



Hochschule für Angewandte Wissenschaften Hamburg
Hamburg University of Applied Sciences

Bachelorarbeit

Florian Meyer

**Audio-visuelles Redirected Walking mit Oculus Rift und
Wellenfeldsynthese**

*Fakultät Technik und Informatik
Studiendepartment Informatik*

*Faculty of Engineering and Computer Science
Department of Computer Science*

Florian Meyer

**Audio-visuelles Redirected Walking mit Oculus Rift und
Wellenfeldsynthese**

Bachelorarbeit eingereicht im Rahmen der Bachelorprüfung

im Studiengang Bachelor of Science Technische Informatik
am Department Informatik
der Fakultät Technik und Informatik
der Hochschule für Angewandte Wissenschaften Hamburg

Betreuender Prüfer: Prof. Dr. Wolfgang Fohl
Zweitgutachter: Prof. Dr.-Ing. Andreas Meisel

Eingereicht am: 14. September 2015

Florian Meyer

Thema der Arbeit

Audio-visuelles Redirected Walking mit Oculus Rift und Wellenfeldsynthese

Stichworte

Umgeleitetes Gehen, Wellenfeldsynthese, Oculus Rift, Simulatorkrankheit, Mensch-Computer-Interaktion, Virtuelle Realität

Kurzzusammenfassung

Diese Arbeit beschreibt die Konzeption und Durchführung eines Versuches zur Feststellung der Erkennungsschwellwerte von audiovisuellem Redirected Walking. Dabei wurden an 20 Probanden insgesamt 954 Manipulationen getestet, aufgeteilt in Rotation Gains und Curvature Gains. Die Ergebnisse zeigen, dass die Probanden physisch 31,7% weniger und 35,6% mehr gedreht werden können als die wahrgenommene virtuelle Rotation. Außerdem können diese auf einem Bogen mit einem Radius von 6 Metern umgeleitet werden, während sie dachten, sie laufen geradeaus. Es wurden verschiedene Symptome der Simulatorkrankheit festgestellt.

Florian Meyer

Title of the paper

Audio-visual Redirected Walking with Oculus Rift and Wave Field Synthesis

Keywords

Redirected Walking, Wave Field Synthesis, Oculus Rift, Simulator Sickness, Human-Computer Interaktion, Virtual Reality

Abstract

This work describes the planning and conduction of an experiment to determine detection thresholds of audiovisual redirected walking. Therefore 20 subjects and a sum of 954 manipulations were tested, separated into rotation gains and curvature gains. The results show that subjects can be turned physically 31.7% less and 35.6% more than the perceived virtual rotation. In addition to that they could be redirected on a circular arc with a radius of 6 meter while believing they are walking on a straight line. Different symptoms of simulator sickness were detected.

Inhaltsverzeichnis

1	Einleitung	1
1.1	Motivation	2
2	Redirected Walking	4
2.1	Das Grundprinzip	4
2.2	Das Tripel der menschlichen Bewegung	6
2.3	Manipulationen	6
2.3.1	Translation Gain	6
2.3.2	Rotation Gain	7
2.3.3	Curvature Gain	9
2.3.4	Displacement Gain	10
2.3.5	Time Dependent Gain	10
2.4	Vergleich zwischen akustischem und visuellem Redirected Walking	11
2.5	Vergleich mit anderen Techniken	12
3	Wellenfeldsynthese	15
3.1	Grundprinzip	15
3.2	Eigenschaften und Typen virtueller Quellen	17
3.3	WONDER	18
3.4	Das Wellenfeldsyntheselabor der HAW Hamburg	20
4	Oculus Rift	22
4.1	Technik	22
4.2	Ansteuerungsmöglichkeiten	24
4.2.1	Oculus SDK	24
4.2.2	Gameengine Integration	25
4.3	Vergleich mit anderen HMDs	26
5	Test	28
5.1	Testplanung	28
5.1.1	Auswahl der Gains	28
5.1.2	Anforderungen an den Test	30
5.1.3	Konzeption der virtuellen Testumgebung	30
5.1.4	Ablauf des Tests	34
5.1.5	Simulatorkrankheit	37
5.2	Technische Realisierung	38
5.2.1	Adaption der akustischen Komponente	38

5.2.2	Systemaufbau	41
5.3	Probanden	46
6	Ergebnisse	48
6.1	Testergebnisse	51
6.2	Vergleich mit akustischem Redirected Walking	52
6.3	Simulatorkrankheit	56
7	Ausblick	59
8	Zusammenfassung	60

1 Einleitung

Eine virtuelle Realität (VR) ist die computergestützte Simulation einer Umgebung, welche versucht das Gefühl von Immersion für den Nutzer zu maximieren. Hierfür kommen häufig sogenannte „Head-Mounted-Displays“ (HMD) zum Einsatz, die stereoskopische Bilder im Sichtfeld des Nutzers einblenden, um realistische 3D-Bilder zu erzeugen [Wal, S. 1].

In den letzten Monaten haben virtuelle und gemischte Realitäten (AR) durch das Aufkommen von Produkten wie der Oculus Rift¹, HTC Vive² und Microsoft HoloLens³ einen regelrechten Boom erlebt. Diese HMDs eröffnen der Allgemeinheit die Möglichkeit, problemlos und komfortabel in virtuelle Realitäten mit stetig steigender Qualität einzutauchen. Ein hohes Maß an Immersion kann dabei durch eine natürliche Steuerung der eigenen Bewegungen in der VR erzeugt werden. Traditionelle Eingabemethoden wie Maus oder Joystick wirken unnatürlich, senken die Immersion und können sogar Simulatorkrankheit auslösen [SBJ⁺10, S. 1]. Deshalb müssen neue Möglichkeiten für eine immersivere Steuerung gefunden werden.

Die natürlichste Methode stellt dabei das Umsetzen physischer Bewegungen in die virtuelle Realität dar [RKW01]. Bei diesen kann es sich um einfache Gesten, aber auch um reales Laufen handeln. Die Voraussetzung ist jedoch immer die Erfassung der Position und der Orientierung des Nutzers mit Hilfe eines Trackingsystems [Wal, S. 1]. Diese sind nicht zwingend mit einem großen Hardwareaufwand und hohen Kosten verbunden. So liefert die HTC Vive ein Trackingsystem bereits mit (siehe Kapitel 4.3) und auch die Kinect⁴ von Windows ermöglicht ein Bewegungstracking. Mit diesem Ansatz tritt jedoch schnell das Problem auf, dass der Nutzer nicht alle Orte der virtuellen Umgebung erreichen kann, da er in seinen Bewegungen auf den Erfassungsbereich des Trackingsystems limitiert ist [SKF⁺11]. Dies schadet der Immersion der virtuellen Realität erheblich.

Um diesem Problem entgegenzuwirken, gibt es verschiedene Herangehensweisen. Eine stellt zum Beispiel die Verwendung mehrachsiger Laufbänder dar, durch die der Nutzer unbegrenzt in alle Richtungen laufen kann, ohne dass sich seine reale Position verändert. Eine andere

¹<https://www.oculus.com/en-us/> - Abruf: 21.09.2015

²<http://www.htcvr.com/de> - Abruf: 21.09.2015

³<https://www.microsoft.com/microsoft-hololens/en-us> - Abruf: 21.09.2015

⁴<https://www.microsoft.com/en-us/kinectforwindows/> - Abruf: 21.09.2015

Möglichkeit sind Lehngesten, sodass in der virtuellen Welt eine Bewegung in die Richtung stattfindet, in welche der Nutzer sich in der realen Umgebung neigt. Die natürlichste Variante bleibt jedoch das physische Laufen [RKW01].

Daher wird beim sogenannten Redirected Walking (RDW) versucht, das physische Laufen beizubehalten, indem die Grenzen der menschlichen Wahrnehmung von Position, Geschwindigkeit und Orientierung ausgenutzt werden. Dies ermöglicht mit einem ausreichend großen Trackingbereich eine Erkundung unendlicher virtueller Umgebungen, ohne auf die Grenzen des Trackingsystems zu stoßen [RKW01, S. 2]. Das Prinzip ist von dem Phänomen inspiriert, dass Menschen mit verbundenen Augen einen Bogen laufen, obwohl sie dazu angewiesen worden sind, sich auf einer geraden Linie zu bewegen. Man erkennt also, dass die Eigenwahrnehmung des Menschen nicht für eine korrekte Einschätzung von Bewegungen ausreicht. Stattdessen arbeiten mehrere Sinne für eine korrekte Wahrnehmung zusammen, wobei kleine Inkonsistenzen unbewusst ausgeglichen werden.

1.1 Motivation

Redirected Walking kann sich zu einer Schlüsseltechnologie entwickeln, wenn mehr und mehr Firmen und Privatpersonen beginnen, die Möglichkeiten der virtuellen Realitäten für sich zu entdecken. Viele der bisherigen Arbeiten zu diesem Thema haben sich lediglich mit Redirected Walking mittels visueller Reize beschäftigt [RKW01, SBJ⁺10, Lac77], während akustische Reize fast immer vernachlässigt worden sind [SNS⁺13, S. 2]. Eine Stimulation durch akustische Reize fand in einigen Arbeiten lediglich über Kopfhörer statt, auf denen zum Beispiel bei Steinicke et al. Straßenlärm gespielt wurde, um die Umgebungsgeräusche auszublenden [SBJ⁺10]. Aus diesem Grund haben andere Autoren bereits rein akustisches Redirected Walking näher betrachtet [SNS⁺13, Nog15]. Hier wurden jedoch keinerlei visuelle Reize verwendet. Alle Autoren sind sich jedoch einig, dass eine Übereinstimmung mehrerer Reize dazu beitragen kann, dass der Nutzer Manipulationen durch das Redirected Walking eher als Eigenbewegungen wahrnimmt [RKW01, SNS⁺13, S. 2].

Vor diesem Hintergrund kommt die Frage auf, wie sich die Erkennungsrate von Manipulationen durch Redirected Walking verändert, wenn akustische und visuelle Reize konsistent gehalten werden. Kann eine Steigerung erreicht werden, da nun mehrere Sinne konsistent sind und sich der Nutzer sowohl über akustische, als auch über visuelle Reize orientieren kann? Oder hat eine Stimulation beider Sinne keinerlei Einfluss auf die Erkennungsrate, da die visuelle Wahrnehmung des Menschen alle anderen Sinne und somit auch die akustische Wahrnehmung überlagert?

In dieser Arbeit soll zunächst geklärt werden, wie sich die Erkennungsrate von Manipulationen bei audiovisuellem Redirected Walking verhält. Für eine bestmögliche Vergleichbarkeit der Ergebnisse wurde das Testverfahren von Nogalski übernommen [Nog15], welcher seine Masterarbeit über rein akustisches Redirected Walking an der HAW Hamburg geschrieben hat. Der Test ist des Weiteren an verwandten Experimenten orientiert, sodass auch hier eine gute Vergleichbarkeit gewährleistet werden kann [SBJ⁺10, SNS⁺13]. In der Arbeit werden die Unterschiede zwischen visuellem und akustischem Redirected Walking erläutert und es wird ein Einblick in die Gestaltung der virtuellen Testumgebung gegeben. Zum Schluss soll geklärt werden, welche Symptome von Simulatorkrankheit bei Probanden auftreten, nachdem sie sich für eine gewisse Zeit in der virtuellen Umgebung aufgehalten haben.

2 Redirected Walking

Virtuelle Umgebungen bieten dem Benutzer häufig die Möglichkeit in irgendeiner Art mit dieser zu interagieren, wobei Bewegungen als die häufigste Form der Interaktion auftreten. Eine sehr natürliche und einfache Art der Bewegungseingabe stellt hierbei die Abbildung von realen auf virtuelle Bewegungen dar [Wal]. Dabei wäre eine naive Vorgehensweise, die realen Bewegungen des Benutzers mit einem Trackingsystem zu erfassen und sie eins zu eins in die virtuelle Umgebung zu übertragen, das heißt, bewegt sich der Benutzer in der realen Welt einen Meter nach vorne, so tut er dies auch in der virtuellen Umgebung [HB13]. Mit diesem Ansatz tritt jedoch schnell das Problem auf, dass der Nutzer nicht alle Orte der virtuellen Umgebung erreichen kann, da er in seinen Bewegungen auf den Erfassungsbereich des Trackingsystems limitiert ist. Redirected Walking löst dieses Problem und ermöglicht grenzenlose virtuelle Bewegungen, mit einem endlichen, aber ausreichend großen, realen Bewegungsbereich [RKW01, S. 2]. Im Folgenden soll zunächst das Grundprinzip des Redirected Walkings erklärt werden, bevor auf die verschiedenen Möglichkeiten zur Manipulation der Nutzerbewegungen eingegangen wird. Danach soll visuelles Redirected Walking mit akustischem Redirected Walking verglichen werden.

2.1 Das Grundprinzip

Redirected Walking nutzt die Grenzen der menschlichen Wahrnehmung, um eine Diskrepanz zwischen virtuellen und realen Bewegungen zu erzeugen. Die Art und Intensität der Manipulation hängt dabei stark von der Position, Orientierung und Bewegung des Nutzers im realen Raum ab, generell wird aber immer versucht, den Nutzer zu der am weitesten entfernten Grenze des Trackingbereiches umzulenken [RKW01]. Um zu verstehen, wie Redirected Walking genau funktioniert, soll im Folgenden zunächst kurz darauf eingegangen werden, wie der Mensch Bewegungen wahrnimmt.

Zur Erkennung von Bewegung und Rotation verlässt sich der Mensch hauptsächlich auf das vestibuläre System und die Propriozeption, sowie auf visuelle und akustische Reize. Mit Hilfe dieser ist es ihm auch möglich zu unterscheiden, ob er selbst oder die Objekte in seiner Umgebung sich bewegen, da zum Beispiel bei der Umgebungsrotation keine Stimulation des

vestibulären Systems auftritt. Dieses verhält sich dabei ähnlich wie ein 3-Achsen-Gyrometer [RKW01, S. 2], es nimmt also die Richtung einer Beschleunigung und deren ungefähre Intensität wahr. Die drei Sinne arbeiten bei der Wahrnehmung von Bewegungen eng zusammen, doch hat man herausgefunden, dass die visuellen Reize alle anderen Sinne im Bezug auf die Bewegungswahrnehmung dominieren, wenn Diskrepanzen in der Wahrnehmung auftreten [DB78]. Zum Beispiel kann es vorkommen, dass man in einem stehenden Zug sitzt, während der benachbarte Zug sich in Bewegung setzt. Die Augen melden dem Körper Bewegung, während das vestibuläre System Stillstand meldet. Trotz allem kann der Eindruck entstehen, der eigene Zug würde sich in Bewegung setzen. Dieser Effekt heißt Vektion. Generell nimmt der Nutzer eine Bewegung eher als Eigenbewegung wahr, wenn alle Sinne ihm konsistent die gleichen Signale liefern, das heißt, wenn sowohl das vestibuläre System, als auch die visuellen und akustischen Reize eine Bewegung melden [Lac77, RKW01, S. 2]. Des Weiteren neigt der Mensch dazu, kleine Abweichungen in einer Bewegung unwillkürlich auszugleichen [SBJ⁺08, S. 1].

Auf diesen Effekten baut nun das Redirected Walking auf. Die Idee ist es, wie bereits erwähnt, durch Manipulation der virtuellen Bewegungen eine Diskrepanz zwischen diesen und den realen Bewegungen herzustellen, indem zum Beispiel eine Rotation des Nutzers verstärkt wird und die virtuelle Rotation somit größer ist als die reale. Damit die Manipulationen unbemerkt bleiben, müssen diese vom Nutzer zwingend als Eigenbewegungen und nicht als Umgebungsbewegungen wahrgenommen werden [RKW01, S. 2]. Dies kann dadurch erreicht werden, dass alle Reize konsistent gehalten werden [LVK04, S. 1]. Das würde zum Beispiel bedeuten, wenn der Nutzer eine reale Rotation von 90° ausführt und diese auf eine virtuelle Rotation von 120° verstärkt wird, dann müssten ebenfalls die Klänge der virtuellen Welt um 30° um den Nutzer herum rotiert werden. Über das vestibuläre System wäre eine solche Manipulation nicht zu erkennen, da nur die Richtung und die Beschleunigung der Rotation wahrgenommen werden. Eine kleine Abweichung ist somit nicht feststellbar und alle Sinne sind konsistent. Außerdem würde bei einer Diskrepanz der visuelle Reiz dominieren.

Der Grad der Manipulation, im Folgenden Gain genannt, sollte mit Bedacht gewählt werden. Ist er zu klein, so reicht der verfügbare Trackingbereich nicht aus, um die gesamte virtuelle Umgebung zu durchlaufen. Ist er zu groß, so nimmt der Nutzer die Manipulation als Umgebungsbewegung wahr und es tritt keine Immersion ein. Im Extremfall kann durch die widersprüchlichen Reize sogar Simulatorkrankheit ausgelöst werden. Mit einem ausreichend großen Trackingbereich ist es jedoch möglich, dass der Nutzer in der virtuellen Welt immer geradeaus läuft, sich in der realen Welt hingegen auf einer Kreisbahn im Trackingbereich bewegt.

2.2 Das Tripel der menschlichen Bewegung

In ihrer Arbeit beschreiben Steinicke et al. eine eindeutige Darstellungsform für menschliche Bewegungen [SBJ⁺10] in Form eines Tripels (s, u, w) aus drei normalisierten Vektoren. Dabei ist s ein, vom Nutzer aus gesehen, zur rechten Seite zeigender Vektor, u ein nach oben zeigender Vektor und w ein in die Laufrichtung zeigender Vektor, wobei dieser auf unterschiedliche Arten ermittelt werden kann. Ansätze sind zum Beispiel, die Sichtrichtung des Nutzers zu verwenden oder die Richtung über zwei, von einem Trackingsystem gemessene Punkte zu bestimmen. Der Seitwärtsvektor liegt immer orthogonal zu w und parallel zu der Ebene, auf der sich der Nutzer gerade bewegt, in einem ebenen Raum also der XY-Ebene. Der nach oben zeigende Vektor u muss dabei nicht zwingend orthogonal zu den anderen beiden Vektoren sein. Zum Beispiel könnte der Nutzer eine Rampe hoch laufen. Menschen neigen dazu, sich der Steigung entgegen nach vorne zu lehnen, wodurch u wieder nach oben zeigt, jedoch nicht parallel zu w ist.

2.3 Manipulationen

Im Folgenden soll auf die unterschiedlichen Manipulationsmöglichkeiten beim Redirected Walking eingegangen werden. Im Wesentlichen geschieht dies entweder durch Rotation oder Translation der realen Bewegungen. Diese werden durch fünf verschiedene Gains verwirklicht, die im Folgenden näher beschrieben werden [SBH⁺09]. In den meisten Anwendungsfällen wird eine Kombination aus den hier vorgestellten Manipulationen eingesetzt.

2.3.1 Translation Gain

Man nehme an, S_{real} ist die vom Trackingsystem erfasste Strecke, die der Nutzer zwischen zwei Abtastungen zurücklegt und S_{virt} ist die korrespondierende Strecke in der virtuellen Umgebung. Ohne Redirected Walking werden reale Bewegungen direkt auf virtuelle Bewegungen abgebildet, das heißt die in der virtuellen Umgebung zurückgelegte Strecke entspricht $S_{virt} = S_{real}$ [SBJ⁺08]. Die Idee des Translation Gains ist es nun, das Verhältnis zwischen realen und virtuellen Bewegungen zu modifizieren, indem die in der virtuellen Umgebung zurückgelegte Strecke skaliert wird [Wal]. Dabei ist der Translation Gain, also der Skalierungsfaktor, als $g_T = \frac{S_{virt}}{S_{real}}$ definiert. Für die Berechnung der virtuellen Bewegung gilt dann $S_{virt} = g_T * S_{real}$ [SBJ⁺10]. Hat man zum Beispiel einen fünf Meter langen Trackingbereich zu Verfügung und möchte in seiner virtuellen Umgebung die gesamte Länge eines Fußballfeldes überwinden, so kann ein Gain von $g_T = 20$ gewählt werden, sodass aus jedem Meter, den sich der Nutzer

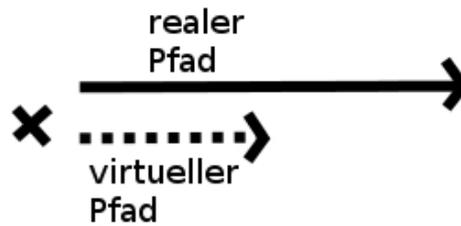


Abbildung 2.1: Realer und virtueller Pfad des Nutzers mit einem Translation Gain von $g_t = 0.5$.

in der realen Umgebung bewegt, eine Bewegung von 20 Metern in der virtuellen Umgebung resultiert. Ein Gain von $g_T = 1$ hat dabei keinen Effekt, sodass reale Bewegungen direkt auf virtuelle Bewegungen abgebildet werden.

Der Translation Gain g_T kann auf jedes Element des menschlichen Bewegungsvektors separat angewendet werden und kann somit als $(g_{T_{[s]}}, g_{T_{[u]}}, g_{T_{[w]}})$ dargestellt werden [SBJ⁺08]. Abbildung 2.1 zeigt die reale und die virtuelle Strecke eines Nutzers bei einem Translation Gain mit $g_T = 0.5$.

2.3.2 Rotation Gain

Beim Rotation Gain wird die reale Rotation des Nutzer modifiziert in die virtuelle Umgebung übernommen. Dabei kann die reale Rotation als ein Vektor der Form $\vec{R}_{real} := (Rollen_{real}, Nicken_{real}, Gieren_{real})$ angegeben werden [SBJ⁺08]. Dies ist eine spezielle Darstellungsform für die Rotation eines Objektes im \mathbb{R}^3 um die lokalen Achsen, welche ursprünglich in der Luftfahrt Verwendung fand, mittlerweile aber auch zur Beschreibung der Orientierung von 3D-Objekten genutzt wird. Diese ist in Abbildung 2.2 dargestellt. Rollen, Nicken und Gieren sind dabei extra eingeführte Begriffe, welche die Rotationen um die jeweiligen Achsen wie folgt beschreiben.

- **Rollen:** Bezeichnet die Rotation um die lokale X-Achse. Diese verläuft immer nach vorne, bzw. in Bewegungsrichtung des Objekts. Rollen hat ein Kippen zu den Seiten zur Folge.
- **Nicken:** Bezeichnet die Rotation um die lokale Y-Achse. Diese verläuft immer nach rechts, relativ zur Bewegungsrichtung des Objektes gesehen. Nicken hat ein Kippen nach vorne bzw. hinten zur Folge.

- **Gieren:** Bezeichnet die Rotation um die lokale Z-Achse. Diese verläuft immer nach oben, relativ zur Bewegungsrichtung des Objektes gesehen. Gieren hat ein Drehen auf der XY-Ebene des Objektes zur Folge.

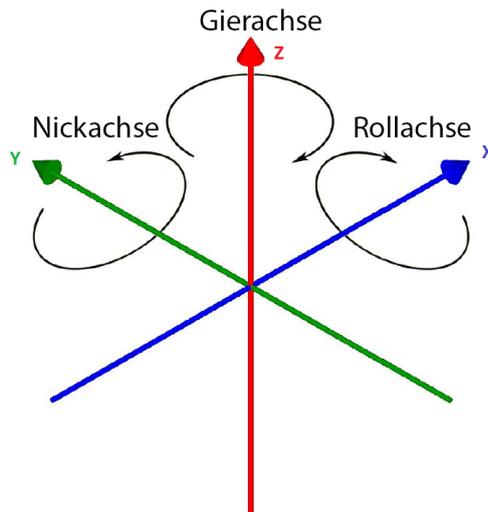


Abbildung 2.2: Roll-Achse, Nick-Achse und Gier-Achse mit Drehsinn [Nog12].

Der Rotation Gain ist nun als das Verhältnis der virtuellen Rotation R_{virt} zu der realen Rotation R_{real} definiert, es gilt also $g_R = \frac{R_{virt}}{R_{real}}$. In der virtuellen Umgebung findet daher eine Rotation mit $R_{virt} = g_R * R_{real}$ statt. Dabei bewirkt ein Gain mit $g_R > 1$ eine Rotation entgegen der Drehrichtung des Nutzers. Will sich der Nutzer zum Beispiel um 90° in der virtuellen Umgebung drehen und wird ein Gain von $g_R = 2$ angewandt, so müsste er sich in der realen Umgebung lediglich um 45° drehen. Ein Gain von $g_R < 1$ bewirkt genau das Gegenteil, also eine Rotation mit der Drehrichtung des Nutzers. Möchte sich der Nutzer zum Beispiel wieder um 90° in der virtuellen Umgebung drehen und wird ein Gain von $g_R = 0.5$ angewandt, so muss sich der Nutzer in der realen Umgebung um 180° drehen. Ein Gain von $g_R = 1$ bewirkt, dass die Szene stabil bleibt, also keine Modifikation der Rotation stattfindet.

Der Rotation Gain ist die wohl am häufigsten verwendete Modifikation beim Redirected Walking. Dies hat vor allem zwei Gründe. Zum einen kann dieser Gain immer angewandt werden, sobald der Nutzer den Kopf dreht, was im natürlichen Bewegungsablauf des Menschen sehr häufig vorkommt. Zum anderen ist hier die Manipulation für den Nutzer sehr viel schwerer zu erkennen als bei den anderen Gains. Der Grund hierfür ist, dass durch die Rotation des Kopfes das vestibuläre System angeregt wird [RKW01, S. 2]

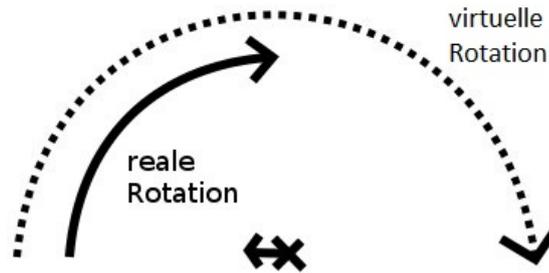


Abbildung 2.3: Reale und virtuelle Rotation des Nutzers bei einem Rotation Gain mit $g_R = 2$.

Rotation Gains können auf jedes Element des Vektors \vec{R}_{real} separat angewandt werden, wodurch man statt einem einzigen Gain g_R einen Vektor von Gains mit der Form $\vec{g}_R = (g_{Rollen}, g_{Nicken}, g_{Gieren})$ erhält [SBJ⁺10]. In der Praxis wird der Rotation Gain dabei meist nur auf das Gieren, also auf die Rotation um die Z-Achse angewandt. Abbildung 2.3 zeigt die reale und die virtuelle Rotation eines Nutzers bei einem Rotation Gain mit $g_R = 2$.

2.3.3 Curvature Gain

Beim Curvature Gain wird ähnlich wie beim Rotation Gain und Translation Gain eine zusätzliche Rotation und Translation auf den Nutzer angewandt. Allerdings werden hier, im Gegensatz zu den anderen beiden Gains, nicht die realen Bewegungen des Nutzers verstärkt. Stattdessen wird eine zusätzliche Rotation in der virtuellen Umgebung ausgeführt, wenn der Nutzer im realen Raum geradeaus läuft, aber keine Rotation ausführt. Sind die Abweichungen klein genug, so gleicht der Mensch sie als Fehler in der Wahrnehmung unwillkürlich aus [Wal].

Der Nutzer bewegt sich dabei im realen Raum auf einem Bogen mit dem Radius r , während er im virtuellen Raum geradeaus läuft. Der Curvature Gain g_C beschreibt die Krümmung des realen Pfads und ist definiert als $g_C = \frac{1}{r}$ [SBJ⁺10]. Läuft der Nutzer zum Beispiel im realen Raum einen Halbkreis mit einem Radius von einem Meter und dreht sich infolgedessen im realen Raum um 180° , so legt er in der virtuellen Umgebung π Meter zurück. Soll kein Curvature Gain angewandt werden, muss ein Radius von $r = \infty$ gewählt werden, sodass sich ein Gain von $g_C = 0$ ergibt.

Curvature Gains können theoretisch auf jedes Element des menschlichen Bewegungsvektors angewandt werden, doch wird in der Praxis häufig nur eine Manipulation mit $g_{C[w]}$ parallel zum Boden durchgeführt. Abbildung 2.4 zeigt den realen und den virtuellen Pfad eines Nutzers bei

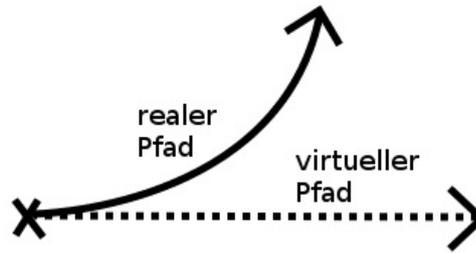


Abbildung 2.4: Der Curvature Gain manipuliert die Wahrnehmung des Nutzers, sodass er einen Bogen in der realen Umgebung läuft.

einem Curvature Gain. Man kann erkennen, dass der virtuelle Pfad gerade verläuft, während sich der Nutzer in der realen Umgebung auf einem Bogen bewegt.

2.3.4 Displacement Gain

Beim Displacement Gain g_D wird die reale Rotation R_{real} des Nutzers auf eine virtuelle Translation abgebildet. Er stellt somit eine Möglichkeit dar, die Position des Nutzers in der virtuellen Welt zu manipulieren, während dieser in der realen Welt stationär auf seiner Position verbleibt [SBH⁺09]. Der Displacement Gain bildet das Gegenstück zum Curvature Gain, bei dem eine virtuelle Rotation stattfindet, wenn der Nutzer eine Translation in der realen Umgebung ausführt.

Der Displacement Gain kann auf jedes Element des menschlichen Bewegungsvektors angewandt werden. Die Abbildung der realen Rotationen auf die virtuellen Translationen kann also als $(pitch_{real}, yaw_{real}, roll_{real}) \rightarrow (g_{D[w]}, g_{D[s]}, g_{D[u]})$ dargestellt werden [SBH⁺09]. Abbildung 2.5 zeigt einen Displacement Gain.

2.3.5 Time Dependent Gain

Jeder der bisher beschriebenen Gains kann auch als Time Dependent Gain g_T definiert werden. Der einzige Unterschied besteht darin, dass nicht die realen Bewegungen des Nutzers als Auslöser für Manipulationen dienen, sondern eine zeitabhängige Manipulation stattfindet [SBH⁺09]. So kann die Szene zum Beispiel bei einem zeitabhängigen Rotation Gain jede Sekunde um wenige Grad um den Nutzer herum gedreht werden, obwohl dieser sich nicht bewegt. Diese kleinen Manipulationen werden vom Nutzer unwillkürlich ausgeglichen, sodass dieser sich mit der Zeit auf der Stelle dreht [SBH⁺09]. Alle Gains können auf zwei verschiedene

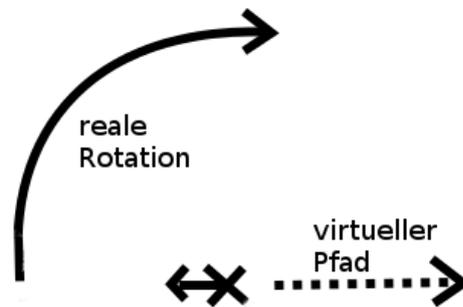


Abbildung 2.5: Der Displacement Gain bildet reale Rotationen auf virtuelle Translationen ab.

Time Dependent Gains abgebildet werden: Zeitabhängige Translationen und zeitabhängige Rotationen.

2.4 Vergleich zwischen akustischem und visuellem Redirected Walking

Akustisches und visuelles Redirected Walking basieren auf den gleichen Grundprinzipien, doch werden bei beiden verschiedene Sinne angesprochen, sodass es zu erheblichen Diskrepanzen bei der Erkennungsrate von Gains kommen kann. Viele der bisherigen Arbeiten zum Thema Redirected Walking haben sich lediglich mit visuellen Reizen befasst [RKW01, SBJ⁺10, Wal], während die akustischen Reize in den meisten Fällen vernachlässigt worden sind [SNS⁺13]. Einige Autoren vertreten jedoch die Auffassung, dass eine konsistente Wahrnehmung über mehrere Sinne dazu beitragen kann, dass der Nutzer Manipulationen durch das Redirected Walking eher als Eigenbewegungen wahrnimmt [Lac77, RKW01]. Deshalb stellen Razzaque et al. räumlich korrekte Klänge als einen wichtigen Bestandteil virtueller Umgebungen dar, die durch Redirected Walking manipuliert werden sollen [RKW01, S. 4].

In den Experimenten von Steinicke et al. wurden Kopfhörer genutzt, um den Umgebungslärm einer Stadt darzustellen. Dieser diente jedoch lediglich dazu, Laborgeräusche zu unterdrücken und so eine Orientierung anhand von Geräuschen in der realen Welt für den Probanden unmöglich zu machen [SBJ⁺10]. Räumlich korrekte Klänge, an denen sich der Proband in der virtuellen Welt orientieren kann, wurden nicht verwendet.

Serafin et al. haben sich mit rein akustischem Redirected Walking beschäftigt [SNS⁺13]. In ihren Experimenten adaptieren sie zwei Experimente von Steinicke et al. [SBJ⁺08, SBJ⁺10], sodass eine gute Möglichkeit zum Vergleich zwischen visuellem und akustischem Redirected Walking geboten wird. Für den Versuch wurden 16 BM5A Dynaudio Lautsprecher verwendet, die auf einer Höhe von 1.6 Metern in einem Kreis mit einem Durchmesser von 7.1 Metern aufgestellt wurden. Angesteuert werden die Lautsprecher nach dem Prinzip des „Vector Based Amplitude Panning“, welches eine präzise Platzierung und Bewegung von Klängen im Raum erlaubt [KRM10, Pul97]. Den Probanden wurde mit Hilfe eines deaktivierten HMDs die Sicht genommen, sodass sie sich an dem Klang einer Alarmglocke orientieren mussten, die von verschiedenen Positionen des Raumes gespielt wurde.

Im ersten Experiment sollte der Erkennungsschwellwert von Rotation Gains festgestellt werden. Abbildung 2.6 zeigt die Ergebnisse. Vergleicht man diese mit den Ergebnisse von Steinicke et al., welche in Abbildung 2.7 dargestellt sind, so stellt man fest, dass der Schwellwert mit akustischen Reizen niedriger liegt als mit visuellen. Konkret kann der Proband mit akustischen Reizen physisch etwa 20% mehr und 18% weniger gedreht werden als die wahrgenommene virtuelle Rotation von 90° [SNS⁺13]. Mit visuellen Reizen sind es 49% mehr und 20% weniger [SBJ⁺10]. Folglich nehmen Menschen das visuelle Redirected Walking weniger stark wahr als das akustische Redirected Walking.

Während des zweiten Experiments wurden die Probanden auf einem Bogen manipuliert, obwohl sie gerade auf die Alarmglocke zulaufen sollten. Die Schwellwerte des Curvature Gains lagen hier bei -25 und 10 [SNS⁺13]. Eine Vergleichbarkeit mit Steinicke et al. ist nicht gegeben.

Die visuelle Wahrnehmung scheint die Propriozeption stärker zu dominieren als es die akustische Wahrnehmung kann. Dies kann dadurch erklärt werden, dass die visuelle Wahrnehmung der akustischen Wahrnehmung im Bezug auf die räumliche Einschätzung von Objekten überlegen ist [Gol13]. Aus diesem Grund liegt der Schluss nahe, dass sich die meisten Probanden beim audiovisuellen Redirekted Walking visuell orientieren werden. Die Experimente von Serafin et al. sind Vorbild für den Test von Nogalski [Nog15] und somit auch für die Versuche in dieser Arbeit.

2.5 Vergleich mit anderen Techniken

Neben Redirected Walking gibt es eine Vielzahl anderer Techniken, welche ebenfalls eine grenzenlose Erkundung von virtuellen Umgebungen erlauben. Zu diesen zählen zum Beispiel Lehngeigen, Fliegen mittels eines Controllers und ein- und mehrachsige Laufbänder. Jede der Techniken hat ihre eigenen Vor- und Nachteile, Redirected Walking bietet jedoch auf Grund

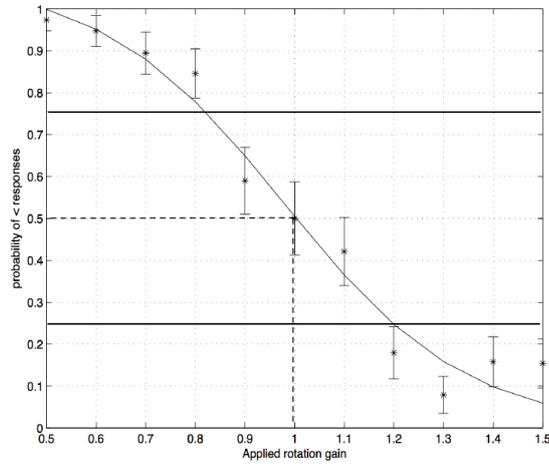


Abbildung 2.6: Die Ergebnisse von Serafin et al. für die Unterscheidung zwischen virtuellen und realen Rotationen. Die X-Achse zeigt den angewendeten Rotation Gain. Die Y-Achse zeigt die Wahrscheinlichkeit, eine virtuelle Rotation wahrzunehmen, die kleiner ist als das physische Gegenstück [SNS⁺13].

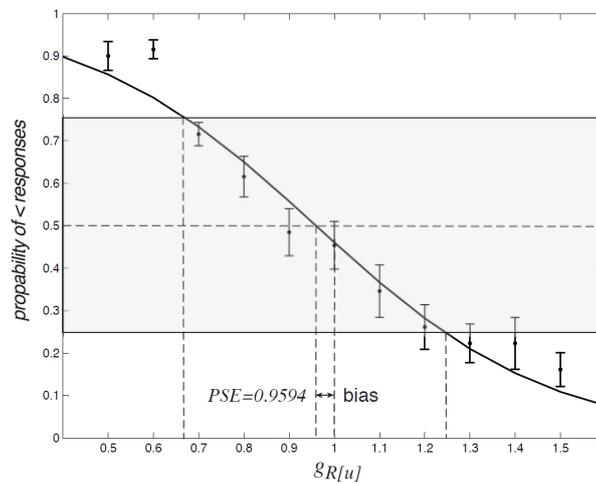


Abbildung 2.7: Die Ergebnisse von Steinicke et al. für die Unterscheidung zwischen virtuellen und realen Rotationen. Die X-Achse zeigt den angewendeten Rotation Gain. Die Y-Achse zeigt die Wahrscheinlichkeit, eine virtuelle Rotation wahrzunehmen, die kleiner ist als das physische Gegenstück [SBJ⁺10].

der direkten Abbildung von physischen auf virtuelle Bewegungen die immersivste Erfahrung [RKW01].

Fliegen mittels eines Controllers bzw. mittels Maus und Joystick war eine der ersten Interaktionsmöglichkeiten mit einer virtuellen Realität. Hierbei werden allerdings keinerlei Sinne angeregt, weshalb die Bewegung in der virtuellen Umgebung unnatürlich erscheint [RSS⁺02, SBJ⁺10]. Auf der anderen Seite wird jedoch keine teure Hardware benötigt, was das Fliegen zu einer einfachen und günstigen Alternative macht.

Mehrachsiges Laufbänder stimulieren die Propriozeption des Laufens, besitzen jedoch den Nachteil, dass das vestibuläre System nicht angeregt wird, da die Bewegungen des Nutzers unterbrochen werden als würde dieser auf einer rutschigen Fläche laufen [RKW01]. Des Weiteren stellt das Laufband eine komplizierte, mechanische Konstruktion dar und ist als solche teuer und fehleranfällig. Einachsige Laufbänder weisen dieselben Schwächen auf, jedoch kommt noch hinzu, dass eine Drehung in der VE für den Nutzer irritierend ist und sogar zu Orientierungsverlust führen kann [RSS⁺02].

Lehngesten wiederum sprechen das vestibuläre System an, erzeugen jedoch keine Propriozeption. Dafür sind sie simpel zu implementieren.

Echtes Laufen im Raum, zum Beispiel durch Redirected Walking, stimuliert das vestibuläre System und die Eigenwahrnehmung konsistent, sodass dieses als die natürlichste Art der Steuerung empfunden wird. Generalisiertes Redirected Walking benötigt jedoch einen weitaus größeren Trackingbereich als alle anderen hier vorgestellten Methoden, da der Nutzer dazu angeregt wird einen vollen Kreis in diesem zu laufen [RKW01].

Zusätzlich kann mit allen Systemen eine Stimulation der akustischen und visuellen Wahrnehmung erfolgen.

3 Wellenfeldsynthese

Der Begriff Wellenfeldsynthese bezeichnet ein Verfahren zur räumlich korrekten Darstellung von Klangquellen, welches im Gegensatz zu traditionellen Verfahren nicht auf dem psychoakustischen Prinzip der Phantomschallquellen beruht, sondern das Wellenfeld einer Klangquelle physisch reproduziert [SZ15]. Im Folgenden sollen zunächst die theoretischen Grundlagen der Wellenfeldsynthese erläutert werden, bevor auf die verschiedenen Eigenschaften und Typen virtueller Klangquellen eingegangen wird. Zum Schluss soll WONDER, eine Software zur Steuerung von Wellenfeldsyntheseanlagen, beschrieben und das Wellenfeldsyntheselabor der HAW Hamburg vorgestellt werden.

3.1 Grundprinzip

Die Funktionsweise der Wellenfeldsynthese basiert auf einem physikalischen Prinzip, dem Huygens-Prinzip oder Huygensschen Prinzip, welches bereits im 17. Jahrhundert vom Niederländer Christiaan Huygens aufgestellt wurde. Dieses beschreibt den Ausbreitungsmechanismus von Wellen, wie zum Beispiel Licht- und Schallwellen, und besagt, dass jeder Punkt einer Wellenfront als ein Ausgangspunkt einer neuen, sphärischen Welle betrachtet werden kann. Diese besitzt die gleiche Wellenlänge und Frequenz, wie die ursprüngliche Wellenfront und wird als Elementarwelle bezeichnet [Vog93, S. 45 ff.]. Durch Überlagerung aller Elementarwellen ergibt sich dann als äußere Einhüllende die sich weiter ausbreitende Wellenfront. 1988 stellen Berkhout et al. ein Konzept vor, um auf Basis dieses Prinzips eine realistische räumliche Darstellung von Klängen zu ermöglichen [Boo01, Ber88].

Dieses Prinzip wird bei der Wellenfeldsynthese durch eine große Anzahl an separat ansteuerbaren Lautsprechern verwirklicht, welche in einem möglichst geringen Abstand zueinander aufgebaut sind, und als Ausgangspunkt bzw. als Erzeuger der Elementarquellen fungieren. Auf diese Weise kann die Wellenfront einer beliebigen Klangquelle, welche sich hinter den Lautsprechern befindet, durch Überlagerung der Elementarwellen rekonstruiert werden [Baa07, S. 1 ff.], sodass der Eindruck entsteht, es gebe wirklich eine physische Quelle außerhalb des Raumes. Da diese Quelle jedoch nicht wirklich physisch vorhanden ist, wird sie als virtuelle Ton- oder Klangquelle oder auch kurz als virtuelle Quelle bezeichnet. Ein großer Vorteil der

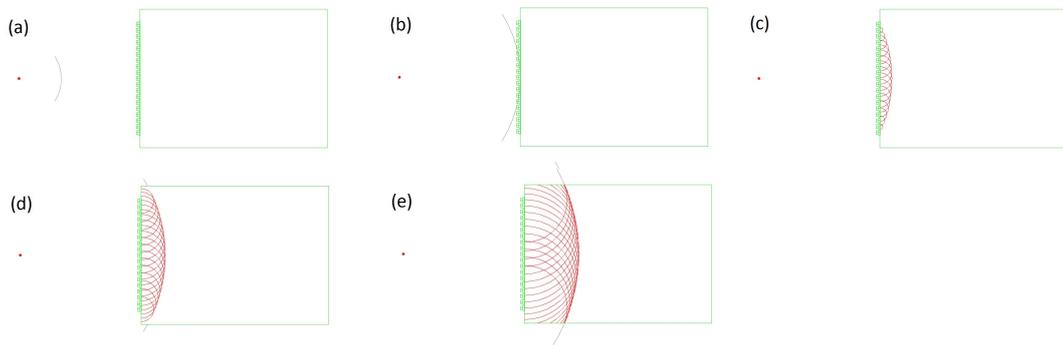


Abbildung 3.1: Ablauf der Synthese einer Schallwelle⁵.

Wellenfeldsynthese ist, dass bei dieser Rekonstruktion der Wellenfronten eine ortsfeste virtuelle Quelle entsteht, die vom Hörer immer an der selben Position geortet wird, auch wenn sich dieser im Wirkungsbereich der Wellenfeldsyntheseanlage bewegt. Im Gegensatz dazu bleibt die optimale räumliche Wahrnehmung bei z.B. stereophonen Verfahren immer auf einen Punkt, den sogenannten „Sweet Spot“, beschränkt [TW04].

Abbildung 3.1 verdeutlicht den Ablauf einer zweidimensionalen Wellenfeldsynthese anhand einer einzelnen Schallwelle. Von der virtuellen Quelle wird eine virtuelle Schallwelle erzeugt (a), die sich solange kreisförmig weiter ausbreitet bis sie einen Lautsprecher erreicht (b). Jeder der Lautsprecher, der von der virtuellen Schallwelle getroffen wurde, erzeugt nun eine neue Elementarwelle, durch deren Überlagerung sich wiederum die ursprüngliche Wellenfront ergibt (c-e).

Da die Schallgeschwindigkeit bekannt und konstant ist, kann für jeden Kanal, abhängig von der Entfernung zur virtuellen Quelle, die Verzögerung und die Dämpfung der Amplitude berechnet werden, mit der die virtuelle Schallwelle bei dieser ankommt und mit der dementsprechend eine Elementarwelle erzeugt werden muss.

Schallwellen breiten sich in der Realität sphärisch aus, sodass das Verfahren ohne Probleme auf die dritte Dimension erweitert werden kann, indem zusätzliche Lautsprecher, nicht nur auf der XY-Ebene, sondern auch untereinander angebracht werden [SZ15, S. 6 ff.]. In der Praxis findet dies jedoch aufgrund der hohen Hardwarekosten noch wenig Anwendung, da sowohl die Berechnung für jeden einzelnen Lautsprecher sehr aufwändig ist, als auch eine extrem hohe Zahl an Lautsprechern benötigt werden würde.

⁵Einzelbilder aus Animation von <http://www.syntheticwave.de/pictures/wave%20field%20synthesis.swf> - Abruf: 22.08.2015

3.2 Eigenschaften und Typen virtueller Quellen

Die Typen und Eigenschaften der virtuellen Quellen können sich je nach verwendetem WFS-System unterscheiden. Die sogenannte „Punktquelle“, welche hinter den Lautsprechern liegt und sphärische Wellen erzeugt, wurde bereits in Kapitel 3.1 näher erläutert. Zusätzlich treten in den meisten WFS-Systemen noch zwei weitere Typen von Quellen auf.

Bei dem ersten Typ handelt es sich um eine Spezialform der Punktquelle, bei der die virtuelle Quelle vor den Lautsprechern liegt. Mit dem bisherigen Modell ist es unmöglich, eine solche Quelle darzustellen. Von den Lautsprechern müssen Elementarwellen erzeugt werden, die auf die Position der virtuellen Quelle fokussiert sind, sodass sich dort durch Überlagerung der Elementarwellen eine sphärische Wellenfront bildet, die von der virtuellen Quelle ausgeht. Für den Hörer ist eine räumliche Wahrnehmung der virtuellen Quelle jedoch nur möglich, wenn er sich nicht zwischen der Quelle und den Lautsprechern befindet. Abbildung 3.2 (c) zeigt den Bereich, in dem die räumliche Wahrnehmung der sogenannten „fokussierten Quelle“ korrekt ist [ML11, S. 15].

Der letzte Typ von Quelle ist die sogenannte „Linearquelle“. Diese erzeugt im Gegensatz zu den anderen beiden Typen lineare Wellenfronten und simuliert auf diese Weise eine Quelle, die sich in großer Entfernung hinter den Lautsprechern befindet. Die Position der virtuellen Quelle ist für diesen Typ nicht relevant, sondern lediglich ihre Ausrichtung [ML11, S. 15]. Abbildung 3.2 zeigt die Wellenfronten der drei vorgestellten Quelltypen.

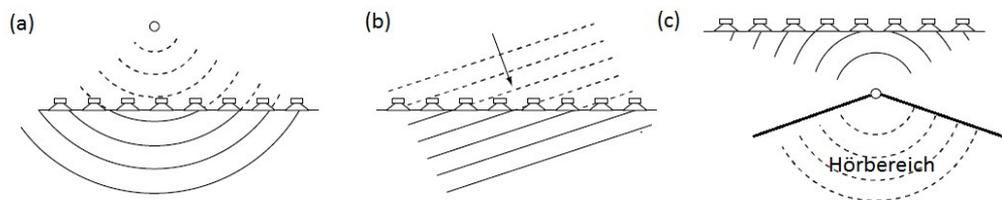


Abbildung 3.2: Wellenfronten verschiedener Quelltypen: Punktquelle (a), Linearquelle (b), fokussierte Quelle (c) [ML11].

Die wichtigste Eigenschaft einer virtuellen Quelle ist ihre Position, da diese für die Berechnung der Elementarwellen benötigt wird. Bei der Linearquelle ist hierfür außerdem die Ausrichtung entscheidend. In den meisten Systemen besitzen die Quellen des Weiteren eine eindeutige Identifikationsnummer zur Referenzierung und andere Attribute, die je nach System

unterschiedlich sind. In der WFS-Software WONDER existieren zum Beispiel zusätzlich die Attribute Name und Farbe.

3.3 WONDER

Bei sWonder⁶ handelt es sich um ein freies Softwarepaket zur Steuerung von Wellenfeldsyntheseanlagen. Dieses besteht aus mehreren Softwarekomponenten, die mittels Open Sound Control⁷ (OSC) Nachrichten über das lokale Netzwerk kommunizieren [Baa05], sodass eine Verteilung auf mehrere Rechner und somit eine vertikale Skalierung, entsprechend der Größe der Wellenfeldsyntheseanlage, erfolgen kann. Im Folgenden sollen kurz die Kernkomponenten von sWonder beschrieben werden:

- **cWonder** ist die zentrale Kontrolleinheit des Systems, die mit allen anderen Softwarekomponenten kommuniziert. Diese läuft auf dem sogenannten WFS-Server und erlaubt es anderen Komponenten, sich über sogenannte „Streams“ für verschiedene Arten von Kontrollnachrichten zu registrieren. Erhält cWonder eine Kontrollnachricht per OSC, wird diese an alle registrierten Komponenten weitergeleitet, sodass die interne Kommunikation ausschließlich über cWonder stattfindet. Des Weiteren sind hier alle Eigenschaften der virtuellen Quellen zentral gespeichert [Baa08, S. 53].
- **tWonder** ist die Renderingeinheit des Systems und als solche für die Verteilung der Audiosignale auf die verschiedenen Ausgabekanäle zuständig. Hierfür nutzt es die von cWonder erhaltenen Positionsdaten der virtuellen Quellen und die festgesetzten Positionen und Ausrichtungen der einzelnen Lautsprecher, um entsprechend der Prinzipien der Wellenfeldsynthese die Verzögerung und die Amplitude für jeden Ausgabekanal zu berechnen. Zur besseren Lastverteilung besteht die Möglichkeit mehrere parallele tWonder-Instanzen zu starten, die jeweils die Berechnung für einen Teil des Lautsprecher-Systems übernehmen. Diese können auch auf mehrere Rechner verteilt werden.
- Bei **xWonder** handelt es sich um die grafische Oberfläche des Systems. Über diese hat der Nutzer die Möglichkeit die virtuellen Quellen zu kontrollieren und zu manipulieren, also unter anderem neue Quellen zu erstellen und zu zerstören und ihre Position zu ändern. Des Weiteren gibt es die Möglichkeit, Projekte zu laden und zu speichern. Der Hauptanwendungszweck besteht somit darin, eine einfache Steuerung des WFS-Systems

⁶<http://sourceforge.net/projects/swonder/> - Abruf: 22.08.2015

⁷<http://opensoundcontrol.org/> - Abruf: 22.08.2015

in Echtzeit zu ermöglichen und die Erstellung von Inhalten zu erleichtern [Baa08, S. 63].
Abbildung 3.3 zeigt xWonder beim Start des Redirected Walking Tests.

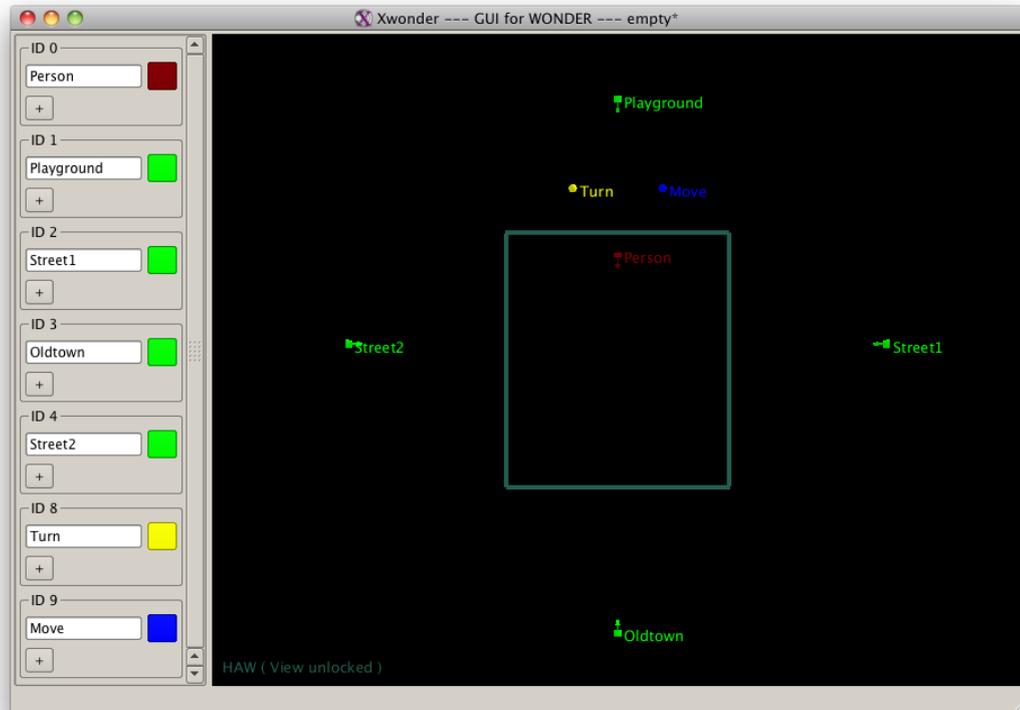


Abbildung 3.3: Die grafische Oberfläche xWonder beim Start des Redirected Walking Tests.

Um Nachrichten von cWonder beziehen zu können, existieren insgesamt vier verschiedene Streams, die jeweils unterschiedliche Informationen an die verbundenen Komponenten liefern [Baa08, S. 53]. Diese sollen im Folgenden kurz vorgestellt werden.

- **/WONDER/stream/render** enthält alle Informationen, um räumlich korrekte Klänge darstellen zu können. Bei diesen handelt es sich zum Beispiel um Position und Ausrichtung der virtuellen Quellen. Dieser Stream wird von der Komponente tWonder genutzt.
- **/WONDER/stream/score** enthält alle Informationen, um die Bewegungen von virtuellen Quellen aufzeichnen und später wieder abspielen zu können.

- **/WONDER/stream/visual** enthält alle Informationen, um den Status aller virtueller Quellen und Einstellungen anzeigen zu können. Dies schließt die Position und Ausrichtung der virtuellen Quellen, aber auch zusätzliche Informationen, wie deren Namen und Farbe, mit ein. Dieser Stream wird von xWonder genutzt.
- **/WONDER/stream/timer** gibt ein periodisches Update der aktuellen Systemzeit. Dieser Stream wird von keiner bestehenden WONDER-Komponente genutzt.

Bei dieser speziellen Darstellungsform der Streams handelt es sich um Adressen von OSC-Nachrichten. Jeder OSC-Server, in diesem Fall cWonder, kann einen eigenen hierarchischen Adressraum aufbauen, dessen Knoten Funktionen des Server darstellen. In OSC-Nachrichten können diese dann wie bei einer URL adressiert werden [WFM03, S. 153].

3.4 Das Wellenfeldsyntheselabor der HAW Hamburg

Das Wellenfeldsyntheselabor der HAW Hamburg verfügt seit 2011 über eine Wellenfeldsyntheseanlage der Firma Four Audio⁸ [Foh13]. Diese besitzt eine rechteckige Grundfläche mit einer Abmessung von etwa 5x6 Metern und besteht aus 26 Audiomodulen, welche auf einer Höhe von etwa zwei Metern installiert sind. Jedes der Audiomodule ist wiederum mit 26 Lautsprechern versehen, die über acht separate Audiokanäle angesteuert werden können, sodass sich eine Gesamtzahl von 208 Wiedergabekanälen ergibt.

Gesteuert wird die Anlage von einem Verbund aus insgesamt vier Rechnern, auf welchen die in Kapitel 3.3 beschriebene Software WONDER läuft. Drei der vier Rechner arbeiten mit Linux, wobei einer als WFS-Server dient und die anderen beiden für das Rendering mittels tWonder zuständig sind. Bei dem letzten Rechner handelt es sich um einen Apple Mac, welcher Audio-Daten in das System speist und eine Kontrolle der Anlage mittels der grafischen Oberfläche xWonder erlaubt. Alle Rechner kommunizieren kabelgebunden über das lokale Netzwerk.

Damit es bei der Übertragung der Audiodaten von den Rechnern zu den Lautsprechern nicht zu Verzögerungen aufgrund einer erhöhten Netzwerklast kommt, wird hierfür ein separates Netzwerk verwendet. Bei diesem handelt es sich um Dante, welches von der Firma Audinate⁹ entwickelt wurde und speziell auf die Nutzung mit Audiodaten zugeschnitten ist. Über das Dante-Netzwerk können außerdem die Steuerdaten für die Lautsprecher übertragen werden [MGTK12].

⁸<http://www.fouraudio.com/> - Abruf: 22.08.2015

⁹<https://www.audinate.com/> - Abruf 22.08.2015

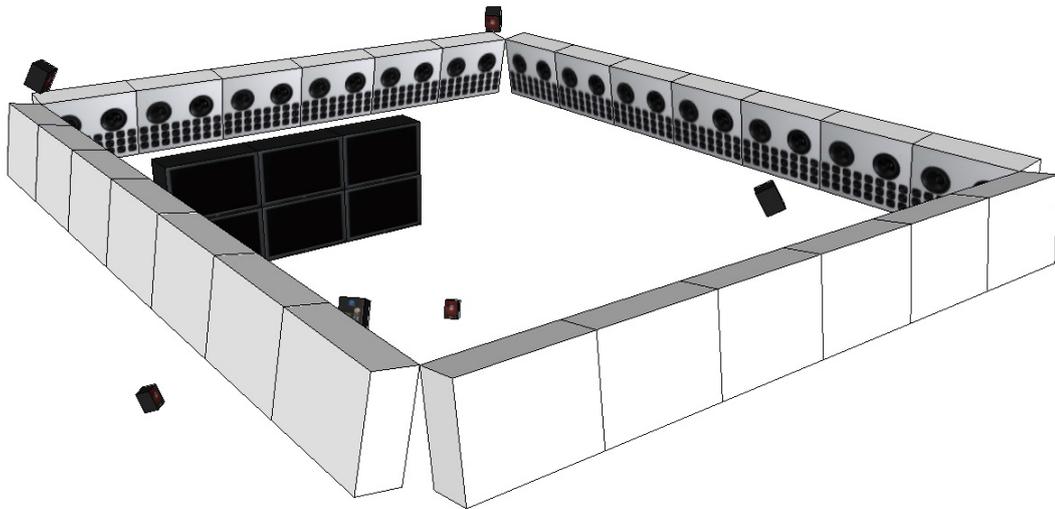


Abbildung 3.4: Aufbau des Wellenfeldsyntheselabors der HAW Hamburg mit 26 Audiomodulen, 8 Infrarotkameras und 6 Bildschirmen [Nog12, S. 12].

In dem Labor ist ein Trackingsystem der Firma Advanced Realtime Tracking¹⁰ verbaut, welches die Position und Ausrichtung von passiven Marker-Objekten auf einer Fläche von 5x5 Metern erfasst. Hierfür werden sechs Infrarot-Kameras verwendet, von denen vier in einem Quadrat in etwa 2.5 Metern Höhe angebracht sind. Die übrigen beiden Kameras befinden sich darunter auf etwa 1.5 Metern Höhe. Erfasst werden die Marker-Objekte über die Reflektionen der Infrarotstrahlung. Die Daten des Trackingsystems werden in eine Multicast-Gruppe eingespeist, wobei ein WLAN-Router eine drahtlose Verteilung der Daten erlaubt. Auf diese Weise kann zum Beispiel die Synthese von fokussierten Quellen dynamisch auf die Position des Nutzers angepasst werden [Chr14]. Des Weiteren ist hierdurch eine Positionierung der virtuellen Quellen über Gesten möglich [FN13].

An der Frontseite des Labors formen insgesamt sechs HD-Bildschirme mit einer Auflösung von 1920x1080 Pixeln eine sogenannte Powerwall. Diese kann als ein einziger großer Bildschirm mit einer Auflösung von 4800x2400 Pixeln genutzt werden. Angesteuert wird die Powerwall durch einen separaten Windows-Rechner.

¹⁰<http://www.ar-tracking.com/home/> - Abruf: 22.08.2015

4 Oculus Rift

Die Oculus Rift ist ein Head-Mounted-Display (HMD) der Firma Oculus VR¹¹ und ist das Ergebnis eines Crowd-Funding-Projektes, mit dem Ziel ein möglichst immersives HMD, ohne die üblicherweise auftretenden Nebenwirkungen von Simulatorkrankheit, wie Schwindel und Übelkeit, zu entwickeln. Zur Zeit sind lediglich Entwicklerversionen der Oculus Rift erhältlich, bei der neuesten verfügbaren Version handelt es sich um das Development-Kit 2 (DK2). In dieser Arbeit wurde ausschließlich diese Version der Oculus Rift verwendet, weshalb im Folgenden lediglich auf diese eingegangen wird.

4.1 Technik

Die Oculus Rift DK2 nutzt zur Darstellung ein durchgängiges OLED-Display mit einer Auflösung von 1920 x 1080 Pixeln, wodurch sich pro Auge eine Auflösung von 960 x 1080 Pixeln ergibt. Die OLED-Technologie ermöglicht hierbei, im Gegensatz zu herkömmlichen LCDs, deutlich geringere Reaktionszeiten, vermindert merklich das Verschwimmen der angezeigten Bilder und wirkt auf diese Weise Symptomen der Simulatorkrankheit entgegen. Dem Bildschirm der Oculus Rift ist pro Auge jeweils eine Linse vorgeschaltet, welche diesen auf ein Sichtfeld von 100° vergrößern, ohne ihn merklich verschwimmen zu lassen. Dabei wird auf den Bildschirmen ein Bild angezeigt, in das die Brechung der Linse bereits mit eingerechnet ist. Abbildung 4.1 zeigt, wie ein solches Bild ohne Brechung durch die Linsen aussieht. Man kann erkennen, dass an den Rändern von Objekten eine Zerlegung in verschiedene Farben stattfindet, welche von den Linsen unterschiedlich gebrochen werden und schließlich im Auge wieder als eine Farbe ankommen. Ein häufiger Kritikpunkt ist, dass aufgrund der Größe und der schlechten Qualität der Linsen die Überlagerung der Farben nicht richtig funktioniert und so merkliche Abstufungen der Farben an den Rändern von Objekten verbleiben. Dieser Effekt wird chromatische Aberration genannt. Die Oculus Rift DK2 wird mit einem zweiten Paar Linsen geliefert, die zwar keine andere Brechung, dafür jedoch eine andere Fassung besitzen. Auf diese Weise werden die Linsen näher an den Bildschirm gebracht und erlauben so auch

¹¹<https://www.oculus.com/en-us/> - Abruf: 30.08.2015



Abbildung 4.1: Vergrößerter Ausschnitt des markierten Bildbereichs auf der Oculus Rift DK2 ohne Brechung durch die Linsen.

Menschen mit starker Kurzsichtigkeit die Nutzung. Der Anschluss an einen Computer erfolgt über einen HDMI-Anschluss für die Übertragung des Bildes und einen USB-Anschluss für die Stromversorgung und die Erkennung der Oculus Rift auf dem Computer. Die DK2 besitzt einen zusätzlichen USB-Anschluss direkt an der Brille, an den optionale Komponenten wie Kopfhörer oder Spielecontroller angeschlossen werden können. Dies erhöht jedoch den Stromverbrauch, sodass zusätzlich eine externe Versorgung benötigt wird.

Die Oculus Rift DK2 ist die erste Version der Oculus Rift, die neben einer internen Bewegungserkennung durch Bewegungssensoren auch eine externe Erkennung mit Hilfe einer Kamera besitzt. Dies ermöglicht erstmals neben der Rotation des Kopfes auch dessen Position im Raum zu erfassen, sodass zum Beispiel wahrgenommen werden kann, wenn der Nutzer sich zur Seite neigt oder den Kopf in Richtung Kamera bewegt. Das Kopftracking erfolgt mittels Infrarot-LEDs, die an der Vorderseite des DK2 befestigt sind und von LED-Sensoren in der Kamera erfasst werden. Da auf der Rückseite keine LEDs verbaut sind, ist ein 360° Kopftracking nicht möglich.

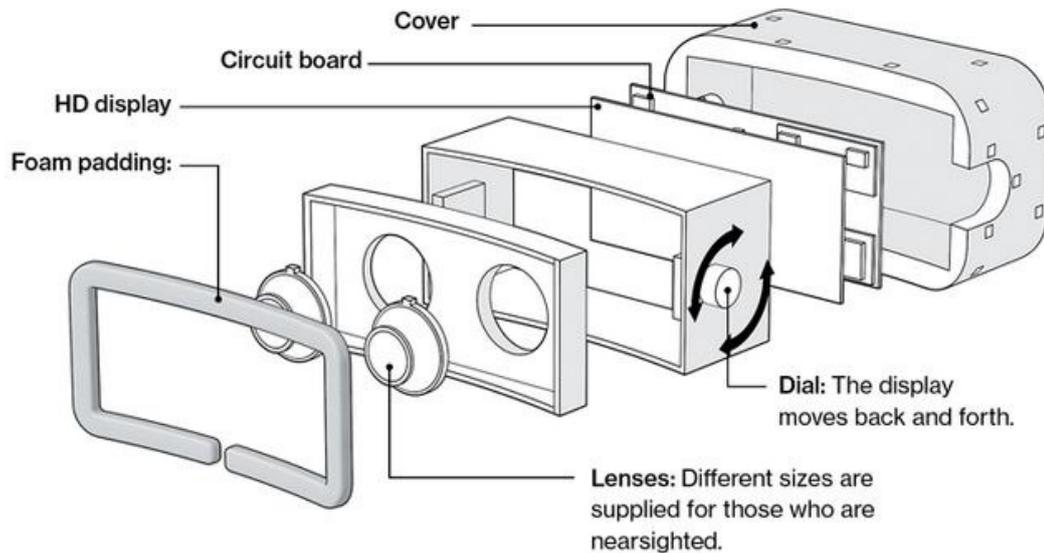


Abbildung 4.2: Interner Aufbau der Oculus Rift [DDAM14].

Abbildung 4.2 zeigt den internen Aufbau einer Oculus Rift DK2 mit allen Einzelteilen, wie den Linsen, dem Bildschirm und der Leiterplatte.

4.2 Ansteuerungsmöglichkeiten

Um Inhalte auf den Bildschirm der Oculus Rift zu bringen, existieren im Wesentlichen zwei Möglichkeiten. Zum einen die Nutzung des Oculus SDKs und zum anderen die Nutzung einer Gameengine. Beide Varianten werden in Kapitel 4.2.1 und 4.2.2 näher erläutert. Zunächst müssen jedoch alle benötigten Treiber installiert werden. Diese werden von Oculus VR in Form einer Laufzeitumgebung¹² zur Verfügung gestellt, die für Windows und Mac erhältlich ist. Neben den Treibern enthält diese auch eine Konfigurationssoftware, in der die Größe des Nutzers sowie dessen Augenabstand erfasst wird.

4.2.1 Oculus SDK

In Form des Oculus SDKs stellt Oculus VR eine C-API zur Verfügung, die eine präzise Ansteuerung der Oculus Rift ermöglicht. Diese hat das Ziel, eine möglichst einfache Integration in neue und bereits bestehende C und C++ Anwendungen zu bieten.

¹²<https://developer.oculus.com/downloads/> - Abruf: 30.08.2015

Aus diesem Grund sind alle Funktionen zur Steuerung der Oculus Rift in einer Header-Datei gebündelt. Diese erlauben neben der Erkennung und der Initialisierung der Oculus Rift auch die Verwendung der internen Sensoren sowie die Nutzung des Kopftrackings über die mitgelieferte Kamera. Des Weiteren existieren Funktionen zum Anzeigen der Bilder auf der Oculus Rift, wobei die Brechung der Linse standardmäßig mit eingerechnet wird. Die chromatische Aberration kann je nach Belieben hinzugeschaltet werden, je nachdem ob man eine bessere Qualität oder weniger CPU-Auslastung erreichen möchte.

4.2.2 Gameengine Integration

Für alle Versionen der Oculus Rift werden, um eine leichtere Erstellung von Inhalten zu ermöglichen, Plugins für die Gameengines Unity und Unreal Engine angeboten. Beide Engines stehen für die unkommerzielle Nutzung kostenlos zur Verfügung. In dieser Arbeit wurde Unity in der Version 5.0 verwendet, weshalb im Folgenden hauptsächlich auf diese Engine eingegangen wird.

Die Ansteuerung gestaltet sich in der Unreal Engine sehr einfach. Hier muss lediglich das Plugin von der Oculus VR Internetseite installiert werden, die Anwendung wird dann automatisch auf der Oculus Rift ausgegeben, wenn diese angeschlossen ist.

Auch für Unity muss lediglich ein Plugin von der Oculus VR Internetseite installiert werden. Es besteht dann die Möglichkeit beim Exportieren der Anwendung die Oculus Rift als Zielplattform auszuwählen. Mit dem Plugin wird auch eine Reihe von sogenannten „Prefabs“ und spezifischem Quelltext für die Oculus Rift installiert. Bei Prefabs handelt es sich um vordefinierte Objekte, welche ohne weitere Bearbeitung in der Anwendung genutzt werden können. Auf diese Weise wird zum Beispiel eine Stereokamera zur Verfügung gestellt, welche zwei verschiedene Bilder der Szene aufnimmt und diese zu einer Oculus Rift geeigneten Form aufbereitet. Diese Stereokamera ist das einzige, zwingend notwendige Objekt für eine VR-Szene. Bei dem Quelltext handelt es sich zu großen Teilen um abstrahierte Zugriffe auf die Oculus-API, die in Form von DLLs von der Runtime Environment zur Verfügung gestellt wird. Des Weiteren werden hier Unity-spezifische Funktionen aufgerufen, zum Beispiel um die beiden Bilder der Stereokamera zum einem gemeinsamen Bild zu vereinen, dass dann auf der Oculus Rift angezeigt wird.

Seit Version 5.1 wird die Oculus Rift von Unity nativ unterstützt. Die Installation eines zusätzlichen Plugins entfällt somit und es muss lediglich an der Hauptkamera der Szene die Option „VR Support“ ausgewählt werden, damit die Anwendung für die Oculus Rift erstellt wird. Es gibt mit dieser Variante allerdings keine Möglichkeiten mehr, Manipulationen am Quelltext

vorzunehmen und so zum Beispiel das interne Tracking der Oculus Rift zu deaktivieren. Aus diesem Grund fand diese Methode in dieser Arbeit keine Verwendung.

4.3 Vergleich mit anderen HMDs

Nachdem es Oculus VR mit der Oculus Rift gelungen ist ein HMD zu entwickeln, das eine immersive Erkundung von virtuellen Welten erlaubt und trotzdem erschwinglich für den Endkunden bleibt, hat der Markt der Soft- und Hardware für die virtuelle Realität einen regelrechten Boom erlebt. Gleich mehrere Firmen entwickeln zur Zeit an eigenen HMDs, die zum Teil eine Alternative zur Oculus Rift darstellen, zum Teil aber auch ganz andere Sparten bedienen sollen. Bei diesen handelt es sich zum Beispiel um „Vive“ von HTC, „Projekt Morpheus“ von Sony, „HoloLens“ von Microsoft und „Gear VR“ von Samsung. Es existiert noch eine Vielzahl weiterer HMDs, die an dieser Stelle jedoch nicht näher beschrieben werden sollen.

Die HTC Vive und Projekt Morpheus stellen zur Zeit die größte Konkurrenz zur Oculus Rift dar. Projekt Morpheus besitzt ähnliche Spezifikationen wie die Oculus Rift DK2 und unterscheidet sich lediglich durch eine höhere Bildwiederholungsrate von 120 Hz von dieser. Das HMD von Sony ist auf die Verwendung mit der Playstation 4 optimiert und erlaubt neben einer immer gleich bleibenden VR-Erfahrung, ein Positionstracking mittels der Playstation Kamera. Aufgrund der Plattformabhängigkeit kommt Projekt Morpheus für diese Arbeit nicht in Frage. Die HTC Vive bietet dagegen mit einer Auflösung von 2160x1080 Pixeln, verteilt auf zwei Displays, eine echte Alternative. Das Ziel von Vive ist es nicht nur ein HMD zu entwickeln, sondern in Kooperation mit Steam eine komplette VR-Erfahrung zu bieten. Zu diesem Zweck besteht die Möglichkeit des Trackings über zwei Infrarot-Laserkameras, welche eine Fläche von 4,5x4,5 Metern erfassen können. Des Weiteren werden zwei spezielle Controller mitgeliefert, die ein Tracking der Hände erlauben. Die HTC Vive stellt zur Zeit nativ das einzige HMD dar, dass dem Nutzer reales Laufen als Eingabe für virtuelle Welten erlaubt.

Die Gear VR wurde von Samsung in Zusammenarbeit mit Oculus VR entworfen. Das besondere ist hier, dass das HMD kein fest verbautes Display besitzt und keine Verbindung zu einem Computer benötigt. Stattdessen wird ein Galaxy Note 4¹³ als Display und für das Rendering der virtuellen Welt genutzt. Dieses besitzt eine Auflösung von 2560x1440 und kann sich somit ohne Probleme mit normalen HMDs messen. Die Laufzeit und die Performance ist durch die Nutzung des Smartphones jedoch stark eingeschränkt.

¹³<http://www.samsung.com/de/consumer/mobile-devices/smartphones/galaxy-note/SM-N910FZWEDBT> - Abruf: 30.08.2015

4 Oculus Rift

Die HoloLens von Microsoft zielt anders als die bereits vorgestellten HMDs nicht auf die Erzeugung einer virtuellen Realität ab. Stattdessen soll eine erweiterte Realität (AR) erschaffen werden, indem die Sicht des Nutzers partiell überlagert wird. Hierbei verschmelzen virtuelle und reale Welt miteinander.

Abbildung 4.3 zeigt alle HMDs, die in diesem Kapitel behandelt wurden. Bei allen handelt es sich zur Zeit noch um Entwicklerversionen.



Abbildung 4.3: Verschiedene HMDs: Project Morpheus¹⁴ (links oben), HTC Vive¹⁵ (rechts oben), Gear VR¹⁶ (links unten) und Microsoft HoloLens¹⁷ (rechts unten).

¹⁴<https://www.playstation.com/de-de/explore/ps4/features/project-morpheus/> - Abruf: 22.08.2015

¹⁵<http://www.giga.de/zubehoer/htc-vive/specials/htc-vive-release-date-preis-wann-erscheint-vr-brille-kosten/> - Abruf: 22.08.2015

¹⁶<http://www.tomsguide.com/us/samsung-gear-vr,review-2602.html> - Abruf: 22.08.2015

¹⁷<http://www.playnation.de/spiele-news/microsoft-hololens/holographie-brille-zusammenspiel-windows-10-angekuendigt-id58877.html> - Abruf: 22.08.2015

5 Test

Dieses Kapitel soll sich mit dem Test befassen, der von den Probanden durchlaufen wird. Zunächst soll dabei auf die Testplanung eingegangen werden, bevor dessen technische Umsetzung geschildert wird. Zu guter Letzt wird die getestete Gruppe der Probanden beschrieben.

5.1 Testplanung

Der Test, der im Folgenden erläutert wird, wurde ursprünglich von Malte Nogalski entwickelt und von diesem im Rahmen seiner Masterarbeit über rein akustisches Redirected Walking bereits erprobt. Für eine detailliertere Beschreibung des Tests empfiehlt sich ebendiese Masterarbeit [Nog15]. Der akustische Test wurde in dieser Arbeit durch eine visuelle Komponente ergänzt. In den folgenden Kapiteln werden zunächst die Auswahlkriterien für die zu testenden Gains beschrieben, bevor auf die Anforderungen an den Test und die Konzeption der virtuellen Testumgebung eingegangen wird. Zum Schluss werden noch der Test an sich und die Simulatorkrankheit näher erläutert.

5.1.1 Auswahl der Gains

Wie in Kapitel 2.3 beschrieben stehen im Wesentlichen fünf verschiedene Gains zur Verfügung, um die Bewegungen des Nutzers in der virtuellen Umgebung zu manipulieren. Bei diesen handelt es sich um Translation Gain, Rotation Gain, Curvature Gain, Displacement Gain und Time Dependent Gain, wobei dieser wiederum in Time Dependent Translation Gain und Time Dependent Rotation Gain unterteilt werden kann.

Um die bestmögliche Vergleichbarkeit der Ergebnisse mit der Arbeit von Nogalski gewährleisten zu können, werden die beiden von ihm getesteten Gains auch Hauptbestandteil dieser Arbeit sein. Bei diesen handelt es sich um den Rotation Gain und den Curvature Gain [Nog15].

Die beiden Gains haben zusammen mit dem Translation Gain in der Literatur bisher am meisten Aufmerksamkeit erfahren [SNS⁺13, Wal, SBJ⁺10] und auch Serafin et al. nutzen in ihrer Arbeit zu rein akustischem Redirected Walking diese beiden Gains. Des Weiteren haben sich

der Rotation Gain und der Translation Gain in einer Selbststudie als äußerst vielversprechend für den Einsatz mit der Wellenfeldsyntheseanlage erwiesen [NF15].

Der Translation Gain wurde von Nogalski und Fohl für das akustische Redirected Walking verworfen, da den Menschen die Einschätzung von Distanzen akustisch deutlich schwerer fällt als visuell. Aus diesem Grund kann es leicht passieren, dass Probanden die Manipulation durch das Redirected Walking nicht als Eigenbewegung, sondern als Umgebungsbewegung wahrnehmen. Daraus resultierend nimmt der Proband seine Startposition in Relation zu der Position der virtuellen Quelle anders wahr, sodass eine fehlerhafte räumliche Einschätzung der virtuellen Umgebung die Folge ist [Nog15]. Visuell wäre eine sehr viel genauere Einschätzung der Distanz möglich, der Translation Gain wurde jedoch aus zwei Gründen nicht mit in den audiovisuellen Test aufgenommen. Zum einen nimmt der Gesamttest mit einer Summe von 72 Teiltests bereits eine Zeit von 40 Minuten pro Teilnehmer in Anspruch. Bei einer Verlängerung der Testdauer durch zusätzliche Gains könnte es somit zu Ermüdungserscheinungen bei den Probanden kommen. Zum anderen sollen für den Test Gains verwendet werden, die visuell und akustisch gleich gut wahrnehmbar sind. Der Erkennungsgrenzwert des Translation Gains hätte andernfalls nur wenig Aussagekraft über die Verbindung von akustischer und visueller Wahrnehmung.

Displacement Gains wurden von Nogalski und Fohl nicht in den Test aufgenommen, da sie nur ein geringes Potential für Manipulationen bieten. Gleiches gilt für Time Dependent Gains. Hier wurde ebenfalls eine Vorstudie durchgeführt, doch hat keiner der Teilnehmer die zeitabhängigen Manipulationen selbstständig ausgeglichen [NF15].

Stärke der Gains

Die Stärke der Gains wurde für eine gute Vergleichbarkeit ebenfalls von Nogalski übernommen. Diese basieren auf der Arbeit von Steinicke et al. [SBH⁺09] und wurden durch eine Reihe von Selbsttests angepasst, sodass sich eine optimale Verteilung der Werte ergibt. Die Stärke der Gains wurde so gewählt, dass die kleinsten Gains von keinem Nutzer erkannt werden, die größten hingegen von allen.

Für den Rotation Gain ergibt sich somit ein Wertebereich von $-60\% \leq g_r \leq +60\%$, mit einer Schrittweite von 5%. Für den Curvature Gain wurde ein Wertebereich von $-1.0 \leq g_c \leq +1.0$ mit einer Schrittweite von 0.05 gewählt. Dies entspricht einem Bogen mit einem minimalen Radius von einem Meter und einem maximalen Radius von 20 Metern. Zusätzlich wird für beide Gains jeweils vier mal ein Nullgain durchgeführt, bei dem keine Manipulation der virtuellen Umgebung stattfindet. Insgesamt ergibt sich eine Zahl von 28 Rotation Gains und 44 Curvature Gains.

5.1.2 Anforderungen an den Test

Nogalski und Fohl formulieren in ihrer Arbeit drei Anforderungen an die akustische Gestaltung des Tests [NF15]:

- Es muss eine Umgebungsquelle geben, welche die Laborgeräusche unterdrückt und eine zusätzliche Möglichkeit zur Orientierung bietet, sodass Nutzer Umgebungsbewegungen leichter als Eigenbewegungen wahrnehmen.
- Es muss einen Klang geben, welcher den Nutzer anregt, sich zu diesem zu drehen.
- Es muss einen Klang geben, welcher den Nutzer anregt, zu diesem zu laufen.

Auch die visuelle Gestaltung des Tests besitzt einige spezifische Anforderungen:

- Es muss Immersion erzeugt werden, ohne dass die Umgebung zu sehr von den visuellen Zielen ablenkt.
- Es muss eine ausreichend große Menge an Merkmalen für die visuelle Orientierung vorhanden sein.
- Es müssen visuelle Ziele vorhanden sein, zu denen der Nutzer sich drehen bzw. zu denen er laufen kann.

Neben diesen spezifischen Anforderung an die akustische und die visuelle Gestaltung gibt aus noch einige Anforderungen, welche den Test an sich betreffen. So dürfen keine Diskrepanzen zwischen den akustischen und visuellen Reizen auftreten und das System muss ohne große Latenzen arbeiten. Dies ist besonders für die visuelle Komponente wichtig, da hier eine Bildwiederholungsrate von 75 Hz für die Oculus Rift DK2 erreicht werden muss. Zu guter Letzt soll der Test automatisch ablaufen, sodass der Nutzer sich während der gesamten Dauer in der virtuellen Umgebung befindet und keine visuellen und akustischen Reize aus der realen Umgebung wahrnimmt.

5.1.3 Konzeption der virtuellen Testumgebung

Während des Tests soll mit Hilfe der Oculus Rift und der Wellenfeldsyntheseanlage eine virtuelle Umgebung dargestellt werden, in der sich der Proband frei bewegen kann. Generell können Redirected Walking Techniken in jeder beliebigen virtuellen Umgebung genutzt werden, für den Test müssen jedoch die in Kapitel 5.1.2 spezifizierten Anforderungen erfüllt werden. Im

Folgenden sollen die Entwurfsentscheidungen der virtuellen Testumgebung erläutert werden. Dazu wird zunächst auf die visuelle Gestaltung, dann auf die akustische Gestaltung eingegangen.

Visuell

Zunächst einmal muss die virtuelle Umgebung um ein Vielfaches größer sein als der reale Raum. Der Grund hierfür ist, dass die Position und Orientierung des virtuellen Raumes während des Tests stark von der des realen Raumes divergiert. Wie in Abbildung 5.1 dargestellt, kann dieser Effekt bereits nach einem Curvature Gain auftreten. Die Linien zeigen die Bewegungen des Probanden im realen und im virtuellen Raum, während des Curvature Gains. Im ersten Schritt (blau) wird dem Probanden in der virtuellen Umgebung vorgegaukelt, er laufe nur geradeaus, obwohl er in Wirklichkeit in die Mitte des Raumes gelotst wird. Wird er dann im nächsten Schritt (orange) im realen Raum ohne jegliche Manipulation in die vor ihm liegende Ecke gelenkt, müsste er in der virtuellen Umgebung durch die Wand laufen. Um dies zu verhindern, muss eine Umgebung gewählt werden, die möglichst keine festen Grenzen besitzt und um ein Vielfaches größer ist als der reale Raum.

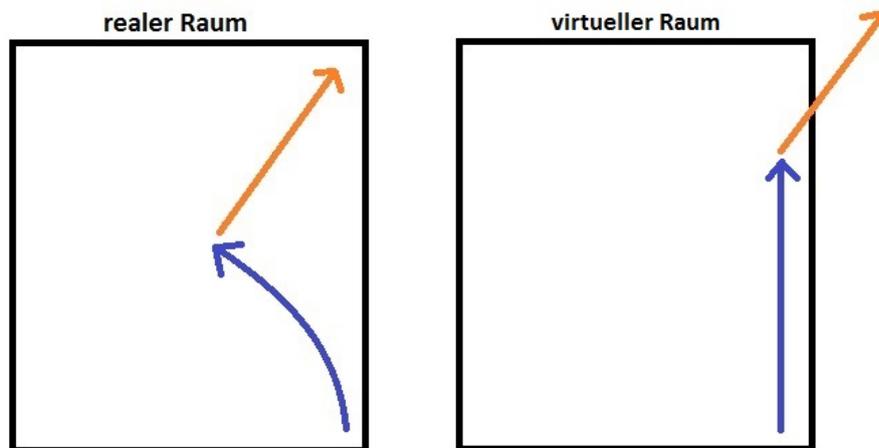


Abbildung 5.1: Divergenz zwischen Bewegungen im realen und virtuellem Raum.

Eine der wichtigsten Aufgaben der virtuellen Umgebung ist die Erzeugung einer möglichst großen Immersion [Wal], um die Orientierung des Nutzers in der virtuellen Welt zu erleichtern. Dabei ist es für die Immersion nicht wichtig, dass eine realistische Umgebung dargestellt wird. Häufig ist es eine bessere Wahl, eine Umgebung zu nutzen, die es in der realen Welt nicht

geben kann, die jedoch den Vorstellungen und Vorurteilen der Nutzer entspricht. Die visuelle Umgebung darf allerdings nicht so interessant sein, dass sie den Nutzer von den visuellen Zielen ablenkt. In dieser Arbeit wurde versucht dieses Prinzip bei der Konzeption der visuellen Testumgebung umzusetzen. Hier stehen Pyramiden direkt neben einem kleinen Dorf und einer Oase. In der realen Welt existiert eine solche Landschaft nicht, sie entspricht jedoch den klischeebehafteten Vorstellungen, die ein Nutzer von einer Wüstenlandschaft besitzt.

Des Weiteren sollte die virtuelle Umgebung über eine möglichst hohe Anzahl an Merkmalen verfügen, welche es dem Probanden ermöglicht, sich in ihr zu orientieren. So sollte er jederzeit in der Lage sein, seine Position und seine Orientierung in der virtuellen Welt zu bestimmen. Dies ist wichtig, da der Proband bei dem Test feststellen soll, ob eine Manipulation der Welt, bzw. seiner Bewegungen in dieser Welt, stattgefunden hat. Ein Objekt in der virtuellen Welt kann aus zwei Gründen zu einem Orientierungspunkt für den Probanden werden. Zum einen geschieht dies durch seine Besonderheit und zum anderen aufgrund der persönlichen Bedeutung für den Nutzer [Sat95, S. 4]. Aus offensichtlichen Gründen konnte bei der Konzeption der visuellen Umgebung kein Objekt verwendet werden, das eine persönliche Bedeutung für alle Nutzer besitzt. Daher wurde auf Objekte zurückgegriffen, die außergewöhnlich erscheinen, so wie die Pyramide oder die Kamele.

Abbildung 5.2 zeigt eine 2D-Ansicht der für den Test erstellten virtuellen Umgebung. Diese erfüllt alle der oben genannten Eigenschaften und stellt eine kleine Wüstenumgebung dar. Erfahrungswerte haben gezeigt, dass der virtuelle Raum sich höchstens um eineinhalb Raumlängen, also ungefähr elf Meter, vom realen Raum entfernt. Deshalb befindet sich in der Mitte, markiert mit einem roten Kreis, eine Ebene mit einem Radius von ca. 20 Metern, sodass sicher gestellt ist, dass der Proband während des Tests nicht mit Hindernissen in der virtuellen Welt kollidiert. Am Rand der Welt sind verschiedene Orientierungspunkte verteilt (1-4). Konkret handelt es sich um eine Oase, ein kleines Forschungscamp mit Kamelen, eine Pyramide und ein kleines Dorf. Zwischen diesen Hauptorientierungspunkten befinden sich jeweils kleinere Orientierungspunkte, wie Felsen, Büsche und Dünen. So ist sichergestellt, dass der Proband, unabhängig von seiner Ausrichtung, immer einen Orientierungspunkt sieht. Die größeren Merkmale sind jedoch relativ weit von dem Probanden entfernt, was eine genaue Einschätzung der zurückgelegten Strecke erschwert. Deshalb wurden auf der Ebene kleine Pflanzen verteilt, die eine bessere Einschätzung der zurückgelegten Distanz ermöglichen.

Zusätzlich werden visuelle Repräsentationen für das Lauf- und das Rotationsziel benötigt, wobei hierfür jede beliebige Repräsentation geeignet ist. Für das Rotationsziel wurde ein Hund gewählt, da es plausibel ist, dass sich dieser im Laufe der Teilstests bewegt. Für das Bewegungsziel



Abbildung 5.2: 2D-Ansicht der virtuellen Testumgebung.

wurde eine Art Springbrunnen gewählt, da es logisch ist in einer Wüstenlandschaft auf Wasser zuzulaufen. Abbildung 5.3 zeigt die beiden visuellen Ziele.

Audio

Wie in Kapitel 5.1.2 beschrieben, werden für den Test im Wesentlichen drei verschiedene Arten von Klängen benötigt. Bei diesen handelt es sich um Umgebungsgeräusche, einen Klang der zur Drehung anregt und einen Klang der zum Laufen anregt.

Für den Test müssen die Umgebungsgeräusche einige spezifische Anforderungen erfüllen. So wurden diese so gewählt, dass sie mit der visuellen Welt übereinstimmen. Das heißt, dass jedes Objekt, von welchem man ein Geräusch erwarten würde, auch wirklich einen Klang erzeugt. In der konzipierten Wüstenlandschaft sind dies zum Beispiel die Kamele, das Lagerfeuer und die Flamingos in der Oase. Außerdem sollte während des Tests von jeder Seite der Wellenfeldsyntheseanlage ein Klang gespielt werden, um Laborgeräusche von allen Seiten zu unterdrücken und zusätzlich eine weitere Möglichkeit zur Orientierung zu geben. Betrachtet man Abbildung 5.2 als Karte, so wird aus nördlicher Richtung orientalische Musik, aus östlicher Richtung Flamingolaute, aus südlicher Richtung ein Kamel- und ein Lagerfeuerklang und



Abbildung 5.3: Das Bewegungsziel in Form eines Springbrunnens (links) und das Rotationsziel in Form eines Hundes (rechts).

aus westlicher Richtung das Rauschen von Wind abgespielt. Alle Klänge wurden möglichst realistisch gewählt, um die Immersion der virtuellen Umgebung zu verstärken.

Die Klänge des Bewegungsziels und des Rotationsziels wurden ebenfalls so gewählt, dass sie mit ihrer visuellen Repräsentation übereinstimmen. Für den Hund wurde daher ein Bellen und für die Quelle das Plätschern von Wasser gewählt. Es hätte jedoch auch ein beliebiger anderer passender Klang genutzt werden können.

5.1.4 Ablauf des Tests

Wie bereits in Kapitel 5.1.1 erläutert, sollen in diesem Test verschiedene Stärken von Curvature Gains und Rotations Gains getestet werden. Die Startpositionen der beiden Tests müssen hierbei spezielle Anforderungen erfüllen [NF15].

Um die Position und die Orientierung des Probanden zu Beginn eines Curvature Gains festzulegen ist es notwendig den Pfad vorherzusagen, auf welchem sich dieser bewegen wird. Auf diese Weise soll zum Beispiel verhindert werden, dass der Proband direkt vor einer Wand startet. Der perfekte Pfad des Probanden kann in der Theorie leicht berechnet werden, doch ist es nicht sehr wahrscheinlich, dass sich der Proband in der realen Umgebung auch wirklich

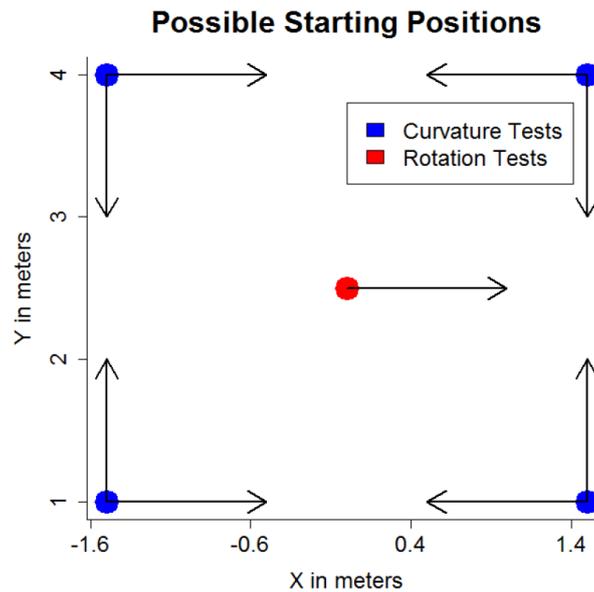


Abbildung 5.4: Alle Startpositionen des Curvature Gains und Rotation Gains mit den dazugehörigen Ausrichtungen [NF15].

auf diesem bewegt. Für den Curvature Gain werden viele kleine Manipulationen berechnet, die direkt von den Bewegungen des Probanden abhängig sind, sodass der ideale Pfad sich mit jedem Schritt des Probanden ändert. Geht man jedoch davon aus, dass der Nutzer zu Beginn des Teiltests in Richtung des virtuellen Ziels ausgerichtet wird, so ist es unwahrscheinlich, dass er sich signifikant in die entgegengesetzte Richtung bewegt. Der Teiltest startet deshalb in einer der Ecken des Raumes, mit Blickrichtung in eine der benachbarten Ecken, abhängig von dem gerade aktiven Gain. Auf die Weise ist sichergestellt, dass vor dem Probanden keine Wand liegt und dieser in Richtung der Raummitte manipuliert werden kann [NF15]. In Abbildung 5.4 sind die Startpositionen des Curvature Gains blau eingezeichnet und die jeweiligen Ausrichtungen mit Pfeilen markiert.

Theoretisch kann der Rotation Gain an jeder beliebigen Position des Raumes durchgeführt werden. Durch die zweidimensionale Wellenfeldsynthese ergibt sich jedoch eine Limitation, welche eine Startposition in der Mitte des Raumes voraussetzt. Diese besteht darin, dass die wahrgenommene Höhe einer virtuellen Quelle nicht positionserhaltend ist, während sich der Proband oder die virtuelle Quelle durch den Raum bewegt. Stattdessen ist diese abhängig von der Distanz des Probanden zu den beteiligten Lautsprechern. Die virtuelle Quelle liegt beim Rotation Gain immer hinter den Lautsprechern. Die Höhe des wahrgenommenen Klangs

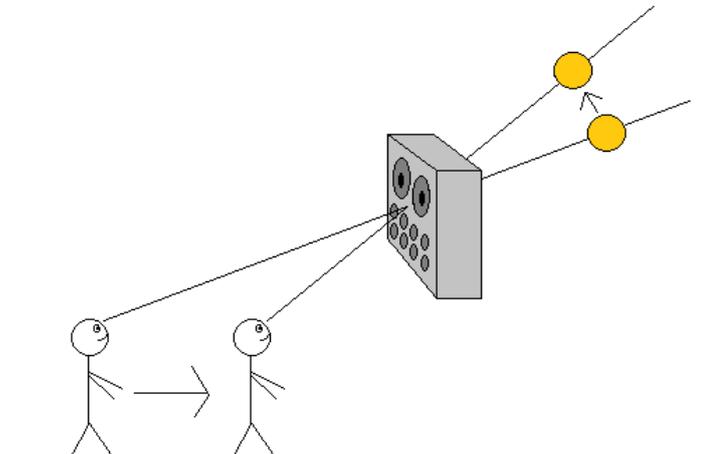


Abbildung 5.5: Die wahrgenommene Höhe einer virtuellen Klangquelle ist nicht positionserhaltend. Bewegt sich der Nutzer auf die Lautsprecher zu, so scheint der Klang von weiter oben zu kommen.

befindet sich dabei nicht, wie man vermuten könnte, auf der Höhe der Lautsprecher, sondern auf einer Strecke, welche durch die Kopfhöhe des Probanden und die Höhe des beteiligten Lautsprechers definiert ist. Daraus resultierend scheint die virtuelle Quelle höher zu liegen, wenn der Proband nah an den Lautsprechern steht und umgekehrt. Dieser Effekt wird in [Abbildung 5.5](#) gezeigt. Die Startposition wird in [Abbildung 5.4](#) in Rot markiert, da hier alle beteiligten Lautsprecher gleich weit von dem Probanden entfernt sind und somit die wahrgenommene Höhe der Quellen gleich bleibt.

Während des Tests soll der Proband sich lediglich über visuelle und akustische Reize der virtuellen Umgebung, das vestibuläre System und die Propriozeption orientieren können. Der Test soll dabei an einem Stück stattfinden, um den Nutzer nicht aus der virtuellen Realität herauszureißen, weshalb dieser automatisch abläuft. So wird zu Beginn jedes Teiltests ein zufälliger Gain aus der Menge aller zu testender Gains ausgewählt, woraufhin der Proband in zwei Schritten zunächst zu einer möglichen Startposition geleitet und dann entsprechend des Tests ausgerichtet wird. Beim Curvature Gain wird dabei als Startposition die nächstliegende Ecke gewählt. Im Anschluss folgt die eigentliche Manipulation und der Nutzer muss angeben, in welche Richtung er manipuliert wurde. Ein Teiltest besteht somit immer aus drei Zielen [[NF15](#)].

Im Gegensatz zum ursprünglichen Testverfahren wird den Probanden zu Beginn des Tests kurz Zeit gegeben, sich an die Bewegung in der virtuellen Umgebung und das Tragen der Oculus Rift zu gewöhnen. Da in den ersten Minuten besonders Bewegungen mit der Oculus Rift schwierig fallen, könnte andernfalls der Test dadurch verfälscht werden, dass die Probanden sich nur darauf konzentrieren nicht das Gleichgewicht zu verlieren. Daher werden diese zunächst aufgefordert sich im Kreis zu drehen und sich in der virtuellen Umgebung umzuschauen. Danach sollen die Probanden in der virtuellen Umgebung umherlaufen, bis sie sich sicher genug fühlen, um mit dem Test zu beginnen. Für gewöhnlich nimmt dies etwa eine Zeit von zwei Minuten in Anspruch.

5.1.5 Simulatorkrankheit

Unter Simulatorkrankheit versteht man eine Reihe von Krankheitssymptomen, wie Übelkeit und Orientierungslosigkeit, die als Folge einer Irritation der menschlichen Wahrnehmung während einer Simulation, zum Beispiel in einem Flugsimulator, auftreten können. Die Symptome werden immer durch widersprüchliche Signale in der menschlichen Wahrnehmung hervorgerufen [Jr.00, S. 50], wie am Beispiel der Flugkrankheit demonstriert werden kann. Befindet man sich im Inneren eines Flugzeug, ohne Sicht aus einem Fenster zu haben, so ist das Auge auch während des Starts nicht in der Lage, die Bewegungen des Flugzeugs wahrzunehmen. Das vestibuläre System meldet allerdings eine starke Beschleunigung, sodass die beiden Sinne in direktem Widerspruch zueinander stehen und es zu Übelkeit und anderen Krankheitssymptomen kommen kann.

Bereits 1993 haben Kennedy et al. einen Fragebogen zur Erkennung von Simulatorkrankheiten (SSQ) entwickelt, der auf einem Fragebogen zur Feststellung von Bewegungskrankheiten (MSQ) beruht. Bei obigem Beispiel der Flugkrankheit handelt es sich wie bei der Seekrankheit eigentlich um eine Form von Bewegungskrankheit, doch werden Simulatorkrankheiten und Bewegungskrankheiten auf dieselbe Weise ausgelöst [KLBL93, S. 204f.].

In den Anfängen der virtuellen Umgebungen und der Interaktion mittels Redirected Walking waren besonders latenzbehaftete Trackingsysteme ein Auslöser der Simulatorkrankheit, da die Bewegungen des Nutzers verzögert auf dem HMD angezeigt wurden. Dies kann durch den Fortschritt der Technik heutzutage fast gänzlich ausgeschlossen werden. Redirected Walking selbst kann jedoch zu einem Auslöser werden, da es auf Diskrepanzen in der menschlichen Wahrnehmung beruht. Hierbei werden visuelle und akustische Reize konsistent gehalten, die Eigenwahrnehmung und das vestibuläre System können jedoch nicht manipuliert werden, sodass sich diese widersprechen können [RKW01, S. 1f.]. Der SSQ ist deshalb ein fester Bestand-

teil der meisten Redirected Walking Tests, da auf diese Weise auch unbewusst wahrgenommene Manipulationen festgestellt werden können.

Besonders in den ersten Entwicklerversionen war die Simulatorkrankheit auch ein großes Problem der Oculus Rift. Hervorgerufen wurde diese zu großen Teilen durch den langsamen Bildschirm und die Bewegungserkennung über die internen Sensoren. Da in dieser Arbeit nicht das mitgelieferte Trackingsystem der Oculus Rift DK2 genutzt werden kann, sondern auf ein externes Trackingsystem zurückgegriffen wird, muss damit gerechnet werden, dass an dieser Stelle Verzögerungen entstehen können und die Oculus Rift somit als einer der Hauptgründe der Simulatorkrankheit wahrgenommen wird. Des Weiteren kann die geringe Pixeldichte andere Symptome, wie Kopf- und Augenschmerzen, auslösen.

Tabelle 5.1 zeigt alle vom SSQ erfassten Symptome, sowie deren Einfluss auf die drei verallgemeinerten Symptomgruppen (Übelkeit, Augenmotorik und Orientierungsverlust). Der Nutzer muss den Fragebogen jeweils einmal direkt vor und einmal direkt nach der Simulation ausfüllen, um die Auswirkungen der Simulation feststellen zu können. Dabei wird die Stärke jedes Symptoms mit Hilfe einer vierstufigen Likert-Skala erfasst: nicht, wenig, mäßig und stark vorhanden. Aus Gründen der Simplizität entsprechen die verschiedenen Stufen bei der Berechnung einer Punktzahl von null bis drei Punkten, auch wenn eine solche Zuordnung formal nicht gänzlich korrekt ist. Für die Berechnung einer Symptomgruppe wird nun die Stärke jedes Symptoms, welches die jeweilige Gruppe beeinflusst, addiert. Für das Gesamtergebnis müssen, entsprechend den Formeln in Tabelle 5.2, wiederum alle Symptomgruppen addiert und mit einem Faktor multipliziert werden. Möchte man lediglich eine einzelne Symptomgruppe verwenden, so muss für diese ebenfalls die entsprechende Formel in Tabelle 5.2 genutzt werden, das Zwischenergebnis der Addition also mit einem Faktor multipliziert werden [KLBL93].

5.2 Technische Realisierung

Im Folgenden soll ein Einblick in die technische Realisierung des Tests gegeben werden. Hierzu wird zunächst erläutert, wie die akustische Komponente für den Test adaptiert wurde, bevor die Verteilung der einzelnen Komponenten im Gesamtsystem näher betrachtet wird.

5.2.1 Adaption der akustischen Komponente

Eine der zentralen Ideen beim Entwurf der visuellen Komponente war es, möglichst keine Änderungen in der akustischen Komponente vorzunehmen, da diese weiterhin ohne die visuelle Komponente lauffähig bleiben soll. Die visuelle Komponente soll eher als ein zusätzliches Modul verstanden werden, welches man nach Belieben an- und ausschalten kann, sodass es in der

Symptome	Übelkeit	Augenmotorik	Orientierungsverlust
Generelles Unwohlsein	1	1	
Ermüdung		1	
Kopfschmerzen		1	
Augenbelastung		1	
Fokussierungsschwierigkeiten		1	1
Erhöhter Speichelfluss	1		
Schwitzen	1		
Übelkeit	1		1
Konzentrationsschwierigkeiten	1	1	
Viele Dinge im Kopf			1
Verschwommene Sicht		1	1
Schwindel (offene Augen)			1
Schwindel (geschlossene Augen)			1
Höhenangst			1
Unwohlsein im Bauch	1		
Aufstoßen	1		
Summe	[1]	[2]	[3]

Tabelle 5.1: Deutsche Übersetzung der Symptome des SSQs mit Gewichtung.

$$\begin{aligned}
 \text{Übelkeit} &= [1] * 9.54 \\
 \text{Augenmotorik} &= [2] * 7.54 \\
 \text{Orientierungsverlust} &= [3] * 13.92 \\
 \text{Summe} &= ([1] + [2] + [3]) * 3.74
 \end{aligned}$$

Tabelle 5.2: Formeln für die Berechnung des Gesamtergebnisses und der Symptomgruppen des SSQs.

akustischen Komponente keinerlei Abhängigkeiten zu dieser geben darf. Des Weiteren muss die visuelle Komponente auf einem anderen Rechner laufen, als die akustische Komponente.

Eine einfache Herangehensweise ist es, wenn die akustischen Komponente zu Beginn jedes Teiltests die Art des Gains, also ob es sich um einen Rotation Gain oder einen Curvature Gain handelt, und die Stärke des Gains zu der visuellen Komponente schickt. Bei dieser erfolgt dann die gleiche Berechnung wie in der akustischen Komponente, sodass beide die gleiche Manipulation anwenden. Diese Methode wurde jedoch aus mehreren Gründen nicht verwendet. Zunächst einmal wird das gesamte Redirected Walking bereits in der akustischen Komponente berechnet. Eine Berechnung in beiden Komponenten ist somit redundant, besonders weil die Rechenleistung für das Berechnen und Anzeigen der virtuellen Umgebung benötigt wird. Außerdem würde diese Variante Änderungen an der akustischen Komponente erfordern. Zu guter Letzt kann es zu Divergenzen zwischen der visuellen und der akustischen Darstellung kommen, wenn der Algorithmus auf zwei verschiedenen Rechnern ausgeführt wird.

Die akustische Komponente sendet jedoch regelmäßig Aktualisierungen an den WFS-Server, welche unter anderem die neue Position und Ausrichtung aller virtuellen Quellen beinhalten, die durch das Redirected Walking manipuliert worden sind. Die Idee ist es nun, aus diesen Nachrichten das visuelle Redirected Walking abzuleiten, sodass die akustische Komponente nicht verändert werden muss. Die akustische Komponente wird somit zum Taktgeber, während es sich bei der visuellen Komponente um eine reine Visualisierung handelt, in der keine Berechnung stattfindet. Damit diese Variante funktioniert, werden zwei Linearquellen benötigt, die einen akustischen Raum definieren. Bei Nogalski treten diese in Form von Umgebungsquellen auf, wie in Abbildung 3.3 verdeutlicht wird. Da der akustische Raum während der beiden Gains um den Nutzer herum rotiert wird, können an diesem zwei Arten von Manipulationen auftreten: Rotationen und Translationen. Diese müssen lediglich eins zu eins auf die visuelle Umgebung abgebildet werden.

Zur Berechnung der Rotation des akustischen Raums wird eine beliebige Linearquelle zur Hilfe genommen, die vom Redirected Walking manipuliert wurde. Beim Start des Tests wird die initiale Ausrichtung dieser Quelle gespeichert. Findet nun eine Rotation um 90° statt, so verändert sich auch die Ausrichtung der Linearquelle um 90° in Relation zur Startausrichtung. Die virtuelle Umgebung muss lediglich um die Differenz der derzeitigen Ausrichtung und der Startausrichtung gedreht werden. Dies ist in Abbildung 5.6 gezeigt.

Für die Berechnung der Translation werden zwei Linearquellen benötigt, in deren Mitte sich der Mittelpunkt des akustischen Raums befindet. Die Position der akustischen Raummitte wird zu Beginn des Tests gespeichert. Findet nun eine Translation des akustischen Raums statt, so verändert sich folglich auch die Position seines Mittelpunkts. Dieser kann jederzeit über die

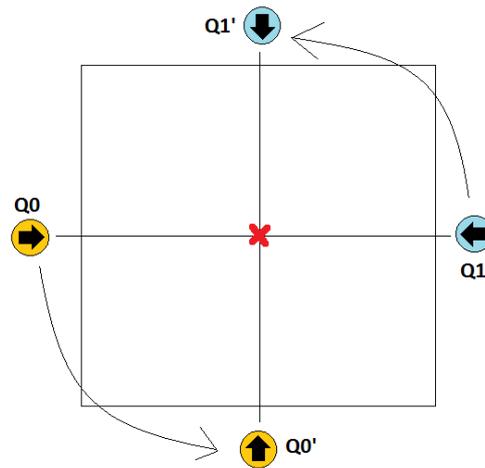


Abbildung 5.6: Rotation der akustischen Umgebung um 90° . Die Ausrichtung der Quellen ist mit Pfeilen in diesen markiert. Es findet keine Verschiebung des Raummittelpunktes statt.

beiden Linearquellen berechnet werden. Durch die Nutzung von zwei Quellen kann dabei eine Verschiebung des Raumes ausgeschlossen werden, wenn eine Rotation durchgeführt wird, wie in Abbildung 5.6 gezeigt.

Ein großer Vorteil dieser Variante ist, dass die Manipulation der Welt mit jeder Aktualisierung der virtuellen Quellen neu berechnet wird. OSC-Nachrichten beruhen auf dem UDP-Protokoll, sodass nicht ausgeschlossen werden kann, dass von Zeit zu Zeit Nachrichten verloren gehen. In der Praxis hat sich gezeigt, dass dies sogar sehr viel häufiger geschieht als man erwarten würde. So hätte es bei der ersten Variante passieren können, dass ein Paket, welches die Art und die Stärke des zu testenden Gains enthält, nicht ankommt. Daraus resultierend kann in der visuellen Komponente keine Manipulation stattfinden, die visuelle und die akustische Welt divergieren und beide müssten aufwendig synchronisiert werden. Die zweite Architektur ist im Gegensatz dazu resistent gegen den Verlust einzelner Pakete.

5.2.2 Systemaufbau

Eine der Hauptvoraussetzungen für einen reibungslosen Ablauf des Tests ist, dass die Probanden sich frei im Raum bewegen können. Dabei sollten sie in ihrem Bewegungsraum nicht von Kabeln oder anderen Hindernissen beeinträchtigt werden. Im Folgenden soll daher zunächst erläutert werden, wie die kabelgebundene Kommunikation mit dem WFS-Server auf eine

drahtlose Kommunikation umgestellt wurde, bevor auf die Verteilung aller Komponenten und den Aufbau des Gesamtsystems eingegangen wird.

OSC-Redirecter

Wie in Kapitel 5.2.1 beschrieben, benötigt die visuelle Komponente für die Manipulation der virtuellen Umgebung die Position und die Orientierung der virtuellen Quellen. Diese werden von dem WFS-Server zur Verfügung gestellt, welcher jedoch keinerlei Möglichkeiten der kabellosen Kommunikation besitzt. Das Nachrüsten eines Drahtlosadapters kam nicht in Frage.

Aus diesem Grund wurde ein Programm (OSC-Redirecter) geschrieben, welches die Kommunikation mit dem WFS-Server über einen anderen Rechner umleitet. Diese müssen allerdings über das lokale Netzwerk miteinander verbunden sein. Der OSC-Redirecter leitet OSC-Nachrichten von beliebigen Clients an den WFS-Server weiter und umgekehrt. Dabei verhält er sich wie eine exakte Kopie von diesem. Das heißt, dass Clients lediglich die IP des WFS-Server gegen die des Rechners, auf dem der OSC-Redirecter läuft austauschen müssen, die Kommunikation über die OSC-Nachrichten findet dann wie gehabt statt. Zusätzlich bietet der OSC-Redirecter die Möglichkeit den „Visual-Stream“ über die grafische Oberfläche an einen Client zu senden. Abbildung 5.7 zeigt den OSC-Redirecter. Dieser kann auf dem MAC ausgeführt werden, um Clients die Verbindung zum WFS-Server über WLAN zu ermöglichen.

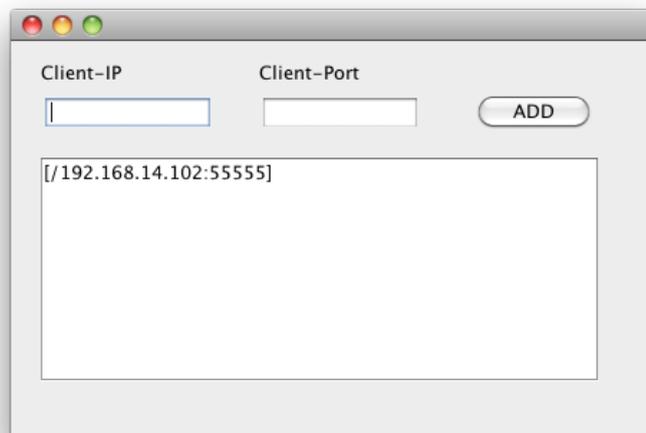


Abbildung 5.7: Der OSC-Redirecter ermöglicht eine Kommunikation mit dem WFS-Server über einen anderen Rechner. Zur Zeit ist ein Client verbunden.

Verteilung der Komponenten

Das Gesamtsystem besteht im Wesentlichen aus fünf Komponenten. Bei diesen handelt es sich um den WFS-Server, den MAC als Kontrollrechner, das Trackingsystem, die visuelle Komponente mit der Oculus Rift und die akustische Komponente als „Kontrolleinheit“. Wie bereits in Kapitel 5.2.2 erwähnt, soll der Proband sich möglichst frei im Raum bewegen können, ohne durch etwaige Kabel behindert zu werden. Abbildung 5.9 zeigt, wie die einzelnen Komponenten miteinander kommunizieren.

Zur Zeit besteht noch keine Möglichkeit die Oculus Rift DK2 kabellos zu betreiben. Um diese trotzdem mobil zu machen, wird sie an ein Lenovo Thinkpad W541 angeschlossen, welches mit einem Intel(R) Core(TM) i7-4910MQ Prozessor mit einer Maximalfrequenz von 3.9GHz und einer NVIDIA Quadro K2100M mit 2GB Grafikspeicher ausreichend Leistung für das Anzeigen der virtuellen Umgebung auf der Oculus Rift DK2 zur Verfügung stellt. Das Thinkpad ist über WLAN mit dem Trackingsystem verbunden, sodass die visuelle Komponente jederzeit auf die aktuelle Position und Orientierung des Nutzers zugreifen kann. Des Weiteren benötigt diese für den Test, wie in Kapitel 5.2.1 näher beschrieben, die Positionsdaten und die Orientierung der virtuellen Quellen. Diese werden in Form von Streams vom WFS-Server bereitgestellt. Das Thinkpad kommuniziert über WLAN mit dem MAC, auf welchem der OSC-Redirecter läuft. Auf diese Weise wird eine kabellose Möglichkeit geboten, OSC-Nachrichten mit dem Server auszutauschen. Das Thinkpad wird während des Tests von den Probanden in einem Rucksack auf dem Rücken getragen. Abbildung 5.8 zeigt eine komplett ausgerüstete Probandin.

Neben dem OSC-Redirecter läuft in Form von Ardour¹⁸ eine digitale Audio-Workstation auf dem MAC. Über diese werden die Klänge für den Test in das WFS-System eingespeist.

Für die akustische Komponente wird ein zweiter Rechner benötigt, da hier die Ergebnisse des Nutzers für jeden Teilttest eingegeben werden. Sie kommuniziert wie die visuelle Komponente drahtlos mit dem Trackingsystem und ist kabelgebunden mit dem MAC und dem WFS-Server verbunden. Die Kabel hierfür sind jedoch außerhalb des Testbereichs verlegt. Die visuelle Komponente fungiert als eine Art Steuereinheit und schickt in rascher Folge die durch das Redirected Walking manipulierten Positionen und Ausrichtungen der virtuellen Quellen an den WFS-Server. Außerdem versendet sie OSC-Nachrichten mit Steuerbefehlen für Ardour an den MAC, um zum Beispiel Spuren mit den akustischen Zielen laut und leise zu schalten.

¹⁸<http://ardour.org/> - Abruf: 25.08.2015



Abbildung 5.8: Eine komplett ausgerüstete Probandin mit einem passiven Target für das Trackingsystem (1) und der Oculus Rift DK2 (2), welche über HDMI und USB (3) an eine mobile Workstation angeschlossen ist (4).

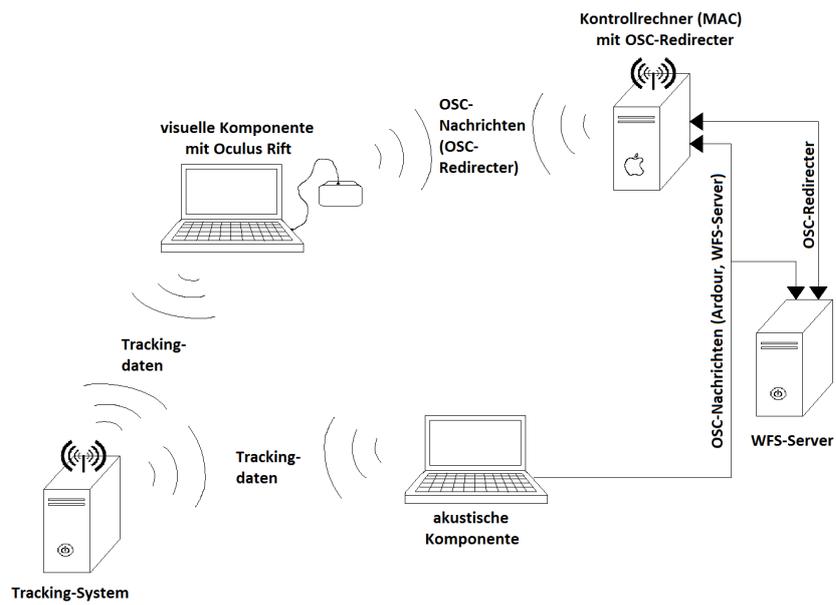


Abbildung 5.9: Verteilung der Komponenten für den Redirected Walking Test.

5.3 Probanden

Insgesamt haben 20 Personen an dem Experiment teilgenommen, konkret acht Probandinnen und zwölf Probanden. Die Gruppe bestand aus 15 Studenten, drei Schülern und zwei Berufstätigen. Sechs der Studenten kamen aus dem Department Informatik der HAW. Die gesamte Dauer des Experiments betrug inklusive der Fragebögen zur Simulatorkrankheit und der Eingewöhnung in die virtuelle Umgebung etwa eine Stunde. Davon verbrachten die Probanden zwischen 20 und 35 Minuten ununterbrochen in der virtuellen Umgebung. Es durften zu jedem beliebigen Zeitpunkt Pausen eingelegt werden.

Die Probanden wurden im Vorfeld des Tests über die Technik des Redirected Walkings aufgeklärt, sodass sich jeder bewusst war, dass die Bewegungen in der virtuellen Welt durch dieses manipuliert werden können. Sie wussten allerdings nicht, in welcher Form und zu welcher Zeit die Manipulationen auftreten würden. Dies entspricht am ehesten dem normalen Anwendungsfall, in dem der Nutzer sich bewusst ist, dass Manipulationen stattfinden können, wann und wie diese auftreten jedoch abhängig von der jeweiligen Anwendung ist.

Für die Versuche wurde der sogenannte „Two-Alternative Forced Choice Test“ (2AFC) gewählt, eine Methode der Psychophysik zur Feststellung von Erkennungsschwellwerten bei der Stimulation eines Probanden durch Reize. Die Kernidee ist es, dass dem Probanden nach jeder Stimulation zwei Antwortmöglichkeiten zur Verfügung stehen, von denen er zwingend eine auswählen muss. In dieser Arbeit kommen als Antwort „rechts“ oder „links“ in Frage, je nachdem, in welche Richtung der Nutzer eine Manipulation wahrgenommen hat. Ist dieser unsicher, muss er raten, sodass sich bei einem Nullgain etwa die Hälfte der Probanden für links und die andere Hälfte für rechts entscheiden sollte. Der Nullgain stellt dabei den Standardreiz dar. Der Gain, welchen die Hälfte der Probanden erkennt, wird als Punkt der Subjektiven Gleichheit (PSE) angenommen, also der Punkt an dem der Standardreiz und der gerade aktive Gain als gleich empfunden werden. Der Erkennungsschwellwert tritt dort auf, wo 75% der Nutzer den Gain erkennen. Somit ergibt sich ein Intervall von von 50% bis 75%, in dem die Probanden die Manipulationen durch das Redirected Walking nicht wahrnehmen [SBJ⁺10].

Die ersten acht Probanden haben den Test in der Form ausgeführt, wie er in den vorherigen Kapiteln beschrieben. Dabei wurden jeweils 72 Manipulationen getestet. Aufgrund einer hohen Anzahl von Abbrüchen und starken Symptomen der Simulatorkrankheit (siehe Kapitel 6.3), musste der Test jedoch leicht modifiziert werden. Daher wurden die stärksten Manipulationen für die restlichen zwölf Probanden nicht durchgeführt. Dabei wurde jedoch darauf geachtet, dass der höchste Gains weiterhin von den meisten Probanden erkannt wird. Für den Curvature

Gain ergibt sich somit ein Bereich von $-0.6 \leq g_C \leq 0.6$. Für den Rotation Gain wurde ein Bereich von $-0.4 \leq g_R \leq 0.4$ gewählt.

6 Ergebnisse

Im Folgenden sollen die Ergebnisse des Tests präsentiert und mit den Ergebnissen anderer Arbeiten verglichen werden. Des Weiteren soll analysiert werden, inwiefern die Probanden unter Symptomen der Simulatorkrankheit zu leiden hatten.

Betrachtet man alle durchgeführten Tests, so wurden insgesamt 954 Teilversuche durchgeführt, von denen es sich bei 574 um Manipulationen durch Curvature Gains und bei 380 um Manipulationen durch Rotation Gains handelte. Nicht jeder Gain wurde dabei gleich häufig durchgeführt, da der Test, wie in Kapitel 5.3 beschrieben, nach acht Probanden leicht modifiziert werden musste. Die Anzahl und die Verteilung der durchgeführten Gains ist in Tabelle 6.1 dargestellt.

In der Theorie besteht zwischen einem Curvature Gain mit einer negativen und mit einer positiven Stärke kein Unterschied, wenn der Absolutwert des Gains gleich bleibt. Der Grund hierfür ist, dass Manipulationen nach rechts und links, anders als bei Rotation Gains, die gleichen Reize auf die Wahrnehmung des Probanden ausüben. Die Ergebnisse von Steinicke et al. bestätigen dieses [SBJ⁺10, S. 9]. Somit besteht die Möglichkeit, die positiven und die negativen Gains zusammenzufassen und auf diese Weise durch mehr Tests die Genauigkeit der Grenzwerte zu erhöhen [Nog15]. Teilt man die Statistik aller Curvature Gains aus Abbildung 6.1 in Statistiken für positive und negative Gains auf, wie in Abbildung 6.2 dargestellt, und berechnet für beide eine Ausgleichsgerade der Form $f(x) = ax + b$, so ergeben sich Koeffizienten von $a = 0,2422$ und $b = 0,7056$ für die negativen Gains und $a = 0,26744$ und $b = 0,7594$ für die positiven Gains. Man kann erkennen, dass beide Koeffizienten bei den positiven Gains geringfügig größer sind als bei den negativen Gains. Folglich ist auch die Erkennungsrate der positiven Gains unwesentlich höher.

Um herauszufinden, ob die beiden Statistiken trotzdem zusammengefasst werden können, muss zunächst die Signifikanz ihrer Übereinstimmung überprüft werden. Hierfür wird die Gesamtstatistik aus Abbildung 6.1 wieder in zwei kleinere Statistiken aufgeteilt, eine für die negativen und eine für die positiven Gains. Die negativen Gains werden auf ihr positives Gegenstück abgebildet, sodass beide Statistiken einen Wertebereich von $0 < g_C \leq 1$ erfassen. Für die Überprüfung soll ein Signifikanzniveau von 5% angenommen werden. Da es sich bei den

Typ	Stärke	Anzahl	Typ	Stärke	Anzahl
<i>g_C</i>	-1.00	7	<i>g_R</i>	-0.60	7
<i>g_C</i>	-0.95	5	<i>g_R</i>	-0.55	6
<i>g_C</i>	-0.90	6	<i>g_R</i>	-0.50	6
<i>g_C</i>	-0.85	7	<i>g_R</i>	-0.45	7
<i>g_C</i>	-0.80	6	<i>g_R</i>	-0.40	16
<i>g_C</i>	-0.75	7	<i>g_R</i>	-0.35	16
<i>g_C</i>	-0.70	6	<i>g_R</i>	-0.30	14
<i>g_C</i>	-0.65	6	<i>g_R</i>	-0.25	17
<i>g_C</i>	-0.60	17	<i>g_R</i>	-0.20	16
<i>g_C</i>	-0.55	15	<i>g_R</i>	-0.15	16
<i>g_C</i>	-0.50	16	<i>g_R</i>	-0.10	18
<i>g_C</i>	-0.45	19	<i>g_R</i>	-0.05	16
<i>g_C</i>	-0.40	19	<i>g_R</i>	0.00	62
<i>g_C</i>	-0.35	17	<i>g_R</i>	0.05	18
<i>g_C</i>	-0.30	17	<i>g_R</i>	0.10	16
<i>g_C</i>	-0.25	16	<i>g_R</i>	0.15	18
<i>g_C</i>	-0.20	19	<i>g_R</i>	0.20	16
<i>g_C</i>	-0.15	16	<i>g_R</i>	0.25	19
<i>g_C</i>	-0.10	16	<i>g_R</i>	0.30	17
<i>g_C</i>	-0.05	16	<i>g_R</i>	0.35	17
<i>g_C</i>	0.00	68	<i>g_R</i>	0.40	15
<i>g_C</i>	0.05	17	<i>g_R</i>	0.45	8
<i>g_C</i>	0.10	17	<i>g_R</i>	0.50	6
<i>g_C</i>	0.15	17	<i>g_R</i>	0.55	7
<i>g_C</i>	0.20	17	<i>g_R</i>	0.60	6
<i>g_C</i>	0.25	15			
<i>g_C</i>	0.30	18			
<i>g_C</i>	0.35	19			
<i>g_C</i>	0.40	16			
<i>g_C</i>	0.45	15			
<i>g_C</i>	0.50	17			
<i>g_C</i>	0.55	17			
<i>g_C</i>	0.60	15			
<i>g_C</i>	0.65	6			
<i>g_C</i>	0.70	7			
<i>g_C</i>	0.75	6			
<i>g_C</i>	0.80	7			
<i>g_C</i>	0.85	7			
<i>g_C</i>	0.90	8			
<i>g_C</i>	0.95	7			
<i>g_C</i>	1.00	5			

Tabelle 6.1: Anzahl der Tests sortiert nach Typ und Stärke des Gains.

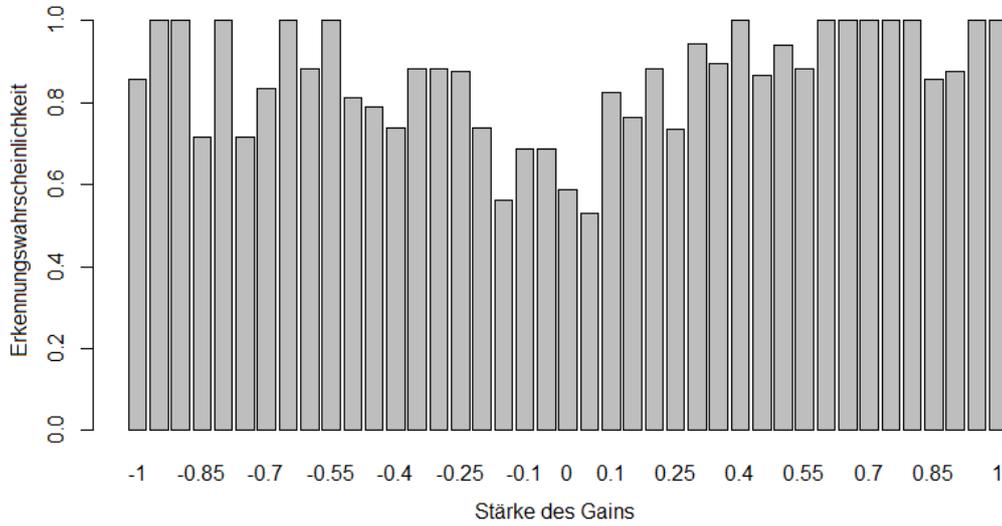


Abbildung 6.1: Anteil der richtigen Antworten für alle getesteten Stärken des Curvature Gains.

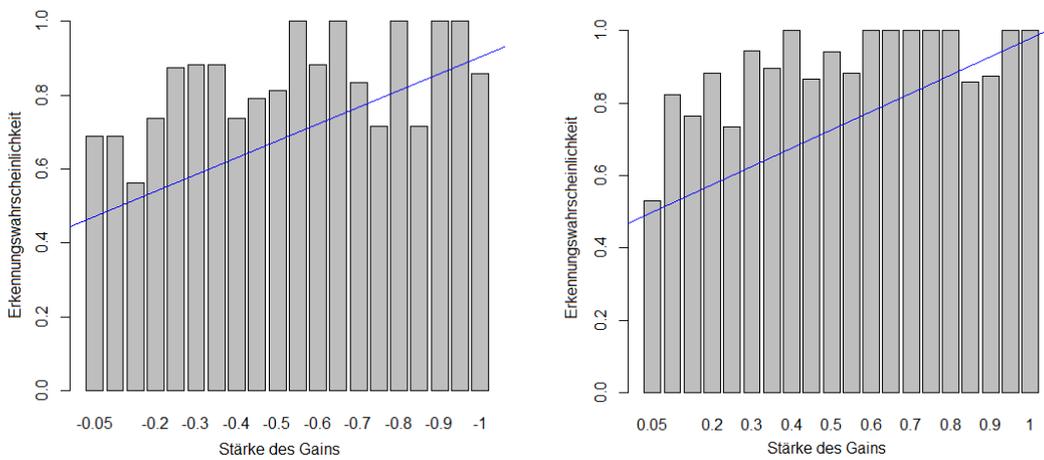


Abbildung 6.2: Anteil der richtigen Antworten für die negativen Stärken (links) und die positiven Stärken (rechts) des Curvature Gains. In Blau ist jeweils eine Ausgleichsgerade eingezeichnet.

beiden um unabhängige Statistiken handelt, kommen zwei Methoden zur Überprüfung in Frage: Der T-Test und der Wilcoxon-Mann-Whitney-Test. Der T-Test geht von einer Normalverteilung der Daten aus. Um zu überprüfen, ob eine solche vorliegt, kann der Kolmogoroff-Smirnov-Test verwendet werden. Mit Hilfe von R¹⁹, einer Programmiersprache für statistische Berechnungen, erhält man für den Test einen P-Wert von 0,000956. Dieser liegt unter dem Signifikanzniveau von 0,05, sodass keine Normalverteilung vorliegt. Aus diesem Grund wird auf den Wilcoxon-Mann-Whitney-Test zurückgegriffen. Als Nullhypothese wird $H_0 : \mu_A = \mu_B$ angenommen, was bedeutet, dass die Mittelwerte der Statistiken sich nicht signifikant unterscheiden. Als Gegenhypothese gilt folglich $H_1 : \mu_A \neq \mu_B$. Mit R erhält man für den Test einen P-Wert von 0,07107, welcher knapp über dem Signifikanzniveau von 0,05 liegt. Die Nullhypothese kann somit nicht verworfen werden und das Zusammenfassen der beiden Statistiken ist möglich. Abbildung 6.4 zeigt die resultierende Statistik.

6.1 Testergebnisse

Die Abbildungen 6.3 und 6.4 zeigen den Anteil der Probanden, die einen Gain korrekt erkannt haben. Erstere zeigt die Ergebnisse des Rotation Gains, während Letztere die Ergebnisse des Curvature Gains darstellt. Für den Nullgain wurde dabei beliebig „rechts“ als richtige Antwort ausgewählt. Die Ergebnisse wurden nach der Stärke der getesteten Gains geordnet. In rot ist eine Glättungskurve eingezeichnet, die im Folgenden für die Feststellung der Erkennungsschwellwerte genutzt werden soll. Bei dieser handelt es sich um einen kubischen Spline.

Für den Rotation Gain wurde der Erkennungsschwellwert von 75% im negativen Bereich bei einem Gain von -0,463 erreicht, während er im positiven Bereich bei 0,265 liegt. Folglich hat der Nutzer Probleme damit, zwischen einer virtuellen Rotation um 180° und einer realen Rotation von 123° - 244° zu unterscheiden. Dies entspricht einer Rotation um 31,7% entgegen der Drehrichtung und 35,6% mit der Drehrichtung.

$$R_{real} = \frac{R_{virtuell}}{1 - g_R} \quad (6.1)$$

$$R_{real} = \frac{180^\circ}{1 - (-0,463)} \approx 123^\circ \quad (6.2)$$

$$R_{real} = \frac{180^\circ}{1 - 0,265} \approx 244^\circ \quad (6.3)$$

¹⁹<https://www.r-project.org/> - Abruf: 27.08.2015

Der Erkennungsschwellwert von 62,5% wurde im negativen Bereich bei -0,366 und im positiven Bereich bei 0,15 erreicht. Die Rotation des Nutzers kann somit um 26,8% auf 132° herunter skaliert werden. Für die andere Richtung ergibt sich eine mögliche Steigerung um 17,7% auf 212°.

$$R_{real} = \frac{R_{virtuell}}{1 - g_R} \quad (6.4)$$

$$R_{real} = \frac{180^\circ}{1 - (-0,336)} \approx 132^\circ \quad (6.5)$$

$$R_{real} = \frac{180^\circ}{1 - 0,15} \approx 212^\circ \quad (6.6)$$

Für den Curvature Gain wurde der Erkennungsschwellwert von 75% bei 0,166 erreicht. Für einen Erkennungsschwellwert von 62,5% liegt er bei 0,031. Dies entspricht einem Bogen mit einem Radius von 6 Metern und 32,3 Metern. Man kann erkennen, dass die Anteile der richtigen Antworten von Beginn an sehr nah an dem Erkennungsschwellwert von 75% liegen.

$$r = \frac{1}{g_C} \quad (6.7)$$

$$r = \frac{1}{0,166} \approx 6,0m \quad (6.8)$$

$$r = \frac{1}{0,031} \approx 32,3m \quad (6.9)$$

6.2 Vergleich mit akustischem Redirected Walking

Im Folgenden sollen die Ergebnisse aus Kapitel 6.1 mit den Ergebnissen von Nogalski verglichen werden. Hierfür werden die Resultate aus Gruppe vier von Nogalski verwendet, da diese als Vorbild für diesen Test diente [Nog15, S. 44]. Tabelle 6.2 zeigt eine Gegenüberstellung der Ergebnisse für den Rotation Gain und Tabelle 6.3 eine Gegenüberstellung für den Curvature Gain.

Zunächst muss geprüft werden, ob sich die Statistiken des Rotation Gains und des Curvature Gains signifikant von den Statistiken Nogalskis unterscheiden. Infolgedessen würden auch die Grenzwerte in den beiden Tabellen signifikant voneinander abweichen. Um die Signifikanz zu prüfen, wurde abermals der Wilcoxon-Mann-Whitney-Test mit der Nullhypothese $H_0 : \mu_A = \mu_B$ und einem Signifikanzniveau von 5% verwendet. Mit Hilfe von R erhält man für den Vergleich der Rotation Gains einen P-Wert von 0,7928. Dieser liegt über dem Signifikanzniveau von 0,05, sodass sich die Statistik des Rotation Gains in diesem Test nicht signifikant von der in

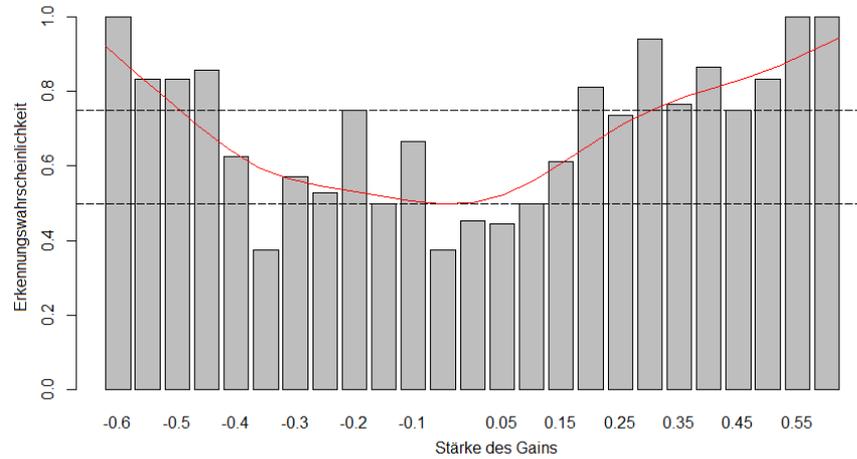


Abbildung 6.3: Erkennungsrate verschiedener Stärken des Rotation Gains. Die Stärke der Gains ist auf der X-Achse und der Anteil der richtigen Antworten auf der Y-Achse abgebildet.

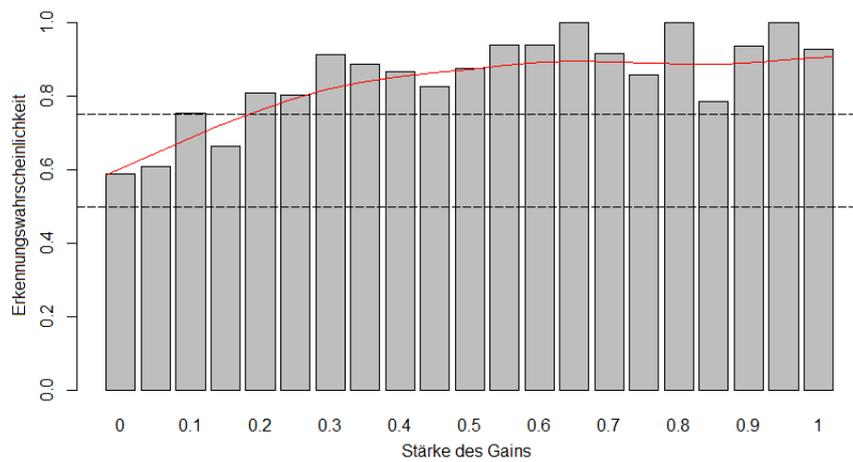


Abbildung 6.4: Erkennungsrate verschiedener Stärken des Curvature Gains. Die Stärke der Gains ist auf der X-Achse und der Anteil der richtigen Antworten auf der Y-Achse abgebildet.

Typ - Schwellwert	Mögliche Manipulation	Mögliche Manipulation (Nogalski)
Reduktion - 75%	31,3%	-
Erhöhung - 75%	35,6%	17,7%
Reduktion - 62.5%	26,8%	37,5%
Erhöhung - 62.5%	17,7%	5,0%

Tabelle 6.2: Gegenüberstellung der Prozentwerte, um die ein Proband während eines Rotation Gains manipuliert werden kann [Nog15, S. 58]. Reduktion ist eine Rotation entgegen der Drehrichtung, Erhöhung eine Rotation mit der Drehrichtung.

Schwellwert	Radius des Bogens	Radius des Bogens (Nogalski)
75%	6,0 m	3,64 m
62.5%	32,3 m	5,71 m

Tabelle 6.3: Gegenüberstellung der Bogenradien beim Curvature Gain [Nog15, S. 58].

Nogalskis Test unterscheidet. Gleiches gilt für den Curvature Gain, bei dem der Test in einem P-Wert von 0,8007 resultiert.

Betrachtet man die beiden Tabellen, so lässt sich feststellen, dass bei dem audiovisuellen Test kleinere Manipulationen erkannt worden sind als bei dem rein akustischen Test. Diese Abweichungen sind nicht signifikant. So steigt zum Beispiel der Radius des Bogens, auf dem sich der Proband während des Curvature Gains bewegt, bei einem Erkennungsschwellwert von 75% von 3,64 Meter auf 6,0 Meter. Aufgrund der vorliegenden Daten kann jedoch keine Aussage darüber getroffen werden, ob die genauere Erkennung der Manipulationen allein auf den dominierenden visuellen Reiz oder die Konsistenz der visuellen und akustischen Reize zurückzuführen ist. Hierfür müsste der Test noch einmal mit rein visuellen Reizen wiederholt werden.

Beim Rotation Gain kann man erkennen, dass die Werte dieser Arbeit gleichmäßiger verteilt sind, als bei Nogalski. So liegen die Manipulationswerte bei diesem für einen Erkennungsschwellwert von 62,5%, bei 5% für eine größere und 37,5% für eine kleinere Drehung. Letzterer wurde dabei erst bei einem maximalen Gain von -0,6 erreicht. Somit kann der Nutzer bei Nogalski etwa neun mal stärker entgegen seiner Drehrichtung manipuliert werden als mit dieser. Die Werte dieser Arbeit liegen bei 17,7% entgegen der Drehrichtung und 26,8% mit der Drehrichtung. Bei einem Erkennungsschwellwert von 75% sind sich die Manipulationswerte mit 35,6% und 31,3% noch ähnlicher.

Einige Probanden haben nach dem Test berichtet, dass die bewusste Wahrnehmung fast ausschließlich über visuelle Reize stattfand. So diente das akustische Signal beim Rotation Gain lediglich der initialen Einschätzung der Zielposition. Die eigentliche Drehung fand über

visuelle Reize statt, bis das visuelle Ziel im Sichtbereich des Probanden auftauchte. Mit diesem Wissen ist eine mögliche These bezüglich der gleichmäßiger verteilten Manipulationswerte, dass die Probanden lediglich Geschwindigkeitsunterschiede bei der Drehung wahrgenommen haben. Über die Propriozeption erkennt der Proband annähernd, mit welcher Geschwindigkeit er eine Drehung ausführt. Beim Rotation Gain dreht sich die virtuelle Welt, abhängig von der Stärke des Gains, schneller oder langsamer als der Proband. Wird der Unterschied zwischen der Geschwindigkeit, mit der sich die Welt dreht, und der Geschwindigkeit, die der Proband aufgrund der Propriozeption erwarten würde, zu groß, wird der Gain als Manipulation wahrgenommen. Diese Schwelle ist für eine schnellere und eine langsamere Drehung der virtuellen Welt gleich groß, sodass sich eine gleichmäßige Verteilung der Erkennungsschwellwerte ergibt.

Im Wesentlichen kann sich die Erkennungsrate der einzelnen Gains durch das Hinzufügen der visuellen Komponente lediglich auf zwei Arten ändern. Konkret ist eine Steigerung oder eine Senkung der Erkennungsrate denkbar, wobei sich für beide Möglichkeiten theoretische Grundlagen finden lassen. So wird bei Razzaque et al. beschrieben, dass eine konsistente Übereinstimmung mehrere Sinne dazu beiträgt, dass der Nutzer Umgebungsbewegungen eher als Eigenbewegungen wahrnimmt [RKW01]. Infolgedessen steigt die Manipulationstoleranz und gleichzeitig sinkt die Erkennungsrate. Serafin et al. gehen hingegen davon aus, dass die visuelle Wahrnehmung alle anderen Sinne vollständig überdeckt [SNS⁺13]. Auf diese Weise werden ebenfalls die Reize der Propriozeption und des vestibulären Systems unterdrückt, was sich wiederum in einer niedrigeren Erkennungsrate äußert. Aufgrund der Tatsache, dass keine signifikanten Abweichungen zwischen den Erkennungsraten des audiovisuellen Tests und des rein akustischen Tests bestehen, kann in dieser Arbeit keine der beiden Theorien verifiziert werden. Betrachtet man jedoch die Werte in den Tabellen 6.2 und 6.3, ohne hierbei die Signifikanz zu berücksichtigen, so stellt man fest, dass beim audiovisuellen Test bereits kleinere Manipulationen erkannt worden sind als beim rein akustischen Test. So ist der Radius des Bogen, auf dem die Probanden manipuliert werden können, wie bereits erläutert, größer und auch die maximale Manipulation beim Rotation Gain sinkt bei dem Erkennungsschwellwert 62,5% von 37,5% auf 26,8%. Hieraus resultiert ein Widerspruch zu den beiden vorgestellten Theorien.

Eine mögliche Erklärung besteht darin, dass der Mensch sich vorwiegend über visuelle Reize orientiert. Die akustischen Reize spielen nur eine untergeordnete Rolle, sodass eine Orientierung über diese beim rein akustischen Test nicht so präzise ist und größere Manipulationen auf den Nutzer angewandt werden können. Beim audiovisuellen Test findet die Orientierung für den Nutzer dagegen auf eine natürliche Weise statt. Die visuelle überdeckt die akustische Wahrnehmung vollständig und aufgrund der Tatsache, dass der Mensch auf diese Art der

Wahrnehmung trainiert ist, fallen bereits kleine Inkonsistenzen auf. Die Folge ist eine höhere Erkennungsrate der Gains.

Ein genauer Vergleich der Erkennungsschwellwerte mit Steinicke et al. [SBJ⁺10] und Serafin et al. [SNS⁺13] soll an dieser Stelle nicht erfolgen, da die Erkennungsrate der verschiedenen Gains stark abhängig von der Konzeption des Tests ist. Aus diesem Grund würde ein Vergleich der Grenzwerte keine aussagekräftigen Ergebnisse liefern [Nog15, S. 70].

6.3 Simulatorkrankheit

Wie bereits in Kapitel 5.1.5 beschrieben, kann es durch das Redirected Walking und das Tragen der Oculus Rift zu Simulatorkrankheit kommen. Um diese festzustellen, haben alle Probanden jeweils einmal vor und einmal nach dem Test einen SSQ ausgefüllt. Abbildung 6.3 zeigt die gemittelten Ergebnisse des SSQs für die ersten acht Probanden. Die Gesamtwertung vor dem Test beträgt 4,68 und die Gesamtwertung nach dem Test 32,25.

Es ist zu erkennen, dass die Gesamtwertung und die Teilwertungen beträchtlich angestiegen sind. Besonders stark ist dies an der Übelkeitswertung zu sehen, die um mehr als 40 Punkte zugelegt hat. Die Symptome Übelkeit, Unwohlsein des Bauches und Schwitzen haben sich dabei im SSQ mit am häufigsten geändert. Dies deckt sich damit, dass drei der acht Probanden den Test auf Grund von Übelkeit vorzeitig abgebrochen haben. Ein Proband wollte einen Teilttest vor dem Ende aufhören, hat den Gesamttest jedoch noch beendet. Fünf der Probanden klagten auch abseits des SSQs über starke Übelkeit, Augenschmerzen und Schwindel. Wiederholt kam die Frage auf, ob der Test denn noch lange gehe. Des Weiteren berichteten alle Probanden, die den Test abgebrochen haben, dass sie mehrere starke, aufeinanderfolgende Manipulationen als Auslöser der Übelkeit empfanden.

Auch die Orientierungslosigkeitswertung ist stark angestiegen. So war bei starken Curvature Gains immer wieder zu beobachten, wie Probanden ins Taumeln kamen. Dies zeigt, dass die Diskrepanz zwischen visueller Wahrnehmung und Eigenwahrnehmung zu groß ist.

Alles in allem kann man feststellen, dass der Test erhebliche Symptome der Simulatorkrankheit hervorgerufen hat, die teilweise sogar zum Abbruch des Tests führten. Als Konsequenz hieraus wurde dieser, wie in Kapitel 5.3 beschrieben, modifiziert, um die Zahl der Abbrüche und die Symptome der Simulatorkrankheit verringern.

Abbildung 6.3 zeigt die gemittelten Ergebnisse des SSQs für die letzten zwölf Probanden. Die Gesamtwertung vor dem Test beträgt 18,39 und die Gesamtwertung nach dem Test 41,14. Wie man erkennen kann, steigen die Gesamtwertung und die Teilwertungen immer noch deutlich an. Die Unterschiede sind jedoch nicht so stark, wie bei den ersten acht Probanden.

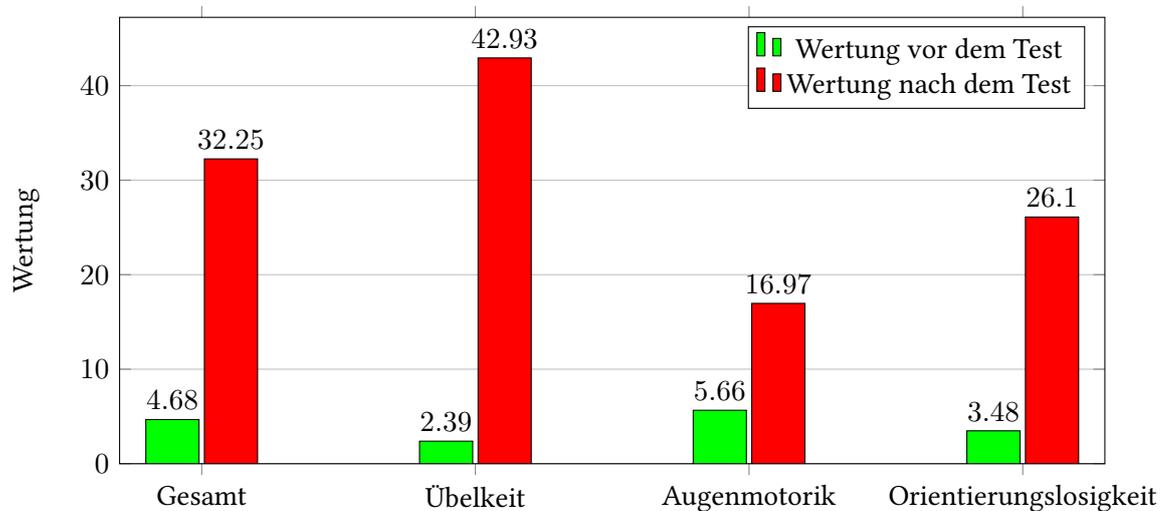


Abbildung 6.5: Durchschnittliche Wertung der Symptomgruppen und Gesamtwertung des SSQs für die ersten 8 Probanden.

Besonders bei der Augenmotorik tritt nur noch eine Steigerung um sechs Punkte auf. Insgesamt liegen die Teilwertungen nach dem Test höher als bei den ersten acht Probanden, was jedoch durch gleichermaßen höhere Werte vor dem Test bedingt ist. Die Teilwertungen Übelkeit und Orientierungslosigkeit steigen im Schnitt etwa um den Faktor 2,8, während die Faktoren bei den ersten acht Probanden 20 bei der Übelkeit und 8,5 bei der Orientierungslosigkeit betragen. Alles in allem ging es den Probanden nach dem Test besser als bei der ersten Version, was sich auch in der Zahl der Abbrüche widerspiegelt. Nur zwei der zwölf Testpersonen haben den neuen Test abgebrochen, was einer Abbruchquote von 16,7% entspricht. Bei einem der beiden Abbrüche kann man außerdem davon ausgehen, dass die Oculus Rift der Auslöser war, da der Proband bereits in der Eingewöhnungsphase eine leichte Übelkeit äußerte. Abseits des SSQs klagten deutlich weniger Probanden über Symptome der Simulatorkrankheit, doch gab es noch immer einzelne Probanden, die eine leichte Übelkeit und Schwindel verspürten. Daher muss man sagen, dass die zweite Version des Tests nach wie vor Symptome der Simulatorkrankheit hervorruft, jedoch in einer stark abgeschwächten Form.

Ergänzend sollte bedacht werden, dass Probanden nach dem Test ein schlechteres Befinden angeben, weil dies ihren Erwartungen entspricht. Durch den SSQ wird suggeriert, dass es zu Simulatorkrankheit kommen kann. Aus diesem Grund werden Probanden eher dazu geneigt sein, eine negative Veränderung durch den Test festzustellen.

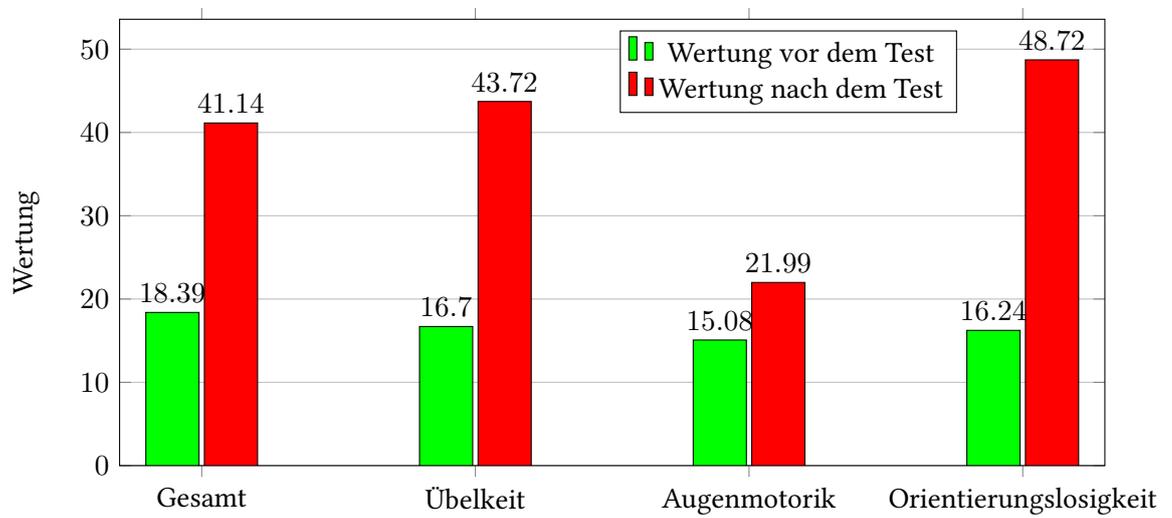


Abbildung 6.6: Durchschnittliche Wertung der Symptomgruppen und Gesamtwertung des SSQs für die letzten 12 Probanden.

7 Ausblick

Einige Probanden haben nach dem Test bemängelt, dass die visuelle und die akustische Wahrnehmung nicht exakt übereinstimmen. Die Klänge können aufgrund der zweidimensionalen Wellenfeldsynthese nur oberhalb der Probanden wiedergegeben werden, die visuelle Darstellung befindet sich jedoch in Bodennähe. Um diesem Problem entgegenzuwirken, können visuelle Ziele gewählt werden, die sich ebenfalls oberhalb des Probanden befinden. Alternativ wird an der HAW Hamburg zur Zeit die Erweiterung der zweidimensionalen Wellenfeldsyntheseanlage durch zusätzliche Lautsprecher untersucht. Diese werden in Z-Richtung unter den ursprünglichen Lautsprechern platziert, sodass in der Theorie eine Positionierung der Klänge in Bodennähe möglich sein sollte.

Zur Untersuchung der Erkennungsschwellwerte des Redirected Walkings ist es außerdem nützlich, zusätzlich zum Two-Alternative Forced Choice Test, auf ein passendes psychologisches Testverfahren, wie die Methode der konstanten Stimuli oder die Staircase-Methode, zurückzugreifen. Besonders Letztere ist für das vorliegende Szenario bestens geeignet, da hier die Grenzwerte des Redirected Walkings mehrfach getestet werden, während Gains, die sowieso von allen Nutzer erkannt bzw. nicht erkannt werden, bei dem Test automatisch wegfallen. Auf diese Weise kann in folgenden Versuchen eine deutlich genauere Bestimmung der Grenzwerte erreicht werden.

Um verlässliche Aussagen über die Erkennungsschwellwerte von audiovisuellem Redirected Walking machen zu können, wird neben dem rein akustischen Test noch ein rein visueller Test benötigt. Hierfür sollte der Versuch dieser Arbeit mit deaktivierten Lautsprechern übernommen werden, um eine bestmögliche Vergleichbarkeit zu gewährleisten. Auf diese Weise kann herausgefunden werden, wie viel Einfluss jeder der beiden Reize auf audiovisuelles Redirected Walking ausübt.

Außerdem wäre es interessant herauszufinden, wie Probanden auf Diskrepanzen zwischen den akustischen und den visuellen Reizen reagieren. Speziell kann so getestet werden, inwieweit die visuelle Wahrnehmung die akustische Wahrnehmung überdeckt.

8 Zusammenfassung

Diese Arbeit hat sich mit audiovisuellem Redirected Walking mittels Oculus Rift und Wellenfeldsynthese befasst. Hierfür wurde zunächst ein Einblick in die Grundlagen dieses Themas gegeben, bevor die Konzeption des Tests näher erläutert wurde. Die Hauptaufgabe dieser Arbeit bestand jedoch in der Erfassung von Erkennungsgrenzwerten für das audiovisuelle Redirected Walking. Hierfür wurden an 20 Probanden insgesamt 954 Manipulationen in Form von Curvature Gains und Rotation Gains untersucht. Für alle Tests wurde der Two-Alternative Forced Choice Test genutzt, um die Probanden auch bei kleinen Gains zu einer Antwort zu bewegen. Auf diese Weise ergibt sich für den Rotation Gain eine mögliche Manipulation um 31,3% entgegen der Drehrichtung des Nutzers und um 35,6% mit der Drehrichtung des Nutzers, bei einer virtuellen Rotation um 180°. Für den Curvature Gain hat sich ergeben, dass der Nutzer auf einem Bogen mit einem Radius von 6,0 Metern manipuliert werden kann, während es ihm in der virtuellen Welt so vorkommt, als laufe er geradeaus.

Der zweite wichtige Bestandteil dieser Arbeit war der Vergleich mit rein akustischem Redirected Walking. Hierfür wurden die Ergebnisse von Nogalski verwendet [Nog15], auf dessen Masterarbeit diese Arbeit aufbaut. Folglich wurde in dieser Arbeit auch der gleiche Test genutzt, wie bei Nogalski, sodass die bestmögliche Vergleichbarkeit gegeben ist. Es stellte sich jedoch heraus, dass sich kein signifikanter Unterschied zwischen den Resultaten des akustischen Tests und des audiovisuellen Tests ergibt. Aus diesem Grund muss gesagt werden, dass die Erkennungsrate von Manipulationen beim audiovisuellem Redirected Walking nicht niedriger ist, da zwei Reize konsistent gehalten werden. Auf der anderen Seite steigert audiovisuelles Redirected Walking die Erkennungsrate jedoch auch nicht signifikant dadurch, dass der visuelle Reiz dominiert.

Während des Tests wurden starke Symptome der Simulatorkrankheit festgestellt, die sogar bis zum Abbruch des Tests führten. Daher wurde dieser nach den ersten acht Probanden leicht abgeändert, um die Zahl der Abbrüche und die Symptome der Simulatorkrankheit zu reduzieren.

Literaturverzeichnis

- [Baa05] Marije AJ Baalman. Updates of the wonder software interface for using wave field synthesis. *LAC2005 Proceedings*, page 69, 2005.
- [Baa07] MAJ Baalman. On wave field synthesis and electro-acoustic music: State of the art 2007. In *Proceedings of the International Computer Music Conference 2007*, 2007.
- [Baa08] Marije Alberdina Johanna Baalman. *On wave field synthesis and electro-acoustic music, with a particular focus on the reproduction of arbitrarily shaped sound sources*. PhD thesis, 2008.
- [Ber88] Augustinus J Berkhout. A holographic approach to acoustic control. *Journal of the audio engineering society*, 36(12):977–995, 1988.
- [Boo01] Marinus M Boone. Acoustic rendering with wave field synthesis. *Proceedings of the ACM Siggraph and Eurographics Campfire: Acoustic Rendering for Virtual Environments, Snowbird, Utah*, 2001.
- [Chr14] Carola Christoffels. Modifikation der Software einer Wellenfeldsyntheseanlage zur Wiedergabe fokussierter Quellen in Abhängigkeit der Zuhörerposition. Bachelorarbeit, 2014.
- [DB78] Johannes Dichgans and Thomas Brandt. Visual-vestibular interaction: Effects on self-motion perception and postural control. In *Perception*, pages 755–804. Springer, 1978.
- [DDAM14] Parth Rajesh Desai, Pooja Nikhil Desai, Komal Deepak Ajmera, and Khushbu Mehta. A review paper on oculus rift-a virtual reality headset. *arXiv preprint arXiv:1408.1173*, 2014.
- [FN13] Wolfgang Fohl and Malte Nogalski. A gesture control interface for a wave field synthesis system. In *International Conference on New Interfaces for Musical Expression*, 2013.

- [Foh13] Wolfgang Fohl. The wave field synthesis lab at the haw hamburg. In *Sound-Perception-Performance*, pages 243–255. Springer, 2013.
- [Gol13] E Goldstein. *Sensation and perception*. Cengage Learning, 2013.
- [HB13] Eric Hodgson and Eric Bachmann. Comparing four approaches to generalized redirected walking: Simulation and live user data. *Visualization and Computer Graphics, IEEE Transactions on*, 19(4):634–643, 2013.
- [Jr.00] Joseph J. LaViola Jr. A discussion of cybersickness in virtual environments. *SIGCHI Bulletin*, 32(1):47–55, 2000.
- [KLBL93] Robert S. Kennedy, Norman E. Lane, Kevin S. Berbaum, and Michael G. Lilienthal. Simulator sickness questionnaire: An enhanced method for quantifying simulator sickness. *The International Journal of Aviation Psychology*, 3(3):203–220, 1993.
- [KRM10] Dimitar Kostadinov, Joshua D Reiss, and Valeri Mladenov. Evaluation of distance based amplitude panning for spatial audio. In *ICASSP*, pages 285–288, 2010.
- [Lac77] James R Lackner. Induction of illusory self-rotation and nystagmus by a rotating sound-field. *Aviation, Space, and Environmental Medicine*, 1977.
- [LVK04] Pontus Larsson, Daniel Västfjäll, and Mendel Kleiner. Perception of self-motion and presence in auditory virtual environments. In *Proceedings of 7th annual workshop of presence*, pages 252–258, 2004.
- [MGTK12] Michael Makarski, Anselm Goertz, Rainer Thaden, and Jochen Kleber. Entwicklung einer WFS-Anlage mit FIR-Entzerrung und Dante Audionetzwerk. Technical report, Institut für Akustik und Audiotechnik und Four Audio GmbH Co. KG, 2012.
- [ML11] Matthew Montag and Colby Leider. Wave field synthesis by multiple line arrays. In *Audio Engineering Society Convention 131*. Audio Engineering Society, 2011.
- [NF15] Malte Nogalski and Wolfgang Fohl. Acoustically Guided Redirected Walking in a WFS System: Design of an Experiment to Identify Detection Thresholds. In *Proceedings of the 12th Int. Conference on Sound and Music Computing (SMC-15)*, pages 419–426, August 2015.
- [Nog12] Malte Nogalski. Gestengesteuerte Positionierung von Klangquellen einer Wellenfeldsynthese-Anlage mit Hilfe eines kamerabasierten 3D-Tracking-Systems. Bachelorarbeit, Hochschule für Angewandte Wissenschaften Hamburg, 2012.

- [Nog15] Malte Nogalski. Acoustic redirected walking with auditory cues by means of wave field synthesis. Master's thesis, Hochschule für Angewandte Wissenschaften Hamburg, 2015.
- [Pul97] Ville Pulkki. Virtual sound source positioning using vector base amplitude panning. *Journal of the Audio Engineering Society*, 45(6):456–466, 1997.
- [RKW01] Sharif Razzaque, Zachariah Kohn, and Mary C Whitton. Redirected walking. In *Proceedings of EUROGRAPHICS*, volume 9, pages 105–106. Citeseer, 2001.
- [RSS⁺02] Sharif Razzaque, David Swapp, Mel Slater, Mary C Whitton, and Anthony Steed. Redirected walking in place. In *ACM International Conference Proceeding Series*, volume 23, pages 123–130, 2002.
- [Sat95] Glenna A Satalich. *Navigation and wayfinding in virtual reality: Finding the proper tools and cues to enhance navigational awareness*. PhD thesis, University of Washington, 1995.
- [SBH⁺09] Frank Steinicke, Gerd Bruder, Klaus Hinrichs, Jason Jerald, Harald Frenz, Markus Lappe, Jens Herder, Simon Richir, and Indira Thouvenin. Real walking through virtual environments by redirection techniques. *Journal of Virtual Reality and Broadcasting*, 6(2), 2009.
- [SBJ⁺08] Frank Steinicke, Gerd Bruder, Jason Jerald, Harald Frenz, and Markus Lappe. Analyses of human sensitivity to redirected walking. In *Proceedings of the 2008 ACM symposium on Virtual reality software and technology*, pages 149–156. ACM, 2008.
- [SBJ⁺10] Frank Steinicke, Gerd Bruder, Jason Jerald, Harald Frenz, and Markus Lappe. Estimation of detection thresholds for redirected walking techniques. *IEEE Transactions on Visualization and Computer Graphics*, 16(1):17–27, 2010.
- [SKF⁺11] Evan Suma, David M Krum, Samantha Finkelstein, Mark Bolas, et al. Effects of redirection on spatial orientation in real and virtual environments. In *3D User Interfaces (3DUI), 2011 IEEE Symposium on*, pages 35–38. IEEE, 2011.
- [SNS⁺13] Stefania Serafin, Niels C Nilsson, Erik Sikstrom, Amalia De Goetzen, and Rolf Nordahl. Estimation of detection thresholds for acoustic based redirected walking techniques. In *Virtual Reality (VR), 2013 IEEE*, pages 161–162. IEEE, 2013.
- [SZ15] Sascha Spors and Franz Zotter. Foundations and practical aspects of sound field synthesis. 138th Convention of the Audio Engineering Society, 2015.

- [TW04] Günther Theile and Helmut Wittek. Wave field synthesis: A promising spatial audio rendering concept. *Acoustical science and technology*, 25(6):393–399, 2004.
- [Vog93] Peter Vogel. *Application of wave field synthesis in room acoustics*. TU Delft, Delft University of Technology, 1993.
- [Wal] James Walker. Redirected walking in virtual environments. Michigan Technological University.
- [WFM03] Matthew Wright, Adrian Freed, and Ali Momeni. Opensound control: State of the art 2003. In *Proceedings of the 2003 conference on New interfaces for musical expression*, pages 153–160. National University of Singapore, 2003.

Hiermit versichere ich, dass ich die vorliegende Arbeit ohne fremde Hilfe selbständig verfasst und nur die angegebenen Hilfsmittel benutzt habe.

Hamburg, 14. September 2015

Florian Meyer