vorteil, dass wiedergabeseitig keine weitere Signalverarbeitung notwendig ist, eine korrekte Signalverteilung der Kanäle vorausgesetzt. Aufgrund der recht geringen Kanalanzahl sind Übertragung und Speicherung der Audiodaten ökonomisch realisierbar.⁷⁸

⁷⁵ Aus (Rumsey, 2001) S. 88. Copyright 2001 Francis Rumsey

⁷⁶ (Rumsey, 2001) S. 84 ff.

⁷⁷ (Theile, Dickreiter, Graul, Camerer, & Spikofski, 2014) S. 312

⁷⁸ (He, 2017) S. 16

Der Produzent muss sich dazu jedoch frühzeitig auf ein Wiedergabeformat festlegen. Soll eine mehrkanalige Tonmischung in einem Wiedergabesetup mit weniger Kanälen als vorgesehen abgespielt werden, ist ein sogenannter Downmix notwendig.⁷⁹

Einsatzmöglichkeiten

Kanalbasierte Verfahren, allen voran 2.0-Stereo, sind im Heimbereich weit verbreitet. Besonders im Kino- sowie im Heimkinobereich kommen mehrkanalige Systeme zum Einsatz. Aufgrund des relativ geringen wiedergabeseitigen Aufwands ist zweikanaliges Stereo auch in Museen weit verbreitet. Beispielsweise wird es bei Videoinstallationen oder auch bei klassischen Audioguides eingesetzt. Mehrkanalige Surround-Verfahren sind eher selten, dann meist in kinoähnlichen Wiedergabesituationen, anzutreffen.

Größter Nachteil kanalbasierter Verfahren ist die eingeschränkte Interaktionsmöglichkeit. Da die Kanalsignale schon während der Produktion festgelegt werden, kann während der Wiedergabe, abgesehen von der absoluten Lautstärke, kein Einfluss auf einzelne Klangelemente genommen werden.

4.3 OBJEKTBASIERTE VERFAHREN

Bei objektbasierten Verfahren werden Schallereignisse als Klangobjekte auf einem eigenen Kanal zusammen mit ihren Richtungsinformationen gespeichert. Kanäle repräsentieren in diesem Verfahren also keine durch die Wiedergabesituation definierte Position im Raum, sondern entsprechen gewöhnlich alleine einer einzigen Schallquelle. Dies hat den Vorteil, dass zum Zeitpunkt der Produktion und Codierung der Tonaufnahme die Wiedergabesituation nicht bekannt sein muss.⁸⁰

Erst bei der Wiedergabe einer objektcodierten Tonaufnahme verteilt ein Decoder das Signal eines Klangobjekts entsprechend seiner Richtungsinformation auf die entsprechenden Lautsprecher. Dies hat den Vorteil, dass das räumliche Darstellungspotential eines jeden Wiedergabesetups, einen entsprechenden Decoder vorausgesetzt, optimal ausgeschöpft werden kann. Da jedoch für jedes Klangobjekt ein eigener Kanal notwendig ist, steigt bei diesem Verfahren die Kanalanzahl und somit die Datenmenge um ein vielfaches.⁸¹

⁷⁹ Vgl. (Rumsey, 2001) S. 222 ff.

⁸⁰ (He, 2017) S. 16 f.

⁸¹ Vgl. (Breebaart & Faller, 2007) S. 155 f.

Einsatzmöglichkeiten

Objektbasierte Verfahren eignen sich für interaktive Soundinstallationen in Museen. Jedoch sind dazu eine wiedergabeseitige Echtzeitverarbeitung und eine entsprechende Rechenleistung notwendig. Erfolgt die räumliche Darstellung der Schallquellen aufgrund von Vector Base Amplitude Panning (VBAP), d.h. durch positionsabhängige Pegelunterschiede, so ist zwar eine ausreichende Lokalisation der erzeugten Phantomschallquellen erreichbar, jedoch zum Preis eines unnatürlichen Hörerlebnisses.⁸²

Der ec(h)o Museums Guide ergänzt beispielsweise einen gewöhnlichen Audioguide um ein Spatial Audio Interface, das es dem Benutzer ermöglicht eine persönliche, interessensbasierte Audioführung zu erstellen. Dabei nutzt das System ein einfaches objektbasiertes Verfahren zur räumlichen Wiedergabe von drei Schallquellen, die durch den Hörer zur Rechten, Linken und in der Mitte geortet werden können.⁸³

Speziell für derartigen Spatial Audio Interfaces bieten sich VBAP an, da in diesen Fällen kein natürliches Hörerlebnis notwendig ist. Gegenüber Verfahren wie der Binauraltechnik, die natürlichere Klangerlebnisse erzeugen kann, liegt der Vorteil dieser einfachen objektbasierten Verfahren darin, dass für VBAP weniger Rechenleistung benötigt wird.

4.4 HIGH ORDER AMBISONICS (HOA)

Im Gegensatz zu den bisher betrachteten Verfahren, die sich auf einzelne Schallquellen konzentrieren, zeichnet das High Order Ambisonic Verfahren das gesamte Schallfeld auf, basierend auf der mathematischen Theorie der Kugelflächenfunktionen. Dabei kann es sich um ein synthetisiertes aber auch ein reales Schallfeld handeln, das mit einem zu diesem Zweck entwickelten Soundfield-Mikrofon aufgezeichnet wird.⁸⁴

B-Format

Bei einem Ambisonic-System erster Ordnung, auch B-Format genannt, wird ein dreidimensionales Schallfeld in nur vier Audiokanäle (W, X, Y, Z) kodiert. Der W-Kanal enthält die ungerichtete Schalldruckkomponente während die anderen drei Kanäle die Schalldruckinformationen der jeweiligen Raumachsen beinhalten. Bei der Dekodierung werden die Lautsprecher signale entsprechend der Lautsprecherposition anteilig aus allen vorhandenen Kanalsignalen zusammengesetzt.⁸⁵

⁸² (Slavik & Weinzierl, 2008) S. 657 f.

⁸³ Vgl. (Wakkary & Hatala, 2007) S. 284 ff.

⁸⁴ Vgl. (Malham, 2003) S. 1 ff.

⁸⁵ (Rumsey, 2001) S. 113 f.

Kodierung und Dekodierung sind bei Ambisonic-Signalen strikt voneinander getrennt. Die Kodierung erfolgt unabhängig von jedwedem wiedergabeseitigem Lautsprechersetup. Erst der Decoder bestimmt aus den Ambisonic-Kanälen die Lautsprecher-signale. Dieser wird also für ein spezielles Lautsprecher-setup konzipiert. Dadurch lassen sich alle Ambisonic-Schallfelder, sofern ein entsprechender Decoder vorliegt, unabhängig von ihrer Ordnung, d.h. ihrer Kanalanzahl, auf jedem Lautsprecher-setup wiedergeben.⁸⁶

Höhere Ordnungen

Soll die volle Auflösung eines Ambisonic-Schallfeldes genutzt werden, so muss die Anzahl der zur dreidimensionalen Wiedergabe verwendeten Lautsprecher mindestens der Kanalanzahl des Ambisonic-Schallfeldes entsprechen. Eine Erhöhung der Kanalzahl, also eine Erhöhung der Ordnung der zur Beschreibung des Soundfeldes verwendeten Kugelflächenfunktionen, sorgt für eine Verbesserung der Lokalisierung sowie eine Vergrößerung der Hörzone (siehe hierzu Kapitel 4.7).⁸⁷

Um die Gesamtzahl der benötigten Kanäle zu verringern ist auch ein Mixed-Order System realisierbar. Hier werden die Horizontale und Vertikale getrennt und mit unterschiedlichen Ordnungen kodiert. Aufgrund der geringeren Lokalisationsschärfe des Gehörs in der Medianebene, kann die Vertikale mit einer niedrigeren Ordnung aufgelöst werden.⁸⁸

Erweiterungen

Durch einfache Rotationsmatrizen lässt sich das Ambisonic-Schallfeld entlang aller drei Koordinatenachsen drehen. Im Zusammenspiel von binauraler (also kopfhörerbasierter) Wiedergabe und Head-Tracking lassen sich somit auch kleine Kopfbewegungen simulieren, die wie auch beim natürlichen Hören zur Lokalisierung von Schallquellen beitragen.⁸⁹

Der Raumeindruck von synthetisierten Schallfeldern lässt sich durch drei zusätzliche Techniken verbessern. Durch eine positionsabhängige Bassanhebung bzw. –absenkung kann die Entfernungskodierung verbessert werden. Mit dem sogenannten O-Format ist es möglich, die räumlichen Eigenschaften eines Schallkörpers abzubilden, anstatt diesen nur vereinfacht als Punktschallquelle darzustellen. Störende Wandreflektionen im Wiedergaberaum können mit Hilfe von auf Messungen des Raumimpulsverhaltens basierenden destruktiven Interferenzsignalen verringert werden (room reflection cancellation).⁹⁰

⁸⁶ (He, 2017) S. 17

⁸⁷ (Rumsey, 2001) S. 116

⁸⁸ (Hollerweger, 2008) S. 7

⁸⁹ Vgl. (Malham, 2003) S. 4 f.

⁹⁰ (Hollerweger, 2008) S. 10 ff.

Einsatzmöglichkeiten

High Order Ambisonics bietet sich für den Gebrauch in Virtual und Augmented Reality Anwendungen an. Durch Rotation kann das Schallfeld auf einfachste Weise an die Orientierung des Hörers angepasst werden. Auch Kopfdrehungen und Neigungen in allen drei Achsen sind auf diese Weise simulierbar. Positionsveränderungen des Hörers sind im aufgezeichneten Schallfeld dahingegen nach der Aufnahme nicht mehr realisierbar, da dazu eine Verschiebung des Mikrofons nötig wäre.

High Order Ambisonics Aufnahmen werden daher beim Sound Design von Virtual und Augmented Reality Anwendungen vorrangig zur Gestaltung der Umgebungsgeräusche eingesetzt. Dank des großen Abstands zu den Umgebungsschallquellen, kommt es in diesem Fall bei einer Positionsänderung des Hörers zu keiner wahrnehmbaren Veränderung der Hörereignisrichtung. Die nahen Schallquellen, bei denen dies nicht mehr der Fall ist, werden durch Faltung mit entsprechenden Kopfübertragungsfunktionen (HRTF) im Raum positioniert.⁹¹

4.5 WELLENFELDSYNTHESE

Die Wellenfeldsynthese (WFS), auch Holofonie genannt, versucht eine physikalisch reale Reproduktion eines Schallfeldes mit Hilfe von Lautsprecherarrays zu erreichen. Dieses Verfahren wählt also einen ähnlichen Ansatz wie HOA und unterscheidet sich darin auch von dem auf Phantomschallquellen basierenden Ansatz der Stereophonie.

Grundprinzip

Die WFS basiert auf dem Huygens-Fresnel-Prinzip und dem Kirchhoff-Helmholtz-Integral. Erstes besagt, dass eine Wellenfront als Summe unendlich vieler Elementarwellen betrachtet werden kann. Im Umkehrschluss lässt sich eine Wellenfront aus den Elementarwellen rekonstruieren.

Nach Kirchhoff und Helmholtz wiederum lässt sich, sofern Schalldruck und –schnelle an der Umrandung einer begrenzten Fläche bekannt sind, der Schalldruck aller Punkte innerhalb dieses Raumes nachbilden. Demnach lässt sich theoretisch ein beliebiges Schallfeld mit unendlich vielen einzelnen Lautsprechern nachbilden.⁹²

Verfahren

In der Praxis werden dazu möglichst kreisförmige Lautsprecherarrays von weit über 100 Lautsprechern verwendet. Bei diesem Verfahren entstehen also keine Phantomschallquellen, sondern

⁹¹ Vgl. (Google Inc., 2016)

⁹² (Slavik & Weinzierl, 2008) S. 664 ff.

virtuelle Schallquellen mit den gleichen Eigenschaften wie die von ihnen nachgebildeten realen Schallquellen.

Bei der WFS wird das Signal der Schallquelle getrennt vom Raumanteil übertragen. Zur Wiedergabe wird das trocken, also ohne Raumanteil, aufgenommene Schallsignal mit einer Raumimpulsantwort gefaltet. Diese Trennung bietet die Möglichkeit, die Schallquelle auch mit einem anderen Raumanteil zu versehen, also in einen anderen real existierenden oder auch virtuellen Raum zu versetzen.

Mit diesem Verfahren ist es möglich, Schallquellen sowohl außerhalb als auch innerhalb des Line Array zu positionieren (siehe Abbildung 6 - Wellenfeldsynthese mit virtuellen Schallquellen). Dabei können sowohl ortsfeste Punktquellen als auch ebene Wellen aus einer stabilen Einfallsrichtung für einen oder mehrere Hörer in der Hörfläche übertragen werden. Durch diese ebenen Wellen ist unter anderem eine als realistisch empfundene Darstellung des Nachhalls möglich. Die virtuellen Schallquellen sind bewegbar und können sogar umwandert werden.⁹³

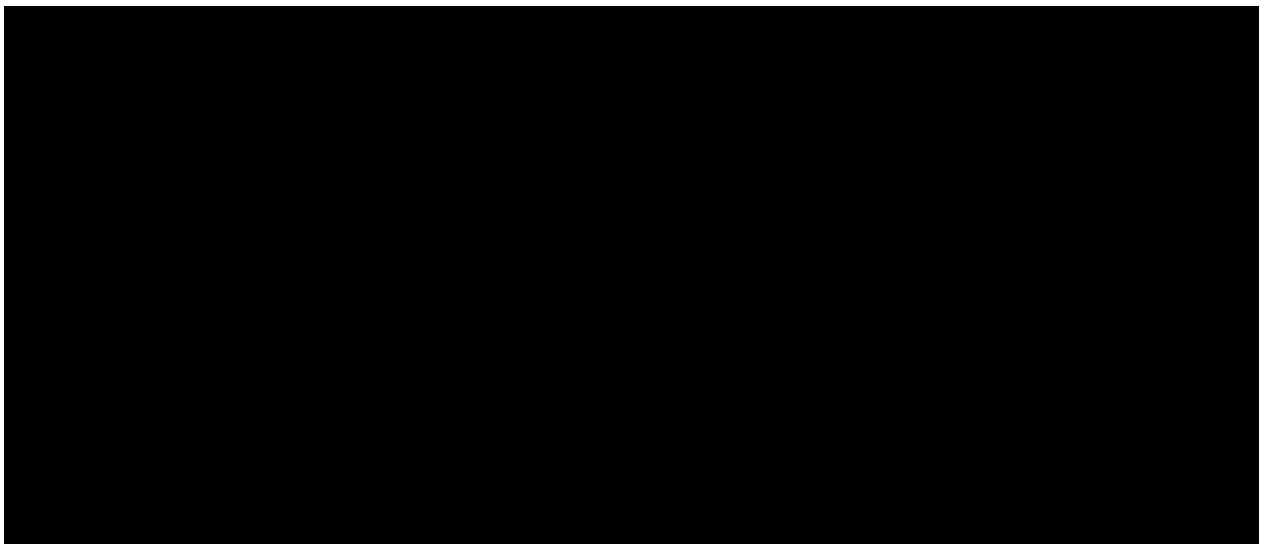


Abbildung 6 - Wellenfeldsynthese mit virtuellen Schallquellen⁹⁴

Schwierigkeiten

In Realität ist keine unendliche, sondern eben nur eine sehr große Anzahl Lautsprecher realisierbar, die noch dazu nur in einem gewissen Abstand voneinander positioniert werden können. Dies führt zu unerwünschten Effekten wie *Spatial Aliasing*, bei dem das Schallfeld oberhalb einer gewissen Grenzfrequenz nicht mehr korrekt wiedergegeben werden kann, und *Spatial Truncation*, bei dem aufgrund

⁹³ (Theile, Dickreiter, Graul, Camerer, & Spikofski, 2014) S. 354 ff.

⁹⁴ Aus (Breebaart & Faller, 2007) S. 180. Copyright 2007 John Wiley & Sons Ltd.

von Beugungswellen Nach- und Vorechos am Rand der Lautsprecherarrays auftreten. Zusätzlich kommt es bei der Schallfeldwiedergabe in unbehandelten Wiedergaberäumen zu ungewünschten Reflexionen, den *Spatial Interferences*.⁹⁵

Aufgrund des enormen Aufwands der Installation beschränken sich WFSen meist auf die Darstellung der Horizontalebene. Denn auch die Ansteuerung einer derart hohen Lautsprecheranzahl wird bei steigender Quellenanzahl immer schwieriger.⁹⁶

Einsatzmöglichkeiten

Für den Einsatz im Museum liegen die Vorteile der Wellenfeldsynthese in der präzisen Positionierung der Schallquellen sowie der breiten Hörzone, die auch von mehreren Besuchern genutzt werden kann. Ein weiterer großer Vorteil ist, dass die Hörer ein gewisses Maß an Bewegungsfreiheit genießen können. Diesen Vorteilen steht vor allem der enorme technische Aufwand gegenüber. Auch ist das Verfahren durchaus platzaufwendig, was in vielen Ausstellungen zu Problemen führen kann.

Eine für den musealen Einsatz besonders interessante Variante der WFS ist das Binaural Sky Verfahren dieses soll in Kapitel 4.7 näher behandelt werden.

4.6 BINAURALE VERFAHREN

Binaurale Verfahren wählen einen hörerzentrierten Ansatz zur Wiedergabe räumlicher Klangeignisse. Dazu werden die Ohrsignale am Trommelfell des Hörers aufgezeichnet bzw. synthetisiert. Dabei nutzt das Verfahren die Tatsache, dass der Schalldruckverlauf an den Trommelfellen bereits alle notwendigen Informationen zur Wahrnehmung und Lokalisation von Schallereignissen enthält.

Binaurale Aufnahmeverfahren

Zur Aufnahme der Ohrsignale können Sondenmikrofone in den Gehörgang eingesetzt oder auch zu diesem Zweck speziell entwickelte Ohrmikrofone verwendet werden. Dabei ist es ausreichend, die Mikrofone am Eingang des Ohrkanals zu platzieren, da auch hier bereits ausreichend Positionsinformationen vorhanden sind. Da derartige Aufnahmen für die beteiligte Person unangenehm sind und zudem Kopfbewegungen zu unerwünschten Effekten führen können, wird in der Praxis häufig auf einen Kunstkopf zurückgegriffen.⁹⁷

⁹⁵ Vgl. (Spors, Rabenstein, & Ahrens, 2008) S. 13 ff.

⁹⁶ (He, 2017) S. 18

⁹⁷ (Slavik & Weinzierl, 2008) S. 671

Kunstkopfstereofonie

Dieses Vorgehen wird dann wiederum als Kunstkopfstereofonie bezeichnet. Der verwendete Kunstkopf ist einem menschlichen Kopf nachempfunden, wobei besonderer Wert auf die Form der Außenohren gelegt wird. Zum Teil kommen sogar Abdrücke real existierender Außenohren zum Einsatz. Dadurch wird gewährleistet, dass die entstehenden Klangverfärbungen, ILDs und ITDs denen eines menschlichen Kopfes möglichst ähnlich sind. Auch in diesem Fall werden die Mikrofone im Eingang des Ohrkanals positioniert.⁹⁸

Mit diesem Verfahren ist im Idealfall eine nahezu perfekte Aufzeichnung des realen Schallfeldes am Gehöreingang möglich. Die Aufnahmen erzielen eine vollständige, dreidimensionale Abbildung des Schallfeldes mit gutem Umhüllungs- und Raumeindruck. Die Stärke dieses Verfahrens liegt in der Abbildung von kurzen Entfernungen. In der Praxis ist die Nutzbarkeit der Aufzeichnung abhängig von der Übereinstimmung der zur Aufzeichnung genutzten Ohrformen mit den Außenohren des Hörers.⁹⁹

Synthese binauraler Signale

Werden die Ohrsignale durch digitale Signalverarbeitung synthetisiert spricht man von Binauraltechnik. Ziel dieses Verfahrens ist es, dem Signal alle auf dem Weg von einem Punkt im Raum zum Trommelfell induzierten auditiven Merkmale zuzuführen.¹⁰⁰

Die Veränderung, die ein Signal auf dem Weg zum Hörer erfährt, lässt sich entweder für den Zeitbereich als Impulsantwort (HRIR) oder im Frequenzbereich als Übertragungsfunktion (HRTF) beschreiben.¹⁰¹ Bei der Synthese der Ohrsignale wird ein trocken aufgenommenes Signal mit den entsprechenden HRTFs gefaltet. Dadurch kann ein realistisches Hörereignis inklusive entsprechender Hörereignisrichtung erzeugt werden.¹⁰²

Rauminformationen

Sowohl HRIR als auch HRTF sind kopfbezogene Übertragungsfunktionen. Sie werden daher im Freifeld gemessen und enthalten somit auch keine Rauminformationen. Zur Synthese der ersten Schallreflektionen sowie des Nachhalls, die maßgeblich an der Entfernungswahrnehmung und der Bildung

⁹⁸ (Theile, Dickreiter, Graul, Camerer, & Spikofski, 2014) S. 346

⁹⁹ (Theile, Dickreiter, Graul, Camerer, & Spikofski, 2014) S. 345

¹⁰⁰ (Slavik & Weinzierl, 2008) S. 671

¹⁰¹ (He, 2017) S. 11

¹⁰² (Breebaart & Faller, 2007) S. 127

des Raumeindrucks beteiligt sind, gibt es unterschiedliche Verfahren, die meist getrennt von der Faltung zur räumlichen Positionierung angewandt werden.¹⁰³

Alternativ lassen sich sogenannte Binaural Room Impulse Responses (BRIR) ermitteln. Deren Messung erfolgt analog zur Messung von HRIRs jedoch in einem bestimmten Aufnahmeraum. Mit BRIRs gefaltete Signale enthalten neben der Kopfübertragungsfunktion daher zusätzlich die Rauminformationen des Aufnahmeraumes.¹⁰⁴

Um eine realistische Klangerfahrung zu ermöglichen, muss die Faltung der Signale in Echtzeit und verzögerungsfrei erfolgen. Mit steigender Komplexität des Schallfeldes, also steigender Quellenanzahl und komplexeren Raumgeometrien, steigt auch der nötige Rechenaufwand.¹⁰⁵

Grenzen der binauralen Verfahren

Unabhängig vom angewandten Verfahren ist die Qualität des durch die binauralen Ohrsignale erzeugten Klangfeldes vom Grad der Übereinstimmung der involvierten Ohrformen abhängig. Es existieren zahlreiche HRTF Bibliotheken, die für die binaurale Synthese verwendet werden können und deren Messungen entweder mit genormten Kunstköpfen oder auch mit menschlichen Versuchsteilnehmern durchgeführt wurden. Jedoch unterscheiden sich individuelle Ohrformen derart stark, dass keine vollkommene Übereinstimmung mit den eigenen Außenohrübertragungsfunktionen erzielt werden kann.¹⁰⁶

Durch Unterschiede der involvierten Ohrformen kommt es zu fehlerhaften Hörereignisrichtungen und gegebenenfalls sind Klangverfärbungen wahrnehmbar. Besonders häufig sind Vorne-Hinten-Verwechslungen. Oberhalb von 2 kHz steigt die Lokalisationsunschärfe an.¹⁰⁷

Versuche zeigen allerdings, dass sich bei häufiger Nutzung fremder HRTFs ein Lerneffekt einstellen kann und sich die Lokalisation wesentlich verbessern lässt.¹⁰⁸

¹⁰³ (Begault, 2000) S. 138 ff.

¹⁰⁴ (Slavik & Weinzierl, 2008) S. 673

¹⁰⁵ (Begault, 2000) S. 10

¹⁰⁶ (Weinzierl, Aufnahmeverfahren, 2008) S. 586

¹⁰⁷ (Slavik & Weinzierl, 2008) S. 673 ff.

¹⁰⁸ Vgl. (Sundareswaran, et al., 2003) S. 1 f.

4.7 WIEDERGABEVERFAHREN

Die Einsatzmöglichkeiten für Spatial Audio im Museum hängen stark von der jeweiligen Wiedergabesituation ab. Sowohl eine Kopfhörer- als auch eine Lautsprecherwiedergabe sind denkbar. Beide Abhörbedingungen bringen für den Einsatz in Ausstellungen verfahrensbedingte Vor- und Nachteile mit sich.

Lautsprecherwiedergabe

Jede Lautsprecheranordnung, von einer Wellenfeldsynthese einmal abgesehen, muss unabhängig vom Typ der wiederzugebenen Sounddateien auf einen Abhörpunkt ausgerichtet sein. Nur Hörer, die sich in dieser Hörzone, auch Sweet Spot genannt, befinden, können die Schallquelle wie gewünscht lokalisieren.¹⁰⁹

Eine feste Hörzone bedeutet eine erhebliche Einschränkung der Bewegungsfreiheit der Besucher innerhalb einer Ausstellung. Zwar kann eine Erhöhung der Lautsprecheranzahl die Hörzone vergrößern, jedoch kann nur in wenigen Fällen gewährleistet werden, dass sich der Besucher zur Betrachtung eines Ausstellungsstücks auch in der entsprechenden Hörzone positioniert. Für große Besuchergruppen ist dies sogar noch schwieriger zu erreichen.

Lautsprecherinstallationen sind zudem eine stete Lärmbelastung, da sie unweigerlich auch an benachbarten Ausstellungsstationen wahrgenommen werden können. In vielen Museumszenarien stellt ein Übersprechen zwischen Stationen ein Problem dar. Neben dem enormen technischen Aufwand ist dies sicherlich auch ein Grund warum Wellenfeldsynthesen nur selten im Museum zum Einsatz kommen.

Transaurale Wiedergabe

Die Wiedergabe binauraler Signale über Lautsprecher, auch transaurale Wiedergabe genannt, ist verfahrensbedingt nur begrenzt möglich, da die Signale bereits die binauralen und räumlichen Merkmale der Aufnahmesituation enthalten. Bei der Lautsprecherwiedergabe werden diese zusätzlich durch die binauralen und räumlichen Merkmale der Wiedergabesituation überlagert und zum Teil verdeckt.¹¹⁰

Zudem kommt es zum Übersprechen der Signale, da der Schall beider Lautsprecher auch beide Ohren erreicht. Tatsächlich sind die Signale aber eindeutig einem der beiden Ohren zugeordnet. Die Folgen

¹⁰⁹ (Theile, Dickreiter, Graul, Camerer, & Spikofski, 2014) S. 228 ff.

¹¹⁰ (Slavik & Weinzierl, 2008) S. 677 f.

sind Klangverfärbung und ein Verlust eines Großteils der Positionsinformationen. Die in dem Signal nach wie vor enthaltenen ILDs und ITDs führen somit nur noch zu einer einfachen Stereoabbildung durch Phantomschallquellen.¹¹¹

Mit Hilfe von Cross-Talk-Cancellation (CTC), einer Übersprechungskompensation mit gegenphasigen Signalen, können binaurale Signale zwar über Lautsprecher vollständig wiedergegeben werden, jedoch verkleinert dieses Verfahren noch einmal zusätzlich die Hörzone und ist deshalb für den Einsatz im Museum kaum geeignet.¹¹²

Der größte Vorteil der Lautsprecherwiedergabe besteht darin, dass sie für soziale Interaktionen kein Hindernis darstellt. Die soziale Komponente ist für viele Besucher ein wichtiger Aspekt, der zum Museumsbesuch motiviert.

Kopfhörerwiedergabe

Umgekehrt liegt der größte Nachteil der Audiowiedergabe über Kopfhörer darin, dass sie den Hörer von seinem Umfeld abschottet. Dadurch wird nicht nur die Kommunikation mit anderen Besuchern, sondern auch die Wahrnehmung von natürlichen Schallquellen in der Ausstellung eingeschränkt. In Ausstellungen, in denen die Klangcharakteristik eines Ausstellungsobjekt von Bedeutung ist, mag dies ein Ausschlusskriterium für den Einsatz von Kopfhörern sein.

Für Audiosignale die mit kanalbasierten, objektbasierten oder einem High Order Ambisonic Verfahren aufgenommen wurden ergeben sich weitere Probleme. Die Kopfhörerwiedergabe kann naturgemäß nur über zwei Kanäle erfolgen. Entweder müssen die Signale also aufwendig mit HRTFs gefaltet werden oder aber alle überzähligen Kanäle werden zu einer Stereomischung heruntergemischt, wobei unweigerlich Positionsinformationen verloren gehen.

Lateralisation

Zudem kommt es bei der Kopfhörerwiedergabe zur sogenannten In-Kopf Lokalisation oder auch Lateralisation. Dabei verschiebt sich die Stereobasis in den Kopf des Hörers und Phantomschallquellen können nur noch auf der Achse zwischen beiden Ohren lokalisiert werden. Um dies zu vermeiden müssen die Audiokanäle vor dem Downmix positionsgerecht mit den entsprechenden HRTFs gefaltet werden.¹¹³

¹¹¹ (Sodnik & Tomažič, 2015) S. 24 f.

¹¹² (Garas, 2000) S. 30 ff.

¹¹³ Vgl. (Blauert & Braasch, 2008) S. 99 f. und (Duraiswami, et al., 2005) S. 10 f.

Eine im Museum durchaus gängige Abhörsituation ist die monotische, d.h. nur über einen Ohrhörer erfolgende, Wiedergabe. Häufig werden in audiovisuellen Medienstationen Einhandhörer genutzt. Für Spatial Audio Anwendungen kommt diese Abhörsituation jedoch praktisch nicht in Frage, da ein einzelnes Ohrsignal nur eine begrenzte Lokalisation zulässt.¹¹⁴

Binaurale Signale über Kopfhörer

Binaurale Signale wiederum lassen sich am einfachsten und besten über Kopfhörer am Außenohr wiedergeben. Dabei ist auf einen der Aufnahmesituation entsprechenden Lautstärkepegel zu achten. Auf Bearbeitung der Ohrsignale mit Effekten sollte verzichtet werden, da diese den realistischen Eindruck der Aufnahme zerstören.¹¹⁵

Eine korrekte Wiedergabe der binauralen Signale kann durch die nichtlineare Übertragungsfunktion von Kopfhörern gefährdet werden, da dabei Klangverfärbungen auftreten, die zu einer inkorrekten Lokalisation führen können. Eine unpassende Trageposition der Kopfhörer kann im schlimmsten Fall dieselben Auswirkungen haben. Im Museumskontext spricht dies für die Verwendung von Einheitskopfhörern mit bekannter Übertragungsfunktion, da so deren Einfluss durch inverse Filterung ausgeglichen werden kann¹¹⁶

Binaural Sky

Eine weitere Wiedergabemöglichkeit ist das Binaural Sky Verfahren, bei dem binaurale Signale über virtuelle Kopfhörer wiedergegeben werden. Diese virtuellen Kopfhörer werden durch ein über dem Kopf des Hörers angebrachtes Lautsprecherarray erzeugt, das mithilfe der Wellenfeldsynthese zwei virtuelle Schallquellen direkt am Außenohr des Hörers erstellt. Diese können via Head-Tracking auch bei Kopfbewegungen nachgeführt werden.¹¹⁷

Gegenüber der Kopfhörerwiedergabe bietet dieses Verfahren den Vorteil, dass auch natürliche Schallquellen aus dem Ausstellungsraum wahrgenommen werden können. Zudem kann sich der Hörer frei um seine eigene Achse drehen. Die sonstige Bewegungsfreiheit ist jedoch auch bei diesem Verfahren eingeschränkt, da sich der Besucher unterhalb des Lautsprecherarrays aufhalten muss.

¹¹⁴ Vgl. (Blauert & Braasch, 2008) S. 88

¹¹⁵ (Theile, Dickreiter, Graul, Camerer, & Spikofski, 2014) S. 218 und S. 350 f.

¹¹⁶ (Slavik & Weinzierl, 2008) S. 674 f.

¹¹⁷ (Theile, Neue Anwendung der Wellenfeldsynthese: Binaural Sky, 2007) S. 2 ff.

5 BINAURALTECHNIK IM MUSEUM

5.1 VIRTUAL UND MIXED REALITY

Die Binauraltechnik hat durch den aktuellen Trend zu Virtual und Augmented Reality einen Aufschwung erlebt. Eine hohe Immersion der Nutzer ist dabei grundlegend für Mixed Reality Anwendungen. Aufgrund des hohen Realismus stellt Spatial Audio ein effektives Werkzeug dazu dar.¹¹⁸

Schon seit einigen Jahren wird die Möglichkeit erforscht, Virtual und Mixed Reality Anwendungen zu Bildungszwecken einzusetzen. Der aktuelle Stand der Technik macht es nun zum ersten Mal möglich, ernsthaft über einen großflächigen Einsatz in informellen Bildungseinrichtungen wie dem Museum nachzudenken.¹¹⁹

Die in Mixed Reality Anwendungen zum Einsatz kommenden immersiven Klangwelten sollen dabei nicht nur dreidimensional sondern auch adaptiv oder sogar interaktiv sein. Unter den vorgestellten Spatial Audio Verfahren ist die Binauraltechnik das gängigste Verfahren für diesen Einsatzzweck. Im folgenden Kapitel sollen daher einige Aspekte behandelt werden, die für die Gestaltung von Virtual und Augmented Spatial Audio Anwendungen für Museen mit Hilfe der Binauraltechnik von Bedeutung sind.

5.2 SPATIAL AUDIOGUIDES

Audioguides haben sich zu einem festen Bestandteil der Museumslandschaft entwickelt. Genau genommen handelt es sich bei diesen Geräten sogar um die einfache Form einer Augmented Reality Anwendung. Audioführungen erreichen zwar nur selten den Immersionsgrad eines einfachen Hörbuchs, aber sie erzeugen ein virtuelles Klassenzimmer im Kopf des Hörers in dem eine Erzählerstimme die reale Museumswelt um eine zusätzliche Informationsebene erweitert.

Es liegt daher nahe, den Audioguide im nächsten Schritt um eine immersive räumliche Komponente zu erweitern. Das Hauptaugenmerk der Forschung im Museumsbereich liegt daher vor allem auf der

¹¹⁸ (Bonneel, 2009) S. 26

¹¹⁹ Vgl. (Hall, et al., 2001) und (Hughes, Stapleton, Hughes, & Smith, 2005) S. 24 ff.

Entwicklung von Spatial Audioguides.¹²⁰ Bestandteil der Untersuchungen sind außerdem verschiedene Interaktionsformen mit diesem System¹²¹, sowie ihr pädagogischer Mehrwert für das Museum.¹²²

Audiovisuelle Mixed Reality

Unter den untersuchten Mixed Reality Anwendungen sind auch Spatial Audioguides, die mit einer grafischen Benutzeroberfläche oder anderen Formen visueller Medieninhalte arbeiten. Daneben existieren zahlreiche Vorschläge zu Virtual Reality Anwendungen für die Museumslandschaft. Bei einer derartigen Verbindung von Spatial Audio mit computergestützter Grafik sind weitere Faktoren zu beachten.

Werden visuelle und auditive Stimuli kombiniert, so überwiegt bei der Lokalisation der visuelle Eindruck. Diese Tatsache machen sich beispielsweise Bauchredner zu nutzen. Darüber hinaus toleriert das Gehirn einen gewissen Zeitversatz zwischen den beiden Stimuli. Die Kombination von Spatial Audio mit einem sichtbaren Objekt erleichtert somit die Zuordnung und Lokalisation von Schallereignissen.¹²³

Dabei ist jedoch ist zu beachten, dass sich eine starke Diskrepanz in der Qualität der virtuellen und auditiven Stimuli negativ auf die subjektive Qualität der gesamten Augmented Reality Anwendung auswirkt.¹²⁴

5.3 BINAURALE SIGNALVERARBEITUNG

Rendering Pipeline

Mit der Binauraltechnik ist es möglich, ein natürliches Audioerlebnis zu synthetisieren. Dazu müssen den trocken aufgenommenen Audiosignalen sowohl Positions-, Abstands-, Bewegungs- als auch Rauminformationen hinzugefügt werden.¹²⁵

Damit sich die Audioumgebung interaktiv auf die Position und Bewegung des Hörers anpassen kann, muss die Berechnung der Signale in Echtzeit erfolgen. Dazu ist eine hohe Rechenleistung nötig, die

¹²⁰ Vgl. (Terrenghi & Zimmermann, 2004) oder (Heller, Knott, Weiss, & Borchers, 2009)

¹²¹ Vgl. (Wakkary & Hatala, 2007) oder (Kaghat & Cubaud, 2010)

¹²² Vgl. (Grinter, et al., 2002) oder (Murphy & Pitt, 2001)

¹²³ (Bonneel, 2009) S. 20

¹²⁴ (Tsingos, Gallo, & Drettakis, Perceptual Audio Rendering of Complex Virtual Enviroments, 2004)

¹²⁵ (Gardener, 1999) S. 4

nur durch eine entsprechend effektive Nutzung der Computerressourcen realisiert werden kann. Zu diesem Zweck wurden sogenannte Audio Rendering Pipelines entwickelt.¹²⁶

Es existieren zahlreiche, zum Teil stark spezialisierte Ansätze zum Aufbau dieser Pipelines. Naturgemäß bringt jeder Ansatz ein individuelles Set an Stärken und Schwächen mit sich. Während im Bereich von Computerspielen und Virtual Reality vor allem die immersive Wirkung und der flüssige Betrieb im Mittelpunkt stehen, liegt bei Akustiksimulationen aus dem Bereich der Architektur das Augenmerk auf einer realitätsnahen Synthese des Schallfeldes. Die Wahl der Rendering Pipeline sollte deshalb anwendungsbasiert erfolgen.¹²⁷

Im Folgenden sollen einige häufig verwendete Ansätze zur Schallfeldsynthese durch digitale Signalverarbeitung vorgestellt werden. In vielen modernen Rendering Pipelines erfolgt die Synthese der Positions- und Rauminformationen getrennt voneinander, d.h. aufgeteilt in Direktschall, erste Raumreflexionen und Nachhall. Die nächsten Kapitel folgen derselben Gliederung.

Synthese des Direktschalls

Der Direktschall enthält Bewegungs-, Abstands- und Positionsinformationen über die Schallquelle. Diese gilt es für die trockenen Audiosignale zu synthetisieren.

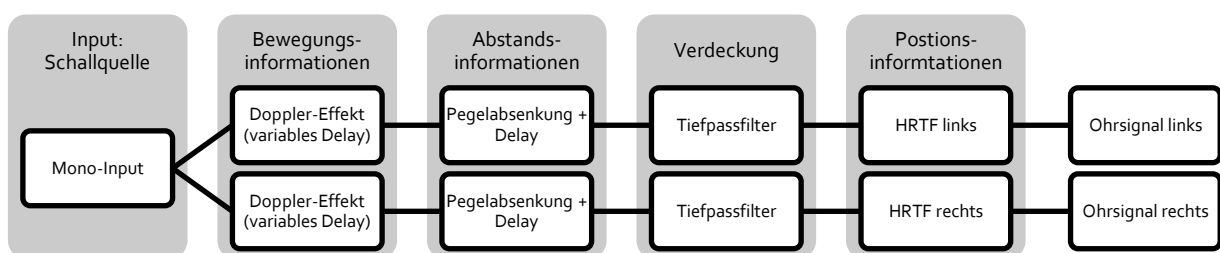


Abbildung 7 - Rendering Pipeline: Direktschall¹²⁸

Durch Bewegung der Schallquelle werden die von ihr emittierten Wellen gestaucht bzw. gedehnt. Dieser sogenannte Doppler-Effekt wird als Änderung der Tonhöhe wahrgenommen und muss somit synthetisiert werden.¹²⁹

Ist die Bewegungsgeschwindigkeit der Schallquelle bekannt, so kann dieser Effekt relativ einfach durch einen variablen Delay-Effekt simuliert werden. Gleiches gilt für Bewegungen des Hörers, auch

¹²⁶ (Rumsey, 2001) S. 78

¹²⁷ (Tsingos, A Versatile Software Architecture for Virtual Audio Simulations, 2001) S. 1

¹²⁸ Nach (Gardener, 1999) S. 7. Copyright 1999 Wave Arts Inc.

¹²⁹ Vgl. (Sommerfeld, 1954) S. 66 f.

wenn der Grad der Tonhöhenänderung im Vergleich zur Bewegung der Schallquelle unterschiedlich ausfällt.¹³⁰

In Abhängigkeit von der Entfernung des Schallobjekts zum Hörer muss der Signalpegel angepasst werden, da mit zunehmendem Abstand weniger der abgestrahlten Schallenergie beim Hörer ankommt. Um die Laufzeit zum Hörer zu simulieren wird das Signal darüber hinaus mit einem Delay versehen.¹³¹

In der Praxis kommt es häufig vor, dass sich weitere Objekte im Schallausbreitungspfad befinden. Diese Objekte verdecken aus Sicht des Hörers die Schallquelle und reflektieren in Abhängigkeit von ihrer Größe vor allem hohe Frequenzen. Derartige Verdeckungen können beispielsweise durch Ray-tracing erkannt und durch einen Tiefpassfilter simuliert werden.¹³²

Zur Darstellung von stationären Punktschallquellen werden Audiosignale mit den Außenohrübertragungsfunktionen gefaltet. Welches HRTF-Paar zum Einsatz kommt, hängt von der Position der Schallquelle in Relation zum Hörer ab. Während die Position der Schallquelle durch die Ausstellungsgestaltung festgelegt ist, müssen Position und Orientierung des Hörers in adaptiven Anwendungen durch Sensoren in Echtzeit ermittelt werden.¹³³

Da jede HRTF-Bibliothek nur eine begrenzte Anzahl an Raumpositionen abdecken kann, ist es möglich, dass für die relative Position der Schallquelle zum Hörer kein entsprechendes HRTF-Paar vorhanden ist. In diesem Fall kann durch lineare Interpolation die gesuchte Position näherungsweise mit Hilfe von benachbarten und vorhandenen Außenohrübertragungsfunktionen bestimmt werden.¹³⁴

Synthese der Rauminformationen

Das menschliche Gehör kann Schallquellen auch ohne Reflektionen lokalisieren, z.B. im freien Schallfeld. Jedoch sind sowohl frühe Reflektionen als auch der Nachhall maßgeblich an der Bildung eines natürlichen Raumeindrucks beteiligt. Zur Simulation eines realistischen Schallfeldes mit einem hohen Grad an Immersion ist daher zwangsläufig eine Synthese der Rauminformationen notwendig.¹³⁵

¹³⁰ (Gardener, 1999) S. 6

¹³¹ (Foale & Vamplew, 2007) S. 2

¹³² (Gardener, 1999) S. 6

¹³³ (Garas, 2000) S. 27 ff.

¹³⁴ (Sodnik & Tomažič, 2015) S. 21 f.

¹³⁵ Vgl. (Garas, 2000) S. 20 f.

Für die absolut realitätsnahe Synthese eines Schallfeldes müssten die Ausbreitungspfade aller Reflexionen, sowohl der frühen als auch des Nachhalls, ermittelt werden. Diese müssten anschließend, analog zum Direktschall, den kompletten Renderingprozess durchlaufen. Für eine Echtzeitanwendung würde dies allerdings ein zu hoher Rechenaufwand bedeuten.¹³⁶

Zur Implementierung von Algorithmen zur Reflektionssynthese ist deshalb stets ein Kompromiss aus realitätsnaher Nachbildung und Rechenaufwand gefragt. Es wird zwischen drei verschiedenen Ansätzen unterschieden: geometrische, wellenbasierte und statistische Verfahren.

Geometrische Verfahren

Zu den geometrischen Verfahren zählen die aus der Computergrafik bekannten Verfahren wie *Raytracing* und *Beamtracing*, sowie das Spiegelschallquellenverfahren. Anstatt des Wellenmodells betrachten diese Methoden die Schallausbreitung vereinfacht anhand eines Strahlenmodells. Dies ermöglicht die Ermittlung von sogenannten virtuellen Schallquellen mit Hilfe geometrischer Operationen wie z.B. der Berechnung von Einfallswinkel- und Ausfallswinkeln.¹³⁷

Anschließend werden die Ohrsignale für jede dieser virtuellen Schallquellen mit den entsprechenden Abstands-, Bewegungs- und Positionsinformationen versehen. Dies erfolgt analog zur Synthese des Direktschalls. Zusätzlich muss noch die frequenzabhängige Absorption der Reflektionsflächen berücksichtigt werden. Diese wird durch einen entsprechenden Filter näherungsweise simuliert.¹³⁸

¹³⁶ Vgl. (Garas, 2000) S. 58

¹³⁷ (Foale & Vamplew, 2007) S. 4 f.

¹³⁸ (Begault, 2000) S. 147

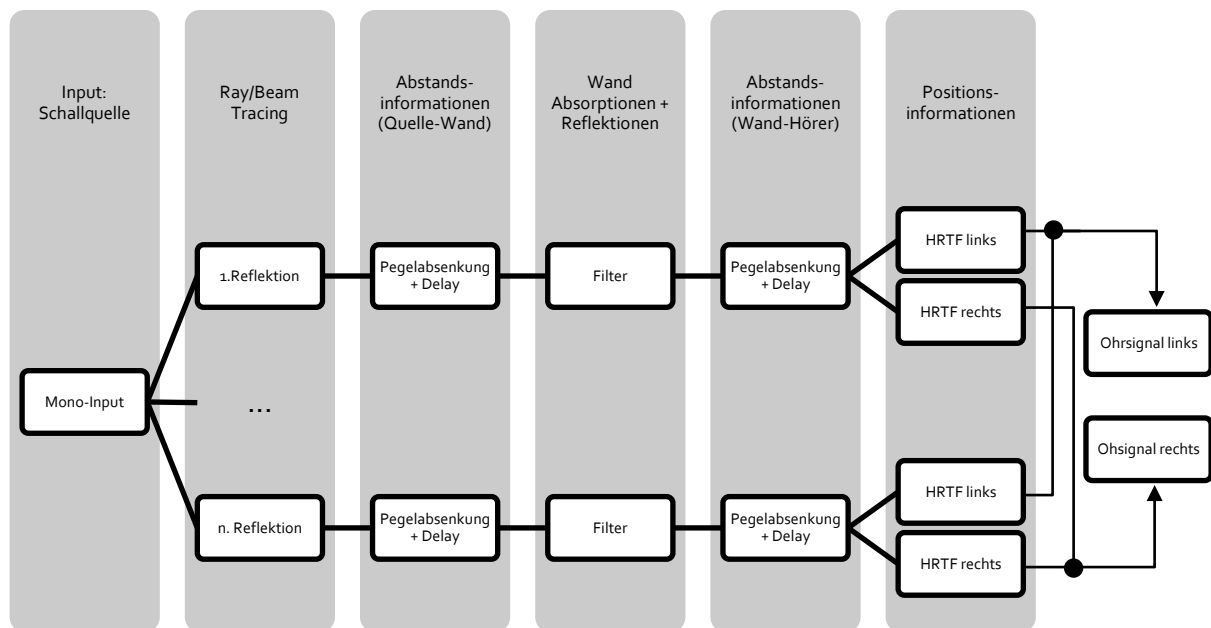


Abbildung 8 - Rendering Pipeline: Geometrische Verfahren¹³⁹

Wellenbasierte Verfahren

Schallwellen werden nur dann an einer Oberfläche gerichtet reflektiert, wenn diese Fläche um ein vielfaches größer als die Wellenlänge ist. Tiefe Frequenzen, mit größeren Wellenlängen als die Reflektionsflächen, werden dagegen diffus reflektiert. Folglich kann für die realitätsnahe Synthese der Reflektionen von tiefen Frequenzen das Strahlenmodell nicht verwendet werden.¹⁴⁰

Wellenbasierte Verfahren nutzen eine Reihe mathematischer Methoden, wie z.B. die Finite-Elemente-Methode oder Randelementmethode, zur Lösung von Differentialgleichungen wie beispielsweise dem Kirchhoff-Helmholtz-Integral. Da es diese Gleichung ermöglicht den Schalldruck an jedem beliebigen Punkt innerhalb eines begrenzten Volumens zu bestimmen, können Reflektionen auf diesem Weg berechnet werden.

Diese mathematischen Verfahren kommen meist in Kombination mit geometrischen Verfahren zum Einsatz. Wellenbasierte Verfahren übernehmen dabei die Synthese der tiefen Frequenzen. Zwar ist mit diesen Verfahren eine akkurate Nachbildung der Reflektionen möglich, jedoch auf Kosten eines hohen Rechenaufwandes. Infolgedessen beschränkt sich der Einsatz dieser Verfahren häufig auf architektonische Akustiksimulationen, nicht jedoch auf Echtzeitanwendungen.¹⁴¹

¹³⁹ Nach (Begault, 2000) S. 153. Copyright 2000 Durand Begault

¹⁴⁰ (Begault, 2000) S. 148 f.

¹⁴¹ (Funkhouser, et al., 2004) S. 740

Statistische Verfahren

Statistische Verfahren zielen dagegen nicht auf eine präzise Simulation der Reflektionen ab, sondern beschränken sich darauf einen annähernd realistischen Raumeindruck zu erzeugen. Aus diesem Grund werden sie auch wahrnehmungsbasierte Verfahren genannt.¹⁴² Einfache parametrische Kamm-/Allpass-Filtersysteme werden dabei zur Erzeugung einer künstlichen Raumimpulsantwort genutzt. Die Implementation derartiger Algorithmen ist äußerst recheneffizient.¹⁴³

Diese wahrnehmungsbasierten Verfahren kommen hauptsächlich bei der Synthese des Nachhalls zum Einsatz. Zu diesem Zeitpunkt der Schallausbreitung existiert eine derart große Anzahl, nahezu wahllos verteilter Reflektionen, dass diese annähernd normalverteilt sind und somit nachgebildet werden können.¹⁴⁴

Kombinierte Verfahren

In Virtual und Augmented Reality Anwendungen kommt häufig eine Kombination der verschiedenen Verfahren zum Einsatz. Die frühen Reflektionen werden mit Hilfe von geometrischen Verfahren ermittelt, während der Nachhall mit einem wahrnehmungsbasierten Verfahren gebildet wird. Diese Methode stellt für derartige Anwendungen einen passenden Kompromiss aus Realitätsnähe und Rechenaufwand dar.¹⁴⁵

Der Nachhall enthält bei diesen Verfahren also keine Richtungsinformationen, obwohl dies nachgewiesenermaßen einen Einfluss auf den wahrgenommenen Raumeindruck hat.¹⁴⁶ Angesichts des dadurch eingesparten Rechenaufwandes ist die verminderte Realitätsnähe, von akustischen Simulationen einmal abgesehen, für die meisten Museumsanwendungen verschmerzbar.

5.4 BESUCHER-TRACKING

Für Spatial Audioguides ist es notwendig, virtuelle Schallquellen fest in einer Ausstellung verorten und mithilfe von HRTF-Filtern für Hörer lokalisierbar machen zu können. Dazu muss sowohl die Position und Abstrahlcharakteristik der Schallquelle, als auch die Position und Orientierung des Hörers bekannt sein.

¹⁴² (Gardner, 2002) S. 87 f.

¹⁴³ (Zölzer, 2008) S. 846

¹⁴⁴ (Gardner, 2002) S. 97

¹⁴⁵ (Begault, 2000) S. 83

¹⁴⁶ Vgl. (Wakuda, Furuya, Fujimoto, Isogai, & Anai, 2003)

Positions-Tracking

Während alle notwendigen Informationen bezüglich der Schallquelle in einem Ausstellungsszenario festgelegt und auch daraus abgerufen werden können, können sich Besucher in einer Ausstellung ständig frei bewegen. Mit Hilfe sogenannter Real-Time Locating Systems (RTLS) können die Aufenthaltsorte von Museumsbesuchern in einer Ausstellung fortlaufend erfasst werden.

Im Freien kann das satelitenbasierte Globale Positionsbestimmungssystem GPS eingesetzt werden. Die meisten aktuellen mobilen Endgeräte unterstützen standardmäßig GPS und es existiert eine Vielzahl an Softwareangeboten, die die Implementierung erleichtern.¹⁴⁷ Für geschlossene Räume existiert eine Reihe von Verfahren, die sich entweder auf das lokale Wi-Fi Netz, auf aktive RFID-Chips¹⁴⁸ oder auf Bluetooth Low Energie Beacons stützen.¹⁴⁹

Optische Tracking-Verfahren sind zwar denkbar, jedoch mit einem großen Kalibrierungsaufwand verbunden und für große Besuchergruppen nur bedingt geeignet.¹⁵⁰ Jedoch könnte in Zukunft ein sensorfreies, kamerabasiertes Positions- und Orientierungs-Tracking mit Hilfe von sogenannten *articulated body pose estimation* Algorithmen erfolgen.¹⁵¹

Head-Tracking

Die Orientierung des Besuchers kann im einfachsten Fall aus zwei aufeinanderfolgenden Positionsmessungen ermittelt werden. Jedoch ist dieses Verfahren darauf angewiesen, dass sich der Besucher zwischen den Messungen auch fortbewegt. Für einfache Navigationsanwendungen mag dieses Verfahren also ausreichen. Da sich Museumsbesucher jedoch frei bewegen, vor Ausstellungsstücken stehen bleiben oder sich auf der Stelle drehen und umblicken können, ist dieses Verfahren im Museums-umfeld keine zufriedenstellende Lösung.¹⁵²

Zusätzlich zur Position muss also die Kopfbewegung der Besucher getrackt werden. Meist wird dazu ein Sensor am Kopfhörer der Nutzer angebracht. Da sowohl einfache Magnetometer als auch Gyrometer recht störanfällig sind, wird in der Praxis eine inertielle Messeinheit (IMU) verwendet. Diese

¹⁴⁷ Vgl. (Hall, et al., 2001) S. 93

¹⁴⁸ (Wakkary & Hatala, 2007) S. 286

¹⁴⁹ (Faragher & Harle, 2014) S. 201 f.

¹⁵⁰ (Heller, Knott, Weiss, & Borchers, 2009) S. 4490

¹⁵¹ (Vazquez-Alvarez, Aylett, Brewster, Von Jungensfeld, & Virolainen, 2016) S. 3:27

¹⁵² (Heller, Jevanesan, Dietrich, & Borchers, 2016) S. 279

Sensoren greifen dabei auf die Messungen mehrerer Sensoren zurück und erzielen dadurch ein verlässliches Ergebnis.¹⁵³

Mobile Applikationen

Während bis vor einigen Jahren noch ein großer Hardwareaufwand zur Umsetzung einer Spatial Audio Anwendung nötig war, sind moderne Smartphones heute in der Lage qualitativ hochwertige Spatial Audio Rendering Algorithmen auszuführen.¹⁵⁴ Anwendungen können daher dem Besucher nun als mobile Applikation für die Nutzung auf dem eigenen Smartphone bereitgestellt werden. Dies verringert den technischen Aufwand für Museen um ein Vielfaches.

Zudem verfügen die meisten Smartphones über GPS, Wi-Fi sowie über Magneto-, Gyro- und Accelerometer. Diese Reihe von Sensoren kann wiederum zum Position- und Head-Tracking der Besucher genutzt werden.¹⁵⁵

5.5 ENTWICKLUNGSWERKZEUGE FÜR SPATIAL AUDIO ANWENDUNGEN

Sogenannte *authoring tools* oder Entwicklungswerkzeuge vereinfachen die Entwicklung von komplexen Spatial Audio Anwendungen. Sie liefern den Kuratoren eine grafische Benutzerschnittstelle mit deren Hilfe interaktive Spatial Audio Installationen gestaltet werden können.¹⁵⁶

Spatial Audio Entwicklungswerkzeuge erfüllen grundsätzlich mehrere Funktionen. Dreidimensionale Polygonmodelle der Museums Umgebung müssen erstellt werden, unter anderem als geometrische Grundlage des Spatial Audio Renderers. Zudem müssen Schallquellen platziert sowie deren Abstrahlcharakteristik definiert werden. Gleiches gilt für das akustische Raumverhalten und die Interaktionsmöglichkeiten der Ausstellung.¹⁵⁷

Es gibt zahlreiche Angebote im Bereich der Spatial Audio Entwicklungswerkzeuge. Es existieren „High-Level“ Gestaltungswerkzeuge mit denen sich Spatial Audio Schallfeldern mit nur wenig Aufwand erzeugen lassen.¹⁵⁸ Die einfache Bedienung ist allerdings häufig mit eingeschränktem

¹⁵³ (Kaghat & Cubaud, 2010) S. 167 f.

¹⁵⁴ (Heller, Jevanesan, Dietrich, & Borchers, 2016) S. 278

¹⁵⁵ (Marotto, et al., 2013)

¹⁵⁶ Vgl. (Begault, 2000) S. 9

¹⁵⁷ (Kaghat & Cubaud, 2010) S. 165 f.

¹⁵⁸ Vgl. Das DAW Plugin von (Oculus VR LLC, 2017)

Gestaltungsfreiraum verbunden. Je nach Komplexität und Ausgefallenheit einer Installation, sind gegebenenfalls individuelle „Low-Level“ Ansätze von Nöten.¹⁵⁹

Game Engines

Spatial Audio kommt schon seit längerem in Computerspielen zum Einsatz. Moderne Game Engines wie zum Beispiel die *Unity*¹⁶⁰ und die *Unreal*¹⁶¹ Engine sind daher in der Lage Spatial Audio zu implementieren. Mit dem Aufkommen von Smartphones und Head Mounted Displays haben sich Engines weg vom reinen Programmierwerkzeug von Desktopspielen hin zu einem Multiplattformtool für Virtual und Augmented Reality Spiele und Anwendungen entwickelt. Ein Einsatz von Game Engines als Entwicklungswerkzeug für Spatial Audio Installationen im Museum bietet sich daher an.

Game Engines können mehrere der von einem Spatial Audio Entwicklungswerkzeug geforderten Funktion eigenständig übernehmen. Die Engines sind in der Lage ein Raummodell der Ausstellung zu modellieren, Schallquellen darin zu positionieren und Interaktionsmöglichkeiten mit Objekten und Schallquellen festzulegen. Außerdem können zahlreiche Eingabemöglichkeiten implementiert werden, die es dem Besucher ermöglichen, mit seinem virtuellen Schallumfeld zu interagieren.

Die meisten modernen Game Engines bieten standardmäßig die Funktion Schallquellen räumlich darzustellen. Jedoch liefern diese Standardfunktionen nur eine qualitativ unzureichende Raumdarstellung. Aus diesem Grund kommt häufig sogenannte Audio Middleware zum Einsatz.¹⁶²

Audio Middleware

Audio Middleware kann entweder als alleinstehendes Programm betrieben oder als Plug-In in eine Game Engine integriert werden. Dadurch lassen sich die Vorzüge beider Engines kombinieren. Zudem sind die meisten Audio Middlewares auch als Programmierschnittstelle oder *application programming interface* (API) verfügbar und lassen sich somit auch in eigenen Programmen bzw. Game Engines einsetzen.¹⁶³

Die Audio Middleware übernimmt vor allem die Synthese der Rauminformationen. Der Nutzer kann dabei zwischen verschiedenen Verfahren zur Erzeugung von Reflektionen und Nachhall wählen. Die gängige *Wwise Audio Engine* bietet beispielsweise mit *Wwise convolution* ein statistisches Verfahren

¹⁵⁹ (Tsingos, A Versatile Software Architecture for Virtual Audio Simulations, 2001) S. 38

¹⁶⁰ (Unity Technologies, 2017)

¹⁶¹ (Epic Games Inc., 2004-2017)

¹⁶² Vgl. (Unity Technologies, 2017) Abs. „Known limitations of the example plugin“ S. „Audio Spatializer SDK“

¹⁶³ (Horowitz & Looney, 2014)

zur Hallerzeugung an, mit dem auch reale Raumimpulsantworten verwendet werden können. Mit *Wwise reflect* wird zudem ein geometriebasiertes Verfahren angeboten.¹⁶⁴

Die Synthese der Richtungsinformationen übernimmt wiederum ein spezialisiertes Plug-In: der sogenannte Spatializer. In manchen Fällen enthält die Audio Middleware bereits auch standardmäßig den Spatializer eines Drittanbieters.

Spatializer

Es existieren zahlreiche Spatializer, die meist für spezielle Einsatzbereiche entworfen wurden und entweder in die Audio Middleware oder direkt in die Game Engine integriert werden können. Die zurzeit gängigsten Spatializer sind: der *Oculus Spatializer*¹⁶⁵, *Google VR Spatial Audio*¹⁶⁶ und *Steam Audio*¹⁶⁷.

Das *Oculus Spatializer* Plug-In wurde ebenso wie *Google VR Spatial Audio* für mobile Virtual und Augmented Reality Anwendungen konzipiert. Googles Plug-In besteht dabei aus zwei Teilen: der *GVR Audio Renderer* übernimmt die Positionierung der Schallquellen, während sich *GVR Audio Room Effects* um die Synthese der Rauminformationen kümmert. *Steam Audio* wiederum wurde in erster Linie für Computerspiele entwickelt und bietet neben einer Spatializerfunktion auch eine weitere Alternative für die Hallsynthese.

Individuelle Spatial Audio Entwicklerwerkzeuge

Obwohl die Zahl der angebotenen Softwarelösungen mit dem aktuellen Trend zu Virtual und Augmented Reality stark zugenommen hat¹⁶⁸, kann es sein, dass anspruchsvolle oder außergewöhnliche Anwendungen eine individuelle Lösung erfordern.

Dazu kann sowohl auf Audio Middleware als auch einige Spatializer zurückgegriffen werden, die auch als „Low-Level“ API und in manchen Fällen sogar als sogenanntes Software Development Kit (SDK) angeboten werden. Wenn noch mehr Kontrolle gefordert ist, bietet sich *XAudio2*¹⁶⁹ als Teil der *DirectX* Bibliothek für windowsbasierte Anwendungen oder eine plattformunabhängige Alternative wie *OpenAL*¹⁷⁰ an.

¹⁶⁴ (Audiokinetic Inc., 2017)

¹⁶⁵ (Oculus VR LLC, 2017)

¹⁶⁶ (Google Inc., 2016)

¹⁶⁷ (Valve Corporation, 2017)

¹⁶⁸ Vgl. (Ballhaus, et al., 2016)

¹⁶⁹ (Microsoft Corporation, 2017)

¹⁷⁰ (Creative Technology Limited, 2007)

5.6 PROBLEME UND OPTIMIERUNGSMÖGLICHKEITEN

Optimierung des Rechenaufwandes

Komplexe virtuelle Klangwelten erfordern einen hohen Rechenaufwand. Es ist daher eine Herausforderung zu gewährleisten, dass Spatial Audio Anwendungen auch mit begrenzten Ressourcen wie z.B. auf mobilen Endgeräten betrieben werden können. Existierende Lösungen verbinden dabei zwei Ansätze: Zum einen soll der Rechenprozess auf relevante Informationen beschränkt werden, zum anderen sollen sich Anwendungen flexibel an die vorhandenen Hardwareressourcen anpassen, um diese voll nutzen zu können.¹⁷¹

Der menschliche Wahrnehmungsapparat hat Grenzen. Eine leise, weit entfernte Quelle, wird gegenüber einer nahen, sehr lauten Quelle nicht mehr wahrgenommen. Derartige Phänomene werden Maskierungseffekte genannt und lassen sich bei der Reduktion des Rechenaufwandes nutzen.

Eine äußerst ökonomische Lösung bewertet Schallquellen aufgrund ihrer Entfernung zum Hörer und blendet solange weit entfernte Quellen aus, bis ein gewisses Rechenbudget eingehalten wird. Zwar kann dieses Verfahren gut an die Hardwareanforderungen angepasst werden, jedoch nur solange sich nicht zu viele Schallquellen in der Nähe des Hörers befinden.¹⁷²

Ein weiterer Ansatz ordnet die Schallquellen der Lautstärke am Ohr des Hörers entsprechend und sortiert alle Quellen aus, die unter eine festgelegte Wahrnehmungsschwelle fallen.¹⁷³ Alle übrigen Quellen werden ihrer Position entsprechend, in sogenannte Cluster gruppiert. Alle Schallquellen eines Clusters werden anschließend gemischt und nur die Summe aller Quellsignale durchläuft die Spatial Audio Pipeline. Die Gesamtanzahl der gerenderten Quellen entspricht somit der Clusteranzahl und kann entsprechend der Hardwaregegebenheiten festgelegt werden.¹⁷⁴

Der Verlust an Rauminformationen durch die Bündelung der Schallquellen ist wahrnehmbar. Eine Verbesserung der wahrgenommenen Räumlichkeit gegenüber dem einfachen Verfahren lässt sich dadurch erzielen, dass der Sichtbereich des Hörers mit einer anteilhaft überhöhten Clusteranzahl aufgelöst wird. Eine Unterauflösung des nichtsichtbaren ist weniger störend als im sichtbaren Bereich.¹⁷⁵

¹⁷¹ (Tsingos, Gallo, & Drettakis, Perceptual Audio Rendering of Complex Virtual Enviroments, 2003) S. 3

¹⁷² (Scherfgen, 2006) S. 448

¹⁷³ Vgl. (Gallo, Lemaitre, & Tsingos, Prioritizing signals for selective real-time audio processing, 2005) S. 5 f.

¹⁷⁴ (Tsingos, Gallo, & Drettakis, Perceptual Audio Rendering of Complex Virtual Enviroments, 2004) S. 251 ff.

¹⁷⁵ (Bonneel, 2009) S. 29 ff.

Hardwareunterstützung

Moderne Grafikprozessoren (GPUs) sind dem Hauptprozessor (CPU) bei der Lösung von parallelisierbaren Aufgaben leistungstechnisch überlegen. Aus dieser Tatsache hat sich das sogenannte *General Purpose Computation on Graphics Processing Unit* (GPGPU) Verfahren entwickelt, bei dem der Grafikprozessor auch zu Berechnung von Problemen eingesetzt wird, die nicht aus dem Bereich der Computergrafik stammen. Mit OpenCL existiert ein offener Standard, der die Implementierung entsprechender Algorithmen vereinfacht.¹⁷⁶

GPGPU lässt sich auch zur Beschleunigung von Spatial Audio Anwendungen nutzen. Ray- bzw. Beamtracing sind Algorithmen aus der Computergrafik und werden daher von der GPU standardmäßig unterstützt. Probleme wie die Berechnung von Reflektionen und Verdeckungen von Schallquellen lassen sich somit wesentlich schneller lösen. Aber auch die Verarbeitung der Spatial Audio Signale, speziell Filter- und Faltungsalgorithmen, lassen sich auf der GPU berechnen.¹⁷⁷

Zur effektiven Nutzung der Rechenleistung ist es notwendig, dass die verwendeten Audio Dateien bereits im Grafikkartenspeicher abgelegt wurden. Die Zugriffsgeschwindigkeit der GPU auf den Hauptspeicher ist aufgrund der geringen Bandbreite des Systembusses begrenzt. Das Leistungspotential der GPU kann dadurch nicht vollständig ausgenutzt werden und die Rechenzeit wird nur wenig verkürzt.¹⁷⁸

Individualisierte Head-Related Transfer Functions

In Spatial Audio Anwendungen kommen HRTFs aus Messungen an einem standardisierten Kunstkopf zum Einsatz. Diese generalisierten HRTFs unterscheiden sich von den individuellen HRTFs des Hörers, wodurch es zu Fehllokalisationen kommen kann. Die Qualität einer Spatial Audio Anwendung hängt also in hohem Maße von der Übereinstimmung der involvierten HRTFs ab.¹⁷⁹

Maßgeschneiderte HRTFs stellen daher eine enorme Verbesserung einer jeden Spatial Audio Anwendung dar. Die Messung individueller HRTFs ist jedoch aufwendig und nicht für die breite Masse der Nutzer realisierbar. Ein anderer Ansatz verfolgt die Möglichkeit generalisierte HRTFs an die Bedürfnisse des Nutzers anzupassen.

¹⁷⁶ (Khronos OpenCL Working Group, 2017)

¹⁷⁷ (Gallo & Tsingos, Efficient 3D Audio Processing on the GPU, 2004) S. 1

¹⁷⁸ (Tsingos, Using Programmable Graphics Hardware for Auralization, 2009) S. 80 ff.

¹⁷⁹ (Begault, 2000) S. 45

Zum einen besteht die Möglichkeit in Hörversuchen aus einer Sammlung verschiedener generalisierter HRTF-Sammlungen die für den Benutzer passendste auszuwählen. Ein weiterer Ansatz ist ein Hörversuch zur Erstellung einer sogenannten Look-up-Tabelle. Generalisierte HRTFs werden hier der individuellen Hörereignisrichtung des Nutzers zugeordnet.¹⁸⁰ Jedoch sind auch derartige Hörversuche zeitaufwendig und nicht für alle Anwendungen geeignet.

Alternativ können generalisierte HRTFs auch durch Skalierung an die individuellen HRTFs des Hörers angeglichen werden. Der benötigte Skalierungsfaktor kann dabei anhand von anatomischer, akustischer oder perzeptiver Eigenschaften ermittelt werden. Jedoch stellt dieses Verfahren nur dann eine Beschleunigung im Vergleich zu oben genannten Verfahren dar, wenn ein einziger Skalierungsfaktor zur Individualisierung der HRTFs verwendet wird. Durch individuelle Skalierungsfaktoren für jedes HRTF-Paar könnte zwar eine noch genauere Anpassung erfolgen, dies rechtfertigt jedoch den enormen Aufwand der experimentellen Ermittlung der Faktoren nicht.¹⁸¹

Alternativ können personalisierte HRTFs näherungsweise über ein grafisches Verfahren ermittelt werden. Dabei wird ein dreidimensionales Grafikmodell des Außenohrs erstellt, anhand dessen mithilfe von Raytracing personalisierte HRTFs berechnet werden. Auch bei diesem Verfahren kommt GPGPU zum Einsatz.¹⁸² Darüber hinaus existieren mehrere Verfahren zur numerischen Simulation von HRTFs.¹⁸³

Flächen- und Volumenschallquellen

Durch die Faltung der Quellsignale mit einer Kopfübertragungsfunktion lassen sich Schallquellen als Punktschallquellen darstellen. Flächen- und Volumenschallquellen, wie etwa ein Fluss oder ein Zug, lassen sich mit diesem Verfahren nur näherungsweise aus einer Summe von Punktschallquellen zusammensetzen.

Dieses Verfahren erzielt nur in begrenzten Fällen ein zufriedenstellendes Ergebnis. Zum einen entstehen hörbare Artefakte: Im Nahfeld wird nur die nächstliegende Teilquelle der Volumenschallquelle

¹⁸⁰ Ein Testsignal wird mit einer bestimmten HRTF gefaltet. Anschließend wird Elevation und Azimut des entstehenden Hörereignisses bestimmt. Die getestete HRTF wird anschließend der ermittelten Elevation und Azimut zugeordnet, unabhängig davon unter welcher Position die HRTF ursprünglich gemessen wurde.

¹⁸¹ (Martens, 2003) S. 226

¹⁸² (Dellepiane, Pietroni, Tsingos, Asselot, & Scopingo, 2008) S. 1721

¹⁸³ (Meshram, Mehra, & Manocha, 2014) S. 2 ff.

und somit als einfache Punktschallquelle wahrgenommen. Zum anderen ist die Berechnung vieler einzelner Punktschallquellen derart rechenintensiv, dass bei großen Schallquellen die Latenzzeit die Wahrnehmungsschwelle für Echtzeitanwendungen überschreitet.

Schissler et al. schlagen zur Lösung dieses Problems einen Algorithmus vor, der durch Projektion der Flächen- und Volumenschallquellen auf den Hörer umgebende Kugelflächenfunktionen und Faltung mit entsprechenden HRTFs einen individuellen Richtungsfilter berechnet. Dieses Verfahren ist äußerst ökonomisch und kann für Echtzeitanwendungen eingesetzt werden.¹⁸⁴

¹⁸⁴ (Schissler, Nicholls, & Mehra, 2016) S. 1359

6 FAZIT

In dieser Arbeit sollte das Potential von Spatial Audio Anwendungen für den Einsatz in Museen bestimmt werden. Zu diesem Zweck wurden sowohl das Kommunikationsmedium Museum untersucht als auch verschiedene Verfahren zur räumlichen Audiowiedergabe vorgestellt. Zudem wurden Mixed Reality Anwendungen, die auf Binauraltechnik zur Erzeugung von realistischen Klangwelten zurückgreifen, gesondert beleuchtet.

Es konnte gezeigt werden, dass Spatial Audio für informelle Lernsituationen wie Museen und Ausstellungen einen Mehrwert darstellt. Die Verfahren können in verschiedenen Funktionen zur Informationsübermittlung, Immersion und Unterhaltung flexibel eingesetzt werden und sind so in der Lage den Lerneffekt zu unterstützen.

Der Einsatz von Spatial Audio Anwendungen ist jedoch auch mit zahlreichen Schwierigkeiten verbunden. Mixed Reality Anwendungen wie in Kapitel 5 beschrieben, erfordern einen enormen technischen Aufwand. Diese sind nicht nur in der Anschaffung kostspielig, sondern auch in der Wartung. Das System muss für den Museumseinsatz auch für den Dauerbetrieb ausgelegt sein.

Für das Museumspersonal bedeutet eine solche Technik einen hohen Mehraufwand. Zum einen müssen Besucher in das System eingewiesen werden, zum anderen werden Fachkräfte für die Wartung der Technik benötigt.

Es sind immer wieder kritische Stimmen zu hören, die sich gegen übermäßigen Gebrauch von technischen Hilfsmitteln in Museen aussprechen und einen puristischen Ansatz einfordern. In der Tat besteht die Gefahr bei exzessivem Einsatz von Medientechnik, die Aufgabengebiete des Museums aus den Augen zu verlieren. Das Museum muss sich als Bildungseinrichtung stets gegen zahlreiche andere Freizeitangebote durchsetzen, ohne dabei selbst zu sehr auf Unterhaltung zu setzen.

Auch Spatial Audio kann und darf keinesfalls als "Allzweckwaffe" betrachtet werden. Erst in durchdachten, gut realisierten Installationen im Wechsel mit anderen Kommunikationsmitteln, kann es sein volles Potential entfalten. Ausschweifende und unüberlegte Implementierungen ersticken gleichwohl die Ausstellung in Technik und simulierter Räumlichkeit.

Jedoch hat die Vergangenheit gezeigt, dass derartige Befürchtungen weitestgehend haltlos sind. Das Museum hat sich nicht zum Kino, Jahrmarkt oder Themenpark verbogen, sondern mit fester Überzeugung seine eigene Identität weiterentwickelt. Medientechnik hat das Objekt nicht aus dem Museum verdrängt, sondern neue Blickwinkel erschlossen und auch Spatial Audio wird einen weiteren Kanal zur Erforschung, Darstellung und Kontextualisierung von Ausstellungsobjekten eröffnen.

INDEX

- 5**
5.1-Stereofonie..... 25
- A**
Accelerometer..... 46
Adressat 11
Ambisonic..... 28, 30, 36
Application Programming Interface *Siehe*
 Programmierschnittstelle
Äquivalenzstereofonie..... 24
Articulated Body Pose Estimation 45
Audio Middleware 47, 48
Audioguide..... 12, 38
Augmented Reality..... 14, 30, 38, 39, 44, 47, 48
Augmented Virtuality 14
Außenohrübertragungsfunktion *Siehe* *Head-Related Transfer Function*
Ausstellungen..... 10
Ausstellungsszenario..... 45
Authoring Tools..... *Siehe* *Entwicklungswerkzeuge*
Azimut..... 3
- B**
Beamtracing..... 42, 50
Bedeutungskonstruktion 11
Besucherfeedback 13
Besucherzentrierte Museen..... 16
B-Format 28
Binaural Room Impulse Responses 34
Binaural Sky..... 32, 37
Binauraltechnik 38, 39
Bluetooth Low Energie 45
Botschaft 11
- C**
Center-Lautsprecher 25
Cluster 49
CPU *Siehe* *Hauptprozessor*
Cross-Talk-Cancellation 36
- D**
Decoder..... 27
Delay-Effekt 40, 41
Direktschall 40
Doppler-Effekt..... 40
Downmix 27, 36
Druckstau 5
- E**
Ebene Welle 7, 31
Echoschwelle..... 8
Einhandhörer..... 37
Elevation 3
Entfernungs..... 3
 -lokalisierung 7
 -unschärfe 7
 -wahrnehmung 7, 33
Entwicklungswerkzeuge..... 46
Erzählungsbasierte Museen 16
- F**
Filter..... 50
 Allpass- 44
 Kamm- 44
Finite-Elemente Methode 43
Freies Schallfeld 4
Frühe Reflektionen 41, 44, 47
- G**
Game Engine 47
Gemeindemuseen 17
General Purpose Computation on Graphics
 Processing Unit 50, 51
Gesetz der ersten Wellenfront..... *Siehe*
 Präzedenzeffekt
GPGPU *Siehe* *General Purpose Computation on Graphics Processing Unit*
GPS 45, 46
GPU..... *Siehe* *Grafikprozessor*
Grafikprozessor 50
Gyrometer..... 45, 46
- H**
Hauptprozessor..... 50
Head Mounted Display 47
Head-Related Impulse Response..... 9, 33
Head-Related Transfer Function ... 8, 33, 34, 36, 41,
 44, 50, 51, 52
Holismus 22
Hörereignisrichtung 3
Hörzone..... 32, 35
Hüllkurve 5
Huygens-Fresnel-Prinzip 30
- I**
Immersion 13, 15, 22, 38, 41
Inertiale Messeinheit 45
In-Kopf Lokalisation *Siehe* *Lateralisation*
Intensitätsverhältnisse 7

K

Kirchhoff-Helmholtz-Integral	30, 43
Klangkunst	12
Klangverfärbungen	6, 7
Kommunikationsmedium	11, 16
Kommunikationsstrategie	11, 18, 19
Kontextualisierung	11
Kopfbezogenes Koordinatensystem	3
Kopfhörerwiedergabe	36
Kugelflächenfunktion	28, 29, 52
Kugelstrahler	7
Kunstkopfstereofonie	33

L

Lateralisation	36
Laufzeitdifferenz	5, 7, 8, 24
Lautsprecherwiedergabe	35
Liminalität	21
Lokalisation	3, 6, 8, 39
monoaurale	6
-smechanismen	5
-sunschärfe	6, 7, 34

M

Magnetometer	45, 46
Maskierungseffekte	49
Medianebene	6
Mensch-Maschine Interfaces	15
Mixed Reality	13, 38, 39
Mixed-Order System	29
Museum	10

N

Nachhall	41, 44, 47
Nationalmuseen	17

O

Objektbasierte Museen	16
O-Format	29
Ohrabstand	5
Ohrmikrofon	32
Ohrsignale	8

P

Pädagogischer Mehrwert	20
Pegelabsenkungen	7
Pegeldifferenz	5, 24
Periodendauer	5
Phantomschallquelle	8, 25, 26, 30, 36
Präzedenzeffekt	8
Programmierschnittstelle	47, 48
Punktschallquelle	29, 31

Q

Quasistationäre Töne	5
----------------------------	---

R

Randelementmethode	43
Raumimpulsantwort	31
Raumimpulsverhalten	29
Räumlichkeit	3
Raytracing	41, 42, 50, 51
Real-Time Locating Systems	45
Rendering Pipeline	40, 49
RFID	45
Richtungswahrnehmung	<i>Siehe</i> Lokalisation

S

Schallereignisrichtung	3, 8
Software Development Kit	48
Sondenmikrofon	32
Soundfield-Mikrofon	28
<i>Spatial Aliasing</i>	31
Spatial Audio	2
-guide	39
Interface	28
<i>Spatial Interferences</i>	32
<i>Spatial Truncation</i>	31
Spatializer	48
Spiegelschallquelle	7, 8, 42
Stereobasis	25
Stereo-Basiswinkel	25
Stereodreieck	24
Stereofonie	8, 24, 30
Subwoofer	25
Summenlokalisierung	8, 25
Surround-Lautsprecher	25
Sweet Spot	29, 35

T

Tracking	
Head-	29, 37, 46
Positions-	12, 45, 46
Transaurale Wiedergabe	35

U

Übersprechungskompensation	36
----------------------------------	----

V

Vector Base Amplitude Panning	28
Virtual Reality	14, 30, 38, 39, 40, 44, 47, 48
Virtuelle Schallquelle	42
Virtuelles Kontinuum	14

W

Wellenfeldsynthese	30, 31, 37
Wi-Fi	45, 46

LITERATURVERZEICHNIS

- Audiokinetic Inc. (2017). *Documentation Audiokinetic [Dokumentation]*. Abgerufen am 29. August 2017 von https://www.audiokinetic.com/library/edge/?source=SDK&id=ps4__specificinfo.html
- Baldis, J. J. (2001). Effects of Spatial Audio on Memory, Comprehension and Preference during Desktop Conferences. *CHI '01 Proceedings of the SIGCHI Conference on Human Factors in Computing Systems in Seattle, Washington, USA* (S. 166-173). New York: Association for Computing Machinery. doi:10.1145/365024.365092
- Ballhaus, W., Bruns, L., Deligios, F., Gräber, T., Kämmerling, S., Lorenz, M., . . . Wilke, N. (Hrsg.). (August 2016). Virtual Reality: Nimmt der Gamingmarkt eine Pionier-Rolle ein? *Digital Trend Outlook 2016*, S. 1-32. Abgerufen am 29. August 2017 von http://www.cpwissen.de/tl_files/pdf/STUDIEN/PwC_Studie_Virtual_Reality.pdf
- Baur, J. (2010). Was ist ein Museum? Vier Umkreisungen eines widerspenstigen Gegenstands. In J. Baur (Hrsg.), *Museumsanalyse - Methoden und Konturen eines neuen Forschungsfeldes* (S. 292). Bielefeld: transcript Verlag.
- Begault, D. R. (2000). *3-D Sound for Virtual Reality and Multimedia*. Hanover: NASA Center for AeroSpace Information. Abgerufen am 29. August 2017 von <https://ntrs.nasa.gov/archive/nasa/casi.ntrs.nasa.gov/20010044352.pdf>
- Bell, G. (2002). *Making Sense of Museums - The Museums as 'Cultural Ecology'*. Hillsboro: Intel Labs. Abgerufen am 29. August 2017 von http://echo.iat.sfu.ca/library/bell_o2_museum_ecology.pdf
- Blauert, J., & Braasch, J. (2008). Räumliches Hören. In S. Weinzierl (Hrsg.), *Handbuch der Audiotechnik* (S. 87-121). Berlin: Springer-Verlag. doi:10.1007/978-3-540-34301-1
- Bonneel, N. (2009). *Audio and Visual Rendering with Perceptual Foundations [Diss.]*. Sophia Antipolis: Université Nice Sophia Antipolis. Abgerufen am 29. August 2017 von <https://www-sop.inria.fr/reves/Basilic/2009/Bonog/Thesis.pdf>
- Breebaart, J., & Faller, C. (2007). *Spatial Audio Processing - MPEG Surround and Other Applications*. Chichester: John Wiley & Sons Ltd.
- Bugg, S. (2011). Playing Width Light: Incorporating Play into an Interactive Science Experience. In K. Beale (Hrsg.), *Museums at Play - Games, Interaction and Learning* (S. 68-83). Edinburgh: MuseumsEtc Ltd.
- Creative Technology Limited. (Juni 2007). *OpenAL Programmers Guide [Dokumentation]*. Abgerufen am 29. August 2017 von https://www.openal.org/documentation/OpenAL_Programmers_Guide.pdf
- Dellepiane, M., Pietroni, N., Tsingos, N., Asselot, M., & Scopingo, R. (2008). Reconstructing head models from photographs for individualized 3D-audio processing. *Computer Graphics Forum (Special Issue - Proceedings of the Pacific Conference on Computer Graphics and Applications in*

- Maui (Pacific Graphics)* (S. 1719-1727). Hoboken: Blackwell Publishing Ltd.
doi:10.1111/j.1467-8659.2008.01316.x
- Deutscher Museumsbund e. V. (2017). *Das Museum*. Abgerufen am 29. August 2017 von <http://www.museumsbund.de/themen/das-museum/>
- Dickreiter, M., & Goeres-Petri, J. (2014). Schallwahrnehmung. In M. Dickreiter, V. Dittel, W. Hoeg, & M. Wöhr (Hrsg.), *Handbuch der Tonstudioteknik* (S. 115-136). Berlin: Walter de Gruyter GmbH.
- Duraiswami, R., Zotkin, D. N., Li, Z., Grassi, E., Gumerov, N. A., & Davis, L. S. (2005). High Order Spatial Audio Capture and its Binaural Head-Tracked Playback over Headphones with HRTF Cues. *Proceedings 119th convention of AES in New York* (S. 1-16). New York: Audio Engineering Society. Abgerufen am 29. August 2017 von <http://www.aes.org/e-lib/browse.cfm?elib=13369>
- Epic Games Inc. (2004-2017). *Unreal Engine 4 Documentation [Dokumentation]*. Abgerufen am 29. August 2017 von <https://docs.unrealengine.com/>
- Faragher, R., & Harle, R. (2014). An Analysis of the Accuracy of Bluetooth Low Energy for Indoor Positioning Applications. *Proceedings of the 27th International Technical Meeting of The Satellite Division of the Institute of Navigation (ION GNSS+ 2014) in Tampa, Florida* (S. 201 - 210). Virginia: The Institute of Navigation Inc. Abgerufen am 29. August 2017 von <https://www.cl.cam.ac.uk/~rmf25/papers/BLE.pdf>
- Fellows, S. (2011). Elementary, My Dear Visitors: How Puzzles, Mysteries and Challenges Can Create Memorable Learning Experiences. In K. Beale (Hrsg.), *Museums at Play: Games, Interaction and Learning* (S. 128-139). Edinburgh: MuseumsEtc Ltd.
- Foale, C., & Vamplew, P. (2007). Portal-based Sound Propagation for First-Person Computer Games. *IE '07 Proceedings of the 4th Australasian conference on Interactive entertainment in Melbourne. Kapitel 9*, S. 1-8. Melbourne: RMIT University. Abgerufen am 29. August 2017 von <http://dl.acm.org/citation.cfm?id=1367965>
- Fugal, H., & Nair, V. (22. Februar 2017). *Spatial audio — bringing realistic sound to 360 video*. Abgerufen am 29. August 2017 von www.code.facebook.com:
<https://code.facebook.com/posts/412047759146896/spatial-audio-bringing-realistic-sound-to-360-video/>
- Funkhouser, T., Tsingos, N., Carlbom, I., Elko, G., Sondhi, M., West, J. E., . . . Ngan, A. (Januar 2004). A beam tracing method for interactive architectural acoustics. *The Journal of the Acoustical Society of America*(115), S. 739–756. doi:<http://dx.doi.org/10.1121/1.1641020>
- Gallo, E., & Tsingos, N. (2004). Efficient 3D Audio Processing on the GPU. *Proceedings of the ACM Workshop on General Purpose Computing on Graphics Processors in Los Angeles* (S. C-42). New York: Association for Computing Machinery. Abgerufen am 29. August 2017 von <http://www-sop.inria.fr/revs/Basilic/2004/GT04>
- Gallo, E., Lemaitre, G., & Tsingos, N. (2005). Prioritizing signals for selective real-time audio processing. *Proceedings of ICAD 05-Eleventh Meeting of the International Conference on Auditory Display* (S. 1-7). Limerick: International Conference on Auditory Display ICAD.
- Garas, J. (2000). *Adaptive 3D Sound Systems*. New York: Springer US.

- Gardener, W. G. (1999). *3D Audio and Acoustic Environment Modeling*. Arlington: Wave Arts, Inc.
Abgerufen am 29. August 2017 von
http://web.cs.wpi.edu/~gogo/hive/papers/Gardner_WaveArts_1999.pdf
- Gardner, W. G. (2002). Reverberation Algorithms. In M. Kahrs, & K. Brandenburg (Hrsg.), *Applications of Digital Signal Processing to Audio and Acoustics* (S. 85-132). New York: Kluwer Academic Publishers.
- Google Inc. (10. Oktober 2016). *Spatial Audio [Dokumentation]*. Abgerufen am 29. August 2017 von Google Developers VR: <https://developers.google.com/vr/concepts/spatial-audio>
- Görne, T. (2015). *Tontechnik - Hören, Schallwandler, Impulsantwort und Faltung, digitale Signale, Mehrkanaltechnik, tontechnische Praxis*. München: Carl Hanser Verlag.
- Grau, O. (2003). *Virtual art : from illusion to immersion*. Cambridge: Massachusetts Institute of Technology. Abgerufen am 29. August 2017 von
http://www.virose.pt/blog/atelier1multimedia/wp-content/uploads/2017/02/INTRO_Oliver-Grau-Virtual-Art-From-Illusion-to-Immersion.pdf
- Grinter, R. E., Aoki, P. M., Hurst, A., Szymanski, M. H., Thornton, J. D., & Woodruff, A. (2002). Revisiting the Visit: Understanding How Technology Can Shape the Museum Visit. *CSCW '02 Proceedings of the 2002 ACM conference on Computer supported cooperative work in New Orleans* (S. 146-155). New York: Association for Computing Machinery.
doi:10.1145/587078.587100
- Gurian, E. H. (2002). Choosing among the options: An opinion about museum definitions. *Curator: The museum journal*(45/2), 75-88. doi:10.1111/j.2151-6952.2002.tb01182.x
- Hall, T., Ciolfi, L., Bannon, L., Fraser, M., Benford, S., Bowers, J., . . . Flintham, M. (2001). The Visitor as Virtual Archaeologist: Explorations in Mixed Reality Technology to Enhance Educational and Social Interaction in the Museum. *VAST '01 Proceedings of the 2001 conference on Virtual reality, archeology, and cultural heritage in Athens* (S. 91-96). New York: Association for Computing Machinery. doi:10.1145/584993.585008
- He, J. (2017). *Spatial Audio Reproduction with Primary Ambient Extraction*. Singapore: Springer Science+Business Media Singapore Pte Ltd. doi:10.1007/978-981-10-1551-9
- Heller, F., Jevanesan, J., Dietrich, P., & Borchers, J. (2016). Where Are We? Evaluating the Current Rendering Fidelity of Mobile Audio Augmented Reality Systems. *MobileHCI '16 Proceedings of the 18th International Conference on Human-Computer Interaction with Mobile Devices and Services in Florence* (S. 278-282). New York: Association for Computing Machinery.
doi:10.1145/2935334.2935365
- Heller, F., Knott, T., Weiss, M., & Borchers, J. (2009). Multi-User Interface in Virtual Audio Spaces. *CHI '09 Extended Abstracts on Human Factors in Computing Systems in Boston* (S. 4489-4494). New York: Association for Computing Machinery. doi:10.1145/1520340.1520688
- Hollerweger, F. (Oktober 2008). *An Introduction to Higher Order Ambisonic*. Abgerufen am 29. August 2017 von <http://www.flo.mur.at/writings/HOA-intro.pdf>
- Horowitz, S., & Looney, S. (11. August 2014). *Masterclass: Using Game Audio Middleware*. Abgerufen am 29. August 2017 von electronic Musician: <http://www.emusician.com/how-to/1334/masterclass-game-audio-middleware/48158>

- Hughes, C. E., Stapleton, C. B., Hughes, D. E., & Smith, E. M. (November-Dezember 2005). Mixed Reality in Education, Entertainment and Training. *IEEE Computer Graphics and Applications*, 25(6), S. 24-30. doi:10.1109/MCG.2005.139
- ICOM Deutschland – Internationaler Museumsrat. (2010). *Ethischen Richtlinien für Museen von ICOM*. Abgerufen am 29. August 2017 von ICOM Deutschland: <http://www.icom-deutschland.de/schwerpunkte-ethische-richtlinien-fuer-museen.php>
- Kaghat, F.-Z., & Cubaud, P. (2010). Fluid interaction in audio-guided museum visit: Authoring tool and visitor device. *VAST10: The 11th International Symposium on Virtual Reality, Archaeology and Intelligent Cultural Heritage in Paris* (S. 163-170). Aire-la-Ville: The Eurographics Association. doi:10.2312/VAST/VAST10/163-170
- Khronos OpenCL Working Group. (12. Mai 2017). *The OpenCL Specification*. Abgerufen am 29. August 2017 von <https://www.khronos.org/registry/OpenCL/specs/opencvl-2.2.pdf>
- Kuttruff, H., & Mommertz, E. (2004). Raumakustik. In G. Müller, & M. Möser (Hrsg.), *Taschenbuch der Technischen Akustik* (S. 331-367). Berlin: Springer-Verlag.
- Malham, D. (December 2003). *Higher order Ambisonic systems [Thesis]*. Abgerufen am 29. August 2017 von University of York: https://www.york.ac.uk/inst/mustech/3d_audio/higher_order_ambisonics.pdf
- Marotto, V., Serra, A., Carboni, D., Sole, M., Dessi, T., & Manchinu, A. (2013). Orientation Analysis through a Gyroscope Sensor for Indoor Navigation Systems. *SENSORDEVICES 2013 : The Fourth International Conference on Sensor Device Technologies and Applications in Barcelona* (S. 85-90). Wilmington: IARIA International Academy, Research and Industry Association. Abgerufen am 29. August 2017 von https://www.thinkmind.org/index.php?view=article&articleid=sensordevices_2013_6_40_20221
- Martens, W. L. (1. September 2003). Perceptual evaluation of filters controlling source direction: Customized and generalized HRTFs for binaural synthesis. *Acoustical Science and Technology*, 24(5), S. 220-232. doi:10.1250/ast.24.220
- Meshram, A., Mehra, R., & Manocha, D. (2014). Efficient HRTF Computation Using Adaptive Rectangular Decomposition. *AES 54th International Conference - Audio Forensics: Techniques, Technologies, and Practice in Helsinki* (S. 1-9). New York: Audio Engineering Society. Abgerufen am 29. August 2017 von http://gamma.cs.unc.edu/HRTF/docs/AES_spatial_audio_paper.pdf
- Microsoft Corporation. (2017). *XAudio2 APIs [Dokumentation]*. Abgerufen am 29. August 2017 von Windows Dev Center: [https://msdn.microsoft.com/de-de/library/windows/desktop/hh405049\(v=vs.85\).aspx](https://msdn.microsoft.com/de-de/library/windows/desktop/hh405049(v=vs.85).aspx)
- Milgram, P., & Kishino, F. (Dezember 1994). A Taxonomy of Mixed Reality Visual Displays. *IEICE Transactions on Information Systems*, E77-D(12), S. 1321-1329. Abgerufen am 29. August 2017 von <https://www.researchgate.net/publication/231514051>
- Murphy, D., & Pitt, I. (2001). Spatial Sound Enhancing Virtual Story Telling. *ICVS 2001: Virtual Storytelling Using Virtual Reality Technologies for Storytelling in Avignon* (S. 20-29). Berlin: Springer-Verlag. doi:10.1007/3-540-45420-9_3

- Oculus VR LLC. (2017). *Oculus Audio SDK Guide [Dokumentation]*. Abgerufen am 29. August 2017 von <https://developer.oculus.com/documentation/audiosdk/latest/concepts/book-audiosdk/>
- Papadopoulos, C., Kyriakakis, C., Sawchuk, A., & He, X. (2004). CyberSeer: 3D Audio-Visual Immersion for Network Security and Management. *VizSEC/DMSEC '04 Proceedings of the 2004 ACM workshop on Visualization and data mining for computer security in Washington DC* (S. 90-98). New York: Association for Computing Machinery. doi:10.1145/1029208.1029223
- Rumsey, F. (2001). *Spatial Audio*. Oxford: Focal Press.
- Scherfgen, D. (2006). *3D-Spieleprogrammierung mit DirectX 9 und C++*. München: Carl Hanser Verlag.
- Schissler, C., Nicholls, A., & Mehra, R. (April 2016). Efficient HRTF-based Spatial Audio for Area and Volumetric Sources. *IEEE Transactions on Visualization and Computer Graphics*, 22(4), S. 1356-66. doi:10.1109/TVCG.2016.2518134
- Slavik, K. M., & Weinzierl, S. (2008). Wiedergabeverfahren. In S. Weinzierl (Hrsg.), *Handbuch der Audiotechnik* (S. 609-685). Berlin: Springer-Verlag. doi:10.1007/978-3-540-34301-1
- Sodnik, J., & Tomažič, S. (2015). *Spatial Auditory Human-Computer Interfaces*. Cham: Springer International Publishing.
- Sommerfeld, A. (1954). *Optics - Lectures on Theoretical Physics, Vol. IV*. New York: Academic Press Inc. Publishers.
- Spors, S., Rabenstein, R., & Ahrens, J. (2008). The Theory of Wave Field Synthesis Revisited. *Audio Engineering Society Convention 124 in Amsterdam* (S. 1-19). New York: Audio Engineering Society. Abgerufen am 29. August 2017 von https://www.researchgate.net/publication/228355734_The_theory_of_wave_field_synthesis_revisited
- Stocklmayer, S. M., Rennie, L. J., & Gilbert, J. K. (2010). The roles of the formal and informal sectors in the provision of effective science education. *Studies in Science Education*, 46(1), 1-44. doi:10.1080/03057260903562284
- Sundareswaran, V., Wang, K., Chen, S., Behringer, R., McGee, J., Tam, C., & Zahorik, P. (2003). 3D Audio Augmented Reality: Implementation and Experiments. *Proceedings of the Second IEEE and ACM International Symposium on Mixed and Augmented Reality (ISMAR '03) in Tokyo* (S. 296-297). Washington DC: IEEE Computer Society. Abgerufen am 29. August 2017 von 3D Audio Augmented Reality: Implementation and Experiments
- Terrenghi, L., & Zimmermann, A. (2004). Tailored audio augmented environments for museums. *IUI '04 Proceedings of the 9th international conference on Intelligent user interfaces in Funchal* (S. 334-336). New York: Association for Computing Machinery. doi:10.1145/964442.964523
- Theile, G. (Oktober 2007). Neue Anwendung der Wellenfeldsynthese: Binaural Sky. *FKT*, S. 1-4. Abgerufen am 29. August 2017 von http://hauptmikrofon.de/theile/2007-3_Binaural-Sky_FKT-2007.pdf
- Theile, G., Dickreiter, M., Graul, W., Camerer, F., & Spikofski, G. (2014). Tonaufnahme und Tonwiedergabe. In M. Dickreiter, V. Dittel, W. Hoeg, & M. Wöhr (Hrsg.), *Handbuch der Tonstudientechnik* (S. 217-369). Berlin: Walter de Gruyter GmbH.

- Thiemeyer, T. (2016). Das Museum als Wissens- und Repräsentationsraum. In M. Walz (Hrsg.), *Handbuch Museum - Geschichte, Aufgaben, Perspektiven* (S. 18-21). Stuttgart: J. B. Metzler Verlag GmbH.
- Tsingos, N. (2001). A Versatile Software Architecture for Virtual Audio Simulations. *Proceedings of the 2001 International Conference on Auditory Display in Espoo* (S. 38-43). Atlanta: Georgia Institute of Technology. Abgerufen am 29. August 2017 von <http://hdl.handle.net/1853/50609>
- Tsingos, N. (2009). Using Programmable Graphics Hardware for Auralization. *Proceedings of the EAA Symposium on Auralization in Espoo* (S. 78 - 87). Serrano: European Acoustics Association EAA. Abgerufen am 29. August 2017 von http://gamma.cs.unc.edu/SOUND09/PAPERS/ntsin_EAA_GPU_paper.pdf
- Tsingos, N., Gallo, E., & Drettakis, G. (2003). *Perceptual Audio Rendering of Complex Virtual Environments*. Sophia Antipolis: INRIA. Abgerufen am 29. August 2017 von <http://www-sop.inria.fr/revs/Nicolas.Tsingos/publis/RR-4734.pdf>
- Tsingos, N., Gallo, E., & Drettakis, G. (2004). Perceptual Audio Rendering of Complex Virtual Environments. *SIGGRAPH '04 ACM SIGGRAPH 2004 Papers in Los Angeles* (S. 249-258). New York: Association for Computing Machinery. doi:10.1145/1186562.1015710
- Unity Technologies. (29. August 2017). *Unity User Manual (2017.1) [Dokumentation]*. Abgerufen am 29. August 2017 von <https://docs.unity3d.com/>
- Valve Corporation. (2017). *Steam Audio*. Abgerufen am 29. August 2017 von <https://valvesoftware.github.io/steam-audio/>
- Vazquez-Alvarez, Y., Aylett, M. P., Brewster, S., Von Jungefeld, R., & Virolainen, A. (2016). Designing Interactions with Multilevel Auditory Displays in Mobile Audio-Augmented Reality. *ACM Transactions on Computer-Human Interaction (TOCHI)* (S. 3:1-3:30). New York: Association for Computing Machinery. doi:10.1145/2829944
- Wakkary, R., & Hatala, M. (2007). Situated play in a tangible interface and adaptive audio museum. In *Personal and Ubiquitous Computing* (Bd. 11 Ausg. 3, S. 171-191). London: Springer-Verlag London Ltd. doi:10.1007/s00779-006-0101-8
- Wakuda, A., Furuya, H., Fujimoto, K., Isogai, K., & Anai, K. (2003). Effects of arrival direction of late sound on listener envelopment. *Acoustical Science and Technology*, 24(4), S. 179-185. doi:10.1250/ast.24.179
- Walz, M. (Hrsg.). (2016). *Handbuch Museum - Geschichte, Aufgaben, Perspektiven*. Stuttgart: J. B. Metzler Verlag GmbH.
- Weinzierl, S. (2008). Aufnahmeverfahren. In S. Weinzierl (Hrsg.), *Handbuch der Audiotechnik* (S. 551-608). Berlin: Springer-Verlag. doi:10.1007/978-3-540-34301-1
- Weinzierl, S., & Tazelaar, K. (2008). *Raumsimulation und Klangkunst*. Abgerufen am 29. August 2017 von www.tu-berlin.de: https://www2.ak.tu-berlin.de/~akgroup/ak_pub/2008/Weinzierl_Tazelaar_2008_Raumsimulation_und_Klangkunst.pdf
- Wohlfromm, A. (2001). *Museum als Medium - Neue Medien in Museen*. Köln: Herbert von Halem Verlag.

Zölzer, U. (2008). Signalverarbeitung, Filter und Effekte. In S. Weinzierl (Hrsg.), *Handbuch der Audiotechnik* (S. 813-848). Berlin: Springer-Verlag. doi:10.1007/978-3-540-34301-1