



Hochschule für Angewandte Wissenschaften Hamburg
Hamburg University of Applied Sciences

Bachelorarbeit

Andrej Braining

**Immersionserweiterung durch akustisches, visuelles und
haptisches Feedback**

*Fakultät Technik und Informatik
Studiendepartment Informatik*

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

Andrej Braining

**Immersionserweiterung durch akustisches, visuelles und
haptisches Feedback**

Bachelorarbeit eingereicht im Rahmen der Bachelorprüfung

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

Betreuender Prüfer: Prof. Dr. Kai von Luck
Zweitgutachter: Prof. Dr. Philipp Jenke

Eingereicht am: 13. Januar 2018

Andrej Braining

Thema der Arbeit

Immersionserweiterung durch akustisches, visuelles und haptisches Feedback

Stichworte

Virtual Reality, Immersion, Trackingsysteme, Mechanische Trackingsysteme, Magnetische Trackingsysteme, Optische Trackingsysteme, Akustische Trackingsysteme, Globale Trackingsysteme, Kinetische Trackingsysteme, Visuelle Wahrnehmung, Stereoskopisches Sehen, Head Mounted Display, Akustische Wahrnehmung, Wellenfeldsynthese, Haptische Wahrnehmung, Oberflächensensibilität, Tiefensensibilität, Haptische Sensoren, Haptische Displays, PHANToM, Cyberglove, CyberTouch, CyberGrasp, CyberForce, Wahrnehmung, Menschliche Wahrnehmung, Raumwahrnehmung, Bewegungswahrnehmung, Salienz, Cybersickness, Uncanny Valley

Kurzzusammenfassung

In dieser Bachelorarbeit werden unterschiedlicher Konzeptionen und Technologien betrachtet, welche bei "Virtual Reality" eingesetzt werden um ein möglichst hohes Immersionsgefühl zu erzeugen. Im Vordergrund stehen Trackingsysteme ebenso wie Ausgabetechnologien der von "Virtual Reality" mit Rücksichtnahme auf die anatomischen Gegebenheiten des Menschen, ebenso wie die Wahrnehmung und wie diese, durch Lenkung der Aufmerksamkeit, beeinflusst werden kann.

Andrej Braining

Title of the paper

Developing software in Germany

Keywords

Virtual Reality, Immersion, Tracking Systems, Mechanical Tracking Systems, Magnetic Tracking Systems, Optical Tracking Systems, Acoustic Tracking Systems, Global Tracking Systems, Kinetic Tracking Systems, Visual Perception, Stereoscopic Vision, Head Mounted Display, Acoustic Perception, Wave Field Syndrome, Haptic Perception, Surface Sensitivity, Depth Sensitivity, Haptic Sensors, Haptic Displays, PHANToM, Cyberglove, CyberTouch, CyberGrasp, CyberForce, Perception, Human Perception, Spatial Perception, Motion Perception, Salience, Cybersickness, Uncanny Valley

Abstract

In this bachelor thesis different concepts and technologies are considered, which are used in "Virtual Reality" to create the highest possible immersion feeling. In the foreground are tracking systems as well as "Virtual Reality" output technologies with consideration for the anatomical conditions of humans, as well as the perception and how these can be influenced by directing the attention.

Inhaltsverzeichnis

1	Einleitung	1
1.1	Motivation	2
1.2	Strukturierung der Arbeit	3
2	Die virtuelle Realität	4
2.1	Was ist virtuelle Realität?	4
2.2	Merkmale eines VR-Systems	5
3	Die erste VR Maschinen (Systeme)	8
3.1	1962 Sensorama	8
3.2	1968 The Swort of Damocles	9
3.3	1995 Virtual Boy	10
4	Trackingsysteme	11
4.1	Einführung	11
4.2	Mechanische Trackingsysteme	12
4.3	Magnetische Trackingsysteme	13
4.4	Optische Trackingsysteme	15
4.4.1	Passive optische Trackingsysteme	15
4.4.2	Aktive optische Trackingsysteme	17
4.5	Akustische Trackingsysteme	18
4.6	Globale Positionssysteme	18
4.7	Kinematische Trackingsysteme	18
5	VR Output	20
5.1	Visuelle Wahrnehmung	20
5.1.1	Head Mounted Display	20
5.1.2	Stereoskopische Bild	21
5.2	Akustische Wahrnehmung	22
5.2.1	Wellenfeldsynthese	23
5.2.2	Wie funktioniert Wellenfeldsynthese?	24
5.2.3	Physikalisches Prinzip	25
5.2.4	Mathematische Grundlagen	25
5.2.5	Der modellbasierende Ansatz	26
5.2.6	Der datenbasierte Ansatz	26
5.3	Haptisches Wahrnehmung	27
5.3.1	Was ist Haptik?	27

5.3.2	Wahrnehmungsprozess (Haptik)	27
5.3.3	Physiologische Hintergründe	27
5.3.4	Oberflächensensibilität	28
5.3.5	Die Tiefensensibilität	30
5.3.6	Verteilung der Sensorpunkte auf der Haut	30
5.4	Haptische Sensoren und Displays	30
5.5	Stand der Forschung	37
5.5.1	Materialie	37
5.5.2	Haptics Using Electrical Muscle Stimulation	39
6	Wahrnehmung	40
6.1	Menschliche Wahrnehmung	40
6.2	Raumwahrnehmung	40
6.3	Bewegungswahrnehmung	43
6.4	Salienz	44
6.5	Immersion	44
6.6	Phänomene und Probleme	45
6.6.1	Cybersickness	45
6.6.2	Uncanny Valley	46
7	Fazit	48

Listings

1 Einleitung

Der Begriff "Virtual Reality" (VR) wurde bereits vor Jahrzehnten im Rahmen von Science Fiction Literatur geprägt. Eines der bekanntesten Beispiele ist die Science Fiction Serie "Star Trek", in der mittels Hologramme Areale, Räume, Objekte erzeugt werden und mit denen Personen interagieren können. VR ist nicht nur eine Darstellung von dreidimensionalen Bildern, sie stellt eher einen Versuch dar, die gesamte eigene Wahrnehmung zu täuschen und ein Gefühl der Immersion zu erzeugen.

Doch, was ist die Immersion?

Das Wort selbst wurde aus dem lateinischen Verb "immergere" abgeleitet, welches aus dem selben Wortstamm wie das Verb "mergere" hervorgeht und folglich für eintauchen steht. Die Erweiterung dieses Verbs zu "immergere" bezieht sich nicht nur auf die Verdeutlichung eines physikalischen Eintauchens, vielmehr ergaben sich auch Ableitungen zu geistigem Eintauchen. Immersion ist ein Begriff, der sich nicht nur auf das Thema Virtual Reality bezieht, sondern im Allgemeinen ein passender Ausdruck für das Verlassen einer Welt und das Eintauchen in eine andere, wie es beispielsweise bei Büchern, Filmen und Spielen der Fall sein kann.

Janet H. Murray beschreibt 1997 in ihren Buch "Hamlet on the Holodeck: The future of Narrative in Cyberspace" an folgendem Beispiel das Konzept der Immersion.

"[Don Quixote] so buried himself into books that he spent nights reading from twilight till daybreak and the days from dawn till dark; and so from little sleep and much reading his brain dried out and he lost his wits. He filled his mind with all that he read in them, with enchantments, quarrels, battles, challenges, wounds, wooings, loves, torments, and other impossible nonsense; and so deeply did he steep his imagination in the belief that all the fanciful stuff he read was true, that ... [h]e decided ... to turn knight errant and travel trough the world with horse and armour in search of adventures.

- Don Quixote de la Mancha" ¹

¹Murray (1997) S. 123

Janet H. Murray erläutert eine Situation in der eine packende Geschichte als eine eigene virtuelle Realität empfunden werden kann. Der Mensch ist in der Lage sich eine Geschichte in der eigenen Fantasie so intensiv vorzustellen, dass die reale Umgebung in den Hintergrund gerät. Murray beschreibt die Immersion im metaphorischen Sinne als eine Erfahrung, vom Wasser umgeben zu sein. Das Eintauchen in eine andere Realität sowie der Unterschied zwischen Luft und Wasser verlangt die vollständige Aufmerksamkeit menschlicher Sinne. Menschen reagieren positiv auf neue Erfahrungen und Umgebungen, sie haben Spaß daran, sich ihre Sinneswahrnehmungen anzupassen sowie beim Lernen sich in dieser anderen Realität zu bewegen.²

Im Kontext von "Virtual Reality" beschreibt Immersion das Gefühl des Eintauchens in die virtuelle Realität. Die virtuelle Realität ist eine künstlich erschaffene Welt, welche sowohl der Realität entsprechen kann, aber auch einer Fantasie mit eigenen Naturgesetzen. Die Immersion wird hauptsächlich durch die Unterstützung der visuellen, akustischen und haptischen Reize erreicht (siehe Kapitel 5). Die Wissenschaft jedoch strebt nach einer multimodalen Interaktion. Das bedeutet, dass möglichst alle Sinne des Menschen angesprochen werden.

1.1 Motivation

"Virtual Reality" nimmt eine immer größere Bedeutung in der Gesellschaft ein. Heute werden diese Technologien nicht nur in der Unterhaltungsindustrie eingesetzt, sie finden auch ein weites Anwendungsfeld in der Medizin, Bildung und Industrie. Diese Bachelorarbeit beschäftigt sich mit den Konzeptionen und deren Umsetzungen, was zum aktuellen Stand von VR bereits möglich ist, wie Hard- und Software VR realisiert wird um eine möglichst hohe Immersion des Benutzers zu begünstigen. Da Immersion in einer direkten Abhängigkeit zu den Interaktionsmöglichkeiten steht, werden auch anatomische Grundlagen und technologische Ansätze betrachtet.

²Murray (1997)

1.2 Strukturierung der Arbeit

Diese Bachelorarbeit ist wie folgt strukturiert:

Um einen Überblick darüber zu erhalten was überhaupt "Virtual Reality" oder abgekürzt VR ist, werden im zweiten Kapitel unterschiedliche Merkmale eines VR Systems betrachtet. Im dritten Kapitel werden drei unterschiedliche VR Systeme vorgestellt, welche zu den ersten VR Systemen gehören um durch einen Vergleich mit den heutigen Stand einen Eindruck über die rasante Entwicklung geben können.

Kapitel vier befasst sich mit unterschiedlichen Konzeptionen von Trackingsystemen, welche als Grundlagen für Mensch-Maschinen-Interaktionen (MMI) und damit als wichtiger Bestandteil von VR und Immersion zu betrachten sind.

Das darauf folgende fünfte Kapitel beschäftigt sich mit den gängigen VR Ausgabetechnologien sowie der Physiologie und der Sensorik des Menschen. Da VR Systeme beim heutigen Stand der Technik nur eine Stimulation in den Bereichen der Optik, Akustik und Haptik ermöglichen, werden auch nur diese betrachtet.

Das sechste Kapitel ist der Wahrnehmung innerhalb der virtuellen Realität gewidmet. Nach einer Einführung in die verschiedenen menschlichen Wahrnehmungsarten werden wichtige Kriterien zur Steigerung des Immersionsgefühls, so wie auf die Probleme bei der Nutzung der virtuellen Realität eingegangen.

2 Die virtuelle Realität

2.1 Was ist virtuelle Realität?

Zur Beantwortung dieser Frage wird im Folgenden ein Überblick auf Definition, Ziele und Anwendungen von VR erarbeitet.

Es gibt viele unterschiedliche Vorstellungen welche mit dem Begriff virtuelle Realität verbunden sind. Der Begriff virtuelle Realität selbst wurde 1989 von Jaron Lanier geprägt und seit dem hat es viele Versuche gegeben eine genaue Definition dessen zu finden. In den meisten Fällen wurden jedoch nur Teilgebiete, Aspekte oder Sichtweisen der VR zum Ausdruck gebracht.

Geht man auf die Bedeutung der einzelnen Wörter zurück, so wird "virtuell" am besten durch "scheinbar" oder "physikalisch nicht existent" beschrieben. Das Wort "Realität" kann in diesem Kontext mit "Wirklichkeit" wiedergegeben werden.

"Virtual Reality ist eine Mensch-Maschine-Schnittstelle, die es erlaubt, eine computergenerierte Umwelt in Ansprache mehrerer Sinne als Realität wahrzunehmen".³

Aus dieser Definition lassen sich typische Merkmale eines VR-Systems ableiten. Die Basis bildet die Computersimulation einer Welt, welche mit verschiedenen Sinnen wahrgenommen werden kann. Visuelle, akustische und haptische Wahrnehmungen lassen die virtuellen Eindrücke real erscheinen. Der Mensch wird praktisch in die virtuelle Realität integriert, sodass ein Gefühl der Immersion (einer persönlichen Anwesenheit) entsteht und durch die Interaktionsmöglichkeit mit der virtuellen Welt verstärkt wird.

Die Immersion und die Interaktion in Verbindung mit der Imagination, einer kreativen Fähigkeit eine VR-Welt zu erschaffen und sich in sie hinein zu versetzen, bilden die Grundlage der virtuellen Realität.

³Hennig (1998) S.14

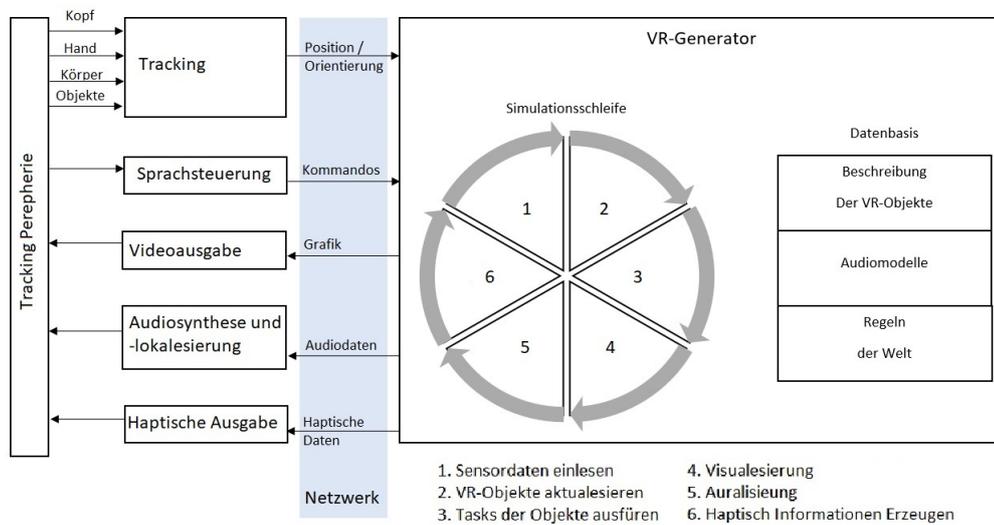


Abbildung 2.1: Aufbau eines VR-Systems (Eigene Darstellung)

2.2 Merkmale eines VR-Systems

Die im vorigen Abschnitt besprochenen Eigenschaften sind im Aufbau eines typischen VR-Systems zu finden, wie in der Abbildung 2.1 verdeutlicht wird. Die Hauptbestandteile sind der VR-Generator und die VR-Peripherie. Durch unterschiedliche Peripheriegeräte des VR-Systems werden die Eingaben des Nutzers erfasst, ebenso wie bestimmte Sinneseindrücke erzeugt. Als Eingabegeräte werden unter anderem Trackingsysteme verwendet. Damit lassen sich Kopf- und Körperposition, Körperhaltung, Gestik und Mimik erfassen. Daraus ermittelte Positions- und Orientierungsdaten werden an den VR-Generator übermittelt.

Um eine Interaktion zu gewährleisten, werden spezifische Anforderungen an die Trackingsysteme gestellt. Da Trackingsysteme ein wichtiger Bestandteil sind, werden diese in einem gesonderten Abschnitt eingehender behandelt (siehe Kapitel 4). Die Erzeugung von Sinneseindrücken an den Nutzer erfordert in einer immersiven Umgebung ebenfalls eine besondere Aufmerksamkeit. Um visuelle Eindrücke möglichst realistisch darzustellen, müssen die virtuellen Räume eine optische Tiefe besitzen. Diese dreidimensionale Darstellung wird in der Realität durch das stereoskopische Sehen erreicht. Dabei werden zwei leicht versetzte Bilder (Parallaxe) derselben Szene erzeugt und jeweils nur für ein Auge sichtbar gemacht werden. Zu solchen Wiedergabegeräten gehören z. B. Head Mounted Displays (HMD), welche umgangssprachlich

als VR-Brille bezeichnet werden.

Den VR-Generator kann man als das Herzstück des VR-Systems betrachten. Er besteht aus einem leistungsfähigen Rechnersystem, das eine virtuelle Welt auf Grundlage von Nutzerinformationen aus der VR-Peripherie und der VR-Datenbasis erzeugt. Diese Daten werden innerhalb der Simulationsschleife ständig ausgewertet. Bei jedem Durchlauf der Simulationsschleife wird ein Frame der virtuellen Welt erzeugt. Die Latenzzeiten setzen sich hierbei aus der Zeit der Sensorverzögerung, der Datenübertragung übers Netz und der Erstellung eines Frames zusammen. Mit steigender Framerate wächst auch das Gefühl der Immersion des Nutzers. Um eine flüssige Darstellung zu erreichen, sollte der VR-Generator 24 Frames pro Sekunde rendern (Stereoausgabe: 24 FPS).

Der VR-Generator bezieht seine gesamten Informationen über die Welt aus der Datenbasis. Diese enthält nicht nur die Beschreibung und das Verhalten der einzelnen Objekte, sowie dazugehörige akustische Daten, sondern auch die Regeln und Gesetzmäßigkeiten der Welt sind darin verankert. Die Datenbasis kann sehr umfangreich werden und besonders der Speicherbedarf und die Übertragung der Informationen machen eine Komprimierung notwendig. Dennoch darf damit die Echtzeitverarbeitung nicht beeinträchtigt werden.

Aufbau der Simulationschleife und ihre wesentlichen Komponenten sind:

1. Sensordaten von der Peripherie lesen
2. VR-Objekte entsprechend der Datenbasis und der Nutzereingaben aktualisieren
3. Objektspezifische Aufgaben (Tasks) ausführen
4. Szene visualisieren
5. Audiodaten berechnen
6. Daten für haptische Rückkopplung erzeugen
7. Qualitäten der Visualisierung kontrollieren
8. Physikalische Simulation generieren

Die Bilderzeugung kann sich als ein zeitintensiver Schritt herausstellen. Nicht nur das verwendete Beleuchtungsmodell, die Texturierung oder die Tatsache, dass eine stereoskopische Darstellung benötigt wird, sind entscheidend, sondern auch die Bildkomplexität die sich durch die Anzahl der Polygone messen lässt. Diese Faktoren zusammen mit der Echtzeitforderung

bilden wichtige Kriterien bei der Wahl des Rechensystems. In den meisten Fällen wird ein Verbund mehrerer Rechereinheiten, wie beispielsweise ein Cluster eingesetzt und anspruchsvolle Grafikkarten zur Visualisierung verwendet.⁴

⁴Vallay (1999)

3 Die erste VR Maschinen (Systeme)

3.1 1962 Sensorama

"Sensorama Simulator" kann als eine Art VR-Prototyp angesehen werden. Im Jahre 1955 veröffentlichte Morton Heilig, Fotograf, Filmemacher und Erfinder von Projektoren und Kameras, detaillierte Pläne für ein "Erfahrungskino". Im Jahr 1962 wurde der "Sensorama Simulator" präsentiert.



Abbildung 3.1: Sensorama (Heilig)

Das Gerät ist eine Art Spielhallenautomat, bei dem der Benutzer eine Sitzposition mit Händen am Lenker und dem Kopf in einer Sichtluke einnehmen musste, um eine simulierte Motorrad- oder Autofahrt zu erleben. Der "Sensorama"-Benutzer konnte nicht nur den Film, sondern simultan auch die entsprechenden Vibrationen und Körperbewegungen sowie Wind und Geruch

wahrnehmen. Wobei ein Gebläse als Fahrwind Simulator und ein System zur Geruchsstimulation (z.B. Auspuffgase oder Blumendüfte) zur Stimulation der Sinne eingesetzt wurde.⁵

3.2 1968 The Swort of Damocles

Im Jahr 1965 veröffentlichte Ivan Sutherland sein Konzept für ein Sichtgerät unter dem Titel "The Ultimate Display". In diesem Artikel heißt es "A display connected to a digital computer gives us a chance to gain familiarity with concepts not realizable in the physical world. It is a looking glass into a mathematical wonderland."⁶

"The ultimate display would, of course, be a room within which the computer can control the existence of matter. A chair displayed in such a room would be good enough to sit in. Handcuffs displayed in such a room would be confining, and a bullet displayed in such a room would be fatal. With appropriate programming such a display could literally be the Wonderland into which Alice walked."⁷

1986 wurde von Sutherland der erste Prototyp unter dem Namen "Swort of Damocles" vorgestellt, welcher als erstes Head Mounted Display (HMD) inklusive Head Tracking Funktionalität bezeichnet werden konnte.

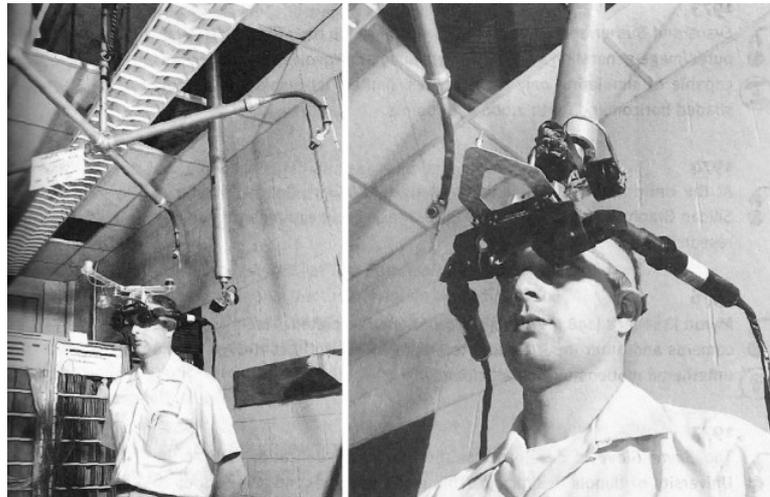


Abbildung 3.2: Swort Of Damocles (SoD)

⁵VrNerds (2017)

⁶Sutherland (1965)

⁷Sutherland (1965) S. 508

Das Head Mounted Display von Sutherland sieht auf den ersten Blick recht simple aus, erfüllt jedoch grundlegende Voraussetzungen für die virtuelle Realität. Ein Computer berechnet Bild für Bild zwei digitale Animationen und leitet sie an den Benutzer weiter. Werden beide Grafik-Paare der Animation mit beiden Augen betrachtet, so erkennt man einen im Raum schwebenden Würfel. Dabei werden die Bewegungen des Kopfes gemessen und gehen ebenfalls mit in die Berechnungen ein, so dass sich die Position des Würfels laufend ändert. Diese Funktion löst beim Betrachter die Empfindung eines realen Objekts aus. ⁸

3.3 1995 Virtual Boy

Der "Virtual Boy" ist eine Videospielekonsole von Nintendo und wurde im Jahr 1995 in Japan und den USA veröffentlicht. Das Design ähnelt einer Tauchermaske auf einem Ständer. Zur Bedienung wird ein Controller benutzt. Beim Hineinsehen nimmt jedes Auge ein anderes, leicht versetztes Bild wahr, was zu einem 3D-Effekt führt. Das Display besteht aus roten LED's auf einem schwarzem Hintergrund. Bei jedem Display sind 224 rote LED's in einer Reihe angeordnet. Mittels eines Spiegelgels und einer Schwungvorrichtung wird der Spiegel mit einer hohen Frequenz hin und her bewegt, so dass ein Bild mit einer Auflösung von 384 x 224 erzeugt wird. ⁹



Abbildung 3.3: Nintendos Virtual Boy (NVB)

⁸VrNerds (2017)

⁹VrNerds (2017)

4 Trackingsysteme

4.1 Einführung

Ein Festkörper im dreidimensionalen Raum verfügt über sechs Freiheitsgrade (DoF), um diese optimal zu bestimmen werden Trackingsysteme eingesetzt.

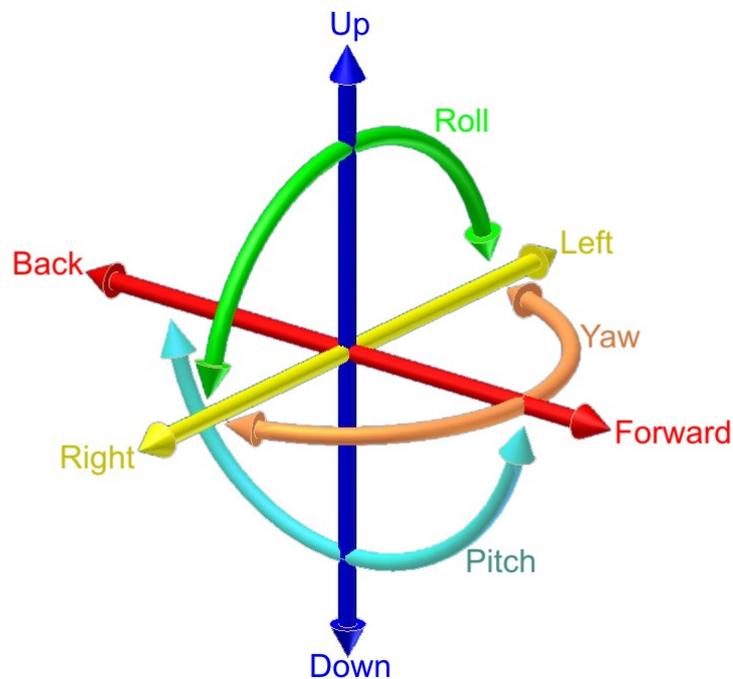


Abbildung 4.1: Die sechs Freiheitsgrade im Raum(Ionescu)

Um alle Bewegungen eines Objekts im dreidimensionalen Raum festzuhalten ist stets ein Bezugssystem erforderlich. Jedes Trackingsystem muss einen Bezugspunkt festlegen, mit dessen Hilfe es die Position des Sensors am Objekt bestimmen kann und damit dessen Bewegung erfasst. Hierbei unterscheidet man zwischen drei unterschiedlichen Arten von Trackingsystemen. ¹⁰

¹⁰Mulder (1994)

- **Inside-in-Systeme:** Das Inside-in-System zeichnet sich durch die Anbringung der Sensoren und der Referenz zur Positionsbestimmung am Objekt aus. Mit dieser Art von Systemen lässt sich jede Bewegung des Objekts messen. Eine Translation im Raum kann jedoch nicht erfasst werden. Ein elektromagnetischer Datenanzug bei dem die Gelenke als Referenz und Potentiometer als Sensoren dienen, kann als Beispiel aufgeführt werden.
- **Inside-out-Systeme:** Beim Inside-out-System sind die Sensoren am Körper angebracht und als Referenz dienen externe Quellen natürlicher oder künstlicher Art. Diese Trackingsysteme sind meist nur in einem begrenztem Bereich einsetzbar. Als Beispiel kann magnetisches Trackingsystem angeführt werden, bei dem die Sensoren am Objekt angebracht werden und sich in einem alternierenden externen Magnetfeld bewegen.
- **Outside-in-Systeme:** Die Sensoren befinden sich beim Outside-in-System außerhalb. Diese werden auch als Marker bezeichnet und können entweder passiv (z. B. Reflektoren) oder aktiv (z. B. Infrarot-LEDs) genutzt werden. Ein negativer Aspekt dieser Systeme ist die Markerverdeckung. Als Beispiel für ein Outside-in-System ist ein passives optisches Trackingsystem mit reflektierenden Markern und Infrarot-Kameras, die Infrarotsignale aussenden und die Reflektoren aufzeichnen. Ein Rechensystem identifiziert die Marker und leitet aus der Lagebeziehung der Kameras zu einander die Position ab.

In der Praxis ist jedoch die Klassifizierung nach Art der Datenübertragung zwischen Sender und Empfänger relevanter. Die bekanntesten sind mechanische, magnetische und optische Trackingsysteme. Akustische Trackingsysteme, Biege-Sensor-Systeme und Systeme mit Trägheitssensoren sind weniger bekannt. Globale Positionssysteme sind auch im Einsatz. Viele der genannten Technologien sind noch in der Entwicklung und eröffnen vielversprechende Ansätze für die Zukunft. ¹¹

4.2 Mechanische Trackingsysteme

Das mechanische Trackingsystem erfasst Bewegungsabläufe über ein Exoskelett. Dieses besteht aus starren Strukturen, welche an festgelegten Körperpartien angebracht werden (Siehe Abbildung 4.2). Die starren Teile sind über Gelenke miteinander verbunden. Diese Gelenke minimieren die Bewegungseinschränkungen und dienen zugleich als elektromagnetische Sensoren. Um die Winkelstellung in digitaler Form zu erhalten, werden häufig Potentiometer

¹¹Doerner (2013)

benutzt, bei denen der Widerstand vom Drehwinkel abhängt. Über einen Spannungsteiler kann der Messwert digitalisiert werden.



Abbildung 4.2: Gypsy Motion Capture System: Model Gypsy 6 (Gmitterko)

Viele Anforderungen werden an das mechanische Trackingsystem gestellt. Das Exoskelett muss präzise an den Körper des Trägers angepasst werden. Mit der Möglichkeit der Einstellungen auf unterschiedliche Körpergrößen, sollte es zugleich stabil und rutschfest sein. Außerdem kann ein zu großes Gewicht eine Bewegungseinschränkung für den Träger darstellen.

Beim Trackingsystem werden nur relative Rotationsdaten gemessen. Um ein digitales Model des Trägers zu erhalten müssen die Abmessungen des Exoskeletts bekannt sein. Die Sensordaten geben nicht direkt die Gelenkrotationen zurück, menschlichen Bewegungen werden aus den Daten des Exoskeletts und der Kalibrierung extrapoliert.

Ein mechanisches Trackingsystem erfordert stets eine Kalibrierung um Daten über das Exoskelett zu erhalten und damit direkt auf den Träger zu schließen. Bei der Kalibrierung wird eine Abbildungsvorschrift bestimmt, die das Exoskelett auf das tatsächliche Skelett des Trägers abbildet. Außerdem werden die Grenzen der Bewegung erfasst, die das System vorgibt. ^{12 13 14}

4.3 Magnetische Trackingsysteme

Die Funktionsweise des magnetische Trackingsystem basiert auf dem Induktionsgesetz. Durch eine stromdurchflossene Spule wird ein Magnetfeld erzeugt. Umgekehrt kann ein in sich

¹²Metamotion (2017)

¹³Doerner (2013)

¹⁴Matter (1995)

veränderndes Magnetfeld in einer Spule einen Strom erzeugen.

Das magnetische Trackingsystem nutzt dieses Prinzip zur Bestimmung der Position und zur Orientierung der Sensoren. Das System selbst besteht hauptsächlich aus mehreren Transmittern, Sensoren und einem Steuerrechner. Der Transmitter muss fest im Raum positioniert sein und bildet damit einen Bezugspunkt für das System. Der Transponder besteht aus drei orthogonal angeordneten elektromagnetischen Spulen, die abwechselnd Niederfrequenzfelder ausstrahlen. Das Erzeugen der Magnetfelder koordiniert der Steuerrechner.



Abbildung 4.3: MotionStar™ Wireless (*Ascension*)

Die Sensoren des Systems bestehen ebenfalls aus drei orthogonalen Spulen. Jeder Sensor muss durch ein abgeschirmtes Kabel mit der Kontrolleinheit verbunden sein, um die Messdaten ohne Störung übertragen zu können. Da diese Leitungen die Bewegungsfreiheit des Trägers beeinträchtigen können, kann auch eine Funkübertragung genutzt werden um Daten vom Akteur zum System zu senden. In der Abbildung 4.3 ist ein solches System abgebildet.

Die Position und die Orientierung wird mit Hilfe des Magnetfeldes ermittelt, da es mit der Entfernung vom Transmitter schwächer wird. Somit kann aus der Stärke des empfangenen Signals die Entfernung bestimmt werden. Die Orientierung relativ zum Magnetfeld wird mit Hilfe der Spulen im Sensor ermittelt, da der induzierte Strom von der Ausrichtung der Feldlinien zu einer Spule abhängt. Drei Spulen im Sensor liefern drei Signale zurück. Eine wichtige Tatsache ist, dass ein Magnetfeld keineswegs kugelförmig ist, sondern die Form eines Torus hat. Die Spulen im Transmitter bauen impulsartig ein zeitversetztes magnetisches Feld

jeweils in ihre Richtung auf. Insgesamt werden dadurch drei mal drei Messwerte pro Sensor generiert. Diese können anschließend in Position und Orientierung umgerechnet werden. ^{15 16}
¹⁷

4.4 Optische Trackingsysteme

Ein optisches Trackingsystem besteht aus Sensoren, welche auch als Marker bezeichnet werden und mehreren Kameras, welche die Bewegungen der Marker erfassen. Aus den Daten mehrerer Kameras kann die Positionen der Marker ermittelt werden. Obwohl es bewegliche Kameras mit festen Markern gibt, bestehen die meisten Konfigurationen aus fest installierten Kameras und beweglichen Markern als Referenz am zu untersuchenden Objekt. In der weiteren Betrachtung stehen ausschließlich die letzteren Systeme im Mittelpunkt.

Ein optisches Trackingsystem wird nach dem Typ der Marker unterschieden. Beim passiven optischen Trackingsystem besitzen die Marker eine retroreflektierende Oberfläche, in den meisten Fällen in Kugelform, die von den Kameras verfolgt und durch Lichtimpulse angestrahlt werden. Aktive optische Trackingsysteme verfügen über selbst leuchtende Marker. Meist hat jeder Marker eine charakteristische Beleuchtung, die eine eindeutige Identifizierung ermöglicht. Image-Base-Rendering Techniken bilden ebenfalls einen vielversprechenden Ansatz für optische Trackingsysteme. Dabei werden nicht die Marker zum Tracken genutzt, es werden hier bestimmte Merkmale im Bild identifiziert, von Bild zu Bild verfolgt und dabei deren Position bestimmt. ^{18 19 20}

4.4.1 Passive optische Trackingsysteme

Passive optische Trackingsysteme bestehen aus reflektierenden Markern, die am Träger befestigt werden und mehreren fest installierten Kameras, die um das Erfassungsvolumen angeordnet sind. Die Kameras verfügen über eingebaute Leuchtdioden, die in den meisten Fällen in infrarotem Spektralbereich leuchten.

Die Oberfläche der Marker besteht aus retroreflektierendem Material, ein oft verwendeter Werkstoff, der aus vielen kleinen Glaskügelchen besteht, die das auftretende Licht in die entgegengesetzte Richtung reflektieren. Die sogenannten Regid-Bodies bestehen aus mindestens

¹⁵MoCapWP (2017)

¹⁶Doerner (2013)

¹⁷Matter (1995)

¹⁸MoCapWP (2017)

¹⁹Doerner (2013)

²⁰Matter (1995)



Abbildung 4.4: Rigid-Bodies(ART)

vier Markern und ermöglichen damit die Erfassung von 6 Freiheitsgraden (Abbildung 4.4). Die Marker haben meistens die Form kleiner Kugeln und werden am Träger fest angebracht. Immer wenn die Kamera ein Bild des Erfassungsvolumens aufnimmt, blitzen deren Leuchtdioden auf. Aufgrund der besonderen Materialeigenschaften der Marker wird das Licht direkt in die Kameras zurückreflektiert. Es entsteht eine monochrome Aufnahme, in dem die Marker als helle Punkte auftauchen. Eine Bildverarbeitungseinheit, die meist in den Kameras integriert ist, sorgt für eine Identifizierung und Verfolgung der Marker. Eine Steuereinheit, die mit allen Kameras verbunden ist, kann im Anschluss aus den Daten die Position der Marker und damit die Position und Orientierung des Rigid-Body bestimmen. ^{21 22 23}

²¹MoCapWP (2017)

²²Doerner (2013)

²³Matter (1995)

4.4.2 Aktive optische Trackingsysteme

Aktive optische Trackingsysteme versuchen die Korrespondenzprobleme von passiven Systemen zu überwinden, indem jeder Marker selbst in bestimmter Weise aufleuchtet, so dass er immer kenntlich gemacht werden kann. Eine Kontrolleinheit übernimmt die Aufgabe, die im System eingebundenen Marker zu synchronisieren, so dass jeweils nur ein Marker aufleuchtet. Jedes mal nehmen externe Detektoren (Kameras) ein Bild auf und können genau einen Marker bestimmen. Die sequenzielle Auswertung der Marker stellt sich schnell als Schwachstelle des Systems heraus, denn mit jedem zusätzlichen Marker wächst die Zeit für einen Messzyklus.



Abbildung 4.5: PhaseSpace Motion-Capture-System mit Aktiven Markern (PhaseSpace)

Die Firma PhaseSpace hat einen vielversprechenden Ansatz zur Lösung dieses Problems vorgestellt. Statt die Marker einzeln auszulösen, erfolgt dies nur in der Kalibrierungsphase. Danach werden alle zugleich erleuchtet. Nur wenn eine Verdeckung auftritt wird wieder sequenziell ein Aufleuchten ausgelöst. Digitale Signalprozessoren in den Detektoren sorgen für die notwendige Koordination und Verarbeitung der Marker. Die Koordination der LED's erfolgt über Funk. Das PhaseSpace System kann bis zu 960 fps verarbeiten und über 100 Marker erfassen. Ein Beispiel wird in Abbildung 4.5 dargestellt. Die Detektoren sind entweder CCD-Kameras (Charge Coupled Device, optisches Aufnahmesystem mit optoelektronischer Bildaufzeichnung durch CCD-Sensoren), die sich kaum von denen in passiven Systemen unterscheiden oder linsenlose Empfänger. Eine interessante Variante arbeitet mit einem stabförmigen System. Zwei Detektoren sind an den Enden befestigt und bestimmen Tiefe und Gierung, der Detektor in der Mitte ermittelt die Neigung eines Markers. Jeder der drei Werte definiert eine Ebene im Raum. Durch Berechnung des Schnittpunktes dieser Ebenen kann die Position des Markers ermittelt werden.

Die Kalibrierung eines aktiven Systems gestaltet sich meist einfacher als bei einem passiven optischen Trackingsystem. Probleme entstehen meist nur dann, wenn Marker verdeckt werden oder das Capture-Volumen verlassen. Wegen der eindeutigen Identifizierung kann aber die Rekonstruktion der Trajektorie eines Markers einfacher bestimmt werden. Ansonsten gelten die selben Richtlinien, wie für passive Systeme. ^{24 25 26}

4.5 Akustische Trackingsysteme

Akustische Trackingsysteme messen die Laufzeit oder die Phasendifferenz eines Ultraschallsignals, das von einem Lautsprecher an Mikrofone gesendet wird. Die erhaltenen Werte dienen zur Triangulierung der Position der Sensoren. Aufgrund der großen Wellenlänge der Signale reicht die Genauigkeit eines akustischen Systems nicht an andere Messmethoden heran, lässt jedoch einen Einsatz in außergewöhnlichen Umgebungen wie unter Wasser zu. Die Technologie wird in der Ozeanographie und der Biomechanik genutzt. ^{27 28}

4.6 Globale Positionssysteme

Ein satellitengestütztes System zur Positionsbestimmung, wie das Global Positioning System (GPS) stellt ein alternatives Trackingsystem dar. Ein Empfänger ermittelt anhand von Timingsignalen den Abstand zu drei Satelliten und kann auf diese Weise seine Position bestimmen. Dieses Verfahren erfordert eine genügend hohe Anzahl an Satelliten im Orbit, damit ein flächendeckendes Netz geschaffen werden kann. GPS-Systeme im zivilen Bereich finden heute überall im Verkehrswesen Anwendung, ob im Automobil, Flugzeug oder Schiff. Dennoch hat es für Motion Capture eine zu geringe Genauigkeit, da die Abweichungen mehr als 2 m betragen können. Durch den Einsatz terrestrischer Sender und die Kombination mit anderen Trackingsystemen wird dieses Problem minimiert. ²⁹

4.7 Kinematische Trackingsysteme

Kinematische Trackingsysteme benötigen keine direkten äußeren Referenzen. Wie der Name schon andeutet, beruht die Bestimmung der Position und Orientierung auf der Analyse von

²⁴MoCapWP (2017)

²⁵Doerner (2013)

²⁶PhaseSpace (2017)

²⁷Doerner (2013)

²⁸Matter (1995)

²⁹ESA (2017)

translatorischen und rotatorischen Bewegungen. Diese Bewegungen werden mit Gyroskopen und Beschleunigungssensoren gemessen. Gyroskope oder Kreisel, wie sie meist genannt werden, messen einachsige Drehgeschwindigkeiten. Ihr Messprinzip ist entweder mechanisch oder optisch. Ein typisches mechanisches Gyroskop besteht aus rotierenden Kreiseln, die in Kardanringen montiert sind. Bei optischen Gyroskopen erfassen Bildsensoren Änderungen im Rotationsverhalten eines Kreisels, die durch Bewegungen entstehen. Eine weitere Gruppe inertialer Sensoren sind die Beschleunigungssensoren. Mit ihrer Hilfe können translatorische Beschleunigungen auf mechanischem Wege ermittelt werden. Benötigt man nur die Neigung gegenüber dem Horizont, kommen so genannte Neigungsmesser zum Einsatz. Zur Messung werden meist Flüssigkeiten oder mikromechanische Pendel genutzt. ³⁰

³⁰Hennig (1998)

5 VR Output

5.1 Visuelle Wahrnehmung

Durch die unterstützende Funktion der visuellen Wahrnehmung kann der Mensch Objekte identifizieren. Das Gehirn analysiert das auf die Netzhaut projizierte Bild der virtuellen Umgebung auf Helligkeit, Kontrast, Farbe und Bewegung. Anschließend wird das Bild verarbeitet. Das Erkennen einzelner Objekte ebenso wie ihre Bedeutung erfolgt durch die Unterstützung von Vergleichen mit bereits im Gehirn gespeicherten Erfahrungen und Informationen. Die räumliche Positionierung bietet eine unterstützende Funktion beim Identifizieren und Unterscheiden von Objekten.

Das stereoskopische Sehen stellt ein gutes Beispiel der menschlichen Wahrnehmung und der Manipulationsmöglichkeiten durch VR-Systeme dar, durch dessen Einsatz eine Präsenz in der virtuellen Welt erzeugt wird. Obwohl der Mensch zwei Augen besitzt, nimmt er keine zwei separaten Bilder der Realität wahr. Das visuelle Wahrnehmungssystem des Menschen erzeugt aus der zweidimensionalen Netzhaut der Augen einen dreidimensionalen Eindruck der Umwelt. Dies geschieht unter anderem durch Triangulierung und wird erst durch zwei Augen möglich. Dadurch kann das visuelle System beispielsweise die Entfernung von Objekten wahrnehmen. Diese Funktion und deren Manipulationsmöglichkeit des stereoskopischen Sehens wird in der virtuellen Welt genutzt um einen dreidimensionalen Eindruck zu bewirken, welcher nur eine zweidimensionale Displayfläche nutzt. ^{31 32}

5.1.1 Head Mounted Display

Bei VR-Systemen ist der Anwender eines Head Mounted Displays von realen visuellen Eindrücken seiner Umgebung völlig abgeschottet und nimmt diese nur virtuell wahr. Ein Head Mounted Display (HMD) ist ein vom Anwender auf dem Kopf getragenes optisches Ausgabegerät, das 2 Hauptaufgaben erfüllt. Zum einem ist es das Tracking und zum anderen die Visualisierung. Das HMD ist zuständig für das Aufzeichnen der Kopfbewegungen des Benutzers

³¹Doerner (2013)

³²Runde (2006)

und für die Präsentation der digitalen Bilder entsprechend dieser Bewegungen. In den meisten Fällen ist das HMD mit einem Rechner verbunden, der die Trackinginformationen verarbeitet und abhängig davon das Bild generieren kann. ^{33 34}

5.1.2 Stereoskopische Bild

Ein Head Mounted Display besteht aus zwei separaten zweidimensionalen Displays, eins für jedes Auge. Die Augen nehmen perspektivisch leicht unterschiedliche Bilder wahr, so dass der Benutzer eine visuelle und dreidimensionale Wahrnehmung erhält (Abbildung 5.1).

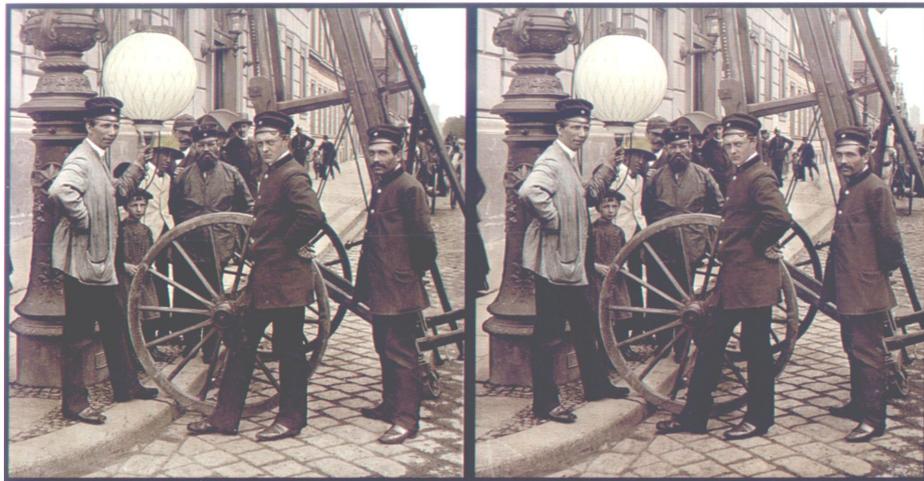


Abbildung 5.1: Installation einer Gaslaterne in Berlin – Zwei Bildelemente eines Stereoskopischen Bildes (Fuhrmann)

Man spricht dabei vom stereoskopischen Bild. Die menschliche visuelle Wahrnehmung beruht auf dem gleichen Prinzip. Die Augen nehmen gleichzeitig ein Bild aus zwei unterschiedlichen Blickwinkeln auf. Das Gehirn kann dadurch die Entfernung der betrachteten Objekte im Bild messen und so ein räumliches Bild des Sichtfeldes erzeugen. Durch den unterschiedlichen Blickwinkel und dem Abstand beider Augen werden Objekte, die in der Nähe des Betrachters liegen, mit dem linken Auge etwas mehr von der einen Seite und mit dem rechten Auge mehr von der anderen Seite gesehen. Je weiter das betrachtete Objekt vom Betrachter entfernt liegt, desto kleiner wird der Winkel zwischen beiden Augen (blaue Sichtlinien in Abbildung 5.2). Bei betrachteten Objekten in einer größeren Entfernung nähern sich die Sichtlinien einer

³³ Doerner (2013)

³⁴ De Lucal (2003)

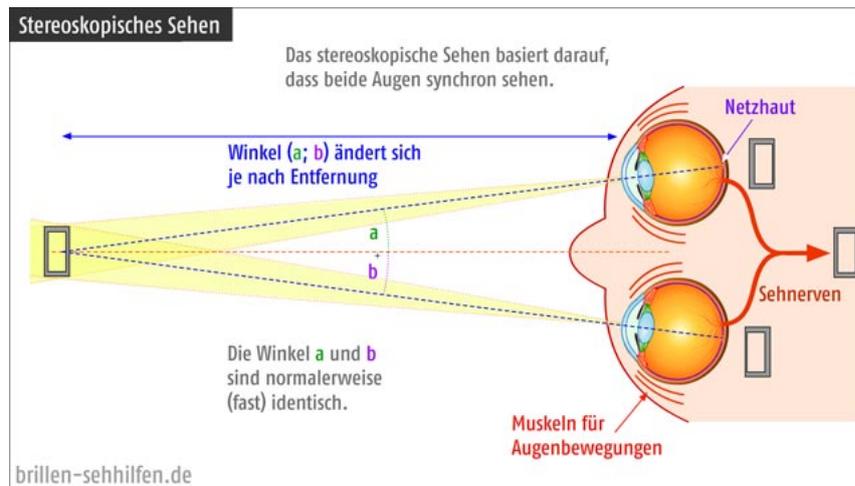


Abbildung 5.2: Stereoskopisches Sehen (BS)

parallelen Ausrichtung an. Aus diesen Informationen erzeugt das Gehirn die räumliche Wahrnehmung. Um ein künstliches stereoskopisches Bild zu erzeugen, müssen zwei Kameras beide Teilbilder synchron aufnehmen. Bei der virtuellen Realität handelt es sich um virtuelle Kameras, also zwei virtuelle Blickwinkel in einer computergenerierten Umgebung. Beide Kameras müssen einen seitlichen Abstand von 65 mm zueinander aufweisen, was einem mittleren Augenabstand des Menschen entspricht. Um einen bestmöglichen räumlichen Eindruck zu bekommen, muss der Augenabstand des Betrachters beider Teilbilder, der Brennweite der Kameras bei den Aufnahmen gleichen. Außerdem darf sich der Sehwinkel nicht zur Aufnahme unterscheiden. Die Realisierung bei VR-Brillen erfolgt durch einen angeschlossenen und leistungsstarken Rechner, der ein stereoskopisches Bild generiert. Die VR-Brille visualisiert dabei jeweils ein Teilbild pro Auge. ^{35 36 37}

5.2 Akustische Wahrnehmung

Der Mensch kann mit den Ohren Luftschwingungen wahrnehmen. Diese Bewegungen nimmt das Ohr in Form von mechanischen Wellen wahr, welche durch Luft und Druckschwankungen erzeugt werden. Die Ohrmuschel fängt die Schallwellen auf und leitet diese an das Mittelohr weiter. Dort werden diese in eine Vibration des Trommelfelles umgewandelt. Die Haarzellen

³⁵Doerner (2013)

³⁶Dodgson (2004)

³⁷Woods (2004)

im Innenohr nehmen unterschiedliche Frequenzen wahr. Eine räumliche Auflösung ist hierbei viel geringer als die des visuellen Sinnes. Die Auswertung der Amplituden ist neben den Laufzeitdifferenz des Geräusches zu den beiden Ohren stellt die Grundlage des akustischen Ortungssystems dar. Die örtliche Unterscheidbarkeit zweier Geräuschquellen kann nur dann erfolgen, wenn die Quellen mehrere Grade auseinander liegen. ^{38 39}

5.2.1 Wellenfeldsynthese

Am Anfang war es Mono, später kam Stereo und inzwischen steht Dolby Surround für überwältigenden Raumklang, jedoch sind damit die Grenzen der Entwicklung nicht erreicht. Die Wellenfeldsynthese basiert auf einem Verfahren der holländischen Technischen Universität Delft von 1988 und wurde später vom Fraunhofer Institut für Digitale Medientechnologie IDMT in Ilmenau zu einem praktischen System weiter entwickelt. Eine Anlage kann aus mehreren hundert Boxen bestehen und eine virtuelle Sound-Realität erschaffen, durch die sich der Hörer frei bewegen kann und dabei an jedem Punkt innerhalb der Anlage einen idealen Klang geliefert bekommt.

In den ersten Jahrzehnten der Schallplattenproduktion konnte die Mono-Wiedergabe einen recht guten Direktschall abbilden. Bei Stereo entsteht mit Hilfe von Lautsprechern durch Laufzeit- und Pegelunterschiede eine Phantom-Schallquelle, damit wird das Ohr durch die psychoakustischen Effekte in die Irre geführt und stellt sich zwischen den beiden Lautsprechern der Stereo-Anlage einen Herkunftsort des Klanges vor. Surround-Sound-Systeme stellen eine Erweiterung durch immer mehr Lautsprecher dar, was eine bessere Lokalisation, Tiefenstaffelung und Räumlichkeit verspricht. Herkömmliche kanalisierte Surround-Systeme welche mit dem Phantomschallquellen arbeiten, generieren einen "Sweetspot" welches die Ideale Hörposition darstellt und üblicherweise genau in der Mitte zwischen den Lautsprechern liegt. Je größer die Entfernung des Hörers zum "Sweetspot" ist, desto schlechter wirkt der Raumklang.

3D-Audio-Systeme, die das Verfahren zur Wellenfeldsynthese nutzen, stellen eine Lösung dieses Problems dar. Das Verfahren basiert nicht auf der akustischen Wahrnehmung durch Phantomschallquellen. Stattdessen wird das akustische Wellenfeld aus der Aufnahmesituation nachgebildet. ^{40 41}

³⁸Doerner (2013)

³⁹Runde (2006)

⁴⁰de.Wikipedia.org (2017)

⁴¹Grundmann (2017)

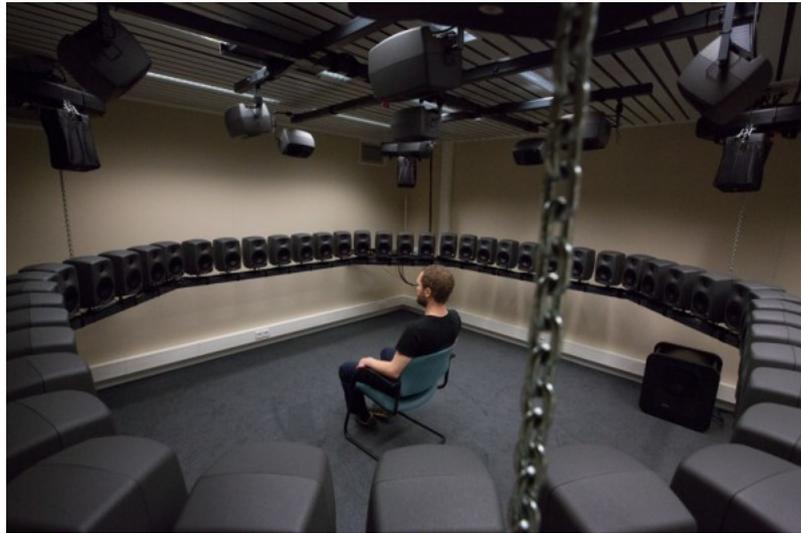


Abbildung 5.3: 3D-Soundsystem – IOSONO, gebaut von Siemens (WFSAnlagen)

5.2.2 Wie funktioniert Wellenfeldsynthese?

Schon vor 300 Jahren hat der niederländische Mathematiker Christian Huygens entdeckt, dass jeder Punkt einer Wellenfront auch ein Ausgangspunkt einer Elementarwelle ist und konnte dadurch erstmals Beugungseffekte erklären. Das Prinzip gilt für jede Wellenausbreitung, für Lichtwellen genauso wie für Schallwellen. Das Huygenssche Prinzip kann als eine der wichtigsten Entdeckungen im Bereich der Physik bezeichnet werden und im Bereich der Akustik bietet dieses Wissen eine Möglichkeit natürliche Wellenfronten aus Elementarwellen zu erzeugen. Eine Wellenfeldsyntheseanlage kann beliebig viele virtuelle Schallquellen gleichzeitig erzeugen und ihre Signalinhalte sind von einander unabhängig und können von verschiedenen Quellen stammen. Wird jedoch das gleiche Audiosignal von mehreren Quellen an verschiedenen Ausgangspunkten erzeugt, so wird eine Reflektion des Signals vorgetäuscht.

Die Wellenfeldsyntheseanlage rekonstruiert physikalisch ein Schallfeld. Separat steuerbare Lautsprecher, meist in einer Reihe rings um den Zuhörer aufgebaut, werden exakt in dem Moment angesteuert, zu dem die Wellenfront einer virtuellen Schallquelle ihren Raum durchlaufen würde. Durch eine ausreichend große Anzahl Elementarwellen entsteht eine gemeinsame Wellenfront, die sich physikalisch von einer realen Wellenfront nicht unterscheidet. ⁴²

⁴²Oellers (2014)

5.2.3 Physikalisches Prinzip

Für eine korrekte Reproduktion des Raumklangs darf die wahrgenommene Position der Schallquelle nicht von der Zuhörerposition abhängig sein. Eine derartige stabile Quellposition entsteht im Inneren einer Kugel aus Lautsprechern. Unabhängig von der Position kann der Ausgangspunkt der Wellenfront immer im Zentrum der Kugel wahrgenommen werden. Die Wellenfeldsynthese bietet die Möglichkeit solche virtuelle Schallquellen mit festen Raumpositionen auf einer Ebene mit dem Lautsprechern zu erzeugen. Die Synthese emuliert natürliche Wellenfronten nach dem Huygens-Prinzip aus Elementarwellen. Eine Computersimulation bewegt dazu jede einzelne, der als horizontale Reihe rings um den Hörer angeordneten, Lautsprecher-Membranen genau in dem Moment, in dem die Wellenfront einer virtuellen Punktquelle ihre Raumkoordinaten erreichen würde. Dadurch wird die ursprüngliche Wellenfront in Betrag und Richtung wiederhergestellt. ⁴³

5.2.4 Mathematische Grundlagen

Wellenfeldsynthese basiert auf der mathematischen Grundlage vom Kirchhoff-Helmholtz-Integral.

$$P(w, z) = \iint_{dA} \left(G(w, z|z') \frac{\partial}{\partial n} P(w, z') - P(w, z') \frac{\partial}{\partial n} G(w, z|z') \right) dz'$$

Abbildung 5.4: Kirchhoff-Helmholtz-Integral(KHI)

Es beschreibt dass der Schalldruck an jedem beliebigen Punkt innerhalb eines quellfreien Volumens definiert ist, wenn Schalldruck und Schallschnelle auf der Oberfläche dieses Volumens bekannt sind. Gemäß Rayleigh II ist der Schalldruck in jedem Punkt eines Halbraumes bestimmt, wenn nur die Druckverteilung auf einer Ebene bekannt ist. Da beim Menschen die akustische Wahrnehmung in der Azimutebene am genauesten ist, wird das Verfahren bis heute allgemein nur auf eine einzelne Lautsprecherreihe rings um dem Zuhörer begrenzt. Den Ausgangspunkt der synthetisierten Wellenfront kann ein beliebiger Punkt innerhalb der horizontalen Ebene der Lautsprecher darstellen. ⁴⁴

⁴³Oellers (2014)

⁴⁴Oellers (2014)

5.2.5 Der modellbasierende Ansatz

Für die Rekonstruktion der Quellpositionen gibt es zwei unterschiedliche Ansätze. Beim modellbasierenden Ansatz werden die Ausgangspunkte der Reflektionen aus der Geometrie des Aufnahmeraumes berechnet. Dabei gehen die Reflexionsfaktoren der Wände in die Signalamplitude ein, außerdem bestimmt das räumliche Abstrahlverhalten der Quelle den Pegel der jeweiligen Reflexion. Für die schallstarken Reflektionen sind diese Berechnungen einfach, und können sogar für bewegte Schallquellen von einem konventionellen PC in Echtzeit gelöst werden. ⁴⁵

5.2.6 Der datenbasierte Ansatz

Bei den Forschungsinstituten hat sich auf das Impulsantwort basierende Verfahren allgemein durchgesetzt. Vor den Aufnahmen wird die räumliche Impulsantwort des Aufnahmeraumes aufgezeichnet. Dabei werden Mikrofone-Line-Arrays in dem Aufnahmeraum aufgestellt. An der Stelle, an der später die direkte Schallquelle positioniert ist, wird dann ein Nadelimpuls erzeugt. Der Impuls wird das nahegelegenste Mikrofon zuerst treffen. Der Lautsprecher, welcher der Mikrofonposition zugeordnet ist, wird daher bei der Wiedergabe des Quellsignals in die räumliche Impulsantwort des Aufnahmeraumes das Signal der Schallquelle zuerst abstrahlen. Später werden die anderen Elementarwellen erzeugt, so dass die ursprüngliche Form der Wellenfront wieder entsteht. Die Wellenfeldsynthese erzeugt mit den virtuellen Schallquellen eine physikalische, virtuelle Kopie des räumlichen Schallfeldes im Aufnahmeraum. Dabei sind die Ausgangspunkte der Wellenfronten unabhängig von psychoakustischer Signalverknüpfung oder der Position des Zuhörers. Veränderungen der Zuhörerposition im Wiedergaberaum führen gleichermaßen zu Veränderungen in der Wahrnehmung, wie eine entsprechende Ortsveränderung im Aufnahmeraum. Dies zeichnet die physikalische Rekonstruktion aus, denn mit psychoakustisch basierten Verfahren wird das nicht möglich sein. Ein offensichtlicher Vorteil einer solchen Volumenlösung ist, dass der Zuhörer bei der Wiedergabe nicht länger an einen Sweetspot gebunden ist, den mit der Wellenfeldsynthese wird eine korrekte Raumabbildung über den ganzen Wiedergaberaum möglich. ⁴⁶

⁴⁵Oellers (2014)

⁴⁶Oellers (2014)

5.3 Haptisches Wahrnehmung

5.3.1 Was ist Haptik?

Der Begriff "Haptik" hat seinen Ursprung aus dem griechischen Wort "hapein", was für Berühren, Ertasten, Greifen oder Erfassen und im Allgemeinen für den Tastsinn steht. Aktuell steht der Begriff "Haptik" für die Lehre von Tastsinn und ist vergleichbar mit den Bereichen Akustik oder Optik. Zur Haptik gehören alle Wahrnehmungen die unmittelbar im Zusammenhang mit Anfassen, Erfühlen und Ergreifen sowie deren wissenschaftlichen oder technisch verwandeten Themen stehen.

5.3.2 Wahrnehmungsprozess (Haptik)

Die menschliche Wahrnehmung auf struktureller Ebene ist durchaus mit technischen Systemen zu vergleichen. Bei der Auslösung eines physikalischen Reizes mittels Sensororgan wird ein Signal über afferente Nervenbahnen zum zentralen Nervensystem weitergeleitet und dort findet eine Vorverarbeitung der Informationen statt. Das zentrale Nervensystem verarbeitet und filtert die Informationen, welche im Nachhinein an den Bereich der objektiven Wahrnehmung weitergeleitet werden. Eine subjektive Wahrnehmung entsteht durch personenbezogenen Einfluss von Erfahrungen und Prägungen zu objektiven Wahrnehmung und tritt so ins Bewusstsein, was als Sinneswahrnehmung empfunden wird. ^{47 48}

5.3.3 Physiologische Hintergründe

Die haptische Wahrnehmung und ihre Qualitäten sind vielfältig. Aufgrund dessen werden die verschiedenen Organe in drei Gruppen unterteilt.

- Oberflächensensibilität: Mechanosensoren
- Tiefensensibilität: Propriozeptoren
- Kinästhetik: Vestibular- und Maculaorgane

Zur Gruppe der *Oberflächensensibilität* zählen Organe, die Oberflächenkontakte wie Kräfte auf oder Deformationen des Körpers registrieren. Diese werden als Mechanosensoren bezeichnet. Mechanosensoren liegen in der Haut und liefern unterschiedliche Aspekte körperlichen

⁴⁷Doerner (2013)

⁴⁸Hatzfeld (2013)

Kontaktes. Dabei spricht man von Taktilität und Oberflächenwahrnehmung. Haptische Wahrnehmungsorgane, die Informationen zur sogenannten *Tiefensensibilität* liefern, stellen eine weitere Gruppe der haptischen Wahrnehmungsorgane dar. Hierzu gehören Informationen über die Stellung des Körpers und dessen Gliedmaßen zueinander. Man spricht hierbei auch von Propriozeption. Die *Kinästhetik* stellt die dritte Gruppe dar, dazu zählen die Vestibular- und Maculaorgane, welche auch als Gleichgewichtsorgane bekannt sind. Beschleunigungskräfte, welche auf den gesamten Körper ausgeübt werden, können eindeutig von dem Skelett, welche durch Belastung oder Stellung einzelner Körperteile entstehen, differenziert werden. Bei Untersuchungen der Haptik von Bedienelementen stehen Oberflächen- und Tiefenwahrnehmung im Mittelpunkt. ^{49 50}

5.3.4 Oberflächensensibilität

Zur Oberflächensensibilität gehören verschiedene Arten von Mechanosensoren. Die Mechanosensoren registrieren Kraftinformationen, welche durch einen Kontakt mit der Hautoberfläche entstehen. Längerer Kontakt führt zu einem zweidimensionalen Abbild der Berührung, jedoch keine direkte Information über die Stellung des Körpers. Unabhängig von der passiven Berührung, was bedeutet, dass etwas über die Haut bewegt wird oder durch aktive Exploration, d. h. die Person ertastet selbständig, werden rein oberflächige Berührungsinformationen erfasst. Bei der aktiven Exploration entsteht durch ein Zusammenspiel mit der Tiefensensibilität ein erweiterter Eindruck über Körper und Gegenstände. Bei der Haptik von Bedienelementen ist die unbehaarte Haut relevant, vor allem bei einer finger- oder handorientierten Bedienung. Unbehaarte Hautflächen beinhalten vier unterschiedliche Typen von Mechanosensoren, welche als die Merkel-, Ruffini-, Meissnerzellen und Pacini-Korpuskel bezeichnet werden.

In der Abbildung 5.5 ist der Aufbau der Haut mit Mechanosensoren sowie die einzelnen Zellen abgebildet. Eine Einteilung der Zellen kann nach unterschiedlichen Kriterien erfolgen, dabei spielt die Größe und die Schärfe des rezeptiven Feldes, ebenso wie die Adaptionsgeschwindigkeit oder die Qualitäten der Berührungsinformation eine bedeutende Rolle. Die Handfläche stellt die Größe des rezeptiven Feldes dar, in der durch entsprechende Reizung ein Mechanosensor stimuliert werden kann. Die Schärfe indiziert, ob ein Sensor eine abrupte oder eine allmählich schwächer werdende Feldgrenze besitzt. Die Adaptionsgeschwindigkeit ist das Antwortverhalten auf einen konstanten Reiz eines Mechanosensors. Langsam adaptierende Sensoren antworten konstant und über einen längeren Zeitraum auf einen dauerhaften Reiz,

⁴⁹Bierbaum (2013)

⁵⁰Hatzfeld (2013)

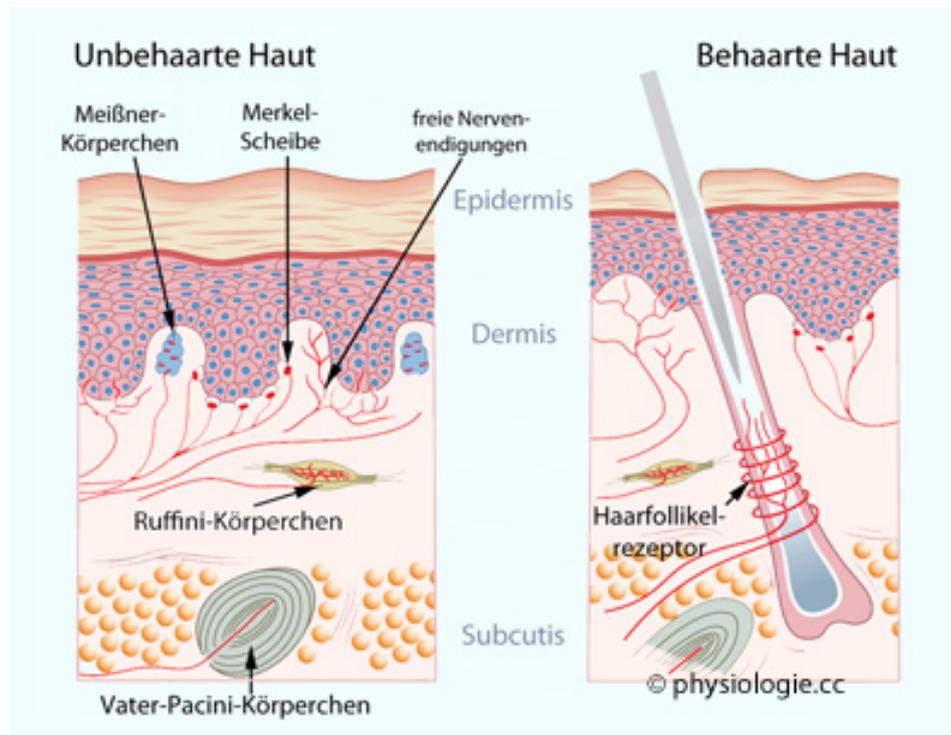


Abbildung 5.5: Aufbau der Haut mit Mechanosensoren (MO)

während schnell adaptive Sensoren nur zu Beginn und Ende eines Reizes antworten. Dieses zeitabhängige Verhalten bestimmt einen Teil der Eigenschaften der Mechanosensoren. ^{51 52}

- SA-I (engl. Abk. Slowly Adapting 1) sind langsam adaptierende Mechanorezeptoren und reagieren auf statischen Druck oder Zug. Diese werden als Merkelzellen oder Merkel-Tastscheiben bezeichnet.
- SA-II (engl. Abk. Slowly Adapting 2) liegen in den tieferen Schichten der Haut und gehören ebenfalls zu langsam adaptierenden Rezeptoren. Diese registrieren vor allem die Dehnung der Haut und spielen bei der Registrierung von Oberflächendetails keine bedeutende Rolle. Die Fasern vom SA-II Typ enden in sog. Ruffini-Körperchen.
- FA-I (engl. Abk. Fast Adapting 1) sind schnell adaptierende Rezeptoren und hauptsächlich in unbehaarter Haut zu finden. Diese Geschwindigkeitsrezeptoren werden bei Veränderungen von Reizstärken stimuliert, welche beispielsweise bei Kontaktaufnahme oder

⁵¹Bierbaum (2013)

⁵²Hatzfeld (2013)

beim Rutschen eines gegriffenen Gegenstandes entstehen. Die Faserenden werden als Meissner-Körperchen bezeichnet.

- FA-II (engl. Abk. Fast Adapting 2): reagiert am schnellsten auf Stimulation. Die FA-II Rezeptoren liegen in der subkutanen Fettschicht und registrieren die Veränderung der Reizgeschwindigkeit(Beschleunigung), wie z. B. bei Vibration. Die FA-II Rezeptoren heißen auch Vater-Pacini-Körperchen.

5.3.5 Die Tiefensensibilität

Ein wichtiger Begriff in der Tiefensensibilität ist die Propriozeption, welche für die Selbstwahrnehmung steht. Propriozeptoren liefern Informationen über Gelenkstellungen, Muskel- und Skelettkräfte. Sie registrieren sowohl aktive als auch passive Bewegungen der Gelenke ebenso wie Widerstände, welche bei Bewegungen entstehen. Die Golgie-Sehnenorgane befinden sich in den Sehnen der Muskeln und geben anhand deren Ausdehnung eine Rückmeldung über die aktuelle Muskelkraft. Die Muskelspindeln liegen im Inneren eines Muskels und registrieren deren Ausdehnung, aus dieser Information wird die Stellung der entsprechenden Gliedmaßen zueinander abgeleitet. Für die Haptik von Bedienelementen spielt die Propriozeption aufgrund ihrer Positionsinformationen eine wichtige Rolle. ^{53 54}

5.3.6 Verteilung der Sensorpunkte auf der Haut

Hautregionen unterscheiden sich in ihrer Wahrnehmung der verschiedenen Reize. Die Verteilungsdichten der verschiedenen Rezeptoren unterscheidet sich je nach Körperregion. Besonders hohe Dichten finden sich auf der Handinnenfläche, im Mund sowie den Geschlechtsorganen. Abbildung 5.6 zeigt die Verteilung der Mechanosensoren auf der Hand. Merkel-Zellen und Meissner-Körperchen sind oberflächlich positioniert und besitzen eher kleine rezeptive Felder, während Ruffini- und Pacini-Körperchen tiefer im Gewebe liegen. Die Dichte der Mechanosensoren ist im Vergleich zu den Thermosensoren hoch. ^{55 56}

5.4 Haptische Sensoren und Displays

VR-Systeme nutzen haptische Geräte nicht nur zur Eingabe von Daten sondern auch zur Ausgabe. Diese Rückmeldung wird als haptisches oder Force Feedback bezeichnet und kann auf

⁵³Bierbaum (2013)

⁵⁴Hatzfeld (2013)

⁵⁵Bierbaum (2013)

⁵⁶Hatzfeld (2013)

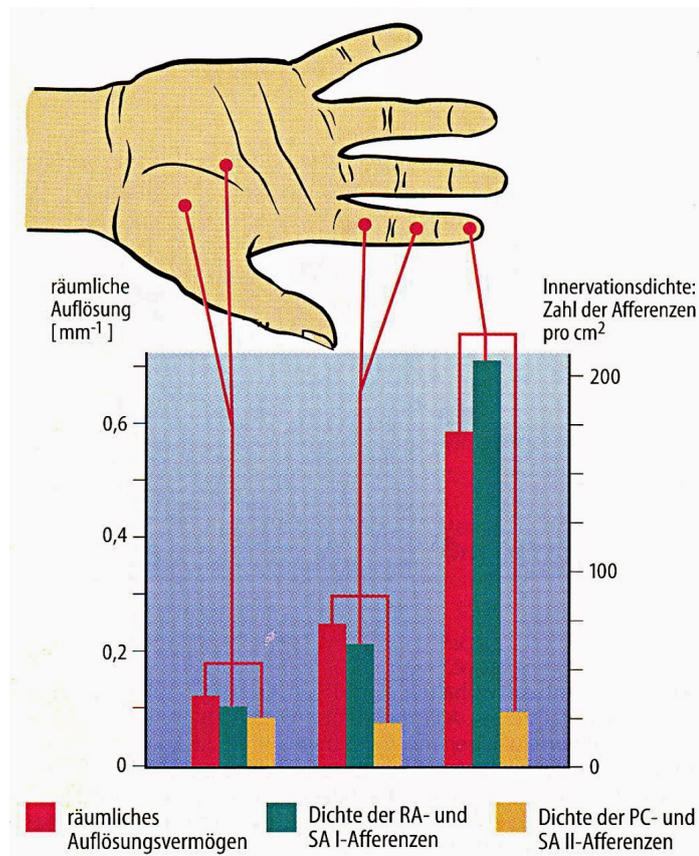


Abbildung 5.6: Verteilung der Mechanosensoren auf der Hand (VMH)

unterschiedliche Weise realisiert werden. Denkbar sind viele Möglichkeiten des taktilen Feedbacks. Eingeschränkt werden diese durch die Art der haptischen Interfaces. Diese werden unterschiedlichen Kategorien zugeordnet.

- Finger-basierende Interfaces (Finger-based): Diese Geräte werden durch die Bewegung der Finger gesteuert. Ein Beispiel dafür ist das "PHANToM", das am Massachusetts Institute of Technology entwickelt wurde. Bei dieser Gruppe von Interfaces wird in den meisten Fällen ein Mauszeiger im dreidimensionalen Raum gesteuert mit dem sich Objekte anstoßen lassen.
- Handbasierende Interfaces (Hand-based): Hierbei wird die Bewegung der Hand ausgewertet. Das bekannteste Beispiel für den handbasierenden Interfaces ist der "CyberGlove" mit dem können Objekte beispielsweise gegriffen werden.

- Exoskeletale Interfaces (Exoskeletal): hierbei erfolgt die Steuerung durch Teile des Skeletts. Das Exoskelett wird so befestigt, dass natürliche Bewegungen des Benutzers erfasst und aufgezeichnet werden können.

Technische Umsetzung

In allen aufgeführten Beispielen wird das Force Feedback durch den Einsatz von Motoren und Dämpfern erreicht. Da Ereignisse in der virtuellen Umgebung unterschiedlich sein können, muss das Feedback über Motoren gesteuert und geregelt werden. Ein mögliches Ereignis ist, beispielsweise der Aufprall eines Objektes auf ein virtuelles Hindernis, dabei treten durch das Abbremsen Kräfte auf, welche auf das Interface übertragen werden müssen. Motoren stehen in Verbindung zu Sensoren und führen Abfragen zu den Aktionen des Benutzers durch.

Haptische Geräte

Im folgenden werden nun einige Geräte vorgestellt, mit deren Hilfe eine haptische Wahrnehmung simuliert werden kann. Genauer Vorgelegt werden zwei Geräte, dessen grundlegenden Techniken auch auf andere übertragbar sind.

PHANToM

Das PHANToM gehört zu der Gruppe der finger-basierenden Interfaces, welcher wie schon erwähnt im Massachusetts Institute of Technology entwickelt wurde. Es existieren fünf verschiedene Modelle, angefangen bei der Desktopvariante bis hin zu einem Model mit einer Reichweite von 40.6 x 58.4 x 83.8 cm, der eine nahezu unbeschränkte Armfreiheit ermöglicht. Im weiteren Verlauf wird nicht weiter auf die versionsbedingten Unterschiede eingegangen, da es keine wesentlichen Funktionsunterschiede zwischen den Modellen gibt. Die Funktion des PHANToM ähnelt einem Industrieroboter und besitzt ebenfalls sechs Freiheitsgrade wie in der Abbildung 5.7 zu sehen ist.

Diese werden benötigt, um einerseits den Endeffektor in eine beliebige Position zu bringen, und andererseits, um die Hand in eine bestimmte Orientierung zu einem Objekt zu bewegen. Die Orientierung der Hand bezeichnet man dabei als Rollen, Gieren und Nicken (Roll, Yaw, Pitch). Damit kann die Spitze, die beim PHANToM eine Roboterhand repräsentiert, zu jeder beliebigen Position, die in ihrer Reichweite liegt, gelangen. In der Regel werden die verschiedenen Positionen in kartesischen Koordinaten beschrieben. Eine andere Beschreibung wäre die in Winkelkoordinaten, Kugelkoordinaten oder Zylinderkoordinaten. Da PHANToM sechs Freiheitsgrade besitzt, wird die Position also mit einem Sechstupel beschrieben, welches die

Stellung jedes Gelenks beinhaltet.



Abbildung 5.7: PHANTOM (HPPE)

Um dem Benutzer ein haptisches Feedback zu vermitteln, verfügt PHANTOM über drei Motoren. Mit ihnen ist es möglich, Kräfte in drei verschiedene Richtungen wirken zu lassen. Wird eine Eingabe vom Benutzer getätigt, welche durch ein Feedback beantwortet werden soll, kann durch die Betätigung der drei Motoren die Beweglichkeit des PHANTOM in alle Richtungen eingeschränkt oder gar gesperrt werden, was ein haptisches Feedback simuliert. ⁵⁷

⁵⁷Massie (1994)

CyberClove

Beim CyberClove (Abbildung 5.8) handelt es sich um einen mit Sensoren versehenen Handschuh. Die Sensoren liefern Informationen über die Stellung und Ausrichtung der Finger und Gelenke, welche zu einer graphischen Hand umgerechnet werden und Bewegungen der realen Hand repräsentieren. Durch diese Funktion kann der Benutzer Handlungen und Aktionen im virtuellen Raum durchführen.



Abbildung 5.8: Der CyberGlove (CGS)

CyberTouch

Der CyberTouch (Abbildung 5.9) stellt eine Erweiterung des CyberGlove dar, welche dem Benutzer über sechs vibrotaktile Stimulatoren ein taktiles Feedback vermittelt. Dabei sind fünf von der Sensoren an den Fingerspitzen und einer an der Handfläche angebracht. Die Sensoren können separat angesteuert werden um die Intensität der Stimulationen einzeln zu regulieren.



Abbildung 5.9: Der CyberTouch (CGS)

Das Feedback reicht von kleinen Impulsen bis hin zu Vibrationen von bis zu 125 Hertz. Durch Kombination können komplexe Wahrnehmungen simuliert werden. ⁵⁸

CyberGrasp

Der CyberGrasp (Abbildung 5.10) stellt ebenfalls eine Erweiterung des CyberClove dar und ermöglicht eine Force-Feedback-Simulation beim Greifen von virtuellen Objekten. Die Art der

⁵⁸CyberGloveSystems (2017)

Konstruktion des CyberGrasp wird als exoskeletal bezeichnet, da das Feedback mechanisch und direkt auf das Skelett des Benutzers übertragen wird. Jeder Finger ist mit der Konstruktion verbunden, sodass die Kräfte direkt wirken können und beispielsweise das Zerdrücken eines virtuellen Objektes verhindern. Bei einem Gewicht von 0,35 kg kann der CyberGrasp Kräfte bis zu 12 N erzeugen. ⁵⁹



Abbildung 5.10: Der CyberGrasp (CGS)

CyberForce

Der CyberForce (Abbildung 5.11) ist wieder eine Erweiterung der CyberGlove- und CyberGrasp-Technologie. Im Vergleich mit dem CyberGrasp, bei dem Kräfte nur auf die Finger ausgeübt werden konnten, ist es mit dem CyberForce möglich, mit der ganzen Hand zu lenken. Es ist also nicht nur möglich virtuelle Objekte zu greifen, sondern auch anzuheben, wobei auch das

⁵⁹CyberGloveSystems (2017)

Gewicht der Objekte simuliert werden kann. Das Gerät simuliert Kräfte mit bis zu 8,8 N. Das Gewicht des CyberForce beträgt 8,6 kg und bietet einen kleineren Arbeitsbereich als seine Vorgänger, da er fest stehen muss. Der Arbeitsradius beträgt 55 cm.⁶⁰



Abbildung 5.11: Der CyberForce (CGS)

5.5 Stand der Forschung

5.5.1 Materiable

"Materiable" (Abbildung 5.12) ist ein Entwicklungsprojekt des Massachusetts Institute of Technology (MIT). Bei diesem Projekt handelt es sich um eine dreidimensionale Plattform, bestehend aus 3D-Blöcken, welche selbständig ihre Form verändern kann (Shapeshifting). Dabei werden physikalische Zustände automatisch digital übertragen, was durch gezieltes Eingreifen zur

⁶⁰CyberGloveSystems (2017)

manuellen Manipulation der Oberfläche führt. Als Nachfolgeprojekt vom "Inform" aus dem Jahr 2013, bei dem die Inform-Plattform mit einer Microsoft Kinect verbunden war und Bewegungen in Form von fühlbaren 3D-Pixeln nachahmen konnte. Diese Technologie ermöglichte eine physische Kommunikation von mehreren Benutzern.



Abbildung 5.12: Materiable (MIT)

"Materiable" erweitert die Technologie von "Inform" durch zusätzliche Funktionen, wie beispielsweise die Simulation von physikalischen und formverändernden Eigenschaften. Die Plattform reagiert sowohl auf Licht als auch auf Berührung. Außerdem hat sie die Möglichkeit zur Imitation von Sand, Wasser und anderen Materialien.

Im Wesentlichen besteht die Technologie aus 3D-gedruckten Blöcken, die in diesem Fall auch als Pixel bezeichnet werden können. Diese Pixel sind mit einem Sensor verbunden, der die Informationen an ein Rechenzentrum leitet. Das Rechenzentrum übermittelt physikalische Informationen an die Blöcke zurück um eine physikalische Simulation zu gewährleisten.

Entwickelt wurde "Materiable" von der "Tangible Media Group" des MIT und wird voraussichtlich nur für Forschungszwecke eingesetzt, wie zum Beispiel für Shapeshifting-Oberflächen.

61

⁶¹MIT (2016)

5.5.2 Haptics Using Electrical Muscle Stimulation

Das Projekt "VR-Walls" vom Hasso Plattner Institute (HTI) forscht an der Technologie eine virtuelle Umgebung durch gezielte Stromstößen fühlbar zu machen. Dabei werden Muskelkontraktion durch Reizstrom exakt in dem Moment und der Körperregion ausgelöst, in dem der Benutzer in Kontakt mit der virtuellen Wand tritt. Durch die Positionierung der Elektroden an unterschiedlichen Muskelansätzen, lassen sich verschiedene Effekte erzeugen. Nicht nur das Gefühl, eine Wand zu berühren kann damit simuliert werden, sondern auch beispielsweise das Betätigen einen Knopfes oder gar das Verschieben von Objekten.

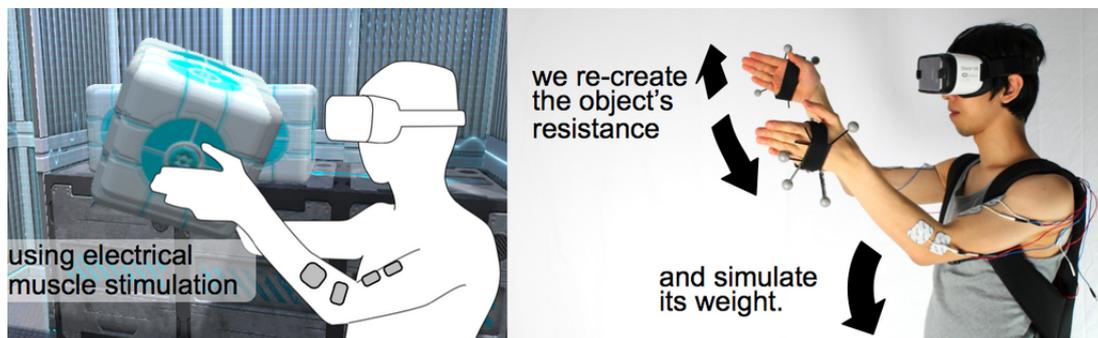


Abbildung 5.13: VR-Walls – Elektro-Haptik-Stimulation (HTI)

Bei der Entwicklung dieser VR-Anwendung wurden unterschiedliche Muskelpartien berücksichtigt und bei welchen Bewegungen diese eine tragende Rolle spielen. Bei der Interaktion, wie beispielsweise dem Verschieben eines Objekts, ist es die Schultermuskulatur und beim Anheben von Objekten der Bi- und Trizeps.

Der Elektro-Haptik-Stimulation wird großes Potenzial zugesprochen. Vor allen da kaum ergänzende Geräte notwendig sind, welche beispielsweise, längeres Anziehen (das Anbringen der Geräte am Benutzer) oder gar Bewegungseinschränkungen verursachen.⁶²

⁶²Lopes (2017)

6 Wahrnehmung

Das Immersionsgefühl in einer virtuellen Umgebung im höchsten Masse zu suggerieren ist eine grundlegende Herausforderung der virtuellen Realität. Der Erfolg beruht nicht nur auf der technischen Umsetzung sondern auch auf der menschlichen Informationsverarbeitung zur Interpretation der gebotenen Sinnesreize. Im Folgenden wird die Grundlage der menschlichen Wahrnehmung behandelt.

6.1 Menschliche Wahrnehmung

Die Umgebung wird vom Menschen über verschiedene Sinne wahrgenommen. Im Rahmen der heutigen VR-Technologien stellen der visuelle, der akustische und der haptische Sinn die wichtigsten Sinne dar. Der olfaktorische (Geruchssinn) oder gustatorische (Geschmackssinn) Sinn, können beim heutigen technischen Entwicklungsstand nicht virtuell stimuliert werden. Aus diesem Grund werden die Informationen einer virtuellen Umgebung durch die Augen, Ohren und über die Haut wahrgenommen.

6.2 Raumwahrnehmung

Visuelle Systeme nutzen nicht nur Disparitäten um eine möglichst realistische Räumlichkeit mit darin befindlichen Objekten zu generieren. Ein bestimmter Teil der menschlichen Bevölkerung kann die Informationen aus den binokularen Disparitäten nicht auswerten und ist somit stereoblind. Es gibt keine genauen Zahlen, aber man schätzt, dass etwa 20 % der Bevölkerung von der Stereoblindheit betroffen sind. Dabei ist es vielen Menschen nicht bewusst dass sie stereoblind sind. Aktuell werden Anhaltspunkte, genannt Tiefenhinweise (engl. Depth Cues) genutzt um dem Gehirn eine Raumwahrnehmung zu ermöglichen. Die Disparität ist ein Beispiel für die einen Tiefenhinweis. Ein weiteres Beispiel ist die Verdeckung, bei der beispielsweise ein Baum von einem Fahrzeug verdeckt wird. Das visuelle System leitet daraus die Information ab, dass wenn das Fahrzeug den Baum verdeckt, das Fahrzeug sich näher am Betrachter als der Baum befindet. Da der Hinweis auch von einem Auge wahrgenommen werden kann, wird er auch als monokularer Tiefenhinweis bezeichnet. Tiefenhinweise helfen bei der Einschätzung

der Position eines Objektes absolut oder auch nur relativ zu einem anderen Objekt. Konvergenz beispielsweise erlaubt eine absolute Ortsbestimmung. Die Aussagekraft und Zuverlässigkeit der verschiedenen Tiefenhinweise ist abhängig von der Entfernung des Betrachters zum jeweiligen Objekt. Während die Verdeckung stets zuverlässige Hinweise liefert, ist dies bei der Disparität nicht der Fall, den je weiter ein Punkt von Betrachter entfernt ist desto geringer ist die Disparität die er erzeugt. Schon bei einer Entfernung von 10 Metern ist die Disparität nicht mehr wahrnehmbar.

Liste von Tiefenhinweisen (mit Wirkungsbereich und Klassifizierung)

Tiefenhinweis	Wirkungsbereich	Klassifizierung	Positionsbestimmung
Verdeckung	Kompletter Bereich	Monokular	Relativ
Disparität	Bis 10 m	Binokular	Relativ
Konvergenz	Bis 2 m	Binokular	Absolut
Akkommodation	Bis 2 m	Monokular	Absolut
Image Blur	Kompletter Bereich	Monokular	Relativ
Linearperspektive	Kompletter Bereich	Monokular	Absolut
Texturgradient	Kompletter Bereich	Monokular	Relativ
Relative Größe	Kompletter Bereich	Monokular	Absolut
Bekannte Größe	Kompletter Bereich	Monokular	Absolut
Höhe im Gesichtsfeld	Über 30 m	Monokular	Relativ
Atmosphärische Perspektive	Über 30 m	Monokular	Relativ
Shape from Shading	Kompletter Bereich	Monokular	Relativ
Schattenwurf	Kompletter Bereich	Monokular	Relativ
Bewegungsparallaxe	Über 20 m	Dynamisch	Relativ
Accretion	Kompletter Bereich	Dynamisch	Relativ

Abbildung 6.1: Liste von Tiefenhinweisen (Doerner (2013) S.41)

In der Tabelle 6.1 werden Tiefenhinweise mit Angaben zum Wirkungsbereich, Informationsgehalt (relativen Anordnung oder absoluten Entfernungsbestimmung) und Klassifizierung (monokular, binokular oder dynamisch. Dynamisch steht hierbei für Tiefenhinweise, die der Betrachter durch Bewegung erhält) aufgezählt. Die in der Liste aufgeführten Tiefenhinweise sind visuell, der Mensch kann aber auch Hinweise durch andere Sinne wie beispielsweise durch Haptik (Berührung) oder durch Akustik (Ton, Geräusche) erhalten, beispielsweise durch Berührung oder durch Geräuschänderungen eines sich bewegenden Objektes. Eine gute Wahrnehmung einer virtuellen Realität ist abhängig von Tiefenhinweisen, aus diesen Grund werden

auch die anderen Hinweise betrachtet. Die Akkommodation ist mit der Konvergenz über verschiedene Prozesse miteinander verknüpft. Beide werden als okulomotorische Tiefenhinweise bezeichnet. Unter Konvergenz wird das Ein- und das Auswärtsdrehen der Augen verstanden, bis die Projektion des betrachtenden Punktes auf die Zentren der Sehgruben ausgerichtet sind. Der Winkelunterschied beider Augen zum Objekt führt zur Raumwahrnehmung. Konvergenz ist ein binokularer, Akkommodation eine monokularer Tiefenhinweis. Als Akkommodation wird die Veränderung der Linsenkrümmung bezeichnet, um Objekte nahe am Betrachter scharf abzubilden. Konvergenz und Akkommodation stehen in einer starken Wechselwirkung zu einander und sind von der Entfernung zum betrachtenden Objekts abhängig, weshalb sie ein Maß für absolute Entfernungsinformationen darstellen. Bei Steigender Objektentfernung verringert sich jedoch auch die Effektivität der Distanzschätzung. Objekte, die zu nah oder zu weit entfernt von Betrachter liegen, werden verschwommen wahrgenommen (engl. Image Blur). Daraus kann ebenfalls ein Rückschluss auf die Entfernung des Objektes gezogen werden. Linearperspektive ist ein Tiefenhinweis, der auf der perspektivischen Verzerrung beruht. Objekte in einer größeren Entfernung wirken kleiner, wie in Abbildung 6.2.a ersichtlich ist. Texturen werden bei steigendem Abstand kleiner. Der Texturgradient dient ebenfalls als Tiefenhinweis. Bei gleichartigen Objekten, wie die Quadrate in der Abbildung 6.2.a, die aber im Bild unterschiedlich groß dargestellt sind, geht das visuelle System davon aus, dass die Größenunterschiede durch unterschiedliche Entfernung zu erklären sind. Dieser Tiefenhinweis wird auch als relative Größe bezeichnet. Bekannte Größen dienen ebenfalls zur Entfernungsschätzung, wie beispielsweise entsprechend der Abbildung 6.2.a. Durch die Person die am Dreieck steht, erhält der Betrachter einen Eindruck von Größe und Entfernung des Dreiecks.

Die Höhe im Gesichtsfeld stellt ebenfalls ein Tiefenhinweis dar, in der Abbildung 6.2.a ist das Quadrat C höher und damit näher an der Horizontlinie positioniert als Quadrat A, dies spricht für eine größere Entfernung zum Quadrat C als zu Quadrat A. Objekte mit hoher Entfernung zum Betrachter, erscheinen nicht so kontrastreich und haben eine leicht bläuliche Färbung (Abbildung 6.2.b). Dies ist auf die in der Luft befindliche Partikel zurückzuführen (atmosphärische Perspektive). Die Beleuchtung von Objekten erzeugt ebenfalls Hinweise auf die räumliche Anordnung. Schattierte Objekte wirken räumlicher wie es in Abbildung 6.2.c ersichtlich ist. Weiterhin gibt der Schattenwurf Hinweise über die Positionierung der Objekte innerhalb des Raumes (Abbildung 6.2.d).

Tiefenhinweise, welche auf der Bewegung von Objekten oder dem Betrachter beruhen, werden auch als Bewegungsparallaxe bezeichnet. Fährt der Betrachter mit einem Fahrzeug so stellt er fest, dass die Bäume an der Straße schneller vorbei ziehen, als Objekte in größerer Entfernung. Außerdem kann eine temporäre Verdeckung von Objekten in einer größeren Entfernung vor

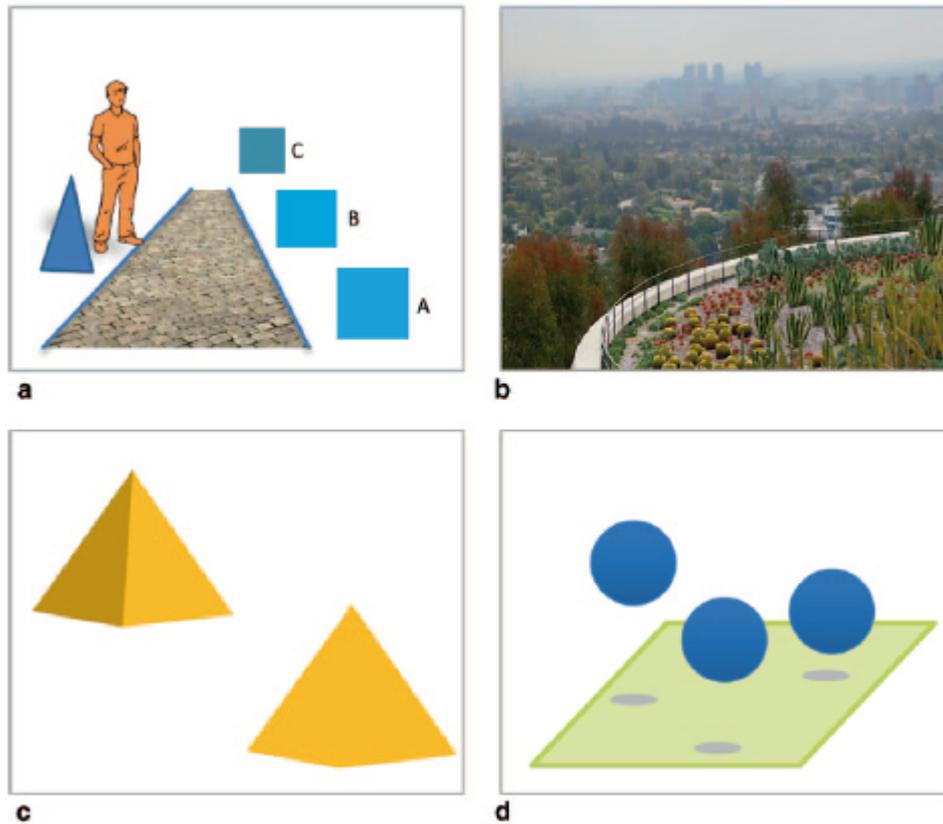


Abbildung 6.2: Tiefenhinweise (Doerner (2013) S.42)

näher befindliche Objekte entstehen. Dieses Phänomen wird als Accretion bezeichnet und gibt ebenfalls Hinweise über die räumliche Anordnung der Objekte. Tiefenhinweise stehen teilweise in Abhängigkeiten zueinander und sollten daher auch zusammenhängend betrachtet werden.⁶³

6.3 Bewegungswahrnehmung

Wird die Bewegung vom rein physikalischen Standpunkt betrachtet, stellt sie eine Ortsveränderung in Abhängigkeit der Zeit dar. Neben der Eigenbewegung gibt es eine Vielzahl von Bewegungen anderer Objekte einer virtuellen Umgebung. Ein wichtiger Aspekt der visuellen Bewegungswahrnehmung ist der "optical flow", sowie der untergeordnete Effekt der Vektion.

⁶³Doerner (2013)

Dieser entsteht beispielsweise dann, wenn sich Objekte in einem eingeschränkten Sichtfeld bewegen und beim Betrachter das Gefühl hervorrufen, er bewege sich selbst. Als Beispiel für den Effekt kann der Moment betrachtet werden, bei dem ein Zug auf dem Nachbargleis anfährt. Vom stehenden Zug aus kann der Eindruck entstehen, dass sich der eigene Zug bewegt. Bewegungen aus den Augenwinkeln werden wahrgenommen und meist unbewusst berücksichtigt. Vorwiegend während der eigenen Fortbewegung. ⁶⁴

6.4 Salienz

Der Begriff Salienz steht für die Steuerung der Aufmerksamkeit des Nutzers in einer virtuellen Umgebung. Die menschliche Wahrnehmung weist nur begrenzte Kapazitäten auf. Nicht alle Reize werden in dem gleichen Maße verarbeitet. Diese Feststellung wird in VR-Systemen dahingehend genutzt, dass nur die Reize künstlich stimuliert werden, welche relevant sind. Daher können teilweise oder gar vollständig außerhalb des Sichtbereiches liegende Objekte mittels Clipping- (Eine Methode zur Entfernung versteckter Flächen in einem Grafikprozessor.) und Culling-Techniken (Der Prozess, bei dem Objekte, die von der Kamera nicht gesehen werden, aus dem Rahmen entfernt werden und somit weniger Polygone verbleiben.) beschnitten oder ganz entfernt werden. ⁶⁵

6.5 Immersion

Die Immersion ist ein elementares Ziel der VR-Technologie. Diese lässt sich in vier unterschiedliche Arten unterteilen. Die erste Art ist die sensormotorische Immersion. Die Immersion entsteht dadurch, dass der Nutzer sensormotorische Aufgaben erfüllt. Während die sensormotorische Immersion den Körper fordert, wird bei der kognitiven Immersion der Geist angesprochen. Die Immersion wird durch ein konzentriertes Hineinversetzen in eine Situation mit einem problematischen Hintergrund und der Suche nach einer möglichen Lösung, gegebenenfalls nach einer Strategie zur Lösungsfindung, erzeugt. Analog zum Schachspiel kann, durch die Konzentration auf das Spiel, die Umwelt in den Hintergrund geraten.

Die emotionale Immersion ist die häufigste Art der Immersion, bei der eine Person sich emotional in einer anderen Welt engagiert, wie es bei Büchern, Filmen und Spielen der Fall sein kann. Je mehr sich die Person mit den Figuren oder der Handlung identifizieren kann, um so stärker ist die Immersion. Die räumliche Immersion ist die letzte Art der Immersion. Die

⁶⁴Doerner (2013)

⁶⁵Doerner (2013)

Person, als Spieler in eine simulierte Welt transportiert. Entspricht diese Welt den Vorlieben des Spielers, so entwickelt er das Gefühl ein Teil der Handlung zu sein. So entsteht ein besonderes Immersionsgefühl. Dabei ist die Interaktionsmöglichkeit des Spielers durch seine Spielfigur mit der Umgebung ein wichtiger Bestandteil.

Laut der Definition unterscheidet sich der Grad der Immersion der virtuellen Realität von anderen Medien, wie beispielsweise Büchern oder Filmen. Der Grad kann von diversen technischen Faktoren beeinflusst werden wie beispielsweise.

- Framerate
- Latenz
- View Mono / Stereo
- Sound Mono / Stereo
- Head Tracking
- Position Tracking
- Supported Haptics

Diese Faktoren sind jedoch nicht aussagekräftig hinsichtlich der emotionalen Immersion, sondern geben hauptsächlich einen Aufschluss über das theoretische Potenzial, dass mit gegebener Hardware eine möglichst immersive virtuelle Umgebung generiert werden kann. Zusätzlich werden noch Aspekte aufgeführt, die einer Immersion entgegen wirken können.

6.6 Phänomene und Probleme

6.6.1 Cybersickness

Ein häufig auftretendes Problem virtuellen Umgebungen ist die Cybersickness. Visuelle Darstellungen von Bewegungen, welche nicht dem Sinnesempfinden des Gleichgewichtorgans oder der Tiefensensibilität entsprechen, können zu Übelkeit, Benommenheit, Schwindelgefühl und sogar Erbrechen führen. Dies kann beispielsweise durch ein Head Mounted Display, welcher eine asynchrone Bilddarstellung im Verhältnis zu der realen Kopfbewegung darstellt, verursacht werden. Verzögernde Bilddarstellung entstehen, falls das System hohe Latenz aufweist. Auch andere Faktoren wie Flimmern, Unschärfe, Kalibrierung und Ergonomie können negativen Begleiterscheinungen auslösen. Abhängig von der Ursache treten die Symptome mit

unterschiedlicher Stärke und Wahrscheinlichkeit auf.⁶⁶

Es werden zwei weitere Theorien vorgestellt, die in Verbindung mit Cybersickness stehen.

- Die Vergiftungs Theorie (poison theory): Zu den Aufgaben des Gleichgewichtsorgans gehört die Räumliche Ausrichtung, die Stabilität der Sicht und natürlich das Halten des Gleichgewichts. Es besteht die Hypothese, dass die Vergiftungserkennung ebenfalls zu den Aufgaben des Gleichgewichtsorgans gehört. Dabei stützt sich die Theorie auf, die Brechreiz erregende Reaktion. Welche als Abwehrreaktion des Körpers definiert werden kann, bei der Giftstoffe aus dem Körper heraus transportiert werden.⁶⁷
- Die Balance Instabilitäts Theorie (postural instability theory): Dabei wird von der instinktiven Aufrechterhaltung einer stabilen Position des Menschen ausgegangen. Bei visuelle Beschleunigungen in einer virtuellen Umgebung, kann der menschliche Körper mit Muskelreizen reagieren, was zu einer instabilen Lage des Körpers und damit zu Cybersickness führt.⁶⁸

6.6.2 Uncanny Valley

Auch bei fortgeschrittenen Computertechnologien im Bereich Virtual Reality stellt der Benutzer selbst ein Hindernis dar, welches die Sinnhaftigkeit einer virtuellen Abbildung der Realität vollständig in Frage stellt. Das sogenannte "unheimliche Tal" (Uncanny Valley) weist auf eine unerwartete Eigenschaft der Reaktion menschlicher Benutzer auf virtuelle Abbilder von Lebewesen hin. Der japanische Robotikforscher Masahiro Mori fand in den 1970-er Jahren heraus, dass die Affinität gegenüber Robotern und Avataren ab einem bestimmten Grad von fast-menschlichem Aussehen abnimmt und erst eine perfekte Nachbildung wieder Zuneigung ermöglicht. Bei virtuellen Darstellungen zeigt sich dieselbe Entwicklung. Charaktere und Avatare wirken unheimlich und abstoßend auf den Menschen. Das Immersionsgefühl wird selbstverständlich von dieser unheimlichen Wirkung realitätsnaher Darstellungen beeinflusst. Gleichzeitig sprechen gegen die Möglichkeit einer perfekten virtuellen Umgebung die Erfahrungen oder die prinzipielle Unzulänglichkeit des menschlichen Wissens über die Gesetzmäßigkeiten der Natur, welche die Grundlage einer virtuellen Umgebung darstellen. Um mit heutigen virtuellen Umgebungen ein starkes Immersionsgefühl auslösen zu können, ist es notwendig, dass Gestaltungsregeln befolgt werden. Den dargestellten Charakteren und Objekten wird bewusst nicht-humanes, abstraktes Aussehen zugeschrieben. Dies kann einerseits

⁶⁶Doerner (2013)

⁶⁷Zacharias (2014)

⁶⁸Zacharias (2014)

durchaus anthropomorph inspiriert sein, andererseits kann auch der vollständige Verzicht auf natürlich anmutende Darstellungsformen eine Strategie sein.^{69 70}

⁶⁹Kortmann (2014)

⁷⁰Watson (2014)

7 Fazit

Innerhalb dieser Bachelorarbeit wurde erarbeitet wie VR und Immersion definiert werden, wo ihre Ursprünge liegen und welchen Status VR-Technologien zum aktuellen Entwicklungsstand erreicht haben.

Da die Immersion in Abhängigkeit zu der Interaktion innerhalb einer virtuellen Umgebung steht wurde der Hauptteil der Arbeit in drei Kapitel, die Eingabe in Form von Trackingsystemen, die Ausgabe in Form von VR Output und die Wahrnehmung aufgeteilt.

In Folge dessen, dass zum aktuellen Entwicklungsstand der Technik nur bedingte Sinnesorgane stimuliert werden können, wurde das Kapitel VR Output in visuelle, akustische und haptische Wahrnehmung unterteilt. Betrachtet wurden nicht nur die technologischen Aspekte sondern auch die anatomischen Eigenschaften der möglichen Benutzer, um die Funktionalität der Konzeptionen und deren Umsetzungen zu verdeutlichen.

Im sechsten Kapitel wurde die menschliche Wahrnehmung betrachtet. Dabei wurden wichtige Kriterien zur Steigerung des Immersionsgefühls erläutert, zusätzlich Probleme aufgeführt, die bei der einer Nutzung von virtuellen Umgebungen entstehen können.

Zum Schluss dieser Bachelorarbeit lässt sich von meiner Seite klarstellen, dass Immersion nicht nur vom Technologischen abhängig ist, sondern zum großen Teil auch von der Psychologie des Menschen. Die Intensität der Immersion lässt sich nicht quantitativ sondern nur qualitativ messen. Unterschiedliche Anwendungsgebiete benötigen angepasste Arten der Immersion. Einer vollständigen Immersion bedarf es in den seltensten Fällen, da die Anwendungsfälle für die virtuelle Realität weit über eine realistische Spielumgebung hinausgehen. Die virtuelle Realität findet deutlich größeren Nutzen in technischen Anwendungsgebieten.

Weit mehr stellt sich die Frage wie real eine virtuelle Realität sein darf und ab welchem Grad die Grenzen zwischen dem Virtuellen und dem Realen verschwimmen und ob die möglichen negativen Aspekte die positiven überwiegen.

Literaturverzeichnis

- [WFSAnlagen] *3D-Soundsystem von IOSONO, gebaut von Siemens.* – URL <https://www.midifan.com/modulenews-detailview-17543.htm>. – (Abgerufen 2018-01-02)
- [PhaseSpace] *The Active Marker Advantage.* – URL <http://phasespace.com/applications/virtual-reality/>. – (Abgerufen 2018-01-02)
- [CGS] *CyberGloveSystems.* – URL <http://www.cyberglovesystems.com/>. – (Abgerufen 2017-11-15)
- [ART] *Hand target.* – URL <https://ar-tracking.com/products/markers-targets/targets/>. – (Abgerufen 2018-01-02)
- [HPPE] *Haptische Phantom Premium-Eingabegeräte.* – URL <https://de.3dsystems.com/haptics-devices/3d-systems-phantom-premium->. – (Abgerufen 2018-01-02)
- [KHI] *Kirchhoff-Helmholtz-Integral.* – URL <https://de.wikipedia.org/wiki/Wellenfeldsynthese>. – (Abgerufen 2018-01-02)
- [MO] *Mechanosensible Organe.* – URL <http://physiologie.cc/XIV.3.htm>. – (Abgerufen 2018-01-02)
- [Ascension] *MotionStar™ Wireless.* – URL <https://www.ascension-tech.com/products/product-history/>. – (Abgerufen 2018-01-02)
- [SoD] *Sword Of Damocles.* – URL <http://www.pxvr.com/accessibility-of-vr-the-future-of-virtual-reality/>. – (Abgerufen 2018-01-02)
- [VMH] *Verteilung der Tastkürperchen (Mechanosensoren).* – URL <http://blog.zirm.net/2014/10/mit-handen-bilder-sehen.html>. – (Abgerufen 2018-01-02)

- [NVB] *VirtualBoy*. – URL <http://www.pxvr.com/accessibility-of-vr-the-future-of-virtual-reality/>. – (Abgerufen 2018-01-02)
- [HTI] *VRWalls*. – URL <https://hpi.de/baudisch/projects/vr-walls.html>. – (Abgerufen 2018-01-02)
- [CyberGloveSystems 2017] *CyberGloveSystems*. 2017. – URL <http://www.cyberglovesystems.com/>. – (Abgerufen 2017-11-15)
- [ESA 2017] *ESA: What is Galileo*. 2017. – URL http://www.esa.int/Our_Activities/Navigation/Galileo/What_is_Galileo. – (Abgerufen 2017-10-24)
- [Metamotion 2017] *Gypsy Motion Capture System Mocap*. 2017. – URL <http://metamotion.com/gypsy/gypsy-motion-capture-system-mocap.htm>. – (Abgerufen 2017-11-20)
- [MoCapWP 2017] *Motion Capture White Paper*. 2017. – URL ftp://ftp.sgi.com/sgi/A%7CW/jam/mocap/MoCapWP_v2.0.html. – (Abgerufen 2017-11-20)
- [Golem 2017] *Wie Valves Steam VR funktioniert*. 2017. – URL <http://www.golem.de/news/virtual-reality-wievalves-steam-vr-funktioniert-1503-112815.html>. – (Abgerufen 2017-11-20)
- [VrNerds 2017] *World-ToolKit Reference Manual – Release 9*. 2017. – URL <https://www.vrnerds.de/die-geschichte-der-virtuellen-realitaet/>. – (Abgerufen 2017-12-20)
- [Bierbaum 2013] BIERBAUM, Alexander: *Haptische Exploration von unbekanntem Objekten mit einer humanoiden Roboterhand*. 2013. – URL <https://www.ksp.kit.edu/download/1000027025>. – (Abgerufen 2017-11-14)
- [BS] BS: *Stereoskopisches Sehen*. – URL <https://www.brillen-sehhilfen.de/vr-brillen/funktionsweise-vr-brille.php>. – (Abgerufen 2018-01-03)
- [De Lucal 2003] DE LUCAL, Alexander: *Ein- und Ausgabegeräte für VR-Systeme*. 2003. – URL http://www.medien.ifi.lmu.de/fileadmin/mimuc/hs_2004/ausarbeitung_deLuca.pdf. – (Abgerufen 2017-11-20)

- [de.Wikipedia.org 2017] DE.WIKIPEDIA.ORG: *Wellenfeldsynthese*. 2017. – URL <https://de.wikipedia.org/wiki/Wellenfeldsynthese>. – (Abgerufen 2017-11-20)
- [Dodgson 2004] DODGSON, Neil A.: Variation and extrema of human interpupillary distance. (2004)
- [Doerner 2013] DOERNER, Ralf: *Virtual und Augmented Reality (VR/AR):Grundlagen und Methoden der Virtuellen und Augmentierten RealitÄdt*. 2013
- [Fuhrmann] FUHRMANN, August: *Installation einer Gaslaterne in Berlin*. – URL <https://de.wikipedia.org/wiki/Stereoskopie#/media/File:August-Fuhrmann-Installation-einer-Gaslaterne-1890.jpg>. – (Abgerufen 2018-01-02)
- [Gmiterko] GMITERKO, Alexander: *The mechanical motion capture Gypsy 6*. – URL <http://pubs.sciepub.com/ajme/1/7/12/figure/1>. – (Abgerufen 2018-01-02)
- [Grundmann 2017] GRUNDMANN, Lukas: Wellenfeldsynthese ist virtuelle RealitÄdt fÄijr deine Ohren. (2017). – URL <https://motherboard.vice.com/de/article/gv59eq/wellenfeldsynthese-ist-virtuelle-realitt-fuer-deine-ohren>. – (Abgerufen 2017-9-19)
- [Hatzfeld 2013] HATZFELD, Christian: *Experimentelle Analyse der menschlichen Kraftwahrnehmung als ingenieurtechnische Entwurfsgrundlage fÄijr haptische Systeme*. 2013. – URL <http://tuprints.ulb.tu-darmstadt.de/3392/1/Dissertation-CH-A5online.pdf>. – (Abgerufen 2017-11-20)
- [Heilig] HEILIG, Morton: *Sensorana*. – URL http://www.w2vr.com/permissions/copyrights_Sandin.html. – (Abgerufen 2018-01-02)
- [Hennig 1998] HENNIG, Alexander: *Die andere Wirklichkeit: Vitual Reality äÄŞ Konzepte, Standards, LÄúsungen*. Addison-Wesley. 1998
- [Huang] HUANG, Milana: *CAVE System*. – URL http://www.w2vr.com/permissions/copyrights_Sandin.html. – (Abgerufen 2018-01-02)
- [Ionescu] IONESCU, Horia: *Die sechs Freiheitsgrade*. – URL https://de.wikipedia.org/wiki/Sechs_Freiheitsgrade#/media/File:6DOF_en.jpg. – (Abgerufen 2018-01-02)

- [Kortmann 2014] KORTMANN, Jan: Das unheimliche Tal der Immersion. (2014). – URL <https://www.vrnerds.de/immersion-uncanny-valley/>. – (Abgerufen 2017-11-20)
- [Lopes 2017] LOPES, Pedro: Providing Haptics to Walls and Heavy Objects in Virtual Reality by Means of Electrical Muscle Stimulation. (2017). – URL https://hpi.de/fileadmin/user_upload/fachgebiete/baudisch/projects/mobile_force_feedback/2017-CHI-VRwalls.pdf. – (Abgerufen 2017-11-20)
- [Massie 1994] MASSIE, J. K.: The PHANToM Haptic Interface: A Device for Probing Virtual Objects. (1994). – URL <https://alliance.seas.upenn.edu/~medesign/wiki/uploads/Courses/Massie94-DSC-Phantom.pdf>. – (Abgerufen 2017-8-2)
- [Matter 1995] MATTER, Front: *Virtual Reality: Scientific and Technological Challenges (1995)*. 1995
- [MIT] MIT: *Materiable*. – URL <http://tangible.media.mit.edu/project/materiable/>. – (Abgerufen 2017-11-12)
- [MIT 2016] MIT: *Materiable*. 2016. – URL <http://tangible.media.mit.edu/project/materiable/>. – (Abgerufen 2017-11-12)
- [Mulder 1994] MULDER, Axel: Human movement tracking technology. (1994). – URL <http://xspasm.com/x/sfu/vmi/HMTT.pub.pdf>
- [Murray 1997] MURRAY, J. H.: *Hamlet on the Holodeck: The Future of Narrative in Cyberspace*. 1997
- [Oellers 2014] OELLERS, Helmut: *Holofonie*. 2014. – URL <http://www.syntheticwave.de/Wellenfeldsynthese.htm>. – (Abgerufen 2017-11-20)
- [Pape] PAPE, Dave: *VPL Data-Suit*. – URL https://en.wikipedia.org/wiki/VPL_Research1. – (Abgerufen 2018-01-02)
- [PhaseSpace 2017] PHASESPACE: *PhaseSpace FAQs*. 2017. – URL <http://phasespace.com/faqs/>. – (Abgerufen 2017-11-12)

- [Runde 2006] RUNDE, Christoph: *Konzeption und Einführung von Virtueller Realität als Komponente der Digitalen Fabrik in Industrieunternehmen*. 2006. – URL <https://elib.uni-stuttgart.de/handle/11682/6663>. – (Abgerufen 2017-11-21)
- [Sutherland 1965] SUTHERLAND, Ivan E.: *The Ultimate Display*. (1965)
- [Vallay 1999] VALLAY, Mill: *World-ToolKit Reference Manual* Release 9. 1999
- [Watson 2014] WATSON, R.: *Das unheimliche Tal der Immersion*. (2014). – URL https://link.springer.com/chapter/10.1007/978-3-642-40744-4_35. – (Abgerufen 2017-11-20)
- [Woods 2004] WOODS, Andrew J.: *Stereoscopic Displays and Virtual Reality Systems*. 2004
- [Zacharias 2014] ZACHARIAS, Konrad: *Bachelorarbeit : Motion Sickness in Virtual Reality Umgebungen*. 2014. – URL <http://www.gdv.informatik.uni-frankfurt.de/abschlussarbeiten/download/2014-11/ausarbeitung.pdf>. – (Abgerufen 2018-01-09)

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

Hamburg, 13. Januar 2018

Andrej Braining