



Hochschule für Angewandte Wissenschaften Hamburg
Hamburg University of Applied Sciences

AW1 Ausarbeitung

David Hemmer

Mobile Augmented Reality Audio Systeme

Inhaltsverzeichnis

1 Einführung	2
1.1 Einleitung	2
1.2 Gliederung der Ausarbeitung	2
2 Szenario	3
2.1 Motivation	3
2.2 Auditory Display	3
2.3 Museums Tour Guide	4
3 Lösungsansätze und Ziele	5
3.1 Virtuelle Schallquellen	6
3.2 Mobilität und Datenübertragung	7
3.3 Besucherortung	8
3.4 Grundidee des Aufbaues	9
4 Risiken	10
4.1 Risikofaktoren	10
4.2 Minimierung der Risiken	10
5 Ausblick	11
Abbildungsverzeichnis	12
Abkürzungsverzeichnis	12
Literaturverzeichnis	14

1 Einführung

1.1 Einleitung

Die virtuelle und erweiterte Realität wird in Zukunft eine noch größere Rolle in unserem Alltag einnehmen. Schon heute gibt es in der Industrie sowie im Heimbereich viele Anwendungsmöglichkeiten. Durch den Einsatz von interaktiven Spielekonsolen im Heimbereich wird das Wohnzimmer zu einer virtuellen Welt. Durch neue Interaktionsmöglichkeiten und die dadurch resultierende Bewegungsfreiheit des Benutzers verschwimmt die reale Welt mit der virtuellen Welt. Dabei beschränkt sich die virtuelle und erweiterte Realität zurzeit noch sehr auf das visuelle Sinnesorgan.

Ein zweites wichtiges Sinnesorgan des Menschen ist das Gehör. Das menschliche Gehör ist bei jeder Wahrnehmung ganz automatisch beteiligt. Es erlaubt uns viele Informationen über unsere Umgebung unterbewusst wahrzunehmen. Beispielsweise kann das Gehör viele Informationen eines Raumes durch die Raumakustik erkennen. Wir Menschen können des Weiteren aber auch die Position von Schallquellen im Raum bestimmen. Ein entsprechendes Augmented Reality Audio (ARA¹) System muss die Realität so genau wie möglich nachbilden. Das bedeutet, dass ein solches System die virtuellen Schallquellen in Echtzeit berechnen und in die Realität einbinden muss. Im Bezug auf virtuelle und erweiterte Realitätssysteme darf ein solches System die Mobilität des Benutzers nicht beeinträchtigen.

Durch ein ARA-System wird die reale oder virtuelle Umwelt mit Informationen angereichert. Daraus erfolgt eine neue Art der Benutzerinteraktion. In meiner Bachelorarbeit habe ich eine SoC-Plattform weiterentwickelt, die mittels Head-Related Transfer Functions (HRTF) über Kopfhörer virtuelle Schallquellen im Raum positioniert. Die SoC-Plattform möchte ich im Rahmen meines Masters an der HAW Hamburg zu einem Augmented Reality Audio System erweitern.

In dieser Ausarbeitung wird versucht dem Leser einen Einblick in die Verwendung von Augmented Reality Audio Systeme zu vermitteln und deren Einsatzmöglichkeiten zu verdeutlichen.

1.2 Gliederung der Ausarbeitung

Zuerst werden zwei Anwendungsbeispiele für Augmented Reality Audio Systeme aufgeführt. Die aus diesen Szenarien erkenntlichen Schwerpunkte werden erläutert. Es folgt im Kapitel 3 ein erster denkbarer Lösungsansatz. Allerdings folgen hieraus auch Risiken (siehe

¹Abkürzungen sind im Abkürzungsverzeichnis im Anhang erläutert

Kapitel 4), welche es zu überwinden gilt. Die Ausarbeitung endet mit einem Ausblick in Kapitel 5, in dem eine erste Aufgabenverteilung auf die Projekte erfolgt.

2 Szenario

2.1 Motivation

In diesem Kapitel werden zwei Szenarien vorgestellt, die das Einsatzgebiet von mobilen Augmented Reality Audio Systemen darlegen. Die beiden Szenarien sind nur ein Teilausschnitt möglicher Anwendungsbereiche. Der Bedarf nach konkreteren Anwendungsmöglichkeiten hat sich bei der Recherche für diese Ausarbeitung ergeben. Anzumerken ist, dass der Ansatz eines mobilen Augmented Reality Audio Systems in der Forschung und Entwicklung kaum vorangeschritten ist.

2.2 Auditory Display

Auditory Displays sind eine audiobezogene Benutzerschnittstelle zwischen Mensch und Maschine. Nicht erst seit der Verwendung von Computern werden auditive Botschaften benutzt, um dem Benutzer Informationen mitzuteilen. Auditive Botschaften sind zum Beispiel eine Kirchenglocke, die zum Gottesdienst ruft oder das Martinshorn eines Rettungswagens im Einsatz. Auch Computer nutzen solche Signale, um nach dem Starten ihre Arbeitsbereitschaft mitzuteilen. Auditory Displays haben im Vergleich zu visuellen Displays wesentliche Vorteile:

- **Der visuelle Sinn wird entlastet:**
Der Mensch muss nicht unbedingt visuellen Kontakt zur Information haben. Auditive Informationen können nebenbei erkannt werden. Somit können gleichzeitig Informationen aufgefasst werden, die die visuelle Aufmerksamkeit erfordern.
- **Sofortige Aufmerksamkeit:**
Die Reaktionszeit auf akustische Signale ist wesentlich schneller als auf visuelle Signale.
- **Akustische Signale sind allgegenwärtig:**
Auch nicht sichtbare Informationen können sich akustisch bemerkbar machen.
- **Akustische Signale werden immer wahrgenommen:**
Dem Menschen ist es nicht möglich wegzuhören. Im Gegensatz zu den Augen können unsere Ohren nicht geschlossen werden.

Dennoch gibt es auch heutzutage noch viele nicht gelöste Probleme und daraus resultieren folgende Nachteile:

- **Geringe Auflösung von akustischen Signalen:**
Zurzeit werden nur verschiedene Signale mit einfachen Parametern verwendet, wie z.B. Tonhöhe, Lautstärke, Klangfarbe und Dauer des Signals.
- **Jeder Information muss ein Signal zugewiesen werden:**
Die Zusammenhänge zwischen Signale und ihren Bedeutungen müssen erst erlernt werden.

Der Einsatz von Auditory Display ist weit verbreitet. Sie werden derzeit in vielen komplexen Arbeitsumgebungen, wie z.B. medizinischen Arbeitsplätzen, Flugzeug-Cockpits und in Kontrollzentren, eingesetzt. Durch ein Augmented Reality Audio Systeme über Kopfhörer wäre es möglich, für jeden Benutzer individuell, virtuelle Schallquellen im Raum zu positionieren. Damit kann das Problem der geringen Auflösung verbessert werden. Virtuelle Schallquellen jeder Art können mittels HRTFs im Raum durch den Azimut, Elevation und die Entfernung zum Kopf festgelegt werden. Zudem wäre es denkbar, die reale Audioumgebung mithilfe von Mikrofonen aufzunehmen und entweder mit einzubeziehen oder ganz auszublenden. Somit könnte ein besserer Informationsfluss zwischen Mensch und Maschine erzeugt werden.

2.3 Museums Tour Guide

In Museen werden immer mehr elektronische Führungen angeboten. Dabei existieren unterschiedliche Arten von diesen Führungssystemen. Es gibt reine Audioguides oder auch die sogenannten Multimediaguides.



Abbildung 1: Links: Audio-Guide [Auda] Rechts: Multimedia-Guide [Mul]

Audioguides sind Tonaufnahmen (Sprache, Töne, Musik), die auf entsprechenden Geräten oder Mobiltelefonen abgespielt werden können. Die entsprechenden Tonaufnahmen zu den Objekten können dann jeweils vom Benutzer abgespielt werden. Mittlerweile werden solche Systeme aber auch als Stadtführer eingesetzt. Zum Beispiel gibt es in Berlin den Audioguide "stadt im ohr", welcher viele verschiedene Stadtführungen im Angebot hat. [Audb]

Eine Weiterentwicklung sind die sogenannten Multimediaguides. Bei diesen Guides können unter anderem mittels Augmented Reality Zusatzinformationen eingebunden werden. Dies geschieht üblicherweise über Bilder, Videos oder Texte. Genau wie die rein audiobezogenen Guides werden diese häufig in Museen eingesetzt, aber auch der Einsatz als Stadtführer mit Verbreitung des Smartphones wird immer beliebter.

Beide Systeme haben Vor- und Nachteile, aber ebenso ihre Daseinsberechtigung. Wichtig für beide Systemansätze ist deren Mobilität. Der Benutzer soll durch die Geräte nicht eingeschränkt werden. Ebenso ist eine einfache Bedienbarkeit Voraussetzung.

3 Lösungsansätze und Ziele

Im Kapitel 2 wurden zwei Anwendungsbereiche von Augmented Reality Audio aufgezeigt. Im Folgenden werden konkrete Ziele formuliert, die in der anschließenden praktischen Phase erarbeitet werden sollen.

Aus den Szenarien wird deutlich, dass es heutzutage schon viele Einsatzmöglichkeiten für Augmented Reality Audio Systeme in unserer Umwelt gibt. Bei den beiden in Kapitel 2 beschriebenen Szenarios werden mehrere Punkte vernachlässigt.

Zum einen der Augmented Reality Ansatz, der den Vorteil hat, dass der Zuhörer die simulierte virtuelle Welt sowie die reale Welt gleichzeitig hört. So wäre es ohne Weiteres möglich ein Gespräch zu führen oder auf Warnsignale zu reagieren.

Der zweite vernachlässigte Punkt ist das Einbeziehen der Position von Schallquellen. Aktuell werden solche Informationen immer vorgelesen oder durch einfache Signale dargestellt. Zum Beispiel fängt bei einem Museumsguide der Erzähler an. "Gleich rechts neben dem Eingang" oder "die Vitrine an der südlichen Wand". Durch die Positionierung der Schallquelle an diesen Punkten wären solche Zusatzinformationen nicht mehr nötig.

Um ein mobiles Augmented Reality Audio System aufzubauen, gibt es viele Schwerpunkte auf, die im Folgenden eingegangen wird.

3.1 Virtuelle Schallquellen

Die aktuellen Guides nutzen nur Stereo-Audiosignale. Um Schallquellen im 3D-Raum zu platzieren gibt es sogenannte Head-Related Transfer Function (HRTF), diese werden im Deutschen auch als kopfbezogene Übertragungsfunktion bezeichnet. (siehe Abbildung 2) Diese Funktion beschreibt den natürlichen Filterprozess, den das menschliche Gehör aufgrund seiner Beschaffenheit auf eintreffende Schallwellen anwendet. Die Filterung ist dabei abhängig von der Position der eingehenden Schallquelle, sowie der daraus resultierenden Interferenzen mit Ohrmuscheln, Kopf und Schultern. Wobei die Position sich durch die Entfernung und die Winkel der horizontalen und vertikalen Ebene zum Kopfmittelpunkt ändert. Diesen Vorgang kann man als die Berechnung der binauralen Impulsantwort bezeichnen. Demzufolge versucht die kopfbezogene Übertragungsfunktion durch die Intensitäts- und Laufzeitunterschiede ein akustisch dreidimensionales Bild zu erzeugen.

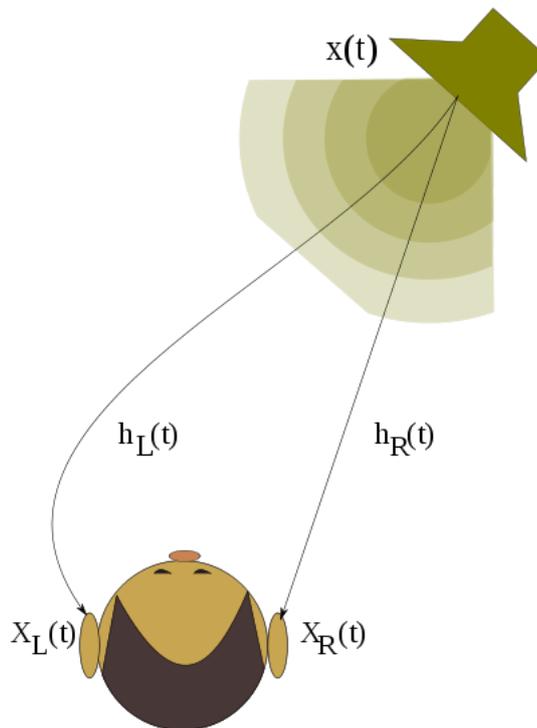


Abbildung 2: Head-Related Transfer Function [HRT]

In der von mir geschriebenen Bachelorarbeit: “Eine SoC-Plattform zur kontinuierlichen Interpolation von HRTF-Filtern für positionsveränderliche virtuelle Schallquellen“ wurde eine SoC-Plattform weiterentwickelt, mithilfe von Kopfhörern und eines 3-Achsen-Kompasses virtuelle Schallquellen im Raum positioniert. Die Positionierbarkeit von Schallquellen be-

schränkt sich hierbei auf den horizontalen 360° Bereich um dem Kopf des Hörers, sowie im vertikalen Bereich von +30° bis -30° mit je einer Schrittweite von je 1°. Ein Schwerpunkt dieser Arbeit war die getrennte Verarbeitung der Laufzeitdifferenz und Pegeldifferenz der HRTF-Filterung. Zurzeit wird der HRTF-Algorithmus in einem Hardware-Software-Codesign verarbeitet. Dieser könnte als nächster Schritt in eine reine Hardwarelösung umgewandelt werden. Der Vorteil wäre die Entlastung des MicroBlazes, der somit wieder mehr Ressourcen zur Verfügung hat.

Um die Schallquelle im 3D-Raum zu positionieren fehlt noch die Entfernung zur Schallquelle. Dieses wurde bisher bei allen Vorgängerarbeiten vernachlässigt. Diese Aufgabe müsste sich somit noch in Laufe des Masterstudiums erarbeitet werden.

Somit wäre es möglich virtuelle Schallquellen im Raum zu positionieren. Für Augmented Reality Audio fehlt noch die reale Audioumgebung, in welcher sich der Benutzer befindet. Es wäre es denkbar, mithilfe von Mikrofonen, die reale Umgebung aufzunehmen und über die Kopfhörer einzuspielen. Die reale Audioumgebung müsste mit der virtuellen Soundumgebung in Echtzeit zusammengemixt werden und über die Kopfhörer ausgegeben werden.

3.2 Mobilität und Datenübertragung

Bei dem im Kapitel 3 vorgestellten Szenario eines Museums Tour Guide steht die Mobilität an erster Stelle. Es gibt zwei wichtige Faktoren, einer der Faktoren ist die Stromversorgung. Ein solches System muss über Akkus betrieben werden. Dieser Punkt soll kein Schwerpunkt der Arbeit werden.

Der zweite wichtige Faktor ist die Datenübertragung. Dabei bestehen zwei Ansätze um die Informationen auszutauschen. Zum einen können die Audiosignale auf einer Speicherkarte dem System zur Verfügung gestellt werden. Dieses hätte aber erhebliche Nachteile. Beispielsweise ist es somit nicht möglich Informationen, wie die Position der Benutzer zu verteilen, welche für die Entfernungssimulation zur Schallquelle wichtig ist.

Deswegen wäre es sinnvoll, den zweiten Ansatz der kabellosen Datenübertragung einzusetzen. Über eine solche Datenverbindung könnten Informationen sowie Echtzeit-Audiostreams ausgetauscht werden. Dazu muss evaluiert werden, welche Datenübertragungsschnittstelle sich in Verbindung mit einem System on Chip (SoC) am besten einsetzen lässt. Denkbar wäre eine Datenübertragung mittels Bluetooth oder WLAN.

Es gibt zwei Arten von Daten, die mittels der Datenschnittstellen ausgetauscht werden sollen:

- **Audiostreams:**

Die Audiodaten für die virtuellen Schallquellen könnten mittels UDP und dem Real-Time Transport Protocol (RTP) zwischen einem Server und den mobilen Endgeräten übertragen werden. Im Anwendungsbereich als Museum Tour Guide könnte auch eine klassische Museumsführung mittels eines solchen Systems verbessert werden. Wenn der Museumsführer ein drahtloses Mikrofon nutzt, könnte diese Audiosequenz über die mobilen Endgeräte abgespielt werden. Der Vorteil: Alle hören jederzeit alles, egal wie weit weg sie vom Sprecher stehen. Diesen Ansatz gibt es schon bei den Audioguide "guidePORT" von der Firma Sennheiser.[Gui]

- **Informations- und Kontroll-Daten:**

Damit sind alle Daten gemeint, die zwischen der Serverseite und der Clientseite ausgetauscht werden müssen. Für die Clientseite ist es für die Entfernungssimulation zur Schallquelle wichtig, die Position des Benutzers zu wissen. Dazu zählt die Position des Zuhörers sowie die der virtuellen Schallquellen. Für die Serverseite wären Informationen über den Client wichtig. Daraus könnten Benutzer-Analysen aufgebaut werden. Ebenso wäre eine Visualisierung für die Entwicklungszeit denkbar.

In der Musikindustrie wird für einen solchen Datenaustausch heutzutage das sogenannte Open Sound Control Protocol [OSC] eingesetzt.

3.3 Besucherortung

Um die Entfernung von Schallquellen zu einem Benutzer des Systems zu ermitteln, ist es nötig die Position der Person zu ermitteln. Durch die Position des Benutzers und der Schallquelle ist die Entfernung bekannt und kann miteinbezogen werden. Für die Positionsbestimmung je nach Aufenthaltsort gibt es verschiedene Möglichkeiten.

- **Outdoor-Bereich:**

Global Positioning System (GPS) könnte zur Benutzerortung eingesetzt werden. Die durch das System erreichbare Genauigkeit würde im Outdoor-Bereich ausreichen.

- **Indoor-Bereich:**

Es gibt eine Vielzahl von verschiedenen Ansätzen um die Position von Personen in Gebäuden zu ermitteln. Meistens wird die Position über RFID, Infrarot oder über ein kamerabasiertes System ermittelt.

Da der Einsatzbereich eines mobilen ARA Systems noch nicht festgelegt ist, ist geplant diesen Teilaspekt erst mal nicht mit einzubeziehen. Die Position der Person könnte für die Entwicklungszeit über eine Anwendung simuliert werden.

3.4 Grundidee des Aufbaues

In der Abbildung 3 ist eine denkbare Systemarchitektur dargestellt. Diese baut auf eine Client-Server Architektur auf. Die Serverseite ist unter anderem für das Audiostreaming sowie für die Positionsbestimmung verantwortlich. Des Weiteren wäre eine Szenensteuerung denkbar. Alle dafür relevanten Daten sendet die Serverseite über eine kabellose Verbindung an die Clientseite. Die Clientseite muss diese Daten empfangen und verarbeiten. Eine weitere Aufgabe des Clients ist die Simulation der virtuellen Audioquellen, sowie das Zusammenführen mit der realen Umgebung. Dazu ist vorgesehen die reale Umgebung mithilfe von zwei Mikrofonen aufzunehmen.

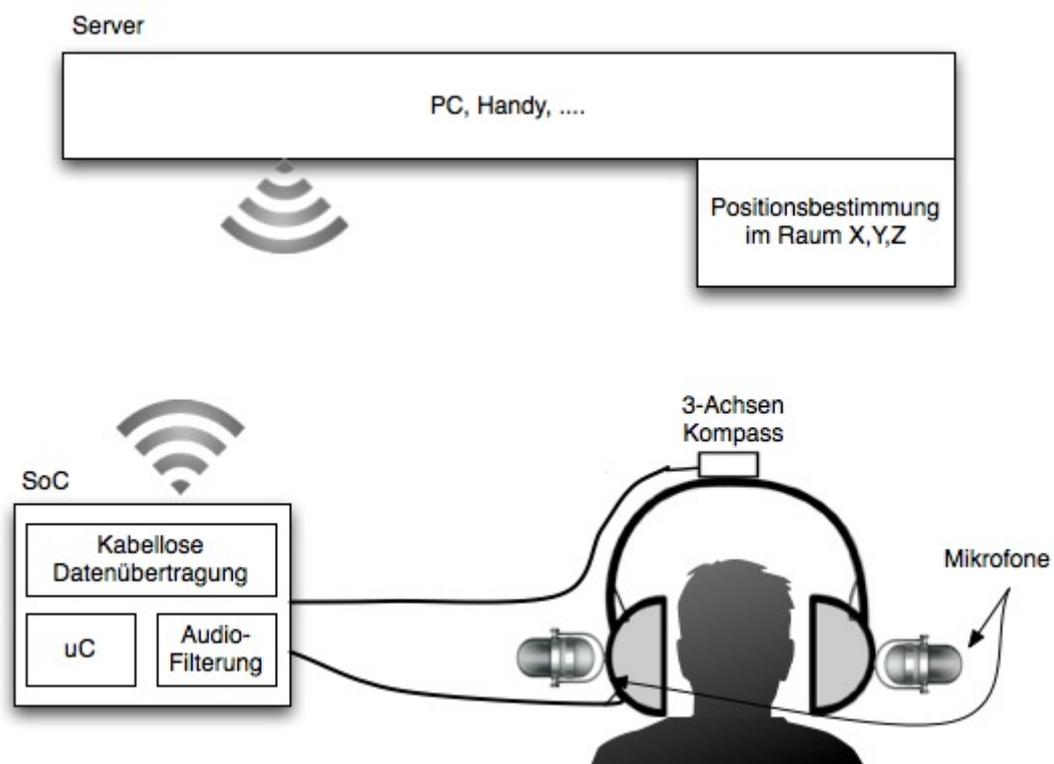


Abbildung 3: denkbare Systemarchitektur

4 Risiken

Bei der Durchführung der gesetzten Projektziele werden diverse Risiken deutlich, die ein Gelingen des Projektes gefährden könnten.

4.1 Risikofaktoren

- **Mobilität und Datenübertragung:**

Es ist vorgesehen die komplette Datenübertragung zwischen dem Server und dem Client (SoC) über eine kabellose Verbindung zu übertragen. Denkbar ist dies durch einen WLAN Adapter, der an die Ethernet-Schnittstelle des FPGAs angeschlossen wird. Da der FPGA mit einer Taktfrequenz von nur 125 MHz arbeitet, könnte sich eine rein softwareseitige Verarbeitung als nicht realisierbar herausstellen. Das hätte zur Folge, dass entweder ein Dual-Mikrocomputer eingesetzt oder ein Teil der Verarbeitung in Hardwarebeschleuniger ausgelagert werden muss.

- **Audioverarbeitung:**

Da die Entfernung zu einer Schallquelle eine sehr komplexe Übertragungsfunktion ergibt, könnte eine Umsetzung scheitern. Ein weiteres Risiko ist, dass eine separate Verarbeitung der Position um den Kopf mittels HRTFs, sowie die darauf folgende Verarbeitung der Entfernung zur Schallquelle sich als nicht geeigneter Lösungsansatz ergibt. Ebenfalls ist anzumerken, dass die Audioverarbeitung sicherlich auch von einer Vielzahl an Personen getestet werden muss, weil bei jeder Person die kopfbezogene Übertragungsfunktion unterschiedlich ist. Im Bezug auf die Ortung von Schallquellen wäre ein Vergleich zwischen der Wellenfeldsyntheseanlage der HAW Hamburg und der SoC-Plattform denkbar.

4.2 Minimierung der Risiken

Innerhalb der letzten Jahre sind mehrere Arbeiten rund um das Thema der Positionsbestimmung von Schallquellen in Rahmen von Bachelor- und Masterarbeiten an der HAW Hamburg entstanden. Eine HRTF-Messreihe von Sylvia Sima [Sim08] sowie die Masterarbeit von Jan Kuhr mit dem Thema einer Echtzeitaudiofilterung für HRTF-Filter [FRK10]. Ebenfalls wurden im Rahmen eines PO-Projektes unter der Führung von Prof. Dr. Wolfgang Fohl Erkenntnisse über das räumliche Hören erworben.[Foh11]

Im Bereich von FPGAs (SoC) wird unter der Führung von Prof. Dr. Bernd Schwarz geforscht. Die Forschungsschwerpunkte überschneiden sich in Teilen mit den für dieses Projekt benötigten Technologien.

5 Ausblick

Bei der Entwicklung eines mobile Augmented Reality Audio Systems handelt es sich um ein neuartiges Themenfeld, das einen aufwendigen Entwicklungsprozess beinhaltet.

Deshalb ist mein Ziel für das nächste Semester, die mobile Datenkommunikation zwischen einem PC und einer SoC-Plattform aufzubauen. Konkret soll diese Schnittstelle über Open Sound Control alle wichtigen Informationen austauschen, um zum Beispiel auch eine einfache Szenensteuerung zu implementieren. Ebenso soll eine Evaluation erfolgen, in der geschaut wird, ob und wie ein Echtzeit-Audiostream von der SoC-Plattform verarbeitet werden kann.

Für die darauf folgende Projektarbeit sowie die Masterarbeit soll der Schwerpunkt auf die Erweiterung und Verbesserung der virtuellen Schallquellen gelegt werden.

Abbildungsverzeichnis

1	Links: Audio-Guide [Auda] Rechts: Multimedia-Guide [Mul]	4
2	Head-Related Transfer Function [HRT]	6
3	denkbare Systemarchitektur	9

Abkürzungsverzeichnis

AR	Augmented Reality
ARA	Augmented Reality Audio
FPGA	Field Programmable Gate Array
GPS	Global Positioning System
HAW	Hochschule für Angewandte Wissenschaften
HRIR	Head Related Impulse Response (kopfbezogene Impulsantwort)
HRTF	Head Related Transfer Function (kopfbezogene Transferfunktion)
ILD	Interaural-Level-Difference (Pegeldifferenz)
IP-Core	Intellectual Property Core
ITD	Interaural-Time-Difference (Laufzeitdifferenz)
OSC	Open Sound Control
RFID	Radio-frequency identification
RTP	Real-Time Protocol
SoC	System on Chip
TCP	Transmission Control Protocol
UDP	User Datagram Protocol
VR	Virtual Reality
WLAN	Wireless Local Area Network

Literatur

- [Auda] *Abbildung: Audio Guide.* <http://www.orbitalsound.co.uk/gfx/products/guideport/1.jpg>, Abruf: 20.02.2012
- [Audb] *Audio Guide Berlin.* <http://www.stadt-im-ohr.de>, Abruf: 20.02.2012
- [Audc] *Auditory Display. Lehrveranstaltung: Innovative Benutzungsschnittstellen von Prof. Dr. H. Oberquelle, Informatikum der Universität Hamburg.* <http://agis-www.informatik.uni-hamburg.de/WissPro/auditives/archive/auditorydisplay-hh/index.html>, Abruf: 20.02.2012
- [cad] *International Community for Auditory Display.* <http://www.icad.org/>, Abruf: 20.02.2012
- [DAF] *DAFX Conference.* <http://www.dafx.de>, Abruf: 20.02.2012
- [Foh11] FOHL, Wolfgang: *Räumliches Hören.* PO-Kursangebot TI/AI HAW-Hamburg, 2011
- [FRK10] FOHL, Wolfgang ; REICHARDT, Jürgen ; KUHR, Jan: *A System-On-Chip Platform for HRTF-Based Realtime Spatial Audio Rendering.* Proc. 2nd Int Conf. on Creative Content(CONTENT10), 2010
- [Gui] *Audio Guide "GuidePORT" der Firma Sennheiser.* <http://www.guideport.de>, Abruf: 20.02.2012
- [HRT] *Head-Related Transfer Function.* <http://de.wikipedia.org/wiki/HRTF>, Abruf: 20.02.2012
- [Mul] *Abbildung: Multimedia Guide.* <http://www.iart.ch/iartnew/wpcontent/uploads/03museumsguideintageslichtraum.jpg>, Abruf: 20.02.2012
- [OSC] *Open Sound Control.* <http://opensoundcontrol.org/>, Abruf: 20.02.2012
- [SFW10] SCHMEDER, Andrew ; FREED, Adrian ; WESSE, David: *Best Practices for Open Sound Control.* Center for New Music and Audio Technologies (CNMAT), UC Berkeley, 2010
- [Sim08] SIMA, Sylvia: *HRTF Measurements and Filter Design for a Headphone-Based 3D-Audio System.* Bachelorarbeit (HAW-Hamburg), 2008

-
- [Tik09] TIKANDER, Miikka: *DEVELOPMENT AND EVALUATION OF AUGMENTED REALITY AUDIO SYSTEMS*. Helsinki University of Technology Dissertation, 2009
- [WAR] *Workshop Virtuelle Erweiterte Realität (VR/AR) von der Gesellschaft für Informatik E.V.* <http://www.gi.de>, Abruf: 20.02.2012
- [Zöl02] ZÖLZER, Udo: *digital audio effects (DAFX)*. 1. Auflage. John Wiley and Sons, 2002 (ISBN 978-0471490784)