



MASTERARBEIT IM STUDIENGANG GAME ENGINEERING UND VISUAL
COMPUTING

VERMEIDUNG VON MOTION SICKNESS IN INTERAKTIVEN VR UMGEBUNGEN

Kurzbeschreibung

Motion Sickness ist eine Krankheit, die ein zentrales Problem für die weitverbreitete Nutzung von Virtual Reality in vielen Bereichen des alltäglichen Lebens und der Industrie darstellt. In dieser Arbeit wird die Implementation einer interaktiven VR-Anwendung beschrieben, die Methoden zur Vermeidung der Krankheit präsentiert und in der Lage ist, Motion Sickness gezielt auszulösen. Zusätzlich ist im Rahmen dieser Arbeit eine Studie mit zwölf Probanden durchgeführt worden. Das Ziel dieser Studie ist zum einen das Auftreten von Motion Sickness bei unterschiedlichen Eingabegeräten, wie VR-Kontrollern und VR-Treadmills, zu untersuchen und zum anderen einen möglichen Zusammenhang zwischen der Krankheitsstärke und der Empfindlichkeit gegenüber der Krankheit ausfindig zu machen.

| | |
|-------------------------|---------------------------------------|
| Verfasser: | Philipp Vidal |
| Aufgabensteller/Prüfer: | Prof. Dr. Christoph Bichlmeier |
| Arbeit vorgelegt am: | 12.09.2022 |
| Fakultät: | Fakultät für Informatik |
| Studiengang: | Game Engineering und Visual Computing |
| Matrikelnummer: | 348515 |

VORWORT:

Ich möchte mich an dieser Stelle recht herzlich bei Prof. Dr. Christoph Bichlmeier für das Betreuen meiner Masterarbeit, den studentischen Hilfskräften im GamesLab der Hochschule Kempten und bei allen Teilnehmern der Studie bedanken.

INHALTSVERZEICHNIS

| | |
|---|-----------|
| INHALTSVERZEICHNIS | 3 |
| 2 EINLEITUNG | 5 |
| 2.1 Verwendete Software | 6 |
| 2.2 Verwendete Hardware | 7 |
| 3 MOTION SICKNESS | 9 |
| 3.1 Biologische Grundlagen | 11 |
| 3.1.1 Das vestibuläre System..... | 12 |
| 3.1.2 Das visuelle System | 13 |
| 3.1.3 Vektion | 14 |
| 3.2 Theorien..... | 15 |
| 3.2.1 Sensory Conflict Theory | 16 |
| 3.2.2 Postural Instability Theory..... | 17 |
| 3.2.3 Rest Frame Theory | 20 |
| 4 VERMEIDUNG UND REDUKTION..... | 21 |
| 4.1 Faktoren..... | 21 |
| 4.1.1 Nutzerabhängige Faktoren..... | 22 |
| 4.1.2 Hardwareabhängige Faktoren | 25 |
| 4.1.3 Softwareabhängige Faktoren | 28 |
| 4.2 Methoden | 32 |
| 4.2.1 Einnehmen von Arzneimitteln..... | 33 |
| 4.2.2 Wahl der Eingabegeräte für Locomotion | 33 |
| 4.2.3 Vermeiden von passiver Bewegung | 35 |
| 4.2.4 Angepasste Fortbewegung in der Anwendung..... | 36 |
| 4.2.5 Manipulation der Peripherie..... | 39 |
| 4.2.6 Rest Frames..... | 41 |
| 5 IMPLEMENTIERUNG DER ANWENDUNG..... | 43 |
| 5.1 Steuerung und Fortbewegung | 43 |
| 5.2 Implementierte Effekte | 45 |
| 5.2.1 Reduktion des Sichtfelds | 45 |
| 5.2.2 Leicht erkennbare Rest Frames | 48 |

| | | |
|-------------|--|-----------|
| 5.2.3 | Frame rate und Tracking-Fehler | 50 |
| 5.3 | Räume in der Anwendung | 52 |
| 5.3.1 | Hauptmenü | 53 |
| 5.3.2 | Locomotion | 54 |
| 5.3.3 | Aktive und passive Bewegungen | 56 |
| 5.3.4 | Anwendungsdesign und Effekte | 59 |
| 6 | STUDIE..... | 65 |
| 6.1 | Messung von Motion Sickness und Empfindlichkeit | 66 |
| 6.1.1 | Simulator Sickness Questionnaire..... | 67 |
| 6.1.2 | Empfindlichkeits-Fragebogen..... | 68 |
| 6.2 | Aufbau und Design | 69 |
| 6.3 | Durchführung der Studie | 71 |
| 6.4 | Evaluierung der Ergebnisse | 73 |
| 7 | DISKUSSION UND AUSBLICK..... | 77 |
| 8 | ABBILDUNGSVERZEICHNIS | 81 |
| 9 | LITERATURVERZEICHNIS..... | 83 |
| 10 | ANHANG | 89 |
| 11 | ERKLÄRUNGEN | 98 |
| 11.1 | Selbstständigkeitserklärung..... | 98 |
| 11.2 | Ermächtigung..... | 98 |

2 EINLEITUNG

Virtual Reality (VR) ist keine neue Technologie, die ersten Schritte in Richtung des heutigen Standes des Virtual Reality-Bereichs gehen auf Technologien zurück, die vor über einem halben Jahrhundert entwickelt wurden. Beispielsweise wurde das erste Head-Mounted Display (HMD), das in der Lage war, mit einem Computer zu interagieren, von Ivan Sutherland in den sechziger Jahren entwickelt. (Kao et al., 2020, S. 135). Zusammen mit ähnlichen Technologien, wie etwa Augmented Reality, hat Virtual Reality und die damit verbundenen Geräte aber gerade in den letzten Jahren einen enormen Aufschwung erlebt. Dieser Aufschwung begann um das Jahr 2012 mit der Veröffentlichung der ersten modernen VR-Headsets und ist besonders der Entwicklung von besseren Bildschirm- und Tracking-Technologien zuzuschreiben, aber auch kompaktere Formfaktoren und ein niedrigerer Preis haben hierzu beigetragen. Heutzutage kann man die Technologie in verschiedenen Bereichen des alltäglichen Lebens auffinden. Die Unterhaltungsindustrie in der Form von Videospiele stellt hier einen der Hauptanwendungsbereiche dar, aber Virtual Reality hat sich aufgrund des Wachstums der Technologie und den aktuellen Entwicklungen auch immer mehr in anderen Industriebereichen, wie beispielsweise der Medizin oder dem Maschinenbau, etabliert. In diesen Bereichen wird Virtual Reality oft in der Form von Videospiele (sogenannten *Serious Games*) genutzt, um Personal durch die Verwendung von Simulationen auszubilden oder Patienten bei der Therapie und Rehabilitation zu unterstützen. Motion Sickness, eine Krankheit, die bei der Verwendung von Virtual Reality bei einem Großteil der Bevölkerung auftritt, stellt gerade in diesen Bereichen ein massives Problem für die weit verbreitete Nutzung der Technologie dar, da dadurch der eigentliche Verwendungszweck (z.B. das Erlernen des Arbeitsablaufes oder das spielerische Darstellen des Therapieverfahrens) beeinträchtigt wird und dies einen negativen Effekt auf die Nutzer haben kann.

Aus diesem Grund versucht diese Arbeit verschiedene Methoden zur Vermeidung und Reduktion von Motion Sickness zu präsentieren, sowie auch einen Überblick über die Ursachen der Krankheit und die Faktoren, die einen Einfluss auf diese haben, zu geben. Hierfür wurde eine VR-Anwendung erstellt, die die verschiedenen Faktoren der Krankheit und Situationen, in denen sie auftreten kann, veranschaulicht. Ebenfalls wurden in dieser Anwendung gängige Methoden und Effekte implementiert, die versuchen, die Symptome der Krankheit zu vermeiden oder zumindest die auftretende Krankheitsstärke zu reduzieren. Im Zusammenhang mit der Anwendung ist zusätzlich eine Studie durchgeführt worden, die die Stärke der Krankheit bei der Fortbewegung durch herkömmliche VR-Kontroller und durch eine moderne VR-Treadmill untersucht und zudem versucht, eine mögliche Korrelation zwischen der Empfindlichkeit gegenüber Motion Sickness und der Krankheitsstärke ausfindig zu machen.

Im Rest dieses Kapitels wird auf die in dieser Arbeit verwendeten Programme und Geräte eingegangen. Kapitel 3 beschäftigt sich mit den Grundlagen und dem biologischen Hintergrund der Krankheit. Zusätzlich werden dort auch einige der Theorien über die Ursachen von Motion Sickness vorgestellt. Im anschließenden Kapitel werden Faktoren, die die Krankheitsausprägungen beeinflussen können, nähergebracht und verschiedene Methoden zum Vermeiden der Krankheit beschrieben. Kapitel 5 und 6 befassen sich jeweils mit der Implementation der Anwendung und der Studie, die mithilfe dieser durchgeführt wurde. Im letzten Kapitel werden die Ergebnisse der Studie diskutiert und kurz auf mögliche zukünftige Entwicklungen eingegangen.

2.1 VERWENDETE SOFTWARE

Zum Erstellen der Anwendung dieser Arbeit wurde die *Unity Game Engine* von Unity Technologies¹ verwendet. Diese Game Engine ist komponenten-basiert und verwendet hauptsächlich sogenannte *Game Objects*, um die Objekte der virtuellen Welt darzustellen. Diesen *Game Objects* wird durch Anhängen bereits existierender oder selbst erstellter Komponenten spezifische Funktionalität gegeben. Die Komponenten, die von der Unity Engine zur Verfügung gestellt werden, sind in der Regel für allgemeine Funktionen verantwortlich, wie etwa das Rendern von Objekten, das Interagieren mit der Physik-Engine und das Abspielen von Audio-Effekten. Selbst erstellte Komponenten sind hauptsächlich eigene Skripte, die von den Entwicklern der Anwendung in der Programmiersprache *C#* geschrieben werden. Zusätzlich bietet diese Engine auch die Möglichkeit, eigene Shader-Programme zu erstellen, um z.B. Objekten in der virtuellen Umgebung ein besonderes Erscheinungsbild zu geben oder spezielle visuelle Effekte zu erzeugen. Diese Shader werden entweder in den herkömmlichen Shader-Sprachen *HLSL* oder *GLSL* verfasst, können aber auch durch ein visuelles Interface mithilfe der internen Shaderschnittstelle *Shader Graph* erstellt werden.

Um mithilfe der Unity Engine eine Virtual Reality-Anwendung erstellen zu können, wurde zudem das *SteamVR*-Plugin von Valve² verwendet. Dieses ermöglicht die Verwendung der Anwendung mit unterschiedlichen VR-Headsets und bietet die Möglichkeit, die verschiedenen Arten von VR-Kontrollern anzusteuern. Zudem stellt das Plugin auch weitere neue Unity-Komponenten zur Verfügung, die grundsätzliche VR-Funktionalität für die Anwendung bereitstellen. Hierzu gehören beispielsweise ein komplexes Interaktionssystem und die Möglichkeit, sich in der virtuellen Welt zu teleportieren.

Um die Inhalte der virtuellen Umgebung zu erstellen, fanden mehrere verschiedene Programme Anwendung. Die 3D-Modelle wurden alle mithilfe des kostenlosen 3D-Grafikprogramms *Blender*³ erschaffen. Mit diesem Programm können neben 3D-Modellen auch komplexe Materialien für die Objekte erstellt werden. Zudem erlaubt es auch das Generieren von verschiedenen Texturen, wie etwa der Normal- und Ambient Occlusion-Map, die für eine realistische visuelle Darstellung in der Game Engine benötigt werden. Die Audio-Effekte der Anwendung wurden selbst aufgenommen und mithilfe des Programms *Audacity*⁴ bearbeitet. Zur Analyse der Studiendaten und Durchführung der Hypothesentests wurde das Statistikprogramm *JASP*⁵ verwendet.

¹ Unity Technologies - <https://unity.com/>

² Valve Corporation - <https://www.valvesoftware.com>

³ Blender Foundation - <https://www.blender.org>

⁴ Audacity Team - <https://www.audacityteam.org/>

⁵ JASP Team - <https://jasp-stats.org/>

2.2 VERWENDETE HARDWARE

Als Virtual Reality-Treadmill wurde für das Testen der Anwendung und Durchführen der Studie die *Virtualizer Treadmill* von Cyberith⁶ verwendet. Genauer genommen wurde das Modell *Virtualizer ELITE 2* genutzt, jedoch wird dieses im Rest der Arbeit lediglich als Virtualizer bezeichnet. Der Virtualizer ist eine omni-direktionale VR-Treadmill, die es dem Nutzer ermöglicht, sich auf relativ natürliche Art und Weise in der virtuellen Welt fortzubewegen. Der Nutzer steht dabei auf einer runden Plattform, die aus einem Material besteht, das leicht das Rutschen bzw. Gleiten der Füße ermöglicht. Hierzu trägt der Nutzer spezielle Überzüge über seinen Schuhen, die das Gleiten erleichtern. Während der Benutzung befindet sich der Nutzer in einer Halterung, die ihn in der Mitte des Geräts hält und zudem als Referenz für die Orientierung des virtuellen Charakters dient. Befindet sich der Nutzer innerhalb der Halterung, kann er virtuelle Bewegungen durch Gleitbewegungen mit den Füßen initialisieren, welche dem echten Gehen sehr nahekommen. Zusätzlich sind währenddessen Drehungen um die vertikale Achse frei möglich.



ABBILDUNG 1 DIE VIRTUALIZER ELITE 2 TREADMILL VON CYBERITH.

Um diese Gleitbewegungen für die Nutzer einfacher zu gestalten, bietet der Virtualizer zudem die Möglichkeit, die Plattform, auf der der Nutzer steht, um festgelegte Winkel zu Neigen. Die Neigung passt sich dabei an die aktuelle Ausrichtung und Bewegungsrichtung des Nutzers an. Auf diese Weise können leicht beliebige Bewegungsgeschwindigkeiten erreicht werden, um etwa das Gehen oder Sprinten in der Realität widerzuspiegeln. Es werden aber nur Bewegungen in die Vorwärts- und

⁶ Cyberith GmbH - <https://www.cyberith.com/>

Rückwärtsrichtungen erkannt und somit muss sich der Nutzer stets durch Drehungen des ganzen Körpers ausrichten. Auch verschiedene Körperhaltungen werden bei Nutzung des Virtualizers ermöglicht, um z.B. Bewegungen im Stehen oder in einer geduckten Stellung zu erreichen. Dabei ist jedoch eine Limitation, dass sich die Nutzer aufgrund des Geräteaufbaus und der Halterung nicht Hinlegen können. Auch das Springen ist gerade aufgrund der potenziellen Neigung der Bodenplattform nicht zu empfehlen. Um die Virtualizer-Treadmill in die Unity-Anwendung zu integrieren, wurde das Cyberith-SDK für Unity verwendet, welches die Codeschnittstelle für diese bereitstellt.

Die visuelle Repräsentation der virtuellen Welt wird mithilfe des *VIVE Pro 2* VR-Headsets von HTC⁷ erreicht. Dieses HMD besitzt zwei LCD-Bildschirme, jeweils einen pro Auge, mit einer Auflösung von 2448 x 2448 Pixeln pro Bildschirm. Die Bildschirme unterstützen Aktualisierungsraten von sowohl 90 Hz als auch 120 Hz und ermöglichen dem Nutzer ein horizontales Sichtfeld von etwa 120 Grad in die virtuelle Umgebung. Für das Tracking der Kopfposition verwendet das Headset eine optische Tracking-Methode, die sogenannte *Base Stations* nutzt. Diese *Base Stations* sind externe Geräte, die nicht direkt mit dem Headset verbunden sind und fest in der Umgebung platziert werden müssen. Sie nutzen Infrarotlicht, um die Lage des Headsets und der Controller mit sechs Freiheitsgraden zu erfassen. Das *Vive Pro 2* HMD besitzt zudem auch inertielle Sensoren, um das optische Tracking zu unterstützen.



ABBILDUNG 2 DAS VERWENDETE VIVE PRO 2 HMD VON HTC.

⁷ HTC Corporation - <https://www.htc.com>

3 MOTION SICKNESS

Der Begriff Motion Sickness beschreibt eine Erkrankung, die in vielen verschiedenen Bereichen des Lebens auftreten kann. Im Alltag begegnet man ihr vor allem bei der Nutzung von Autos und anderen Fortbewegungsmitteln, wie etwa im Bus oder auf einem Boot. Es gibt aber auch andere Situationen, in denen die Krankheit vorkommt. Heutzutage ist insbesondere der Bereich der Virtual- und Augmented Reality-Anwendungen ein Gebiet, in dem man die Symptome und Beschwerden, die mit Motion Sickness in Verbindung stehen, häufig auffindet. Eine konkrete Definition für die Krankheit zu finden ist schwer, viele der existierenden Definitionen sind oft nicht zufriedenstellend und teils sehr vage gehalten. Aus diesem Grund wird häufig darauf zurückgegriffen, die Krankheit anhand der auftretenden Symptome zu beschreiben. (Graybiel, 1988, S. 44).

Die charakteristischen Symptome der Krankheit sind Übelkeit, Erbrechen, erhöhte Schweißproduktion, erhöhte Speichelbildung und Müdigkeit. (Dobie, 2019, S. 6, Gavvani et al., 2018, S. 1670, Kennedy et al., 1987, S. 9). Übelkeit spielt in der Regel die Hauptrolle bei den Symptomen und ist mit der Krankheit so eng verbunden, dass selbst der englische Begriff für Übelkeit (*Nausea*) von den griechischen Wörtern für Seefahrer (*nautes*) und Schiff (*naus*) abgeleitet wurde. (Kennedy et al., 2010, S. 495). Andere mögliche Symptome und Effekte sind Blässe, Schwindel und ein mulmiges Gefühl in der Magengegend, sowie Verwirrung und Kopfschmerzen. (Regan, 1995, S. 19, Golding, 2016, S. 371). Wie genau sich die einzelnen Symptome ausprägen, kann von Person zu Person signifikant variieren und ist von vielen verschiedenen Faktoren der vorliegenden Situation abhängig. Laut Graybiel (1988) ist das komplette Vermeiden der Symptome und damit der Krankheit in vielen Fällen nicht praktikabel oder auf realistische Weise umsetzbar, vor allem da es sehr aufwendig ist, die Symptome in kurzer Zeit loszuwerden, sobald sie sich etabliert haben (S. 44).

Die meisten Personen werden schon einmal in der Vergangenheit unter der Krankheit gelitten haben, da so gut wie jeder anfällig für Motion Sickness ist. (Oman, 1990, S. 294). Gerade im VR-Bereich kann der Anteil der beeinträchtigten Nutzer sehr hoch sein. Viele Studien berichten Erkrankungsraten, die zwischen 30% und 80% der Teilnehmer liegen. (Kennedy et al., 1987, S. 8, Rebenitsch et al., 2016, S. 101, Sharples et al., 2008, S. 66). Laut Stanney und Kennedy (1997) haben besonders sehr frühe Untersuchungen im VR-Bereich ausgesprochen hohe Erkrankungsraten aufgewiesen, die teilweise zwischen 90% und 95% der Probanden lagen (S. 66). Die hohen Erkrankungsraten dieser Studien können darauf zurückgeführt werden, dass die Technologie zu der Zeit noch in den Kinderschuhen gesteckt hat, jedoch ist auch heute noch das Auftreten von Motion Sickness und der damit assoziierten Symptome keine Seltenheit bei der Immersion in VR-Anwendungen.

Im Allgemeinen gibt es verschiedene Bezeichnungen für Motion Sickness, die versuchen die diversen Untertypen der Krankheit zu beschreiben. Im deutschsprachigen Raum ist die Krankheit vor allem unter den Begriffen *Reisekrankheit* oder *Reiseübelkeit* bekannt, jedoch kann argumentiert werden, dass die wortwörtliche Übersetzung *Bewegungskrankheit* besser geeignet ist, um die Symptome, das Konzept und die Natur der Krankheit widerzuspiegeln. Im englischsprachigen Raum sind die Bezeichnungen *Traveling Sickness*, *Car Sickness*, *Sea Sickness* und *Flight Sickness* geläufig, allerdings finden hinsichtlich Virtual Reality besonders die drei Begriffe *Simulator Sickness*, *Cybersickness* und *Visually Induced Motion Sickness* Anwendung.

In der Literatur gibt es keine einheitlichen Definitionen für diese Begriffe und Unterkategorien der Krankheit. Während Krankheitsbezeichnungen wie *Traveling Sickness* oder *Sea Sickness* sehr einleuchtend sind und direkt eine grundsätzliche Idee

darüber geben, was damit gemeint ist und in welchem Kontext sie genutzt werden, gibt es bei den Begriffen, die im Zusammenhang mit Virtual Reality Verwendung finden, unterschiedliche Meinungen und Interpretationen.

Simulator Sickness ist ein Begriff, der ursprünglich genutzt wurde, um die Form von Motion Sickness zu beschreiben, die bei der Nutzung von Flugsimulatoren im Militär auftritt. (Regan, 1995, S. 19). Heutzutage wird der Begriff jedoch auch sehr oft im Bereich der Virtual Reality genutzt. Manche Forscher sehen Simulator Sickness dabei als Untertyp der traditionellen Motion Sickness an (z.B. Gavvani et al., 2018, S. 1671), wohingegen andere einen grundlegenden Unterschied zwischen den Beiden sehen. Dieser Unterschied ist, dass Simulator Sickness eine rein visuell induzierte Krankheit sein kann und nur dann der echten Motion Sickness gleichzustellen ist, wenn der Simulator echte Bewegungen, zum Beispiel in der Form von bewegbaren Plattformen, integriert. (Kolasinski, 1995, S. 5, Kennedy et al., 1993, S. 204). Hinsichtlich ihrer Symptome sind sich die beiden Arten der Krankheit sehr ähnlich. (Kim et al., 2018, S. 67). Dennoch treten Symptome wie Erbrechen oder Würgereize bei Simulator Sickness seltener auf (Kennedy et al., 1992, S. 296) und auch die allgemeine Stärke der Symptome ist in der Regel niedriger. (Hettinger et al., 1990, S. 171).

Der Begriff *Cybersickness* wird, ähnlich wie Simulator Sickness, für das Beschreiben einer Unterkategorie von Motion Sickness genutzt. Genauer genommen, wird der Begriff als Bezeichnung der Krankheit in VR-Anwendungen verwendet. (Gavvani et al., 2018, S. 1670). Manche Forscher sehen Cybersickness aber nicht als direkte Unterkategorie der traditionellen Motion Sickness, sondern als Unterkategorie der Simulator Sickness (z.B. Kim et al., 2018, S. 70, Kemeny et al., 2020, S. 48). Aber auch hier spalten sich die Meinungen wieder, da es auch die Ansicht gibt, dass sich die Symptome von Cybersickness bedeutend von den Symptomen von Simulator Sickness unterscheiden. (Stanney et al., 1997, S. 1140, Cobb et al., 1999, S. 184).

In der Literatur werden die beiden Begriffe dennoch sehr häufig als Synonyme verwendet und es wird leicht offensichtlich, dass es keine einheitliche Differenzierung gibt. Spezifische Definitionen für die Begriffe zu finden, mit denen die Mehrheit der Forscher einverstanden ist, erweist sich als schwierig und oft sind die existierenden Definitionen sehr vage gehalten. Im Großteil der Definitionen und Beschreibungen kann man daher die beiden Begriffe ohne Probleme miteinander austauschen, insbesondere in der heutigen Zeit, in der es schwer ist, eine sinnvolle Abgrenzung zwischen Simulatoren und Virtual Reality-Anwendungen aufzustellen. Zudem kann man argumentieren, dass diese beiden Bezeichnungen in den meisten Fällen das gleiche Krankheitsbild beschreiben. Die Abgrenzung anhand der Präsenz physischer Bewegung kann hierbei auch nicht zuverlässig verwendet werden, da heutzutage nicht nur Simulatoren die Imitation von physischen Bewegungen integrieren, sondern es durchaus auch VR-Anwendungen gibt, die geeignete Hardware nutzen, um realistische Bewegungen zu simulieren.

Die Unterscheidung der verschiedenen Motion Sickness-Kategorien anhand der verwendeten Hardware oder des Anwendungskontextes, in dem sie auftreten, ist daher nicht sehr verlässlich und hängt in den meisten Fällen stark von der vorliegenden Situation, sowie der Interpretation des Betrachters ab. In den meisten Fällen ist der Hauptunterschied zwischen traditioneller Motion Sickness und der Art von Krankheit, die bei der Verwendung von VR-Anwendungen und Simulatoren auftritt, die Existenz bzw. die Abwesenheit von physikalischen Bewegungen. Sowohl Simulator Sickness als auch Cybersickness können durch rein-visuelle Stimulation ausgelöst werden, dennoch kann die Präsenz von künstlicher Bewegungssimulation zu ihnen beitragen. Anstatt zwischen Motion Sickness, Simulator Sickness und Cybersickness zu unterscheiden, ist es daher vielleicht eine bessere Idee, insbesondere in Hinsicht auf die Symptome, lediglich zwischen traditioneller Motion Sickness, welcher hauptsächlich physikalische Bewegungen im Zusammenspiel mit visueller Stimulation zugrunde liegen, und

Visually Induced Motion Sickness (VIMS), welche durch eine rein visuelle Stimulation hervorgerufen wird, zu differenzieren. Motion Sickness in Virtual Reality fällt aufgrund des primär visuellen Stimulus vor allem in die Kategorie von VIMS, kann aber, abhängig von der verwendeten Hardware, als Teil beider Kategorien angesehen werden. Diese und ähnliche Arten der Einteilung finden sich auch öfters in der Literatur wieder, wie etwa in der Arbeit von Keshavarz et al. (2015).

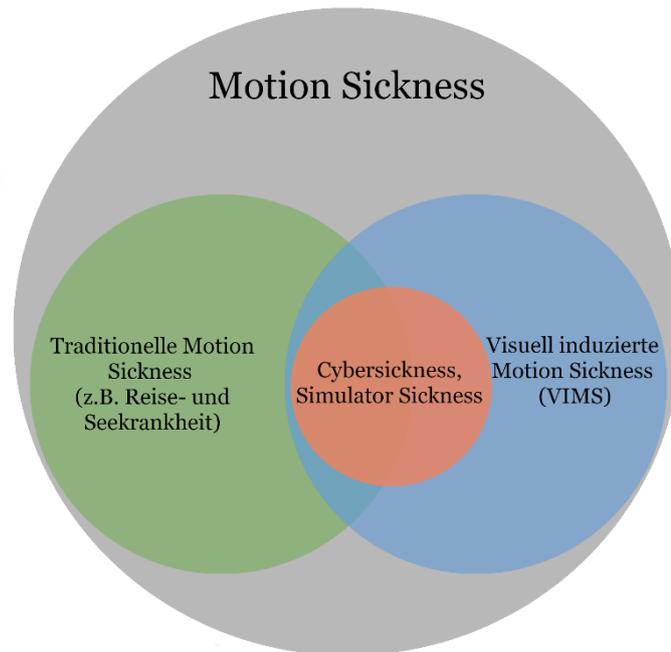


ABBILDUNG 3 DIE EINTEILUNG DER VERSCHIEDENEN MOTION SICKNESS-KATEGORIEN IN DIESER ARBEIT.

Ob die Art von Motion Sickness, die z.B. während einer Schifffahrt auftritt und die Motion Sickness, unter der die Nutzer von VR-Anwendungen leiden, grundsätzlich die exakt gleiche klinische Krankheit darstellen, ist dennoch eine offene Frage. (Gavgani et al., 2018, S. 1671). Es gibt Studien, die darauf hinweisen, dass dies jedoch der Fall ist. Beispielsweise zeigen die Ergebnisse von Gavgani et al. (2018), dass sowohl die Sensitivität als auch die Stärke und Art der Symptome eng zwischen den beiden Varianten korrelieren (S. 1675). Ihre Schlussfolgerung ist daher, dass es sich dabei tatsächlich um die gleiche klinische Krankheit handelt (S. 1679). Da es keine weit anerkannten Definitionen für die einzelnen Unterkategorien der Krankheit gibt und die Symptome sich sehr stark ähneln, wird im Rest dieser Arbeit daher einfach der Begriff *Motion Sickness* genutzt, um jegliche Formen der Krankheit zu referenzieren.

3.1 BIOLOGISCHE GRUNDLAGEN

Hinsichtlich der Ursachen der Krankheit gibt es zwar einige Theorien, aber keinen allgemeinen Konsensus dafür, wieso die Krankheit überhaupt im Menschen auftritt. (Nesbitt & Nalivaiko, 2018, S. 2). Um diese Theorien besser beurteilen zu können, ist es wichtig zuerst die Grundlagen und Mechanismen hinter den, für die Krankheit relevanten, biologischen Sinnesorganen zu verstehen. In Bezug auf Motion Sickness sind besonders die Mechanismen wichtig, die für die Registrierung von Bewegungsinformationen des Körpers verantwortlich sind. Wie Kemeny et al. (2020) erläutern, gibt es im Zusammenhang mit den Theorien insgesamt vier biologische Sinnesorgane, die solche Informationen liefern. Das sind zum einen die

Otolithenorgane und die drei Bogengänge des inneren Ohrs, welche es einer Person ermöglichen, lineare Beschleunigung und die Neigung des Kopfes anhand der Schwerkraft, sowie Änderungen der Drehgeschwindigkeit des Kopfes zu erfassen und damit die Balance zu halten. Zum anderen sind auch das Sehsystem in Form der Augen, welche visuelle Informationen und Hinweise über die Lage des Körpers liefern, und die Propriozeption, die die Position der Gliedmaßen des Körpers wiedergibt, involviert. (Kemeny et al., 2020, S. 49).

3.1.1 DAS VESTIBULÄRE SYSTEM

Die Otolithenorgane und Bogengänge des inneren Ohrs sind Komponenten des vestibulären Systems des Menschen. Der vordere, seitliche und hintere Bogengang sind jeweils so angeordnet, dass sie alle Bewegungsrichtungen abdecken. Jeder der Bogengänge ist daher für das Detektieren von Bewegungen entlang einer Achse im dreidimensionalen Raum verantwortlich. (LaViola, 2020, S. 49). Man kann sich das Ganze also sehr analog zu den X-, Y- und Z-Achsen eines Koordinatensystems vorstellen, in dem die einzelnen Achsen jeweils senkrecht zueinander stehen. Anhand dieser Achsen können die Neigungen nach oben und unten, rechts und links, sowie Neigungen in die Seitwärtsrichtungen registriert werden. Jeder der drei Bogengänge hat die Form eines halbkreisförmigen Kanals und ist mit einer dickflüssigen Flüssigkeit, der sogenannten *Endolymphe*, gefüllt. Bei Kopfbewegungen interagiert diese Flüssigkeit aufgrund ihrer Trägheit mit den Sinneshärchen spezieller Haarzellen, die sich am Ende des jeweiligen Bogenganges befinden und wiederum anhand dessen Informationen über die Änderungen der Drehgeschwindigkeit des Kopfes an das Gehirn senden. (LaViola, 2020, S. 49, Kemeny et al., 2020, S. 38).

Die Otolithenorgane *Sacculus* und *Utriculus* besitzen im Vergleich zu den Bogengängen viel geringere Reaktionszeiten. Sie sind jeweils senkrecht und waagrecht im Innenohr angeordnet, um vertikale und horizontale Beschleunigungen zu identifizieren. Wie die Bogengänge, beinhalten auch sie feine Sinneshärchen die sich in einem Bereich, der sogenannten *Makula*, befinden, weshalb die Otolithenorgane auch als Makulaorgane bezeichnet werden. Diese feinen Sinneshärchen erstrecken sich in eine gallertartige Membran, hinter der sich sehr kleine Kalziumkarbonatkristalle, die Otolithen, befinden. Bei Bewegungen des Kopfes werden die Spitzen der Sinneshärchen durch die Trägheit der Otolithen beeinflusst, was eine Anregung der Otolithenorgane auslöst und damit Beschleunigung registriert. (Kemeny et al., 2020, S. 38f).

Die vestibulären Organe im linken und rechten Innenohr sind jeweils das symmetrische Spiegelbild der anderen Seite und, unter normalen Bedingungen, sollten sich die beiden Seiten hinsichtlich ihrer Aussage über die Lage des Kopfes im Einklang befinden. In dem Fall, dass die resultierenden Informationen der Otolithen und Bogengänge im linken und rechten inneren Ohr nicht übereinstimmen, treten unangenehme Symptome, wie etwa Schwindelgefühle und Gleichgewichtsstörungen, auf. (LaViola, 2020, S. 49). Eine weitere wichtige Eigenschaft des vestibulären Systems ist, dass die Registrierung von Bewegungsinformationen, sowohl durch die Otolithenorgane als auch durch die Bogengänge, nur dann stattfindet, wenn es Änderungen in der Geschwindigkeit gibt. (Bonato et al., 2008, S. 284, Reason, 1978, S. 820). Das bedeutet also, dass keine Bewegung des Kopfes wahrgenommen wird, wenn eine Positions- oder Orientierungsänderung mit konstanter Geschwindigkeit stattfindet. Kemeny et al. (2020) beschreiben den Vestibularapparat daher passend als inertielle Messeinheit, die Informationen zu der Beschleunigung, Neigung und Rotation des Kopfes liefert (S. 39). Darüber hinaus gibt LaViola (2000) ein gutes Beispiel für das Auftreten dieser Limitation im Alltag: Wenn man sich als Passagier in einem Auto befindet, kann man die Bewegung des Fahrzeugs sehr leicht wahrnehmen solange der Fahrer beschleunigt. Sobald jedoch eine konstante Geschwindigkeit erreicht wird,

stabilisieren sich die Otolithenorgane im Innenohr und die wahrgenommene Bewegung durch das vestibuläre System verschwindet. (LaViola, 2000, S. 49).

Da das vestibuläre System im Innenohr des Menschen für einen signifikanten Teil der Informationen über die Lage des Kopfes im dreidimensionalen Raum verantwortlich ist und indirekt auch Informationen zu der allgemeinen Lage des gesamten Körpers liefert, spielt es eine zentrale Rolle für Motion Sickness. Das vestibuläre System ist tatsächlich so relevant für die Krankheit, dass ein Defekt in den vestibulären Organen zur kompletten Immunität gegenüber der Krankheit führt. In der Regel ist dies auch der einzige Weg, eine vollständige Immunität zu erreichen, da ansonsten die Symptome und Charakteristika der Krankheit immer auftreten, solange der entsprechende Stimulus stark genug ist. (Graybiel, 1988, S. 44, Treisman, 1977, S. 495).

3.1.2 DAS VISUELLE SYSTEM

Bei der Nutzung von Virtual Reality sind laut Kemeny et al. (2020) besonders die räumliche Wahrnehmung in der Form von Geschwindigkeits- und Distanzwahrnehmung, sowie das Beobachten der Umwelt und das Orientieren der Augen anhand dessen, relevant für die allgemeine visuelle Wahrnehmung (S. 32). Das Zusammenspiel der Informationen, die durch die Anpassung der Linsen in den Augen und die Orientierung der beiden Augäpfel zueinander erhalten werden, stellt hierbei ein zentrales Problem für die korrekte visuelle Wahrnehmung der virtuellen Welt mit der heutigen VR-Technologie dar (S. 32f).

Sowohl das Scharfstellen der realen und virtuellen Objekte im Sichtfeld durch die Linsen, bezeichnet als *Akkommodation* der Augen, als auch das Orientieren der Augen basierend auf dem momentan fokussierten Objekt, als *Vergenz* bezeichnet, erlauben es, die Distanz von Objekten im Sichtfeld des Betrachters abzuschätzen. Zum Beispiel führt das Fokussieren eines Objekts, das sich sehr nahe im Sichtfeld des Betrachters befindet, dazu, dass sich die Augen jeweils leicht nach innen, also in Richtung der Nase, drehen. Diese entgegengesetzte Rotation der Augäpfel sorgt dafür, dass das binokulare Sehen als Teil der Tiefenwahrnehmung korrekt erhalten bleibt. Ähnlich dazu passt sich die Krümmung der Linsen anhand der Distanz zu dem beobachteten Objekt an. Zwischen der Akkommodation und der Vergenz der Augen gibt es zudem eine neurale Kopplung, was dazu führt, dass die beiden Mechanismen einen direkten Einfluss aufeinander haben. (Shibata et al., 2011, S. 1f).

Bei der Nutzung von VR-Anwendungen tritt ein Konflikt zwischen diesen biologischen Mechanismen auf, der der aktuell genutzten VR-Technologie inhärent ist. Die visuelle Darstellung der virtuellen Welt wird heutzutage meistens durch Wiedergabe der computergenerierten Szenerie auf Bildschirmen, die jedem Auge ein eigenes Bild zeigen, erreicht. Diese Art der Präsentation erzeugt glaubhafte Tiefeneffekte, jedoch ist es dadurch dem Betrachter nicht immer möglich, übereinstimmende Distanzinformationen von den beiden Mechanismen zu erhalten. Wie Kemeny et al. (2020) erwähnen, ist das der Fall, wenn die Anpassung der Augenlinsen anhand des Bildschirms durchgeführt wird und nicht anhand des virtuellen Objekts, das der Betrachter eigentlich fokussiert (S. 34). Dadurch liefert die Akkommodation die reale Distanz zwischen den Augen und dem Bildschirm, auf dem die virtuelle Szenerie abgebildet ist, während die Vergenz die simulierte Distanz zwischen den Augen und dem fokussierten virtuellen Objekt berichtet. Dieser Konflikt wird auch als Vergenz-Akkommodations Konflikt bezeichnet und, um Effekte wie doppeltes Sehen zu vermeiden, muss der Betrachter der neutralen Kopplung der beiden Mechanismen entgegenwirken, was ein Auslöser für mehrere, in Verbindung mit den Augen auftretende Motion Sickness-Symptome sein kann. (Shibata et al., 2011, S. 2).

Die für Motion Sickness in Virtual Reality relevanten Eigenschaften des menschlichen Auges werden von Kemeny et al. (2020) gut erklärt. Die Augen ermöglichen dem

Menschen ein horizontales Sichtfeld von etwa 200 bis 220 Grad und ein vertikales Sichtfeld von 130 bis 135 Grad, wobei rund 120 Grad des horizontalen Sichtfelds von beiden Augen abgedeckt werden. Um das Sehen zu ermöglichen, gibt es verschiedene Zellen innerhalb des Auges. Die Grundlage hierfür sind die Fotorezeptoren der Netzhaut, die sogenannten Zapfen und Stäbchen. Die Zapfen sind für das Sehen von Farbe verantwortlich, während die Stäbchen für Helligkeitsinformationen bzw. Schwarz-Weiß-Sehen (z.B. in der Nacht) zuständig sind. Zapfen können verteilt über die ganze Netzhaut aufgefunden werden, jedoch findet man sie vermehrt in der Nähe der Fovea (dem Bereich des schärfsten Sehens) und nur selten in den Außenbereichen der Netzhaut. Im Gegensatz hierzu sind die Stäbchen vermehrt in der Peripherie der Netzhaut und kaum in Bereich der zentralen Retina auffindbar. (Kemeny et al., 2020, S. 34). Wie von Kemeny et al. (2020) weiter erklärt wird, gibt es neben den Fotorezeptoren auch noch andere Zellen in der Retina, die besonders für die visuelle Wahrnehmung von Bewegungen in VR relevant sind. Diese Zellen sind die M- und P-Zellen, sogenannte Ganglienzellen, die ähnlich wie die Zapfen und Stäbchen angeordnet sind. Die P-Zellen können verstärkt in dem Bereich um die Fovea aufgefunden werden und sind für das Erkennen von Details und der Form von Objekten zuständig. Im Kontrast dazu sind die M-Zellen für das Erkennen von Bewegungen verantwortlich und man findet sie hauptsächlich in der Peripherie der Retina. (Kemeny et al., 2020, S. 35f).

3.1.3 VEKTION

Bei der Nutzung von Virtual Reality kommt es oft vor, dass der Nutzer das Gefühl hat, sich aufgrund der visuellen Darstellung der virtuellen Szenerie zu bewegen, obwohl er in der realen Welt stationär ist und keinerlei aktive Bewegungskräfte auf ihn einwirken. (Budhiraja et al., 2017, S. 1). Dieses Phänomen wird in der Literatur als *Vektion* (engl. *Vection*) bezeichnet und regelmäßig im Zusammenhang mit Motion Sickness im VR-Bereich erwähnt. Im Alltag kann man Vektion beispielsweise beim Sitzen in einem stillstehenden Zug erfahren, wenn man einen anderen Zug beobachtet, der auf der anliegenden Schiene vorbeifährt. Aufgrund der visuellen Reize kann man dabei das Gefühl haben, dass sich der eigene Zug bewegt. (Trutoiu et al., 2009, S. 47). Vektion spielt eine sehr relevante Rolle im visuellen Teil der Motion Sickness und tritt in der Regel im Zusammenhang mit der Krankheit auf. (Budhiraja et al., 2017, S. 1). Grundsätzlich wird ein stärkeres Erfahren von Vektion mit einem höheren Maß an Motion Sickness verbunden. (Hettinger & Riccio, 1992, S. 308, Risi & Palmisano, 2019, S. 15). Dieser Zusammenhang führt auch dazu, dass Vektion von manchen Forschern als Ersatz für das Untersuchen von Motion Sickness angesehen wird. (Webb & Griffin, 2003, S. 622). Das Einbilden von illusionären Eigenbewegungen kann zwar auftreten, ohne dass die betroffene Person jegliche Symptome von Motion Sickness aufzeigt, jedoch ist die Frage, ob Motion Sickness auftreten kann, ohne dass dabei Vektion in irgendeiner Form involviert ist, noch offen. (Keshavarz et al., 2015, S. 2).

Zwei wichtige Faktoren für das Auslösen von Vektion in VR-Anwendungen sind die Breite des Sichtfelds und die auftretende optische Flussrate bzw. auftretenden optischen Flussmuster. (LaViola, 2000, S. 49, Hettinger & Riccio, 1992, S. 308). Die Breite des Sichtfelds ist relevant, da die Augen aufgrund der Verteilung der spezialisierten Zellen auf der Netzhaut Bewegungen vermehrt in der Peripherie des Sichtfelds wahrnehmen. Ein breiteres Sichtfeld sorgt natürlicherweise dafür, dass ein größerer Anteil der visuellen Bewegungen in den Bereich der Peripherie fällt, was wiederum zu mehr Vektion führen kann. (Webb & Griffin, 2003, S. 625). Der Zusammenhang zwischen Vektion und der Größe des Sichtfelds stellt daher oft einen zentralen Forschungspunkt in vielen veröffentlichten Arbeiten dar. Optischer Fluss ist nach Gemert und Bergstrom (2021) als die wahrgenommene Bewegung von Lichtmustern (d.h. der gesehenen virtuellen Umgebung) definierbar (S. 381). Laut LaViola (2000) führt eine höhere optische Flussrate zur Wahrnehmung einer höheren

Bewegungsgeschwindigkeit, wodurch die eingebildete Eigenbewegung intensiver wird (S. 49).

Nach Trutoiu et al. (2009) unterscheidet man normalerweise zwischen der linearen Vektion (engl. *Linear Vection*), die den Eindruck einer Translation in eine gegebene Richtung gibt, und der zirkulären Vektion (engl. *Circular Vection*), die den Anschein einer Rotationsbewegung vermittelt. Dabei ist zirkuläre Vektion in der Regel überzeugender als lineare Vektion und kann leicht gezielt ausgelöst werden. (Trutoiu et al., 2009, S. 47).

Darüber hinaus kategorisieren Bonato et al. (2008) Vektion in zwei weitere Untertypen, nämlich die *stetige Vektion* (engl. *steady Vection*) und *unstetige Vektion* (engl. *changing Vection*). Stetige Vektion bezeichnet hierbei das Einbilden einer Bewegung, die sich weder in ihrer Richtung noch in ihrer Geschwindigkeit über die Zeit verändert. Unstetige Vektion ist das Gegenteil der stetigen Vektion, sie kann also über ihren zeitlichen Verlauf sowohl in der wahrgenommenen Bewegungsrichtung als auch der registrierten Bewegungsgeschwindigkeit variieren. (Bonato et al., 2008, S. 284). Beide dieser Arten von Vektion können grundsätzlich in den gleichen Situationen auftreten (z.B. beim Autofahren), unstetige Vektion kann jedoch wahrscheinlicher zu stärkerer Motion Sickness führen. (Bonato et al., 2008, S. 291).

Die Informationen, die durch das visuelle und vestibuläre System bei stetiger Vektion geliefert werden, sind normalerweise sehr ähnlich zu den Informationen, die die Systeme bei einer echten stetigen Bewegung liefern. Das visuelle System berichtet in beiden Fällen die gleichen Informationen und da das vestibuläre System hauptsächlich auf Änderungen in der Richtung oder Geschwindigkeit reagiert (welche bei stetiger Vektion nicht auftreten), stimmen auch die Signale des vestibulären Systems in beiden Fällen größtenteils überein. (Bonato et al., 2008, S. 284). Hinsichtlich des visuellen Systems ist es sehr ähnlich bei der unstetigen Vektion, jedoch unterscheiden sich hier die Signale des vestibulären Systems oftmals signifikant. Die auftretenden Änderungen in der Richtung oder Geschwindigkeit werden durch den Vestibularapparat wahrgenommen, was zu einem Konflikt zwischen den Sinnessignalen führt, wenn es sich um einen rein-visuellen Stimulus handelt. Bonato et al. (2008) veranschaulichen diesen Unterschied anhand der Reise in einem Fahrzeug: Wenn man sich in einem Fahrzeug befindet, das mit einer stetigen Geschwindigkeit unterwegs ist und dabei keine Richtungsänderungen vollzieht, kann man, solange man seine Augen schließt und seinen Kopf gerade hält, keine Bewegung aufgrund des visuellen und vestibulären Systems wahrnehmen. Das Abbremsen, Beschleunigen oder Ändern der Bewegungsrichtung des Fahrzeugs, während die Augen geschlossen sind, ist hingegen durch das vestibuläre System, unabhängig von den vorhandenen visuellen Informationen, leicht erkennbar. (Bonato et al., 2008, S. 284).

3.2 THEORIEN

Die drei am häufigsten in der Literatur erwähnten Theorien über die Ursachen von Motion Sickness sind die *Sensory Conflict Theory*, die *Postural Instability Theory* und die *Rest Frame Theory*. Besonders die Sensory Conflict Theory ist dabei sehr beliebt. Diese Theorien schließen sich nicht notwendigerweise gegenseitig aus, sondern können sich untereinander komplementieren und gemeinsame Anwendung finden. (Keshavarz et al., 2015, S. 2). Obwohl diese Theorien erklären, weshalb die Krankheit auftritt, können sie dennoch in der Regel nicht genutzt werden, um vorherzusagen, wie stark die Krankheit auftreten wird und warum die Ausprägungen der Krankheit stark zwischen Individuen variieren. (Regan, 1995, S. 20, Nesbitt & Nalivaiko, 2018, S. 2).

3.2.1 SENSORY CONFLICT THEORY

Die Sensory Conflict Theory wurde das erste Mal von Reason und Brand im Jahr 1975 präsentiert (Kemeny et al., 2020, S. 51, Regan, 1995, S. 20) und ist heute die meist anerkannte Theorie. Sie besagt, dass Motion Sickness dann auftritt, wenn es einen Widerspruch zwischen den beteiligten körperlichen Sinnen gibt und die von ihnen erhaltenen Informationen daher nicht erfolgreich interpretiert werden können. (LaViola, 2000, S. 50). Insbesondere sind hierbei der visuelle und vestibuläre Sinn beteiligt, jedoch spielt auch die allgemeine Propriozeption eine Rolle. (Kemeny et al., 2020, S. 5, Gavgani et al., 2018, S. 1671). Solche Konflikte kommen gerade dann vor, wenn die erhaltenen Sinnesinformationen nicht in Übereinstimmung mit den gewohnten Signalen sind, welche die Person aufgrund ihrer vorherigen Erfahrungen erwartet. (LaViola, 2000, S. 50). LaViola (2000) stellt hierfür ein gutes Beispiel bereit, dass dieses Konzept gut im Kontext einer VR-Fahrzeugsimulation erklärt (S. 50):

As the subject uses the simulation, the optical flow patterns of the road, buildings, and other parts of the environment move past the subject's periphery which gives him/her a sense ofvection. The visual system tells the subject a variety of information which includes that he/she is moving in a certain direction, accelerating when pressing the gas pedal and decelerating when pressing the brake. However, since the subject is not actually moving, the vestibular sense provides no sense of linear or angular acceleration or deceleration. Under normal physical driving conditions, the subject has both the vestibular and visual systems providing information and, as a result, this is the perception that the subject expects to have. When the subject does not get the expected response, a conflict occurs and cybersickness may ensue.

In anderen Worten tritt Motion Sickness in Virtual Reality laut der Theorie also auf, wenn das, was der Nutzer in der virtuellen Welt sieht, nicht mit den Informationen übereinstimmt, die ihm von seinem Körper in der echten Welt, hauptsächlich durch das vestibuläre System, bereitgestellt werden.

Reine Bewegungen des Kopfes stellen mit der heutigen Tracking-Technologie der verfügbaren VR-Headsets in der Regel kein Problem dar, da die vestibulären Organe des Nutzers die korrekten Signale aufgrund der echten Bewegung liefern und diese mit dem visuellen Stimulus durch die virtuelle Welt in Einklang gebracht werden können. Vollständig künstliche Änderungen der Lage des virtuellen Charakters oder der Kameraposition führen hingegen nur zu den richtigen Signalen für das visuelle System. Die vestibulären Organe stellen in diesem Fall keinerlei Bewegung fest, was nicht korrekt interpretiert werden kann und daher zu einem Konflikt führt, der Motion Sickness auslöst.

Cobb et al. (1999) und Reason (1978) teilen diese Konflikte in zwei Gruppen ein, die jeweils auf drei verschiedene Weisen ausgelöst werden können. Bei den Konflikten kann es sich dabei entweder um visuell-vestibuläre Konflikte (zwischen den visuellen und vestibulären Sinnen) oder um rein-vestibuläre Konflikte (zwischen den Bogengängen und Otholithenorganen des Innenohrs) handeln. (Cobb et al, 1999, S. 170, Reason, 1978, S. 820). Traditionelle Motion Sickness (z.B. Reisekrankheit) und die Art von Motion Sickness, die man bei der Nutzung von Virtual Reality erfährt, treten aufgrund von visuell-vestibulären Konflikten auf, da dort visuelle Informationen geliefert werden, die nicht mit den Informationen des vestibulären Systems übereinstimmen. Konflikte zwischen den vestibulären Organen treten beispielsweise bei Astronauten während der Raumfahrt auf. Hier ist die Funktionsweise der Otholithenorgane stark eingeschränkt, da es in dieser Situation keinen Einfluss der Schwerkraft gibt. Die Bogengänge funktionieren jedoch weiterhin einwandfrei und liefern die korrekten Signale, was zu einem Konflikt führt. (Regan, 1995, S. 20). Anhand der Konflikte zwischen dem visuellen Sinn (**A**) und dem vestibulären Sinn (**B**)

können die drei grundsätzlichen Situationen, in denen sie auftreten, wie folgt zusammengefasst werden (Reason, 1978, S. 820f):

- **A** und **B** berichten beide eine Bewegung, die aber nicht miteinander übereinstimmt (z.B. durch das Schauen aus dem Fenster eines sich bewegenden Fahrzeugs)
- **A** berichtet eine Bewegung, **B** jedoch nicht (z.B. bei der Nutzung einer VR-Anwendung)
- **A** berichtet keine Bewegung, **B** aber schon (z.B. beim Lesen eines Buchs, während man sich in einem fahrenden Auto befindet)

Auch wenn hier die zweite Situation in der Regel der Hauptauslöser der Krankheit bei der Nutzung von VR ist, kann durchaus argumentiert werden, dass ein Konflikt auch aufgrund der dritten Situation oder einer Kombination der Beiden auftreten kann. (Cobb et al., 1999, S. 184). Beispielsweise könnte die dritte Situation auftreten, wenn Bewegungen des Kopfes nur bedingt oder überhaupt nicht (etwa durch Fehler in der Positionserfassung des VR-Headsets) in der virtuellen Welt widergespiegelt werden. In jeder der drei Situationen spielt das vestibuläre System eine zentrale Rolle, da immer entweder die Informationen des gesamten Systems oder die Informationen der einzelnen vestibulären Organe involviert sind. Damit kann die Immunität gegenüber Motion Sickness bei defekten vestibulären Organen erklärt werden. Wenn das gesamte vestibuläre System defekt ist, liefert dies auch außerhalb von Situation, die Motion Sickness erzeugen, keine Signale, die von dem Gehirn interpretiert werden können. Da dies also den Normalfall für die betroffene Person darstellt, kann daher kein Konflikt in provokativen Situationen entstehen, bei dem das vestibuläre System beteiligt ist.

Auch wenn die Sensory Conflict Theory in der Lage ist, einen Großteil der auftretenden Effekte von Motion Sickness zu erklären und eine gute Grundlage bereitstellt, um die Krankheit weiter zu erforschen, gibt es einige Probleme mit dieser Theorie, die von LaViola (2020) aufgelistet werden. Wie schon kurz erwähnt, kann anhand der Theorie nicht vorhergesagt werden, ob sich in einer bestimmten Situation garantiert Krankheitssymptome ausprägen werden oder wie stark die Krankheit auftritt. Zudem berücksichtigt die Theorie nicht alle der Faktoren, die eine Rolle bei dem Entstehen von Motion Sickness spielen und sie gibt zusätzlich keine Begründung dafür, wieso manche Personen in einer vorgegebenen Situation mit den exakt gleichen visuellen und vestibulären Reizen Ausprägungen der Krankheit aufweisen, während sich bei anderen Personen hingegen gar keine Symptome ausbilden. Des Weiteren gibt die Erklärung der Krankheit anhand von Konflikten zwischen den körperlichen Sinnen zwar eine gute Erläuterung, wie Motion Sickness aufgrund dessen auftritt und welche biologischen Mechanismen verantwortlich sind, aber sie gibt dennoch keine Rechtfertigung dafür, warum die Sinneskonflikte überhaupt zu den Symptomen im Menschen führen. (LaViola, 2020, S. 51).

3.2.2 POSTURAL INSTABILITY THEORY

Eine weitere beliebte Theorie für die Ursache von Motion Sickness ist die sogenannte Postural Instability Theory, manchmal auch als Ecological Theory bezeichnet. Diese Theorie wurde 1991 von Riccio und Stoffregen vorgestellt und fokussiert sich, wie der Name schon vermuten lässt, vorwiegend auf das Konzept von instabiler Körperhaltung als möglicher Auslöser von Motion Sickness. Die grundsätzliche Hypothese dieser Theorie ist, dass eine anhaltende, instabile Körperhaltung, bei der die Kontrolle über die Haltung des Körpers nicht erreicht werden kann, zu den Symptomen der Krankheit führt. (Riccio & Stoffregen, 1991, S. 196). Ein Hauptziel des menschlichen Verhaltens ist es, eine stabile Körperhaltung zu erhalten (LaViola, 2000, S. 51), wobei eine instabile Körperhaltung als Zustand definiert ist, der eine Minimierung der unkontrollierten Bewegungen in Bezug auf die Aktions- und Wahrnehmungssysteme

des Körpers hervorruft. (Ricchio & Stoffregen, 1991, S. 202). Ricchio und Stoffregen (1991) haben ihre Theorie entwickelt, um der Sensory Conflict Theory zu widersprechen, da sie der Meinung sind, dass Sinneskonflikte nicht den Auslöser von Motion Sickness darstellen (S. 197). Hierzu treffen Ricchio und Stoffregen (1991) die folgende Aussage (S. 199):

Sensory conflict theory implies that there is something wrong with sensory stimulation in provocative situations. Our analysis implies that the accuracy or utility of stimulation is no different in provocative situations than it is in nonprovocative situations. The locus of the "problem" in motion sickness must be sought elsewhere.

Sie basieren ihre Meinung auf dem Argument, dass es eine Redundanz an Informationen gibt, wenn die Signale von mehreren involvierten Sinnen (z.B. des visuellen Systems und des vestibulären Systems) miteinander übereinstimmen. Diese Redundanz liegt jedoch nicht vor, wenn sich die beiden Sinne widersprechen. Die Abwesenheit der Redundanz führt aber nicht immer zu Krankheitssymptomen, was durch die Sensory Conflict Theory nicht erklärt werden kann. (Ricchio & Stoffregen, 1991, S. 196ff). In der Ansicht von Ricchio und Stoffregen (1991) stellen die nicht-redundanten Informationen zwischen den einzelnen Sinnen eher eine komplementäre Beziehung als eine Quelle für einen wirklichen Konflikt dar. Sie sind daher der Meinung, dass widersprechende Signale zwischen zwei Sinnessystemen keinen Konflikt erzeugen, der gelöst werden muss, sondern stattdessen lediglich wahrheitsgemäße Informationen über die Umwelt des Individuums liefern. (Ricchio & Stoffregen, 1991, S. 197f).

Die Interaktionen zwischen einem Individuum und dessen Umwelt werden bei dieser Theorie als geschlossenes System betrachtet, bei dem das Verhältnis zwischen dem Individuum und der Umgebung von dem Verhalten der betroffenen Person abhängt, aber das resultierende Verhältnis auch wieder einen direkten Einfluss auf das Verhalten haben kann. (Ricchio & Stoffregen, 1991, S. 196f). Bei der Interaktion mit der Umwelt spielen viele unterschiedliche Faktoren eine Rolle, wobei die Faktoren auch stark von der spezifischen Umgebung abhängen. Die Kontrolle über die Körperhaltung ist in allen möglichen Umgebungen jedoch von besonderer Bedeutung, da alle anderen Interaktionen von dieser abhängig sind. (Ricchio & Stoffregen, 1991, S. 199). Wie von Ricchio und Stoffregen (1991) erklärt wird, haben hier unterschiedliche Umgebungen verschiedene Anforderungen an die Kontrolle der Körperhaltung. Beispielsweise kann man sich im Winter auf einer gefrorenen Oberfläche, auf der man leicht ausrutscht, nicht auf die gleiche Weise bewegen, wie auf einem normalen Untergrund (S. 200). Um die Kontrolle über die Körperhaltung in solchen Situationen zu behalten, wird zum einen Aufwand von Seiten des Individuums benötigt, um die Anpassung an die aktuelle Lage umzusetzen, zum anderen muss aber auch eine Strategie zum Erhalten der Haltungskontrolle erlernt worden sein. Ist dies nicht der Fall oder sind die Änderungen in der Kontrolle entweder zu abrupt oder zu groß, kann es sein, dass die Kontrolle über die Körperhaltung komplett verloren geht (S. 201f). Im Beispiel der gefrorenen Oberfläche würde dies etwa bedeuten, dass die Person hinfällt. Laut der Theorie von Ricchio und Stoffregen (1991) findet hierbei ein direkter Übergang zwischen einer Situation, die Kontrolle über die Haltung erfordert, und einer Situation, die keine Kontrolle benötigt, statt (S. 202). Nach dem Ausrutschen und Hinfallen befindet man sich beispielsweise in einer liegenden Lage; eine Situation, bei der die Stabilität der Körperhaltung gegeben ist.

Ist die Änderung nicht schlagartig oder zu groß, kann ein Zustand von instabiler Körperhaltung erreicht werden. Ricchio und Stoffregen (1991) sind der Meinung, dass ein solcher Zustand, sofern er lange genug anhält, zu Motion Sickness führen kann. Laut ihnen ist eine instabile Körperhaltung nicht nur ein möglicher Auslöser von Motion Sickness, sondern ein grundsätzlich erforderliches Kriterium für die Krankheit,

dass die Wahrscheinlichkeit für das Auftreten und die Stärke der Symptomausprägung direkt beeinflusst und in der Regel der Krankheit vorhergeht. Das Auftreten von Symptomen findet jedoch nicht statt, wenn die Haltungskontrolle direkt verloren wird oder wenn man die Kontrolle über Haltungsstabilität selbst im Griff hat. Das liegt daran, dass die Instabilität in diesen Situationen normalerweise nur eine kurze Zeit anhält. (Riccio & Stoffregen, 1991, S. 206). Die Situation, in denen eine instabile Körperhaltung entstehen kann, werden von Riccio und Stoffregen (1991) in vier grundsätzliche Kategorien eingeteilt (S. 207ff):

- Low-Frequency Vibration
- Weightlessness
- Changing Relationships Between the Gravitoinertial Force Vector and the Surface of Support
- Altered Specificity

Virtual Reality fällt hierbei in die letzte der vier aufgeführten Kategorien, die wie folgt beschrieben werden kann: Wenn sich die Stimulationen der Umgebung ändern, kann das dazu führen, dass die erlernten Strategien zum Erhalten der stabilen Körperhaltung nicht länger adäquat für diesen Zweck sind und daher eine Anpassung an die neuen Umstände benötigt wird. Die Kontrolle über die Körperhaltung wird dabei am stärksten beeinflusst, wenn die Kontrollstrategien überhaupt nicht mehr den benötigten Strategien für die gegebene Situation entsprechen und daher nicht mehr für das Erhalten der stabilen Haltung geeignet sind. (Riccio & Stoffregen, 1991, S. 211f).

Wie Riccio und Stoffregen (1991) erklären, gibt es bei der Nutzung von VR visuelle Beschleunigungen und Rotationen, die komplett unabhängig von den Beschränkungen der Körperkontrolle in der echten Welt existieren (S. 211). Versuche, die Körperhaltung anhand der Strategien zu kontrollieren, die normalerweise für solche Beschleunigungen und Rotationen in der echten Welt erfolgreich genutzt werden, sind daher nicht angebracht (S. 212). Um sich einer Neigung oder Bewegung in der virtuellen Welt zu widersetzen, wird aktiv eine Körperbewegung und Haltungsänderung durch die betroffene Person ausgeführt. Aufgrund dieser Gegenaktion wird jedoch eine ungewollte und vor allem unkontrollierte Abweichung des Körpers von der Gleichgewichtslage erreicht, weil sich das Lageverhältnis zwischen dem Körper und der auf ihn einwirkenden externen Kräfte in der echten Welt nicht geändert hat, was letztendlich zu einer instabilen Haltung führt (S. 211).

In vielen Situationen kann die betroffene Person die Kontrolle über die Haltung durch das Anpassen an die aktuelle Situation zurückgewinnen. Das kann zum einen durch anpassen der Bewegungen oder aber auch durch eine angepasste Interpretation der erhaltenen Informationen erreicht werden. Wie Riccio und Stoffregen (1991) erwähnen, kann eine Person, die sich beispielsweise an die Bewegungen eines virtuellen Flugzeugs in einer Flugsimulation gewöhnt hat, den negativen Konsequenzen entgehen. Hierzu muss die betroffene Person die Bewegungen des virtuellen Flugzeugs erlernen und es schaffen, die Strategien für das Erhalten der Haltungskontrolle und das Steuern des Flugzeugs voneinander zu entkoppeln. (Riccio & Stoffregen, 1991, S. 227).

Ähnlich zu der Sensory Conflict Theory kann auch die Postural Instability Theory von Riccio und Stoffregen (1991) sinnvolle Begründungen dafür geben, wieso die Symptome von Motion Sickness in den verschiedenen Situationen auftreten, aber sie liefert keine Begründung dafür, dass die auftretenden Symptome genau diese Symptome sind (S. 206). Ein großer Vorteil dieser Theorie gegenüber der Sensory Conflict Theory ist jedoch, dass die Instabilität der Körperhaltung quantifiziert und objektiv gemessen werden kann (S. 207). Im Gegensatz dazu sind Konflikte zwischen den verschiedenen involvierten Sinnen nur indirekt objektiv messbar.

3.2.3 REST FRAME THEORY

Die letzte hier behandelte Theorie ist die Rest Frame Theory, welche 1998 von Jerrold Prothero vorgestellt wurde. Laut dieser Theorie versucht das Gehirn des Menschen stets eine feste Referenz in seiner Umwelt zu finden, die es als statisch bzw. stationär betrachten kann. Um einen Großteil der Forschung im Bereich der räumlichen Wahrnehmung zusammenzufassen, hat Prothero (1998) das sogenannte *Rest Frame Construct* entwickelt, welches auf der Tatsache aufbaut, dass Menschen eine sehr gute Wahrnehmung dafür haben, welche Dinge in ihrer Umgebung stationär sind und welche nicht (S. 26). Nach der Analyse, was in der Umgebung als stationäre Referenz angesehen werden kann, können die Bewegungen von Objekten, die nicht stationär sind, relativ zu dieser Referenz evaluiert werden (S. 27). Natürlich ist dabei eine wichtige Frage, wie das Auswählen einer geeigneten stationären Referenz in der Umgebung vonstatten läuft. Um diese Frage zu beantworten, schlägt Prothero (1998) den Ansatz vor, dass das Nervensystem der Person diese Entscheidung basierend auf dem benötigten Aufwand für die Evaluierung der Informationen trifft. Für die alltägliche Navigation macht es daher meistens Sinn, die Erdoberfläche als statische Referenz auszuwählen und sich an dieser zu orientieren, um die räumlichen Vergleiche zwischen der stationären Referenz und den dynamischen Referenzen zu evaluieren. Prothero (1998) vergleicht das Ganze dabei mit der Auswahl eines geeigneten räumlichen Koordinatensystems in der Physik oder Mathematik, um die Komplexität eines Problems zu verringern und erklärt was in dieser Theorie mit *Rest Frames* gemeint ist anhand dieser Analogie wie folgt: „a coordinate system used to define positions, angular orientations and motions is called a 'reference frame'. The particular reference frame which a given observer takes to be stationary is called the 'rest frame' for that observer“. (Prothero, 1998, S. 27).

Prothero (1998) sieht bei der Wahl eines Rest Frames basierend auf der Reduktion des Evaluierungsaufwandes besonders den visuellen Hintergrund der Szenerie als ausschlaggebend, weil dieser in den meisten Fällen die in sich schlüssigsten Hinweise auf die räumliche Lage gibt. In diesem Zusammenhang können laut ihm verschiedene Illusionen auftreten, wenn sich aufgrund von Änderungen des visuellen Hintergrunds der ausgewählte Rest Frame verändert. Diese Änderungen können beispielsweise durch die Lage und Bewegungen des eigenen Körpers oder externer Objekte entstehen. Eine der Illusionen ist die schon erwähnte Vektion. Zwei weitere Illusionen sind zum einen das Gefühl, dass sich ein Objekt in der Umgebung aufgrund einer Bewegung des Hintergrundes bewegt und zum anderen, dass sich die wahrgenommene Distanz zu dem aktuell fixierten Objekt aufgrund von Manipulation des Hintergrunds verändert. (Prothero, 1998, S. 30).

Die Auswahl eines Rest Frames in der Umgebung ist nicht immer leicht, es gibt auch Situationen, in welchen das Nervensystem nicht in der Lage ist, sich für einen einzelnen Rest Frame zu entscheiden. Wenn es einen Konflikt bei der Auswahl eines spezifischen Rest Frames aus den verfügbaren potenziellen Rest Frames gibt, treten laut Prothero (1998) als Konsequenz Ausprägungen von Motion Sickness auf (S. 36). Dabei ist nicht, wie bei der Sensory Conflict Theory, der Konflikt zwischen den Sinnen und damit das Empfangen von unterschiedlichen Sinnessignalen zentral für das Auslösen der Krankheit, sondern wie die erhaltenen Signale interpretiert werden, um statische Referenzen in der Umgebung ausfindig zu machen (S. 37). Prothero (1991) veranschaulicht das an dem folgenden Beispiel: Wenn man sich stationär in seiner Umgebung befindet und einem Vogelschwarm im Himmel beim Fliegen beobachtet, weißt man im Normalfall keine Symptome von Motion Sickness auf. In der Theorie hätte man hier einen Konflikt zwischen den Signalen, die die verschiedenen Sinne liefern. Da man sich stationär im Raum befindet, liefert das vestibuläre System und die Propriozeption keinerlei Bewegungssignale, die beobachteten Vögel führen jedoch dazu, dass das visuelle System eine relative Bewegung berichten sollte. Diese Situation führt nicht zu Motion Sickness, da die beobachteten Vögel nicht als Rest Frame

ausgewählt und interpretiert werden, sondern stattdessen der Boden oder der Himmel hinter den Vögeln. (Prothero, 1998, S. 36). Basierend darauf, ist Prothero (1991) der Meinung, dass das Problem von Motion Sickness nicht etwa durch das Vermeiden von Konflikten zwischen den involvierten Sinnen gelöst werden kann, sondern vielmehr durch das Entfernen von Unstimmigkeiten in der Umgebung, welche die Auswahl eines spezifischen Rest Frames erschweren (S. 36).

Die Rest Frame Theory versucht jedoch nicht die traditionelle Sensory Conflict Theory zu widerlegen. Stattdessen beschreibt Prothero in einer späteren Arbeit von ihm und Parker das Konzept der Rest Frames als eine Weiterentwicklung der Sensory Conflict Theory von Reason. (Prothero & Parker, 2003, S. 53). In der gleichen Arbeit wird von ihnen zusätzlich erwähnt, dass sich die Theorie grundsätzlich auch mit der Postural Instability Theory von Riccio und Stoffregen in Vereinbarung bringen lässt. Eine Instabilität in der Körperhaltung der betroffenen Person könnte laut ihnen das Resultat einer ungünstigen Auswahl eines spezifischen Rest Frames sein. (Prothero & Parker, 2003, S. 54). Die allgemeine Kompatibilität der Rest Frame Theory mit den anderen beliebten Theorien macht sie zu einem interessanten Kandidaten für das Erforschen der genauen Ursachen von Motion Sickness.

4 VERMEIDUNG UND REDUKTION

Ein unangenehmes Problem bei der Vermeidung von Motion Sickness in VR ist, dass die Wahrscheinlichkeit für das Auftreten der Krankheit und die Stärke der Ausprägung ihrer Symptome von einer weiten Reihe unterschiedlicher Faktoren abhängt. Um Methoden für die Reduktion der Symptome und das komplette Vermeiden der Krankheit zu formulieren, müssen diese Faktoren beachtet und in den Aufbau der Methoden integriert werden. Man kann an dieser Stelle auch argumentieren, dass die Faktoren und die Methoden in dem meisten Fällen Hand in Hand gehen und die beeinflussbaren Faktoren oft direkte Methoden für das Vermeiden und die Reduktion der Krankheitsausprägungen darstellen. Es gibt aber auch Faktoren, die sich nicht aktiv beeinflussen lassen.

4.1 FAKTOREN

Wie schon erwähnt haben viele verschiedene Faktoren Einfluss auf das Auftreten von Motion Sickness und die Ausprägung der damit assoziierten Symptome. Einige dieser Faktoren können teilweise direkt aus den schon vorgestellten Theorien hinsichtlich Motion Sickness abgeleitet werden, andere wurden durch Analysen von Experimenten und Beobachtungen in der Praxis durch mehrere Forscher aufgefunden gemacht. Diese Faktoren sind bei der Entstehung von Motion Sickness nicht unbedingt gleich stark beteiligt. In manchen Fällen kann es sein, dass ein einzelner Faktor die alleinige Verantwortung für das Auslösen von Krankheitssymptomen hat, in anderen Fällen sind bei dem Auslösen viele verschiedene Faktoren jeweils unterschiedlich stark beteiligt. Die potenzielle Vielzahl an involvierten Faktoren und die Varianz in ihrer Beteiligung kann das Aufspüren der verantwortlichen Faktoren in einer spezifischen Situation sehr aufwendig machen. In der Literatur werden die Faktoren regelmäßig anhand ihrer Abhängigkeit von den drei Kategorien *Nutzer*, *Hardware* und *Software* aufgeteilt. Die meisten Faktoren lassen sich gut in eine dieser drei Kategorien einordnen, aber dennoch gibt es vereinzelt Fälle, bei denen dies nicht so leicht ist. Ein gutes Beispiel hierfür ist etwa die Anzahl an Bildern pro Sekunde, die dem Nutzer der VR-Anwendung präsentiert werden. Zum einen kann dieser Faktor den hardwareabhängigen Faktoren in Form der Aktualisierungsrate der benutzten Bildschirme zugeordnet werden, aber zum anderen auch den softwareabhängigen

Faktoren, weil die Anzahl an präsentierten Bildern pro Sekunde auch von der Performanz der eigentlichen VR-Anwendung abhängig ist. Die hier vorgestellten Faktoren stellen keinesfalls eine vollständige Liste relevanter Faktoren dar, sondern lediglich eine Ansammlung der prominentesten Faktoren, die regelmäßig in der Literatur erwähnt werden.

4.1.1 NUTZERABHÄNGIGE FAKTOREN

In die Kategorie der nutzerabhängigen Faktoren fallen alle Faktoren, die nicht von der verwendeten Technologie, die für das Erzeugen der virtuellen Welt verantwortlich ist, abhängig sind. Stattdessen sind sie von der individuellen Person und der direkten Umwelt des Individuums abhängig. Die allgemeine Anfälligkeit gegenüber Motion Sickness und wie genau sich die Krankheit ausprägt ist dabei stark an die jeweilige Person gebunden. Kennedy et al. (1987) vergleichen Motion Sickness daher in dieser Hinsicht mit anderen Krankheiten (S. 7):

For example, like most diseases, not everyone who comes in contact with the agent gets sick. Not everyone who gets sick will experience the same level of severity. Some people recover more rapidly than others. Some are immune, some allergic. On certain days, one's susceptibility may be higher or lower, sometimes for unknown reasons.

Zwei solcher nutzerabhängigen Faktoren sind zum Beispiel das Alter und das Geschlecht der Person. In Abhängigkeit von ihrem Alter kann eine Person entweder eine höhere Resistenz gegen Motion Sickness besitzen oder sogar, zumindest teilweise, als immun gegen die Krankheit angesehen werden. Laut Reason und Brand (1975) sind Kinder unter einem Alter von ungefähr zwei Jahren sehr unempfindlich gegenüber der Krankheit. Danach steigt die Anfälligkeit weiter an, bis sie ein Maximum in der Zeit gegen Ende des zwölften Lebensjahres erreicht. Zwischen 12 und 21 Jahren nimmt die Empfindlichkeit hingegen mit signifikanter Geschwindigkeit ab. Dieser Abstieg verlangsamt sich im Anschluss und ab einem Alter von ungefähr 50 Jahren wird ein weiteres Minimum der Empfindlichkeit erreicht. (Reason & Brand, 1975, S. 87). Demnach ist es also gerade bei Kindern, Jugendlichen und jungen Erwachsenen wahrscheinlich, dass sie in provokativen Situationen unter Symptomen der Krankheit leiden. Hingegen dazu sind ältere Person, Neugeborene und auch Kleinkinder weniger empfindlich gegenüber der Krankheit und besitzen damit eine höhere Resistenz. Die geringere Empfindlichkeit gegenüber der Krankheit bei älteren Personen kann durch die Abnahme von vestibulären Signalen mit steigendem Alter erklärt werden. (Guedry, 1991, S. 12). Diese erhöhte Resistenz jedoch als vollständige Immunität zu betrachten, wäre nicht ganz richtig. Die verminderte Empfindlichkeit kann zwar zu einer Quasi-Immunität in Situationen mit leichten und mäßigen Provokationspotentialen führen, aber es kann dennoch eine Ausprägung der Krankheit auftreten, wenn der Stimulus in der gegebenen Situation provokant genug ist. (Guedry, 1991, S. 12). Eine geringere Empfindlichkeit gegenüber Motion Sickness in VR-Umgebungen mit erhöhtem Alter wurde auch von Saredakis et al. (2020) bestätigt. Sie haben mehrere Studien im VR-Bereich untersucht und gefunden, dass ältere Teilnehmer im Vergleich zu den jüngeren Teilnehmern nur ungefähr die Hälfte an Motion Sickness in diesen Studien erfahren haben. Gerade die Stärke der Symptome in Verbindung mit Orientierungslosigkeit hat sich dabei signifikant von den jüngeren Probanden unterschieden. (Saredakis et al., 2020, S. 12).

Auch das Geschlecht kann die Empfindlichkeit gegenüber Motion Sickness beeinträchtigen. Grundsätzlich sind dabei Frauen anfälliger für die Krankheit als Männer. (Reason & Brand, 1975, S. 188). Ein Grund hierfür ist laut LaViola (2000), dass Frauen im Allgemeinen ein breiteres Sichtfeld als Männer besitzen (S. 53). Wie Biocca (1992) erwähnt, ist eine weitere mögliche Begründung für die Differenz

zwischen den Geschlechtern der hormonelle Unterschied, gerade im Zeitraum der Menstruation und während einer Schwangerschaft (S. 339). Basierend auf der Aussage von Reason und Brand (1975), dass sich die Geschlechter grundsätzlich nicht in ihren Reaktionen zu verschiedenen Stimuli aufgrund von Bewegungen unterscheiden (S. 188), zieht Biocca (1992) den Schluss, dass Männer im Vergleich zu Frauen die Stärke der Symptome gegebenenfalls als weniger schlimm berichten, obwohl diese eigentlich gleich stark aufgetreten sind (S. 339). Ein Unterschied zwischen den beiden Geschlechtern wurde auch in einer Studie von Munafo et al. (2017) aufgefunden. Sie haben dabei Ausprägungen der Krankheit in einem Drittel der Männer festgestellt, jedoch waren über drei Viertel der weiblichen Probanden betroffen (S. 895). Hinsichtlich der Stärke der Krankheit konnten sie jedoch keinen signifikanten Unterschied feststellen (S. 896). In einem Experiment von Stanney et al. (2003) wurden hingegen signifikant stärkere Symptome bei den weiblichen Teilnehmern festgestellt (S. 512). Insbesondere Symptome in Verbindung mit Orientierungslosigkeit und der Okulomotorik waren dabei relevant (S. 516).

Ein weiterer nutzerspezifischer Faktor ist die Vorerfahrung mit der genutzten Anwendung. Die Wahrscheinlichkeit, dass Ausprägungen von Motion Sickness auftreten und auch die Stärke der Symptome sinkt mit wiederholter Immersion in eine VR-Anwendung. (Regan, 1995, S. 26, Kolasinski, 1995, S. 19). In der Literatur werden hierfür die Begriffe Habituation und Adaptation genutzt. Es gibt aber auch Forscher, die die Ansicht haben, dass diese beiden Begriffe nicht gleichgesetzt werden können. Zum Beispiel differenzieren Howarth und Hodder (2008) die Begriffe wie folgt (S. 117): „Habituation is a process whereby the response to the same stimulus lessens with repeated presentations, whereas adaptation is a more immediate change of sensitivity, generally involving a specific sense organ (e.g. dark adaptation of the eye)“. Habituation ist also genau genommen die Anpassung an den Stimulus über mehrere separate Sitzungen hinweg, wohingegen Adaptation die Anpassung an den Stimulus, während dieser aktiv erfahren wird, darstellt. Die beiden Begriffe werden in der Literatur dennoch oft als Synonyme verwendet und auch die genaue semantische Bedeutung wird oft vernachlässigt. Grundsätzlich können sie also dennoch das gleiche Konzept repräsentieren.

Reason (1978) teilt die Anpassung an Situationen, die Motion Sickness auslösen, in drei verschiedene Phasen ein. Die erste Phase ist die initiale Konfrontation mit der Situation, bei der Symptome von Motion Sickness auftreten (*initial exposure phase*). Anschließend verschwinden bzw. verringern sich die Ausprägungen der Krankheit durch Fortsetzen der Konfrontation über einen längeren Zeitraum hinweg (*continued exposure phase*). Die letzte Phase findet nach Verlassen der provokativen Situation statt (*after-effect phase*). In ihr wird der Zustand zu Beginn der ersten Phase wiederhergestellt. Über mehrere Sitzungen hinweg wird bei diesen Phasen ein gewisser Teil der Anpassung beibehalten. Der beibehaltene Anteil verringert sich jedoch über die Zeit hinweg, falls keine Interaktion mit dem verantwortlichen Stimulus stattfindet. (Reason, 1978, S. 822). Wie Reason (1978) erwähnt, kann es dabei sein, dass eine größere Anzahl an Sitzung zu einem geringeren Verlust der Anpassung über die Zeit führt (S. 822). Nach Regan (1995) können diese Anpassungen in Virtual Reality auf zwei unterschiedliche Weisen zustande kommen. Zum einen kann es sein, dass der Nutzer einfach nicht mit der Anwendung vertraut ist und diese erst erlernen muss. Der Nutzer muss sich also beispielsweise zuerst an die Steuerung und den Umgang mit der virtuellen Welt gewöhnen. Je nach Art der Steuerung könnten etwa unbeabsichtigte Bewegung auftreten, wenn der Nutzer noch nicht richtig mit der Steuerung umgehen kann, welche folglich Symptome von Motion Sickness hervorrufen können. Die zweite Möglichkeit richtet sich nach dem schon genannten Drei-Phasen Prinzip von Reason. Die Person kann sich also über die Zeit an die unterschiedlichen, teilweise neuen, Sinnessignale gewöhnen. Das führt dazu, dass die Konflikte zwischen den einzelnen Sinnen weniger stark auftreten, sobald die Signale auf eine geeignete Weise

interpretiert werden. (Regan, 1995, S. 26). Diese Anpassungen könnten jedoch nur anwendungsspezifisch sein und daher nicht auf den generellen Gebrauch von Virtual Reality übertragen werden, da sie gegebenenfalls stark von den verantwortlichen Stimuli abhängig sind. (Regan, 1995, S. 28). Ob das wirklich der Fall ist oder ob die erlernte Anpassung beispielsweise durch weitere Konfrontation mit der Situation generalisiert und dadurch auf andere Anwendungen übertragen werden kann, ist jedoch noch immer eine offene Frage. (Palmisano & Constable, 2022, S. 14).

Ähnlich zu der Anzahl an schon erfahrenen Immersionen in eine spezifische VR-Anwendung, spielt auch die Länge dieser Immersionen eine wichtige Rolle als Faktor. Grundsätzlich gilt, dass sowohl die Wahrscheinlichkeit für das Auftreten als auch die Stärke der Symptome mit der Länge der Nutzung ansteigen. (Nesbitt & Nalivaiko, 2018, S. 3). Je länger eine Person sich also in der virtuellen Welt befindet, desto schlimmer werden die Effekte der Krankheit und umso wahrscheinlicher tritt sie auf. Aus diesem Grund beschreiben Hettinger et al. (1990) Motion Sickness in VR-Anwendungen auch als ein kumulatives Phänomen (S. 177). Der Zusammenhang zwischen der Länge der Konfrontation mit der Situation und der Stärke der Ausprägung von Motion Sickness kann in vielen Forschungsarbeiten aufgefunden werden. Gute Beispiele sind etwa die Studien von So et al. (2001) und Regan (1995), welche beide diesen Zusammenhang unter den Probanden aufgefunden haben. In der Studie von So et al. (2001) wurden dabei sowohl erhöhte Krankheitssymptome also auch ein höheres Maß an Vektion festgestellt. Dieser Effekt begann nach lediglich 5 Minuten und die Bewertung für die erfahrene Übelkeit stieg über 30 Minuten weiter bis zum Ende der VR-Anwendung an. (Sol et al., 2001, S. 456). Auch bei der Studie von Regan (1995) traten ansteigende Symptome in Abhängigkeit von der Konfrontationslänge auf. Dabei haben 22% der Teilnehmer nach einer Immersion von 5 Minuten Symptome aufgewiesen. Bis zum Ende der Immersion, nach 20 Minuten, stieg dieser Anteil weiter auf 45% der Probanden an. (Regan, 1995, S. 23). Stanney et al. (2003) sind der Ansicht, dass die Zunahme der Krankheit über die Zeit ein Indiz für die Richtigkeit der Postural Instability Theory sein könnte. Sie führen das darauf zurück, dass es mit steigender Immersionszeit immer schwieriger wird, die Körperhaltung in einer stabilen Lage zu halten. In einer Studie haben sie zudem Anzeichen dafür gefunden, dass das Wachstum der Stärke, zumindest bei einem Teil der Symptome, nach längerer Konfrontation abbricht und sich die Stärke nicht weiter signifikant erhöht. (Stanney et al., 2003, S. 516). Im Zusammenhang mit der schon besprochenen Anpassung an die Stimuli der VR-Anwendung macht dies natürlich auch Sinn, da sich die Probanden zu diesem Zeitpunkt an die Steuerung und die Bewegungen in der virtuellen Welt gewöhnt haben.

Anhand der Postural Instability Theory kann zudem die Körperhaltung als weiterer Faktor von Motion Sickness hervorgehoben werden. (LaViola, 2000, S. 53). Wie schon erwähnt, sind laut dieser Theorie Personen, die für längere Zeit eine instabile Körperhaltung einnehmen, in höherer Gefahr die negativen Effekte von Motion Sickness zu entwickeln. Eine natürliche Schlussfolgerung daraus ist es, für das Verhindern und Reduzieren der Krankheitssymptome bei der Verwendung von Virtual Reality daher eine möglichst stabile Körperhaltung einzunehmen. Eine geeignete Körperhaltung ist beispielsweise das Sitzen auf einem Stuhl, da dabei eine höhere Stabilität erreicht wird als beim Stehen.

Des Weiteren gibt es auch unzählige andere Faktoren, die von dem jeweiligen Nutzer abhängig sind. Dazu gehören beispielsweise die allgemeine Gesundheit der Person und vorhandene Beeinträchtigungen des visuellen Systems (z.B. bei Brillenträgern). (LaViola, 2000, S. 53). Existierende Erkrankungen könnten zu diversen Problemen mit den vestibulären Organen führen und ähnlich ist es auch bei Problemen mit dem visuellen System. Brillen können dafür sorgen, dass das Licht anders gebrochen wird

oder gegebenenfalls das VR-Headset nicht optimal auf dem Kopf des Nutzers aufsitzt. (Rebenitsch & Owen, 2014, S. 312).

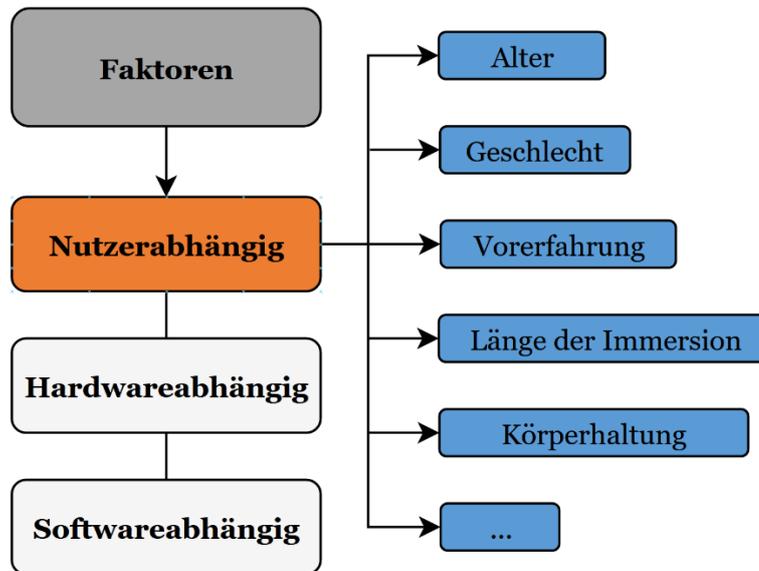


ABBILDUNG 4 EIN KURZER ÜBERBLICK ÜBER DIE NUTZERABHÄNGIGEN FAKTOREN VON MOTION SICKNESS.

4.1.2 HARDWAREABHÄNGIGE FAKTOREN

Zu den hardwareabhängigen Faktoren gehören alle Faktoren, die von den genutzten physischen Geräten abhängig sind. Das heißt, alle Faktoren die beispielsweise durch die Wahl des VR-Headsets und der Geräte, die die Interaktion mit der virtuellen Welt ermöglichen, beeinflusst werden.

Die Auflösung der Bildschirme, die in dem genutzten VR-Headset verbaut sind, ist ein solcher hardwareabhängiger Faktor. Eine höhere Auflösung ist dabei von Vorteil für das Vermeiden von Motion Sickness. (Wang et al., 2022, S. 11). Hingegen kann eine zu niedrige Auflösung zum Beispiel dazu führen, dass unzureichende visuelle Signale für die Verarbeitung durch das visuelle System bereitgestellt werden. (Cobb et al., 1999, S. 170). VR-Headsets haben entweder einen einzelnen Bildschirm, der sich über die gesamte Breite des Sichtfelds erstreckt, oder zwei separate Bildschirme, einen für jedes Auge. Wenn zwei Bildschirme verbaut sind, kann sich die Angabe der Auflösung auf einen einzelnen Bildschirm beziehen oder aber auch die kombinierte Auflösung beider Bildschirme angeben.

Wang et al. (2022) haben zum Testen der Relevanz dieses Faktors eine Studie durchgeführt, bei der vier verschiedene Auflösungen hinsichtlich der ausgelösten Motion Sickness miteinander verglichen wurden. Die von ihnen verglichenen Auflösungen sind 1K (1096 x 696 Pixel), 2K (2084 x 1320 Pixel), 3K (3084 x 1956 Pixel) und 4K (3836 x 2432 Pixel) pro Auge. Die Ergebnisse ihrer Studie zeigen, dass Auflösungen unter 2K zu stärkeren Ausprägungen von Motion Sickness bei den Probanden geführt haben. Ab einer Auflösung von 2K pro Auge gab es keine signifikanten Verbesserungen hinsichtlich Motion Sickness. Die niedrigste Auflösung hatte dabei vor allem zu stärkeren Symptomen in Verbindung mit Orientierungslosigkeit geführt, was Wang et al. (2022) der geringeren Anzahl an wahrnehmbaren Details der virtuellen Welt zuschreiben. Sie sehen dabei 2K als Grenze an, ab der das Erhöhen der Auflösung nur schwindende Vorteile mit sich bringt. (Wang et al., 2022, S. 11). Die Ergebnisse dieser Studie sind von großer Bedeutung für Motion Sickness bei Betrachtung der aktuellen VR-Headsets. In der Vergangenheit war die

Auflösung der Bildschirme oft sehr gering (weniger als 1K), heutzutage ist dies jedoch nicht mehr der Fall. Die erste Generation der momentanen VR-Headsets (z.B. die Oculus Rift und HTC Vive) hat Bildschirme mit einer Auflösung im Bereich von 1K, wobei die meisten aktuelleren VR-Headsets im Bereich von 2K bis 4K liegen. (Wang et al., 2022, S. 2).

Neben der Auflösung ist auch die Latenz des VR-Headsets und der anderen genutzten Geräte ein hardwareabhängiger Faktor. Mit Latenz ist hierbei die Zeit gemeint, die gebraucht wird, um eine Bewegung oder Aktion des Nutzers in der virtuellen Welt abzubilden. (LaViola, 2000, S. 52). Wenn der Nutzer seinen Körper, die Hände oder seinen Kopf bewegt, muss dies zuerst von der Tracking-Hardware erfasst und verarbeitet werden. Anschließend wird das Signal an den angeschlossenen Computer weitergeleitet, welcher damit die Position und Rotation der Person in der virtuellen Welt aktualisiert. Sobald diese Aktualisierung von der VR-Anwendung verarbeitet und das neue Bild der Szene gerendert wurde, wird das Resultat an das VR-Headset geschickt, welches damit die Bildschirme aktualisiert und dem Nutzer das neue Bild zeigt. Grundsätzlich findet der gleiche Ablauf statt, wenn der Nutzer mittels eines Eingabegeräts mit der virtuellen Welt interagiert. Die Zeit, die für diesen Ablauf gebraucht wird, wird in der Literatur als *Motion-To-Photon-Delay* (Zhao et al., 2017, S. 313) oder manchmal auch als *Transport Delay* (Kolasinski, 1995, S. 30) bezeichnet. Ist diese Latenz zu hoch, kann deswegen Motion Sickness bei dem Nutzer auftreten. Der Grund hierfür ist, dass sich der Unterschied zwischen dem, was der Nutzer in der realen Welt tut, und dem, was in der virtuellen Welt abgebildet wird, mit einer steigenden Latenz immer weiter vergrößert. Warum das ein Problem darstellt, kann mithilfe der Sensory Conflict Theory erklärt werden. Sobald die Aktionen in der realen und der virtuellen Welt nicht mehr als synchron wahrgenommen werden, kann ein Sinneskonflikt auftreten, welcher als Resultat Motion Sickness mit sich bringt. (Regan, 1995, S. 21). Um Motion Sickness aufgrund einer zu langen Latenzzeit zu vermeiden, ist es daher eine gute Idee, das Motion-To-Photon-Delay unter 20 Millisekunden zu halten. (Kemeny, 2014, S. 2). Laut Jung et al. (2017) kann diese Art der Verzögerung ein primärer Faktor für das Auslösen von Motion Sickness sein (S. 151), jedoch ist die Latenz der aktuell erhältlichen VR-Headsets in der Regel gering genug, um die negativen Effekte zu umgehen.

Wie schon kurz angeschnitten, hängt die Latenz von mehreren verschiedenen Bestandteilen des VR-Systems ab. Diese Bestandteile sind auch Faktoren für das Auftreten von Motion Sickness. Die Sensoren, die die Interaktion und Bewegungen in der realen Welt wahrnehmen, müssen das Signal verarbeiten und an die Rechenkomponenten weiterleiten. Gerade bei der Tracking-Hardware treten hierbei Verzögerungen auf, aber auch die Zeit, die das Signal braucht, um über die Leitung zum Rest der Hardware zu gelangen, kann die Latenz erhöhen. Sobald das Signal die Rechenkomponenten erreicht hat, wird es von der Anwendung weiterverarbeitet. Hierbei spielt die Bildrate, mit der die VR-Anwendung läuft, eine wichtige Rolle (genaueres hierzu in Kapitel 4.1.3). Nach Verarbeitung durch die Anwendung kann das neue Bild an das Headset gesendet und auf dessen Bildschirm präsentiert werden. Dabei hat die Zeit, die der verbaute Bildschirm braucht, um sich selbst mit dem Bild zu aktualisieren und es für den Nutzer fehlerfrei darzustellen, einen weiteren Einfluss auf die Latenz.

Die Position und Orientation des Nutzers wird durch das verwendete Tracking-System des VR-Headsets bestimmt. Es gibt unterschiedliche Typen von Tracking-Systemen die dabei Verwendung finden und jeweils eigene Vor- und Nachteile besitzen. Vor allem vor dem VR-Boom konnte man diverse Tracking-Methoden in VR-Produkten auffinden (z.B. mechanisches, akustisches und elektromagnetisches Tracking). In den heutzutage kommerziell erhältlichen VR-Headsets hat sich hingegen gerade optisches Tracking als Hauptmethode für die Erfassung der Position und Orientation etabliert. Die Wahl der

verwendeten Tracking-Methode spielt hierbei nicht nur aufgrund der darauf basierenden Latenzzeit eine wichtige Rolle, sondern auch aufgrund der Qualität der Positions- und Orientationserfassung, sowie der Handhabung von Fehlern während des Trackings. Wenn die Bewegungen des Körpers in der realen Welt durch die genutzte Tracking-Methode nicht genau genug erfasst werden können, kann es zu einem merkbaren Unterschied zwischen der realen Bewegung und der in der virtuellen Welt ausgeführten Bewegung kommen, was wiederum zu einem Konflikt zwischen den Sinnen führen kann. Es kann argumentiert werden, dass das akkurate Erfassen anderer Körperteile (z.B. der Hände) und externer Gegenstände von niedriger Priorität ist, aber die präzise Übertragung der Kopfbewegung in die virtuelle Welt ist ein Muss, um das Auftreten von Motion Sickness zu vermeiden, da aufgrund der hier involvierten Sinne kleinste Unstimmigkeiten leicht wahrgenommen werden können. LaViola (2000) verweist hier zum Beispiel auf das Auftreten von Jitter (S. 52): „[...] consider a jittery tracker attached to the user's head. If this tracker is used to update the user's view, then the view will be in constant uncontrollable movement even when the user is holding his/her head and body stationary.“. Jitter im Kontext der Tracking-Methoden ist ein Problem, das aufgrund der Ungenauigkeit der Sensoren auftritt und die Fehler in der Positionserfassung, ohne dass dabei in der realen Welt eine Bewegung durchgeführt wird, beschreibt.

In Hinsicht auf die Wichtigkeit einer geeigneten Tracking-Methode, macht es Sinn, dass sich optisches Tracking bei den aktuellen VR-Headsets als Industriestandard etabliert hat. Optisches Tracking liefert nicht nur präzises Erfassen der Position und Orientation, es ist dabei auch noch sehr schnell und ermöglicht hohe Aktualisierungsraten, trägt somit also nicht überwiegend stark zu der gesamten Latenzzeit des VR-Systems bei. Zudem wird das optische Tracking in den meisten gegenwärtigen VR-Headsets durch zusätzlich integrierte inertielle Tracking-Methoden ergänzt, um Tracking-Fehlern und Problemsituationen vorzubeugen. Inertielle Tracking-Methoden haben das Problem, dass sie über die Zeit aufgrund von kleinen Messfehlern an Genauigkeit verlieren. Optische Tracking-Methoden haben hingegen den Nachteil, dass bei ihnen durch Verdeckungen in der Umgebung Abbrüche in der Erfassung ausgelöst werden. Die Kombination der beiden Tracking-Methoden löst diese Probleme größtenteils und führt dazu, dass die Erfassung der Lage bei den heutigen VR-Headsets im Normalfall kein wesentliches Problem mehr für Motion Sickness darstellt. In vereinzelt Fällen können aber dennoch kleinere Fehler und komplette Abbrüche in der Bewegungserfassung auftreten.

Ein weiterer hardwareabhängiger Faktor für Motion Sickness ist die Größe des Sichtfelds in die virtuelle Welt, das dem Nutzer durch die Bildschirme des VR-Headsets gegeben wird, generell als Field-Of-View (FOV) bezeichnet. Ein größeres Sichtfeld auf die virtuelle Welt führt dabei zu mehr Motion Sickness bei Nutzung der VR-Anwendung. (Fernandes & Feiner, 2016, S. 209f, Groth et al., 2021, S. 487). Ein Grund hierfür ist, dass, wie schon in Kapitel 3.1.2 erklärt wurde, die Peripherie der Augen besser geeignet ist, um Bewegungen in der Umgebung wahrzunehmen und daher eine größere Rolle beim Auftreten von Vektion einnimmt. Ein größeres Sichtfeld in die virtuelle Welt führt dazu, dass ein größerer Teil der VR-Umgebung im Bereich der Peripherie abgebildet wird und dementsprechend diesen Bereich stärker stimuliert. Zum anderen ist eine weitere Erklärung, dass ein größeres FOV zu einer realistischeren Abbildung der virtuellen Welt für den Nutzer führt und deshalb ein Konflikt zwischen den involvierten Sinnen glaubhafter für die betroffene Person ist. (Emmerik et al., 2011, S. 169).

Das FOV ist ein Faktor, der zugleich von der verwendeten Hardware und der verwendeten Software der VR-Anwendung abhängig ist. Das hardwareabhängige FOV ist durch den Aufbau des VR-Headsets und der darin verbauten Bildschirme festgelegt. Das softwareabhängige FOV wird hingegen durch die Einstellungen der VR-

Anwendung entschieden. Emmerik et al. (2011) unterscheiden hier zwei Arten von Sichtfeldern anhand der Begriffe *externes FOV* und *internes FOV*. Sie definieren die beiden Begriffe dabei wie folgt (S. 169):

The external FOV (eFOV) is defined as the angular size of the observer's physical visual field that is filled by the displayed virtual scene. As such it is directly related to the size of the screen and the viewing distance of the observer [...]. The internal FOV (iFOV) can be considered the design eyepoint. It is independent of the player and screen dimensions because it refers to the FOV the graphics generator is using to render its images of the environment.

Laut dieser Definition könnte man auf den ersten Blick die Annahme machen, dass das externe FOV nur von der verwendeten Hardware abhängig ist, aber es kann durchaus auch von Seiten der VR-Anwendung beeinflusst werden, wie in Kapitel 4.2.5 gezeigt wird. Auch wenn das interne FOV als Faktor von Motion Sickness angesehen werden kann, lässt es sich, in Abhängigkeit davon, welche spezifische Software für die VR-Anwendung genutzt wird, nicht immer direkt von Seiten der Entwickler verändern. In vielen Fällen wird das interne FOV automatisch durch die Software an die verwendete Hardware angepasst, um dem Nutzer das bestmögliche Erlebnis zu bieten. Das externe FOV wird bei den aktuellen VR-Headsets nicht selten als Verkaufsargument genutzt, wobei größere Sichtfelder oft als begehrenswerter für die Käufer angesehen werden, weil sie eine realistischere Abbildung der virtuellen Welt ermöglichen. Im Allgemeinen kommt das FOV der aktuell erhältlichen VR-Headsets dennoch nur vereinzelt in die Nähe des menschlichen FOVs. (Kemeny et al., 2020, S. 9). Beispielsweise beträgt das horizontale FOV des HTC VIVE Pro 2 Headsets nur rund 120 Grad, wohingegen das horizontale FOV des Menschen etwa 200 – 220 Grad beträgt.

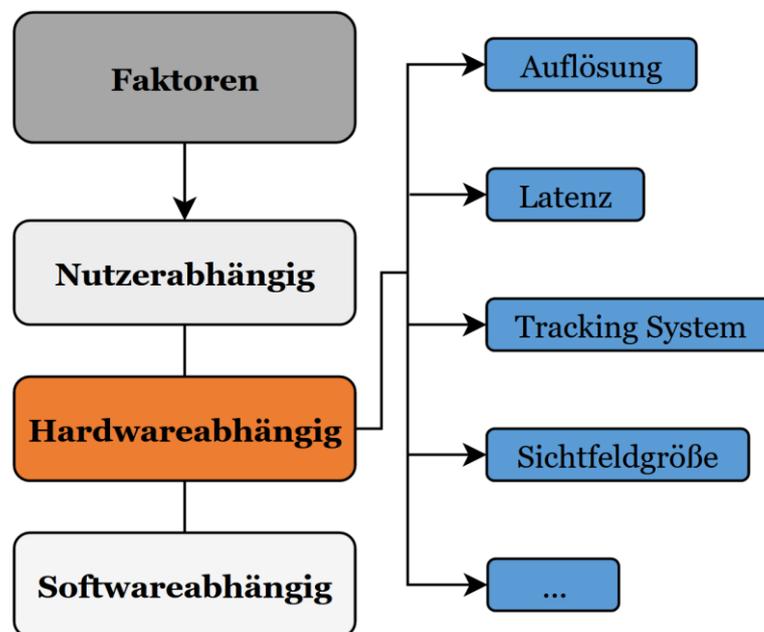


ABBILDUNG 5 EIN KURZER ÜBERBLICK ÜBER DIE HARDWAREABHÄNGIGEN FAKTOREN VON MOTION SICKNESS.

4.1.3 SOFTWAREABHÄNGIGE FAKTOREN

Zu der Kategorie der softwareabhängigen Faktoren zählen alle Faktoren, die weder alleinig von der Hardware noch von dem Nutzer der VR-Anwendung abhängig sind. Sie sind stattdessen an die verschiedenen Aspekte der VR-Anwendung, die dafür getroffenen Design-Entscheidungen und die implementierte virtuelle Welt gebunden.

Der wohl bekannteste softwareabhängige Faktor hinsichtlich Motion Sickness ist die Bildrate, die von der VR-Anwendung erreicht wird, auch *Framerate* genannt. Diese Bildrate wird auf Seiten der Software als Bilder pro Sekunde in *Frames Per Second* (FPS) gemessen. Genau genommen ist diese Bildrate aber ebenfalls ein hardwareabhängiger Faktor, da die endgültig erreichte Bildrate auch durch die Eigenschaften der verbauten Bildschirme festgelegt wird. Auf Seiten der Hardware wird die Bildrate üblicherweise als Bildschirmaktualisierungen pro Sekunde in Hertz (Hz) angegeben. Die Bildrate der Bildschirme hat hier aber lediglich die Möglichkeit, die resultierende Bildrate zu beschränken. Das heißt, dass beispielsweise ein Bildschirm, der für 60 Hz ausgelegt ist, dem Betrachter nur maximal 60 Bilder pro Sekunde präsentieren kann. Wenn in diesem Beispiel also die VR-Anwendung eine Framerate von 90 FPS erreicht, würden beim Betrachter der Anwendung dennoch nur maximal 60 Bilder pro Sekunde ankommen. Neben den Hardwareeigenschaften der Bildschirme ist die resultierende Bildrate auch abhängig von den Hardwarekomponenten des Rechners, auf dem die Anwendung läuft (z.B. der GPU und CPU) und der daraus resultierenden Rechenkraft.

Grundsätzlich gilt, dass eine geringere bzw. unzureichende Framerate zu Ausprägungen von Motion Sickness führt. Der Grund hierfür ist, dass die Framerate der VR-Anwendung zu der schon besprochenen Latenzzeit des gesamten Systems beiträgt und dementsprechend einen wahrnehmbaren Unterschied zwischen den realen und virtuellen Aktionen auslösen kann. Je nach Performanz der verwendeten VR-Anwendung kann es dabei gut sein, dass die zusätzliche Latenz aufgrund der Framerate den größten Teil der gesamten Latenzzeit darstellt. Laut Golding (2016) braucht die Anpassung der Augen an die Bewegungen des Kopfes, die durch das vestibuläre System signalisiert werden, eine sehr kurze Zeit, teilweise nur 10 ms. Aufgrund dessen können schon Latenzzeiten, die etwas länger als diese Zeitspanne sind, leicht durch den Nutzer wahrgenommen werden. Sollte die Latenzzeit viel länger als 10 ms werden, kann dies laut ihm zu Krankheitsausprägungen führen. (Golding, 2016, S. 375). Eine Latenzzeit von 10 ms entspricht einer Bildrate von 100 FPS (ohne Einbezug der Latenzzeit, die durch andere Komponenten des Systems erzeugt wird). Andere Forscher sind der Meinung, dass schon Bildraten von mindestens 50 bis 60 FPS ausschlaggebend für das Vermeiden von negativen Effekten sind. (Nesbitt & Nalivaiko, 2018, S. 3). Im VR-Bereich wird heutzutage dennoch eine Bildrate von 90 FPS oder mehr für eine ideale Erfahrung empfohlen. Zusätzlich wird oft darauf hingewiesen, dass die Framerate immer mindestens der Aktualisierungsrate der Bildschirme entsprechen sollte (z.B. Unity Technologies, 2021, Oculus VR, 2017). Das macht Sinn, da dadurch die Latenzzeit beim Visualisieren der virtuellen Welt minimiert werden kann. Die Bildschirme in modernen VR-Headsets besitzen Aktualisierungsraten im Bereich zwischen 90 Hz und 110 Hz (Kemeny et al., 2020, S. 9), was wiederum die regelmäßige Empfehlung von mindestens 90 FPS für VR-Anwendungen plausibel macht.

Neben der Anzahl an Bildern pro Sekunde sind auch viele integrale Aspekte des Anwendungsdesigns von Relevanz als potenzielle Faktoren für das Auftreten von Motion Sickness. Diese Aspekte können vom Audiodesign und der visuellen Darstellung der virtuellen Umgebung bis hin zu den Interaktionen mit virtuellen Objekten und der allgemeinen Szenerie reichen.

Ein potenzieller Faktor bei dem visuellen Design der Anwendung ist die Wahl des Genres und der damit verbundenen Umgebung. Chattha et al. (2020) haben in ihrer Studie zwei unterschiedliche Anwendungsgenres mit dazu passenden virtuellen Umgebungen untersucht. Eine der virtuellen Umgebung war dabei eine idyllische Küstenlandschaft, die von dem Anwender als angenehm wahrgenommen werden sollte und daher entsprechend helle und warme Farben genutzt hat. Die zweite Umgebung hat ein verlassenes Krankenhaus repräsentiert, in das Designelemente, die man normalerweise in einem Horrorspiel auffindet, wie etwa Blutspuren und flackernde

Lichtquellen, integriert wurden. (Chattha et al., 2020, S. 130490). Das Ergebnis der Studie von Chattha et al. (2020) hat gezeigt, dass die Probanden signifikant stärkere Motion Sickness in der Horror-Umgebung erfahren haben als in der angenehmen Umgebung (S. 130493f). Dieses Resultat wurde von ihnen als ein möglicher Zusammenhang zwischen den biologischen Werten des Probanden, welche sich bei Angstzuständen in verschiedenen Situationen verändern (Blutdruck, Herzschlagfrequenz und Blutzuckerspiegel), und dem Auftreten von Motion Sickness interpretiert (S. 130496f). Zudem verursachen virtuelle Umgebungen mit besserer Beleuchtung eine geringere Ermüdung der Augen, was laut ihnen zum Begrenzen der Motion Sickness beiträgt (S. 130488).

Eine weitere Erklärung könnte hierbei der wahrgenommene Detailgrad der virtuellen Umgebung sein. Motion Sickness kann auch aufgrund eines höheren Realitätsniveaus der virtuellen Objekte und Szenerie der Anwendung auftreten (Hettinger et al., 1990, S. 172, Davis et al., 2015, S. 11), da ein höheres Realitätsniveau in der Regel mehr visuelle Stimulation mit sich bringt und diese in Verbindung mit stärkeren Symptomen steht. (Saredakis et al., 2020, S. 11f). Der Grund hierfür ist, dass ein höherer Detailgrad der Umgebung zur stärkeren Wahrnehmung von Bewegung, gerade in der Peripherie des Sichtfelds, führt, was wiederum ein stärkeres Gefühl der Vektion auslöst. Wenn man beispielsweise entlang einer einfarbigen Wand in der virtuellen Welt geht, wird man aufgrund der Textur, dem Material und dem allgemeinen Detailgrad dieser Wand vergleichsweise wenig Bewegung wahrnehmen können, was der geringen optischen Flussrate in dieser Situation zugrunde liegt. Ein höherer Realismus in der virtuellen Szene könnte zudem die Präsenz des Nutzers beeinflussen. Präsenz in diesem Kontext bezieht sich auf das Gefühl des Nutzers, dass er sich wirklich in der virtuellen Welt befindet. Wie in einer Studie von Lin et al. (2002) gezeigt wurde, kann es eine positive Korrelation zwischen der erfahrenen Präsenz und der aufgetretenen Motion Sickness geben (S. 170). Das kann also bedeuten, dass eine höhere Präsenz die Wahrscheinlichkeit für das Ausprägen von problematischen Krankheitssymptomen erhöht.

Neben dem visuellen Design der virtuellen Szenerie kann auch das akustische Design einen Faktor darstellen. Wie von Golding (2016) erwähnt wird, kann das Auftreten von Vektion auch durch spezifische Audiosignale hervorgerufen werden (S. 373). Zu diesen spezifischen Audiosignalen gehören z.B. Audioquellen, die sich im Kreis um die betroffene Person bewegen. Im Vergleich zu der normalen Vektion ist hier der Unterschied, dass das visuelle System nicht benötigt wird. Die rein-akustisch ausgelöste Vektion ist nach den Funden von Keshavarz et al. (2014) jedoch weniger intensiv als die rein-visuell ausgelöste Vektion (S. 4). In ihrer Studie haben sie die aufgetretene Krankheit zwischen einer visuellen Simulation mit und ohne akustischen Signalen verglichen, dabei jedoch keine bedeutenden Unterschiede auffinden können. Sie konnten hingegen einen signifikanten Anstieg von Motion Sickness als Resultat einer rein-akustischen Stimulation feststellen (S. 6). Die Stärke der erfahrenen Motion Sickness durch die Audiosignale war zwar relativ schwach, aber dennoch haben zwei Probanden die Teilnahme an dem Experiment aufgrund dessen abbrechen müssen. Eine potenzielle Erklärung für das Auftreten von Motion Sickness in dieser Situation, die von ihnen gegeben wird, basiert auf der Sensory Conflict Theory. Die Informationen über die Bewegung des Körpers, die dem Nutzer durch die Audiosignale vermittelt werden, könnten dabei einen Sinneskonflikt zwischen dem akustischen System und den Signalen des vestibulären Systems oder der Propriozeption ausgelöst haben. Ist das der Fall, würde das laut ihnen bedeuten, dass die Sensory Conflict Theory gegebenenfalls um das akustische System erweitert werden muss. (Keshavarz et al., 2014, S. 6).

Keshavarz und Hecht (2014) haben zudem in einer anderen Arbeit die Auswirkungen von Musik auf Motion Sickness untersucht. Dabei haben sie den Probanden ein

provokatives Video einer Fahrradfahrt gezeigt. Die Probanden wurden dafür in vier verschiedene Gruppen eingeteilt, denen entweder entspannende, neutrale, stressauslösende oder gar keine Musik im Zusammenspiel mit dem Video präsentiert wurde. Sie konnten dabei zwar einen positiven Effekt von entspannender Musik gegenüber stressauslösender Musik feststellen, jedoch war dieser Effekt nicht signifikant. Sobald die Musik aber von den Probanden selbst als entspannend eingestuft wurde, konnte, unabhängig davon, in welches Genre die Musik fällt, ein positiver Effekt auf die Krankheitssymptome festgestellt werden. (Keshavarz & Hecht, 2014, S. 525). Keshavarz und Hecht (2014) können für diese Ergebnisse keine Erklärung anhand der existierenden Theorien, wie etwa der Sensory Conflict Theory oder der Postural Instability Theory, geben. Die wahrscheinlichste Erklärung ist laut ihnen, dass das Hören von entspannender Musik, die von der betroffenen Person auch als solche eingestuft wird, verschiedene physiologische Werte positiv beeinflusst (z.B. die Herzschlagfrequenz und den Blutdruck) und dadurch zu geringerer Krankheit führt. (Keshavarz & Hecht, 2014, S. 525f).

Ein weiterer relevanter Aspekt der Anwendung ist das Design der Interaktionen des Nutzers mit der virtuellen Welt. Bei der Analyse von 55 Forschungsarbeiten zum Thema Motion Sickness in VR haben Saredakis et al. (2020) gefunden, dass Anwendungen, die aktive Interaktion des Nutzers mit der virtuellen Welt erfordern und bei denen Aufgaben in der VR-Umgebung erfüllt werden müssen, in der Regel zu mehr Motion Sickness führen, als Anwendung, bei denen es keine oder nur sehr simple Interaktionen mit der virtuellen Welt gibt (S. 10). Ein integraler Aspekt ist hier die Menge an Bewegung, die für die Interaktion und Fortbewegung in der simulierten Umgebung und den damit verbundenen Anwendungsablauf benötigt wird. Der Gedankengang dabei ist, dass Bewegungen in der virtuellen Welt eine Hauptquelle für Sinneskonflikte darstellen und daher in Anwendungen, in denen man sich weniger oder gar nicht bewegen muss, seltener provokative Situationen auftreten.

Die Art und Weise, wie sich der Nutzer in der simulierten Welt bewegt und welche Interaktionsmöglichkeiten ihm dafür in der realen Welt zur Verfügung stehen ist von besonderer Bedeutung bei dem Design der Interaktionen. Um die Änderungen der Position und Rotation in der virtuellen Umgebung zu bezeichnen, wird normalerweise der englische Begriff *Locomotion* genutzt. Die unterschiedlichen Locomotion-Techniken sind dabei aber nicht nur softwareabhängig, oft wird auch spezielle Hardware benötigt. Für interaktive VR-Anwendungen, in denen sich der Nutzer aktiv durch die virtuelle Welt bewegen muss, stellt die Wahl der Fortbewegungsmethode einen integralen Teil der Anwendung und vor allem auch einen Faktor für das Auftreten von Motion Sickness dar. Zusätzlich ist in den meisten Fällen der Platz für Bewegungen in der realen Welt viel kleiner als der zugängliche Bereich in der virtuellen Welt. Dieses Problem kann zwar durch die Wahl einer geeigneten Locomotion-Methode umgangen werden, aber viele dieser Methoden können direkt Motion Sickness auslösen. Abgesehen von dem natürlichen Gehen in der VR-Anwendung, können alle Locomotion-Arten Konflikte zwischen dem Gesehenen und dem durch das vestibuläre System Gefühlten auslösen. Das Entstehen von Sinneskonflikten zwischen den echten und virtuellen Bewegungen ist dabei, wie Gemert und Bergstrom (2021) erwähnen, ein inhärentes Problem der Fortbewegung in VR-Anwendungen (S. 380). In Hinsicht auf die Eigenschaften der erhältlichen VR-Headsets (schnelles und akkurates Tracking, hohe Bildschirmaktualisierungsraten) kann durchaus argumentiert werden, dass die verwendete Fortbewegungsmethode eine der Hauptrollen beim Auslösen von Motion Sickness spielt.

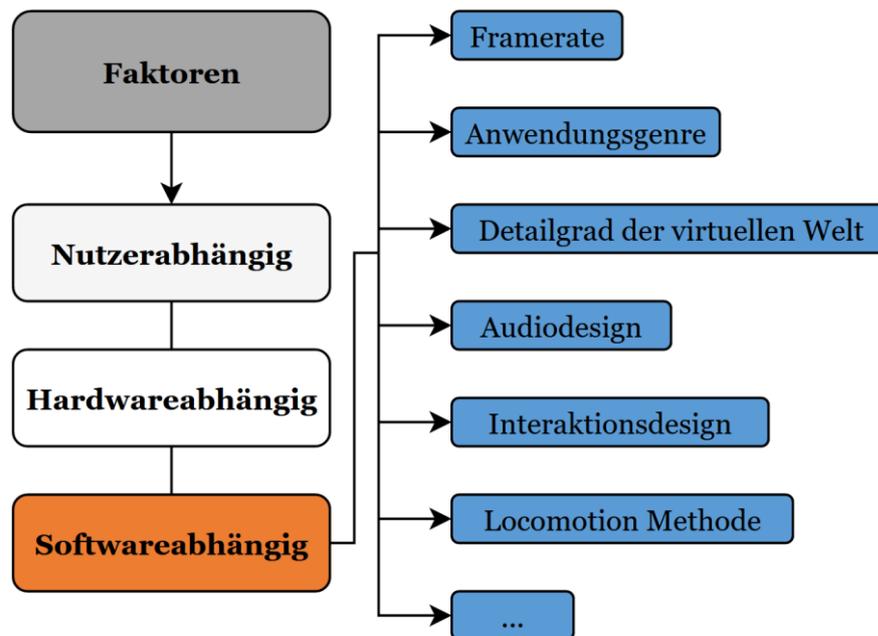


ABBILDUNG 6 EIN KURZER ÜBERBLICK ÜBER DIE SOFTWAREABHÄNGIGEN FAKTOREN VON MOTION SICKNESS.

4.2 METHODEN

Aus vielen der hier behandelten Faktoren können praktische Methoden zur Vermeidung und Reduktion der Krankheitssymptome erarbeitet werden. Die Prävention der Krankheit steht zwar bei allen diesen Methoden im Mittelpunkt und ist für ein gutes Erlebnis der Nutzer besonders wichtig, jedoch stellt sie sich häufig als schwerer heraus als das Behandeln der Symptome, sobald sich diese ausgeprägt haben. (Graybiel, 1988, S. 46). Dennison und Krum (2019) weisen hierbei auch auf eine weitere wichtige Tatsache hin, die bei diesem Thema im Hinterkopf behalten werden muss (S. 1858):

There is no single magic silver bullet to end motion sickness in immersive experiences. The best approach is a concerted effort to connect and coordinate user models of motion sickness, content models, and mitigation techniques, allowing users, researchers, developers, and content creators to have adaptive and adjustable immersive experiences.

Es gibt also keine perfekte Lösung für das Problem der Motion Sickness bei interaktiven VR-Anwendungen. Der beste Weg dieses Ziel zu erreichen ist daher ein gutes Zusammenspiel der Präventionsmethoden und des Designs der Anwendungsinhalte, sowie das Abstimmen dieser auf den jeweiligen Nutzer und seine individuellen Bedürfnisse. Es muss auch beachtet werden, dass viele dieser Methoden zudem einen Kompromiss zwischen der Stärke der Krankheit und der Immersion bzw. Präsenz des Nutzers in der Anwendung darstellen, was gerade bei interaktiven VR-Anwendungen, die versuchen eine gewisse Atmosphäre aufzubauen und den Nutzer ohne Hindernisse in die Anwendung eintauchen zu lassen, ein Problem darstellt. Glücklicherweise eignen sich die meisten Methoden gut als optionale Einstellungen der Anwendung, die je nach Bedarf des Nutzers verändert und ein- bzw. ausgeschaltet werden können.

4.2.1 EINNEHMEN VON ARZNEIMITTELN

Die wahrscheinlich verbreitetste Methode zum Vermeiden und Reduzieren von Motion Sickness außerhalb des VR-Bereichs ist das Einnehmen von Medikamenten. Es gibt eine Vielfalt an Medikamenten die versprechen gegen die Symptome der Krankheit zu helfen. Diese können beispielsweise die Form von Tabletten zur direkten oralen Einnahme, in Wasser aufgelösten Brausetabletten oder auch Kaugummis annehmen und sind sehr gebräuchlich für das Bekämpfen der Reisekrankheit im Auto und der Seekrankheit bei der Schifffahrt. Wie lange vor Auftritt der Krankheit das Medikament eingenommen werden muss, um effektiv zu sein, oder auch die Länge des Wirkungszeitraums hängen dabei stark von dem jeweiligen Arzneimittel ab. Laut Jung et al. (2017) gibt es heutzutage auch Anti-Motion-Sickness-Medikamente, die spezifisch für den VR-Markt vorgesehen sind und versuchen, die Krankheitssymptome zu verringern oder komplett zu vermeiden, indem sie die Empfindlichkeit des vestibulären Systems vermindern (S. 151). Es gibt jedoch einige Gründe, warum die Einnahme von Medikamenten keine optimale Lösung für den Gebrauch im VR-Bereich darstellt. Zum einen muss die Einnahme des Arzneimittels mehr oder weniger geplant erfolgen, da eine gewisse Zeit benötigt wird, bis die Wirkstoffe einen Effekt auf den Körper haben. Zum anderen muss solch ein Medikament womöglich relativ häufig eingenommen werden, beispielweise bei regelmäßiger Nutzung der VR-Anwendung oder bei längeren Sitzungen. Das kann zum einen zu Sorgen und Unwohlsein hinsichtlich der Dosierung führen, aber auch ein allgemeines Problem im Zusammenspiel mit anderen Gesundheitsproblemen darstellen. Viele dieser Arzneimittel haben zudem auch potenzielle Nebenwirkungen, die die regelmäßige Einnahme verhindern (z.B. Ermüdung, Orientierungslosigkeit, Schwindelgefühle oder ein trockener Mund). (Chattha et al., 2020, S. 130487, Regan, 1995, S. 28f).

4.2.2 WAHL DER EINGABEGERÄTE FÜR LOCOMOTION

Wie schon erwähnt, stellt die Wahl der Fortbewegungsmethode in der VR-Anwendung einen wichtigen Faktor hinsichtlich Motion Sickness dar. Von Seiten der Hardware sind die Eingabegeräte, die der Nutzer verwendet, oft direkt mit der Fortbewegung in der virtuellen Umgebung verbunden. Die Locomotion-Techniken können dabei in abstrakte und natürliche Methoden eingeteilt werden. (Darken et al., 1997, S. 213). Abstrakte Methoden sind die Methoden, die nicht der Bewegung in der echten Welt ähneln (z.B. Teleportieren oder Bewegung durch einen Joystick). Hingegen ähneln die natürlichen Methoden den Bewegungen in der echten Welt oder versuchen zumindest, diese bestmöglich zu imitieren (z.B. das echte Gehen oder das Simulieren der Gehbewegung durch eine Treadmill). Unabhängig davon, ob es sich um eine abstrakte oder natürliche Fortbewegungsmethode handelt, gibt es hier zwei grobe Ansätze, um Motion Sickness zu vermeiden. Der erste Ansatz ist das künstliche Unterdrücken oder Abändern der Signale des visuellen und vestibulären Systems, um entweder Sinneskonflikte komplett zu vermeiden oder die Signale der Sinne besser aneinander anzupassen und damit Konflikte abzuschwächen. Der zweite Ansatz ist es, die Bewegungen in der echten und künstlichen Welt so gut wie möglich übereinstimmen zu lassen, so dass Konflikte im besten Fall gar nicht erst entstehen.

Heutzutage wird in VR-Anwendungen meistens durch die Verwendung spezieller VR-Kontroller mit der virtuellen Welt interagiert. Diese Kontroller besitzen in der Regel Knöpfe, Trigger, Joysticks und Touchpads, um verschiedene Aktionen in der VR-Anwendung durchzuführen (z.B. das Aufheben oder Auswählen eines Objekts), aber ermöglichen zudem auch das Tracking der Hände und, je nach VR-Kontroller, auch das Ermitteln der Fingerpositionen. Die Joysticks oder Touchpads der Kontroller werden normalerweise für das Fortbewegen in der Umgebung genutzt, sehr ähnlich zu der Steuerung herkömmlicher Videospiele. Dies stellt jedoch ein Problem für das Vermeiden von Motion Sickness dar, da hier ein direkter Konflikt zwischen dem

visuellen und vestibulären System auftritt (der Nutzer sieht Bewegung, fühlt sie aber nicht). Das macht die herkömmliche Fortbewegung mittels VR-Kontrollern, ohne Anpassungen von Seiten der Anwendung, zu einem direkten Auslöser von Motion Sickness und damit zu einer der ungünstigsten Fortbewegungsmethoden, die in interaktiven VR-Anwendungen verwendet werden können. Besonders im Vergleich zu den alternativen Fortbewegungsarten, sowohl von Seiten der Software als auch der Hardware, können durch die Fortbewegung basierend auf VR-Kontrollern sehr starke Ausprägungen von Motion Sickness auftreten. (Saredakis et al., 2020, S. 12).

Grundsätzlich würde die Fortbewegung durch das Gehen in der echten Welt zu den geringsten Ausprägungen der Krankheit führen oder diese unter Umständen auch komplett vermeiden, jedoch stellt die Limitation des physischen Raums dabei ein inhärentes Problem dar. Dieses Problem kann jedoch durch Nutzen von spezieller Hardware, wie etwa einer VR-Treadmill, umgangen werden. VR-Treadmills sind externe Geräte, die mithilfe von Laufbändern oder rutschigen Oberflächen das Gehen auf der Stelle ermöglichen und damit die Bewegungen der echten und virtuellen Welt bestmöglich synchronisieren. In der Vergangenheit waren diese Geräte oft sehr teuer und aufgrund ihrer Größe oft nicht für den Privatgebrauch geeignet, aber gerade seit Start des aktuellen VR-Booms haben sie sich immer mehr in Richtung des Konsumer- und Unterhaltungsbereichs entwickelt, was sie wiederum auch attraktiver für den Gebrauch in der wissenschaftlichen Forschung und professionellen Anwendungsgebieten macht. Wie in der Arbeit von Kemeny et al. (2020) zu sehen ist, gibt es auch eine Vielzahl an anderen Gerätearten, die das gleiche Prinzip wie Treadmills nutzen, um Motion Sickness zu vermeiden (z.B. Gait Devices, Walking Shoes und Mobile Tiles) (S. 86ff). Treadmills und diese anderen Geräte versuchen grundsätzlich die physischen Bewegungen beim echten Gehen zu imitieren und damit dem vestibulären System und der Propriozeption des Nutzers den Eindruck von echter Bewegung zu verschaffen. VR-Treadmills ermöglichen dabei nicht nur eine realistische Bewegung des Kopfes und des restlichen Körpers, sondern auch eine natürliche Gehbewegung und dazu passende Körperhaltung. Das Involvieren von physischen Bewegungen, um die Sinne auf diese Art zu täuschen, kann dabei zu einer durchaus signifikanten Verringerung der Krankheitssymptome führen. (Jaeger & Mourant, 2001, S. 1900).

Bei den VR-Treadmills kann zwischen *unidirectional* und *omnidirectional* Treadmills unterschieden werden. Unidirectional Treadmills bestehen oft aus einem simplen Laufband, das dem Nutzer nur das Bewegen in eine einzelne Richtung ermöglicht. Omnidirectional Treadmills ermöglichen hingegen das Bewegen in verschiedene Richtungen und auch das problemlose Rotieren des Körpers. Da omnidirectional Treadmills die Freiheitsgrade des Nutzers weniger einschränken und damit ein realistischeres bzw. natürlicheres Bewegen in der virtuellen Welt ermöglichen, sind sie bei der Verwendung hinsichtlich Motion Sickness zu bevorzugen. Ein Nachteil von omnidirectional Treadmills ist, dass der Nutzer bei Verwendung dieser in der Regel in eine Art Halterung eingespannt ist, was die möglichen Bewegungen und einnehmbaren Haltungen teils stark einschränkt und deshalb bei der Nutzung als unangenehm empfunden werden könnte. Die Halterung bietet hingegen aber auch den Vorteil, dass der Nutzer dadurch keine Bedenken haben muss, den Bereich der VR-Treadmill unbeabsichtigt zu verlassen und sich dabei unter Umständen zu verletzen. Es kann zudem argumentiert werden, dass die Halterung zusätzlich auch für bessere Stabilität der Körperhaltung sorgt, was gegebenenfalls einen positiven Effekt auf Motion Sickness haben könnte.

Die Imitation der Gehbewegung durch eine Treadmill kann zwar bei den Konflikten zwischen den Sinnen helfen, oft ist es jedoch nicht möglich, diese vollständig zu verhindern. Wie Frissen et al. (2013) erklären, sind gerade die vestibulären Signale bei Beginn und Beendigung der Gehbewegung von besonderer Bedeutung bei der

Identifikation von Bewegungen (S. 130). Der Grund hierfür ist, dass die vestibulären Organe, wie schon in Kapitel 3.1.1 beschrieben, vorwiegend Beschleunigungen wahrnehmen und bei einer Bewegung ohne wahrnehmbare Beschleunigung keine signifikanten Signale liefern. Wenn der Nutzer der VR-Anwendung keine Signale durch das vestibuläre System erhält, heißt das also grundsätzlich nicht, dass es keine Bewegung gibt, sondern nur, dass aktuell keine Beschleunigung stattfindet. Aus diesem Grund sehen Frissen et al. (2013) besonders das akkurate Wahrnehmen der Beschleunigung bei Beginn und Beendigung der Gehbewegung als wichtig, um die korrekten Signale im vestibulären System auszulösen (S. 18). Mithilfe der meisten kommerziell erhältlichen VR-Treadmills kann dies jedoch nicht erreicht werden, da der Nutzer sich dabei fest in einer Position befindet und die Beschleunigungen damit nicht akkurat imitiert werden können. Des Weiteren kann es bei der Verwendung einer Treadmill theoretisch auch zu nicht-visueller Vektion aufgrund der Propriozeption kommen (Frissen et al., 2013, S. 129), was wiederum die erfahrene Motion Sickness beeinflussen könnte.

4.2.3 VERMEIDEN VON PASSIVER BEWEGUNG

Neben den externen Eingabegeräten, durch die die Fortbewegung in der virtuellen Welt ausgeführt wird, ist auch die Art und Weise wie sich der virtuelle Charakter bewegt, ein Aspekt, bei dem gezielte Änderungen einen positiven Effekt auf die Ausprägungen von Motion Sickness haben können. Dabei kann man die Bewegungen des Charakters in der virtuellen Welt in passive und aktive Bewegungen einteilen.

Passive Bewegungen können als Bewegungen definiert werden, die der Nutzer nicht direkt initiiert und über die er keine gezielte Kontrolle hat. Diese Art von Bewegung kann durch verschiedene Elemente der VR-Anwendung ausgelöst werden, beispielsweise durch bewegliche Objekte, die den Spieler durch die virtuelle Umgebung transportieren, wie etwa Aufzüge oder Fahrzeuge. Zudem können passive Bewegungen auch das Resultat der einwirkenden physikalischen Kräfte in der VR-Umgebung sein. Das ist zum Beispiel der Fall, wenn der Nutzer aufgrund der Schwerkraft nach unten fällt oder auf den virtuellen Charakter physikalische Kräfte bei Kollisionen mit anderen virtuellen Objekten einwirken. Auch manuelle Bewegungen der Sicht des Nutzers durch Manipulation der Anwendungskamera zählen zu der Kategorie der passiven Bewegungen. In herkömmlichen Videospiele tritt dies z.B. bei den sogenannten *Cutscenes* auf. *Cutscenes* sind Zwischensequenzen des Spiels, die keine Interaktion des Nutzers zulassen und in der Regel für das Näherbringen der Handlung genutzt werden. Das Simulieren der Auf- und Abbewegung des Kopfes beim Gehen ist eine weitere passive Bewegung, die in herkömmlichen Videospiele regelmäßig vorkommt und dafür gedacht ist, die Anwendung für den Nutzer realistischer erscheinen zu lassen und damit zudem auch die Immersion des Spielers zu erhöhen.

Im Gegensatz dazu, werden aktive Bewegungen durch direkte Aktionen des Nutzers und seine Interaktionen in der echten Welt hervorgerufen. Der Nutzer hat über diese Bewegungen die vollkommene Kontrolle und kann sie, abhängig von seinen eigenen Fähigkeiten und den existierenden Limitationen, beliebig beeinflussen. Zu den aktiven Bewegungen gehören nicht nur die Bewegungen aufgrund direkter Interaktion des Nutzers mit dem Eingabegerät und das Gehen in der echten Welt, sondern auch indirekte Aktionen des Nutzers, wie etwa das Verändern seiner Sichtrichtung durch Anpassen der Kopflage.

In der Regel gilt bei VR-Anwendungen, dass passive Bewegungen so gut wie möglich vermieden werden sollten, um die Wahrscheinlichkeit für das Auftreten und die Stärke von Motion Sickness zu verringern. Wie viele andere Effekte der Krankheit, lässt sich der Grund hierfür sehr gut am Beispiel der Autofahrt erklären. Reisekrankheit beim Autofahren tritt vermehrt bei den Passagieren auf und vergleichsweise nur selten bei

dem Fahrer. Die Passagiere besitzen keinerlei Kontrolle über die Bewegungen des Fahrzeugs und können sich auf diese auch nicht direkt vorbereiten. Hingegen dazu hat der Fahrer die volle Kontrolle, weiß welche Bewegungen mit dem Fahrzeug ausgeführt werden und kann sich demnach auf sie vorbereiten. (Kemeny et al., 2002, S. 118f). Eine mögliche Erklärung für den Unterschied zwischen Fahrer und Beifahrer ist, dass das aktive Ausführen der Aktion, die die Bewegung auslöst, grundsätzlich anders wahrgenommen wird und der daraus resultierende Vergleichsprozess zwischen den motorischen Signalen weniger zu der Ausprägung von Krankheitssymptomen beiträgt. (Rolnick & Lubow, 1991, S. 877). Des Weiteren kann der Unterschied anhand der benötigten Zeitspanne zum Anpassen der Sicht an eine Körper- bzw. Kopfbewegung erklärt werden. Da sich der Fahrer auf die Bewegungen des Fahrzeugs vorbereiten kann, kann er eine schnelle Anpassung der Sicht an die Bewegung durchführen. Der Beifahrer kann sich auf die Bewegung nicht direkt vorbereiten und braucht daher länger für diese Anpassung, was gegebenenfalls zu mehr bzw. stärkeren Konflikten zwischen den involvierten Sinnen führt. (Kemeny, 2014, S. 2).

Eine weitere mögliche Erklärung wird von Dong et al. (2011) gegeben, welche dieses Phänomen anhand der Postural Instability Theory wie folgt erklären: Personen in einem Fahrzeug müssen aktiv Kontrolle über die Haltung ihres Körpers auswirken, um sich bei der Fahrt zu stabilisieren (weswegen man sich beispielsweise bei Beschleunigungen des Fahrzeugs diesen entgegen lehnt). Fahrer können sich aufgrund ihrer aktiven Kontrolle über das Fahrzeug auf diese Bewegungen vorbereiten und daher sind die Haltungsänderungen, die sie vollziehen, um eine stabile Körperhaltung zu erreichen, besser an die vorliegende Situation angepasst. Die Beifahrer haben diesen Vorteil nicht und laufen deshalb eher Gefahr, eine instabile Körperhaltung zu erfahren, was sie wiederum leichter anfällig für Motion Sickness macht. (Dong et al., 2011, S. 129).

Wie anhand dieser Erklärung zu sehen ist, spielt die Fähigkeit des Fahrers, die Bewegungen des Fahrzeugs vorherzuahnen, eine zentrale Rolle für die Anpassung an passive Bewegungen. Eine potenzielle Schlussfolgerung ist daher, dass es möglicherweise einen positiven Effekt bei Beifahrern geben könnte, wenn sie die Bewegungen auch erahnen können. Die Studien von Bos et al. (2012) und Tal et al. (2012) haben gezeigt, dass dies in gewissen Situationen tatsächlich der Fall ist. In der Studie von Bos et al. (2012) hat ein visueller Indikator, der die Probanden die Flugbahn eines Flugzeugs während einer VR-Simulation erahnen ließ, zu einer sehr signifikanten Reduktion der Motion Sickness-Symptome geführt (S. 8f). Ähnlich hierzu hat auch das Einblenden eines künstlichen Horizonts bei einer Schifffahrtssimulation in der Studie von Tal et al. (2012) die Ausprägungen der Krankheit abgeschwächt (S. 884). Wenn passive Bewegungen nicht vermieden werden können, sollte daher zumindest versucht werden, den betroffenen Personen das Vorhersagen der Bewegungen auf geeignete Weise zu ermöglichen. Je nach Art der passiven Bewegung kann eine weitere Möglichkeit auch das Verringern der Zeit, in der die Bewegung stattfindet, sein. Ein gutes Beispiel ist hier das Herunterfallen des virtuellen Charakters von einer erhöhten Position. Durch starkes Beschleunigen der Fallgeschwindigkeit wird der Zeitraum, in dem ein Konflikt zwischen den Sinnen entstehen kann, verringert, was unter Umständen dafür sorgt, dass der Konflikt entweder gar nicht oder zumindest abgeschwächt auftritt.

4.2.4 ANGEPASSTE FORTBEWEGUNG IN DER ANWENDUNG

Auch wenn eine VR-Anwendung komplett auf passive Bewegung des Nutzers verzichtet, kann Motion Sickness trotzdem noch bei aktiver Bewegung auftreten. Basierend auf den verschiedenen Theorien und beteiligten Phänomenen haben sich daher bei der aktiven Bewegung verschiedene Fortbewegungsmethoden zur

Vermeidung der Krankheit etabliert. Der Großteil dieser Methoden fällt dabei in die Kategorie der abstrakten Locomotion-Arten.

Die wohl verbreitetste Methode ist hierbei das Ersetzen der Gehbewegung in der virtuellen Welt durch das Teleportieren von einem Punkt zum anderen. Diese Fortbewegungsmethode stellt gerade im Bereich der VR-Videospiele eine weit verbreitete Technik dar und es ist heutzutage schwer, ein VR-Spiel zu finden, das dem Spieler nicht die Option des Teleportierens zur Verfügung stellt. Bei dieser Art von Fortbewegung verwendet der Nutzer einen VR-Kontroller, mit dem er in eine beliebige Richtung zeigen kann und durch einen Knopfdruck an die ausgewählte Stelle in dieser Richtung teleportiert wird. Das Teleportieren kann dabei entweder auf festgelegte Positionen in der virtuellen Welt beschränkt sein oder durch eine dynamische Auswahl der Position erfolgen. Zudem kann die Distanz der Teleportation auf die unmittelbare Umgebung des Nutzers begrenzt werden. Dies führt zwar dazu, dass der Nutzer vergleichsweise viele Teleportationen durchführen muss, um an sein Ziel zu kommen, aber die räumliche Wahrnehmung und Orientierung in der virtuellen Welt können davon profitieren.

Das Teleportieren im virtuellen Raum stellt dabei, wie Weißker et al. (2018) erklären, ein Extremum im Vergleich mit der kontinuierlichen Bewegung dar. Die kontinuierliche Fortbewegung kann als das Teleportieren zwischen unendlich kleinen Abständen angesehen werden, bei dem der Nutzer die gesamte Bewegung wahrnimmt. (Weißker et al., 2018, S. 2). Bei den verschiedenen Variationen des Teleportierens nimmt der Nutzer zwar auch eine Positionsveränderung wahr, aber im Gegensatz zu der kontinuierlichen Fortbewegung existiert dabei keine direkt wahrnehmbare Bewegung. Das Verhindert das Auftreten eines Konfliktes zwischen dem Gesehenen und dem Gefühlten, wodurch wiederum Ausprägungen von Motion Sickness vermieden werden können. Dieser positive Effekt lässt sich in einigen Studien auffinden (z.B. Farmani & Teather, 2020 und Zaidi & Male, 2018) und das Teleportieren kann man daher hinsichtlich der Vermeidung von Motion Sickness als die beste Fortbewegungsmethode ansehen.

Die Fortbewegung mittels Teleportation ist zwar sehr gut geeignet, um die Wahrscheinlichkeit des Auftretens von Motion Sickness und die Stärke der Symptome zu verringern, aber es gibt dennoch einige Probleme hinsichtlich anderer relevanter Aspekte. Zu diesen Aspekten gehören beispielsweise das Behalten der räumlichen Wahrnehmung, wie viel Zeit benötigt wird, um die virtuelle Welt mit der Fortbewegungsmethode zu traversieren und wie intuitiv das Ganze für den Nutzer ist. Die Intuitivität und das Erhalten der räumlichen Wahrnehmung können zudem auch Faktoren für die Immersion und die gefühlte Präsenz sein, wobei Immersion und Präsenz auch selbst von der gewählten Fortbewegungsmethode beeinflusst werden können. Da die Fortbewegung durch Teleportieren eine sehr abstrakte Locomotion-Technik darstellt, haben manche Nutzer gegebenenfalls die Ansicht, dass das Teleportieren ihre allgemeine Anwendungserfahrung und Immersion in der virtuellen Welt negativ beeinflusst. Dazu kommt, dass Teleportieren auch zu Problemen mit dem konkreten Design und den Inhalten einer VR-Anwendung führen kann. Ein Beispiel hierfür wäre etwa ein Hindernisparcour, bei dem der Nutzer verschiedenen Objekten ausweichen und über eine schmale Brücke balancieren muss. Fortbewegung mittels Teleportation trivialisiert bei einer solchen Anwendung sowohl das Ausweichen und das Balancieren, was wiederum das Anwendungserlebnis verschlechtert. Ähnlich ist es auch bei Anwendungen, in denen mehrere Teilnehmer miteinander interagieren, gerade wenn diese in der Anwendung gegeneinander arbeiten (z.B. bei einem VR-Shooter).

Eine Alternative zur Teleportation bei der Steuerung mittels eines VR-Kontrollers ist das Anpassen der kontinuierlichen Bewegung durch verschiedene Methoden. Zu diesen

Methoden gehören beispielweise das Begrenzen der Bewegungsgeschwindigkeit und das Entfernen von wahrnehmbaren Beschleunigungen oder Rotationsbewegungen.

Das Begrenzen der Bewegungsgeschwindigkeit bezieht sich sowohl auf die Translation im Raum als auch die Rotation der Kamera. Der Gedankengang ist hierbei, dass das Begrenzen der Bewegungsgeschwindigkeit zu einer natürlicheren Wahrnehmung der Bewegung und damit weniger oder abgeschwächten Konflikten zwischen den Sinnen führt. Beispielsweise schlägt der Best Practices Guide von Oculus vor, dass die Bewegungsgeschwindigkeit auf die Gehgeschwindigkeit eines Menschen in der echten Welt (ca. 1.4 Meter pro Sekunde) begrenzt werden sollte. (Oculus VR, 2017, S. 6). Das macht Sinn, da der Nutzer diese Geschwindigkeit gewohnt ist und sie daher als sehr natürlich ansieht. Allgemein kann davon ausgegangen werden, dass eine höhere Bewegungsgeschwindigkeit des Charakters in der Anwendung zu mehr Motion Sickness bei den Nutzern führt. (Kwok et al., 2018, S. 92, So et al., 2001, S. 457f). Ähnlich ist es auch bei der Rotationsgeschwindigkeit der Kamera bzw. des Charakters in der virtuellen Welt. (Farmani & Teather, 2018, S. 147, Kovalev et al., 2020, S. 2838). Eine Erklärung hierfür ist, dass eine höhere Geschwindigkeit zu einer größeren optischen Flussrate und damit einer stärkeren Wahrnehmung von Vektion führt, was wiederum mehr und intensivere Sinneskonflikte mit sich bringt. (Kwok et al., 2018, S. 91, Kovalev et al., 2020, S. 2838).

Bei der Rotationsgeschwindigkeit gibt es im Vergleich zur der Gehgeschwindigkeit jedoch keinen konkreten Wert, der von den Nutzern als natürlich angesehen wird, da die Rotation in der echten Welt durch Drehung des Kopfes oder auch durch Rotation des ganzen Körpers erreicht werden kann. Bei der künstlichen Drehung der Blickrichtung in der virtuellen Umgebung bietet es sich daher an, eine ähnliche Methode zu nutzen, wie bei der Traversierung der Umgebung durch Teleportieren. Anstatt eine kontinuierliche Rotation durchzuführen, wird die Drehung dabei anhand eines festgelegten Winkels inkrementell ausgeführt. Das Ganze wird als *Rotation Snapping* bezeichnet und führt dazu, dass der Nutzer die Drehbewegung nicht direkt wahrnimmt. Diese Anpassung kann zu einer sehr signifikanten Reduktion der auftretenden Motion Sickness führen, wie die Studie von Farmani und Teather (2020) gezeigt hat. Die auftretenden Symptome wurden dabei um ungefähr 40% gesenkt, ohne einen signifikanten negativen Einfluss auf die wahrgenommene Präsenz der Probanden gehabt zu haben. (Farmani & Teather, 2020, S. 654). Der Grund für diesen großen Effekt ist, dass Rotationen und Seitwärtsbewegungen in der Regel besonders ausschlaggebend für das Auslösen von Motion Sickness sind und Vektion aufgrund zirkulärer Bewegung sehr überzeugend für den Nutzer ist. (Trutoiu et al., 2009, S. 56).

Bei kontinuierlichen Bewegungen aller Art ist es zudem eine gute Idee, auf wahrnehmbare Beschleunigungen in der Anwendung, die nicht auf Beschleunigungen in der echten Welt basieren, zu verzichten. Ähnlich wie schon in Kapitel 3.1.1 erwähnt, stellen aufgrund der Eigenschaften des vestibulären Systems besonders Beschleunigungen eine Quelle für Konflikte dar. Dazu kommt auch noch, dass Beschleunigungen zu Änderungen der erfahrenen Vektion führen können, also unstetige Vektion auftritt, was den negativen Effekt verstärken kann. Es ist daher am besten, Geschwindigkeits- und Richtungsänderungen augenblicklich durchzuführen, so dass sich der virtuelle Charakter also entweder mit der gewollten Geschwindigkeit bewegt oder komplett stehen bleibt, ohne dabei abzubremsen oder zu beschleunigen.

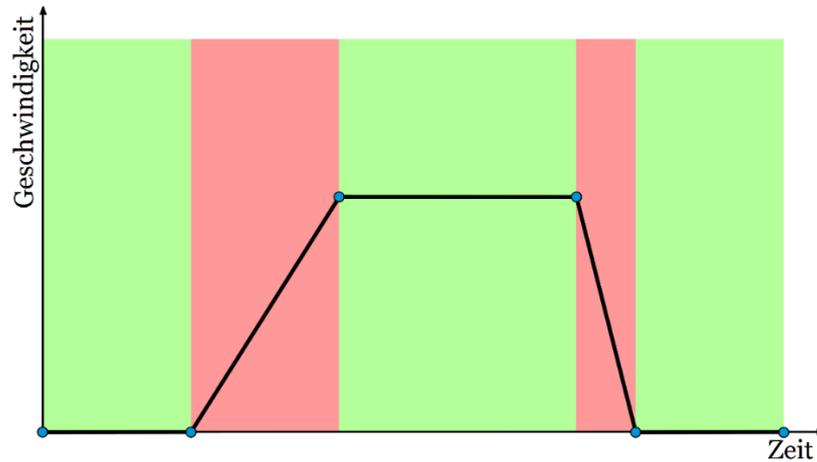


ABBILDUNG 7 DARSTELLUNG DER PROBLEMATISCHEN ZEITRÄUME (ROT) BEI DER LOCOMOTION MIT BESCHLEUNIGUNG.

4.2.5 MANIPULATION DER PERIPHERIE

Neben der Art und Weise, wie sich der Nutzer in der virtuellen Welt und der Realität bewegt, gibt es auch Methoden, die die visuelle Darstellung und verschiedene visuelle Aspekte anpassen, um Motion Sickness zu vermeiden. Diese Methoden haben den Vorteil, dass sie sich gut mit den angepassten Fortbewegungsmethoden kombinieren lassen und auch eine valide Option für Nutzer darstellen, für die aufgrund von körperlichen Einschränkungen einige der besprochenen Locomotion-Techniken nicht in Frage kommen. Eine Art dieser Methoden ist das gezielte Manipulieren des äußeren Sichtfeldbereichs des Nutzers. Wie schon erklärt, ist die Peripherie der Augen besonders stark bei der Wahrnehmung von Bewegungen und Vektion beteiligt, weshalb gezielte Änderungen in diesem Bereich einen positiven Effekt auf die erfahrene Motion Sickness des Nutzers haben können.



ABBILDUNG 8 VERANSCHAULICHUNG DER PERIPHERIE BEI DER BETRACHTUNG EINER VIRTUELLEN UMGEBUNG. DER RÖTLICHE BEREICH AUßERHALB DES KREISES STELLT DIE PERIPHERIE DES SICHTFELDS DAR.

Eine solche Methode ist das Reduzieren des (externen) Sichtfelds in die virtuelle Welt. Die Reduktion des FOVs führt zu einer geringeren Wahrnehmung der simulierten Bewegung und vermindert zudem die erfahrene Vektion, was wiederum die Wahrscheinlichkeit für das Auftreten von Konflikten verringert. Die Reduktion des Sichtfelds wird bei den meisten Implementierungen dieser Technik durch einen Vignetteneffekt erreicht, der eine Art Tunneleffekt erzeugt, weshalb man diese Methode auch unter dem Begriff *Tunneling* auffinden kann. Das Ganze stellt dabei in erster Regel eine Methode auf Seiten der Software dar, jedoch gibt es durchaus auch Arbeiten, die diese Methode erfolgreich durch spezielle Hardwarelösungen implementieren (z.B. Zhang et al., 2021).



ABBILDUNG 9 VERANSCHAULICHUNG DES TUNNELEFFEKTS ZUR REDUKTION DER STIMULATION IN DER PERIPHERIE.

Da das Begrenzen des Sichtfelds den Anwendungsablauf und das Erledigen existierender Aufgaben, sowie die Orientierung und räumliche Wahrnehmung negativ beeinflussen kann, wird die FOV-Reduktion in der Regel dynamisch durchgeführt. Durch das dynamische Begrenzen des Sichtfelds kann der Effekt an genau die Aktionen des Nutzers gebunden werden, die bei dem Auftreten von Motion Sickness beteiligt sind. Beispielsweise wird der Tunneleffekt oft nur dann aktiviert, wenn sich der Nutzer in der virtuellen Welt bewegt. Um den Anwendungsablauf noch weniger zu beeinträchtigen, können zusätzlich nur die Bewegungen beachtet werden, die nicht in der realen Welt stattfinden. Sobald eine Bewegung durchgeführt wird, die die festgelegten Kriterien erfüllt, kann das FOV etwa anhand der Dauer der Bewegung oder der Geschwindigkeit verringert werden.

Wie stark der Tunneleffekt dabei maximal sein sollte, hängt von dem FOV des verwendeten VR-Headsets und von der Anwendung selbst ab. Je größer das externe FOV vor der Beschränkung ist, desto stärker kann bzw. muss die Reduktion sein, um den gewünschten Effekt zu erzielen. Grundsätzlich führt dabei eine stärkere Reduktion zu einem besseren Effekt auf die Ausprägungen von Motion Sickness, aber es müssen auch die Auswirkungen auf den Anwendungsablauf beachtet werden. Ist der Effekt zu stark, kann das die gefühlte Präsenz des Nutzers negativ beeinflussen. Laut Experimenten von Lim et al. (2021) sollte daher die Reduktion auf eine Sichtfeldgröße von 60 Grad nicht überschritten werden. Ein FOV von 60 Grad stellt einen guten Kompromiss zwischen verringerter Motion Sickness und einem minimalen Verlust der

Präsenz dar. (Lim et al., 2021, S. 334). Wie in der Studie von Fernandes und Feiner (2016) gezeigt wurde, kann es zudem sein, dass die Nutzer zwar von dem Tunneleffekt profitieren, diesen jedoch gar nicht aktiv wahrnehmen, falls er subtil genug ist (S. 209f).

Eine ähnliche Methode zur Manipulation der Peripherie ist es, einen Unschärfeeffect zu nutzen, um die wahrgenommene Bewegung im äußeren Bereich des Sichtfelds abzuschwächen. Der allgemeine Ablauf dieser Methode ist dabei mehr oder weniger der Gleiche wie bei der direkten FOV-Reduktion, mit dem Unterschied, dass der Unschärfeeffect die Peripherie nicht komplett verdeckt, sondern lediglich weichzeichnet. Groth et al. (2021) haben in ihrer Studie diese Art der Methode und direkte FOV-Reduktion durch einen Tunneleffekt verglichen. Sie haben dabei gefunden, dass sich zwar beide Methoden für die Reduktion von Motion Sickness-Symptomen eignen, das komplette Verdecken der Bewegungen in der Peripherie durch dynamische FOV-Reduktion jedoch einen größeren Effekt auf die Ausprägung der Krankheit hat. (Groth et al., 2021, S. 487).



ABBILDUNG 10 VERANSCHAULICHUNG DES UNSCHÄRFEFFEKTS ZUR REDUKTION DER STIMULATION IN DER PERIPHERIE.

4.2.6 REST FRAMES

Eine andere visuelle Methode zum Vermeiden von Motion Sickness, die nicht auf den Eigenschaften des Peripheriebereichs des menschlichen Auges beruht, ist das gezielte Integrieren von Rest Frames in die VR-Anwendung. Laut der Rest Frame Theory tritt Motion Sickness dann auf, wenn es Konflikte bei der Auswahl des verwendeten Rest Frames gibt, da es dann schwer ist zu entscheiden, welche Teile der Umgebung stationär sind und welche nicht. Eine mögliche Lösung ist also das Einfügen von leicht erkennbaren, allgegenwärtigen Rest Frames in die virtuelle Umgebung, damit es seltener zu einem Konflikt bei der Auswahl kommen kann.

Diese Rest Frames können verschiedene Formen in der VR-Anwendung annehmen. Prothero (1998) hat in seiner ursprünglichen Arbeit zu diesem Thema die Auswahl des Rest Frames durch das Integrieren eines unabhängigen visuellen Hintergrundes (engl. *Independent Visual Background*, kurz *IVB*) beeinflusst. Ein IVB stellt eine visuelle Szene hinter dem fokussierten Inhalt der VR-Anwendung dar, die getrennt davon kontrolliert werden kann. Die Idee dabei ist es, die Bewegung des IVBs in Einklang mit

den inertialen bzw. vestibulären Signalen des Körpers zu bringen und damit einen Konflikt bei der Auswahl des Rest Frames zu vermeiden. (Prothero, 1998, S. 37). In seiner Arbeit hat Prothero (1998) jedoch diesen IVB mithilfe des See-Through-Modus des verwendeten VR-Headsets umgesetzt, in dem die reale und virtuelle Umgebung gleichzeitig dargestellt werden (S. 94). Diese Implementierung ist daher stark abhängig von dem Anwendungsdesign und vor allem den Eigenschaften der verwendeten Hardware.

Eine allgemein geeignete Methode könnte das Einbauen visueller Elemente in die Sicht des Nutzers sein, welche als Rest Frames fungieren. Diese Elemente sind entweder statisch oder können beispielsweise auch, ähnlich wie bei der Manipulation der Peripherie, dynamisch bei problematischen Bewegungen des Nutzers in der virtuellen Welt eingeblendet werden. Cao et al. (2018) haben in ihrer Arbeit die Effekte von dynamischen und statischen Rest Frames dieser Art verglichen. Der Rest Frame hat dabei die Form eines schwarzen Metallnetzes angenommen, das als eine Art Overlay über die Ränder des gerenderten Bildes gelegt wurde, jedoch weiterhin die Sicht auf die Szenerie in der Peripherie ermöglicht hat. Die statische Variante dieses Rest Frames wurde dabei dauerhaft angezeigt, die dynamische Variante hingegen nur dann, wenn ein gewisses Maß an Bewegung in der virtuellen Welt durchgeführt wurde. Die dynamische Variante hatte zwar einen geringeren Effekt auf die Krankheitssymptome, jedoch konnten sie keine signifikanten Unterschiede zwischen den beiden Varianten feststellen. (Cao et al., 2018, S. 111). Eine ähnliche Art von Rest Frame wurde in der Arbeit von Whittinghill et al.⁸ verwendet, welche 2015 auf der *Game Development Conference*⁹ vorgestellt wurde. In der Arbeit wurde untersucht, ob das Einfügen einer virtuellen Nase in das Sichtfeld des Nutzers gegen das Unwohlsein in Virtual Reality helfen kann. Diese Nase wurde dabei auf realistische Weise gerendert, so dass das linke Auge nur die linke Hälfte der Nase sehen konnte und das rechte Auge nur die Rechte. Bei ihren Experimenten hat die virtuelle Nase zu einer Reduktion der negativen Symptome von rund 13% geführt (14:50) und interessanter Weise hat der Großteil der Nutzer die Nase gar nicht bemerkt (15:18). Auf ähnliche Weise können die UI-Elemente einer VR-Anwendung auch als eine Art von Rest Frame genutzt werden. UI-Elemente, die sich dafür anbieten, sind beispielsweise ein Crosshair, das dem Nutzer die Mitte des Bildschirms anzeigt, oder aber auch Anzeigen, die Informationen über die Punktezahl oder die verbrachte Zeit in der Anwendung geben (z.B. Burks, 2018). In einer Studie von Seok et al. (2021) hat das Einblenden eines Crosshairs die Stärke der erfahrenen Motion Sickness bei den Teilnehmern verringert, wenn sie interaktive Kontrolle über die Anwendung hatten. Das Ausmaß des Effektes war dabei zusätzlich von der Lage und Größe des Crosshairs abhängig, wobei eine Größe von 30% des Bildschirmverhältnisses und eine Positionierung in der Mitte des Bildschirms zu dem größten Effekt geführt hatten. (Seok et al., 2021, S. 10).

Das Integrieren von leicht erkennbaren Rest Frames in eine Anwendung durch visuelle Elemente dieser Art hat zudem den Vorteil, dass es sich für eine Vielzahl an Anwendungsgenres eignet. Statische UI-Elemente sind zwar nicht oft in kommerziellen VR-Anwendung anzufinden, aber die Darstellung von Rest Frames durch eine Overlay kann beispielsweise gut in der Form von Masken oder Hüten, die etwas in den Sichtbereich des Nutzers hineinragen, eingebaut werden, ohne dabei unangebracht oder komisch zu wirken. Bei Anwendungen, die das Nutzen eines Fahrzeugs simulieren, könnte hierfür auch direkt das Modell des Fahrzeugs genutzt werden, ohne dabei die Immersion oder Präsenz des Nutzers zu gefährden. Des Weiteren lässt sich

⁸ Präsentation der Arbeit von Whittinghill et al. auf der Webseite der GDC, 2015: <https://www.gdcvault.com/play/1022287/Technical-Artist-Bootcamp-Nasum-Virtualis>

⁹ Game Development Conference <https://gdconf.com/>

diese Methode auch gut mit den anderen Methoden zur Vermeidung von Motion Sickness, wie etwa dem Einschränken des Sichtfelds, kombinieren, ohne dabei einen besonders großen Mehraufwand zu verursachen.

5 IMPLEMENTIERUNG DER ANWENDUNG

Zum Veranschaulichen der Faktoren von Motion Sickness und Demonstration der existierenden Methoden zur Vermeidung der Krankheitssymptome wurde zudem eine Anwendung in der Unity Game Engine erstellt. Bei der Anwendung handelt es sich dabei um ein VR-Videospiel, bei dem der Spieler einzelne Räume durchläuft, die verschiedene Aspekte der Faktoren und Effekte in der Form eines Hindernisparcours präsentieren.

5.1 STEUERUNG UND FORTBEWEGUNG

Der Spieler kann seinen virtuellen Charakter in der Anwendung entweder mithilfe von herkömmlichen VR-Kontrollern oder durch Nutzen einer VR-Treadmill steuern. Als Treadmill wird hier die zuvor erwähnte Virtualizer Treadmill von Cyberith verwendet. Auch bei Verwendung der Treadmill werden die VR-Kontroller genutzt, um Interaktionen mit der virtuellen Umgebung zu ermöglichen. Zusätzlich kann sich der Spieler bei beiden Eingabegeräten theoretisch auch durch Bewegung in der echten Welt fortbewegen. Bei der Virtualizer Treadmill ist das aufgrund der Halterung praktisch gesehen zwar nicht direkt möglich, aber stationäre Bewegungen in der echten Welt, wie etwa das Lehnen in eine Richtung, können dennoch genutzt werden, um den virtuellen Charakter leicht zu bewegen und damit feine Kontrolle auszuüben.

Um den Charakter des Nutzers in der Spielwelt durch die beiden Eingabegeräte bewegen zu können, wurde eine eigene Charakter-Steuerung implementiert, die auf der *CharacterController*-Komponente von Unity basiert und keinen direkten Gebrauch von Unitys Physik-Engine macht. Dadurch wird bessere Kontrolle über die Bewegung erreicht, ohne dabei auf mögliche krankheitsauslösende Effekte aufgrund von physikalischen Interaktionen achten zu müssen (z.B. Jitter oder unbeabsichtigte passive Bewegungen). Die einzige physikalische Kraft, die den Spieler direkt bewegen kann, ist die simulierte Schwerkraft. Sie wird genutzt, um ihn auf dem Boden der Spielwelt zu halten und das Herunterfallen von virtuellen Objekten zu ermöglichen. Zudem kann der Spieler auch mit virtuellen Objekten kollidieren, jedoch haben diese Kollisionen nur die Möglichkeit, die Bewegung in die Richtung des kollidierenden Objekts zu unterbinden, können den Spieler also nicht passiv bewegen. Solche Kollisionen werden hauptsächlich genutzt, um den Spieler innerhalb des Spielbereichs zu halten oder ihm das Interagieren mit der virtuellen Welt zu ermöglichen (z.B. zum Drücken eines Knopfes). Der virtuelle Körper ist in der Anwendung durch eine Kapsel repräsentiert, die aus Sicht des Nutzers unsichtbar ist. Die Hände des Nutzers werden in der virtuellen Welt hingegen durch die Handmodelle des SteamVR-Plugins visualisiert und bieten sehr präzise Kollisionen mit den virtuellen Objekten.

Die Steuerung mittels VR-Kontrollern ist ähnlich zu den meisten kommerziellen VR-Spielen gehalten, aber dem Spieler werden dabei mehrere verschiedene Arten der Fortbewegung angeboten. Grundsätzlich wird hierbei durch Drücken des Joysticks bzw. des Touchpads des rechten Kontrollers eine Bewegung in die jeweilige Richtung ausgelöst. Beim linken Controller führt eine Eingabe nach links oder rechts hingegen zu einer Drehung in diese Richtung und eine Eingabe nach oben erlaubt es dem Spieler, sich in die Richtung, in die der Controller gerade zeigt, zu teleportieren. Das

Teleportieren ist in der gesamten Anwendung jedoch auf vorgeschriebene Bereiche begrenzt, damit der Spieler die Hindernisse nicht durch Teleportieren umgehen kann.

Neben der Fortbewegung durch Teleportieren hat der Spieler bei Bewegung durch die Controller die Wahl zwischen zwei kontinuierlichen Bewegungsarten. Die erste Bewegungsart ist das Bewegen mit einer festen Geschwindigkeit. Das heißt, es findet entweder eine Bewegung mit der vollen Geschwindigkeit statt oder der Benutzer bewegt sich überhaupt nicht. Bei dieser Art der Fortbewegung treten also in der Regel keinerlei wahrnehmbare Beschleunigungen durch die direkten Eingaben des Nutzers auf, was von Vorteil für das Vermeiden von Motion Sickness ist. Bei der zweiten Bewegungsart baut der virtuelle Charakter bei Eingabe durch den Nutzer langsam Geschwindigkeit auf, bis die festgelegte maximale Geschwindigkeit erreicht wurde. Die hierbei auftretende Beschleunigung kann durchaus ein Problem darstellen und zum Auftreten von Krankheitssymptomen beitragen. Um festzulegen, was beim Traversieren der virtuellen Welt als „nach vorne“ oder „nach rechts“ gilt, kann zwischen drei Referenzen gewählt werden. Das ist zum einen die Orientierung des VR-Headsets (d.h. die Blickrichtung) und zum anderen die Orientierungen der linken oder rechten Hand, festgelegt durch die jeweiligen VR-Controller in der echten Welt. Werden die Controller als Referenz für die Bewegungsrichtung verwendet, hat das den Vorteil, dass sich der Nutzer während der Bewegung problemlos umschauen kann, ohne dabei unbeabsichtigt eine Bewegung in die Blickrichtung auszulösen.

Wie bei der Positionsänderung hat der Spieler auch bei der Rotation die Wahl zwischen zwei verschiedenen Methoden. Im Gegensatz zu den beiden Bewegungsarten können die beiden Rotationsarten aber auch während der Nutzung der Treadmill verwendet werden. Als erste Methode hat der Spieler hier die simple Drehung durch eine kontinuierliche Rotation zur Auswahl. Diese Rotation findet mit einer festgelegten Geschwindigkeit statt und kann aufgrund der ununterbrochenen Drehbewegung negative Effekte hinsichtlich Motion Sickness auslösen. Die zweite Rotationsmethode ist das schon besprochene Rotation Snapping, bei dem der Nutzer sich in festgelegten Winkelinkrementen dreht und dadurch die negativen Effekte der kontinuierlichen Drehbewegung größtenteils umgeht. In der Implementierung unterscheiden sich die beiden Rotationsmethoden jedoch nicht sehr stark. Für die kontinuierliche Drehung wird auf die aktuelle globale Rotation des Spielers lediglich eine kleine Drehung um die Y-Achse der virtuellen Welt addiert, welche abhängig von der vergangenen Zeit seit dem letzten Frame und der festgelegten Rotationsgeschwindigkeit ist. Dabei erfolgt zudem eine dauerhafte Drehbewegung, solange es eine Eingabe von Seiten des Spielers gibt. Ähnlich dazu wird bei der inkrementellen Drehbewegung eine Rotation um den festgelegten Winkel auf die aktuelle Rotation addiert, allerdings aber unabhängig von der Zeit seit dem letzten Frame. Die Drehung findet hier pro Eingabe nur einmal statt.

Die Steuerung durch die Virtualizer Treadmill ist im Vergleich zu der Steuerung mit den Controllern relativ simpel gehalten und verwendet hauptsächlich die Standardimplementierung des Cyberith-SDKs. Dabei wird die Rotation des Nutzers innerhalb des Virtualizers abgefragt und anschließend mit der Rotation des Spielers in der virtuellen Welt verrechnet. Basierend auf der Rotation und der Gehbewegung in der echten Welt wird auch der Richtungsvektor für die Bewegung des virtuellen Charakters berechnet. Die Geschwindigkeit der virtuellen Gehbewegung hängt dabei von der echten Gehgeschwindigkeit des Nutzers ab und wird zudem mit einem festlegbaren Faktor multipliziert, um die finale Geschwindigkeit zu berechnen. Die Bewegungsrichtung und Blickrichtung sind bei dieser Fortbewegungsmethode entkoppelt, d.h. das Umschauen in der Umgebung hat keinen Einfluss auf die Richtung, in die sich der Spieler bewegt.

5.2 IMPLEMENTIERTE EFFEKTE

Um allgemein einsetzbare Techniken zu veranschaulichen und den Einfluss dieser vergleichen zu können, wurden mehrere visuelle Methoden implementiert, die für die Vermeidung von Motion Sickness vorgesehen sind. Des Weiteren wurden auch zwei Effekte implementiert, die bei dem alltäglichen Gebrauch von Virtual Reality auftreten können und in der Regel starke Motion Sickness auslösen. Sowohl diese allgemeinen Methoden als auch die beiden Effekte können in der gesamten Anwendung verwendet werden, unabhängig davon, in welchen Raum sich der Spieler momentan befindet.

5.2.1 REDUKTION DES SICHTFELDS

Wie schon in Kapitel 4.2.5 beschrieben, ist das Reduzieren des Sichtfelds in die virtuelle Welt eine effektive Methode, um die Symptome von Motion Sickness zu reduzieren oder sogar ganz zu verhindern. In der Anwendung wird diese Methode als *Tunneling* bezeichnet, da man sie unter diesem Namen aufgrund des tunnelartigen Effekts regelmäßig auffinden kann. Die Stärke der Sichtfeldreduktion wird anhand der momentanen Bewegung des Spielers dynamisch berechnet, solange das Tunneling aktiviert ist.

In der Arbeit von Fernandes und Feiner (2016) wurde dieser Effekt durch zwei separate Quads mit einer geeigneten Textur gelöst. Dabei haben sie die Quads vor jeweils einem Auge des Spielers platziert und sie, basierend auf der Bewegung des Spielers, hoch- oder runterskaliert. Die Quads besaßen dabei eine schwarze Textur mit einem transparenten Loch in der Mitte, um den Tunneleffekt zu erreichen. Zudem wurden sie jeweils nur von der dazugehörigen Kamera des jeweiligen Auges gerendert, um Verdeckung bei großen Skalierungsstufen zu verhindern. Bei kleinen Skalierungsstufen hätte bei dieser Implementierung das Problem auftreten können, dass das Quad nicht den gesamten Bildschirmbereich einnimmt, weswegen Fernandes und Feiner das Herunterskalieren begrenzt haben. Um sicherzustellen, dass die Quads vor allen anderen Modellen der virtuellen Umgebung gerendert werden, wurden die Kameras in der Anwendung zusätzlich so eingestellt, dass sie die Quads nach allen anderen Objekten der Szene rendern. (Fernandes & Feiner, 2016, S. 203). Die Implementierung auf diese Weise hat einige Nachteile. Zum einen muss beim Hoch- und Runterskalieren der Quads ihre Fläche beachtet werden. Die richtigen Einstellungen diesbezüglich für ein einzelnes VR-Headset festzulegen, ist zwar nicht besonders schwer, aber wenn der Effekt mit vielen verschiedenen Modellen kompatibel sein muss, bedeutet das gegebenenfalls einen bedeutenden Mehraufwand. Zudem kann der resultierende Tunneleffekt bei dieser Implementierung nicht leicht manipuliert oder nach den persönlichen Wünschen des Nutzers eingestellt werden.

In dieser Arbeit wurde das Tunneling daher etwas anders implementiert. Anstatt die Quads als reguläre Objekte in der virtuellen Welt zu rendern, werden diese direkt durch den Command-Buffer von Unitys Rendering-Pipeline als Mesh über den gesamten Bildschirm gelegt. Auf diese Weise wird sichergestellt, dass der Tunneleffekt immer den gesamten Bereich des Sichtfelds abdeckt und keine Skalierung der Quads benötigt wird. Da weder hoch- noch runterskaliert werden muss, gibt es hierbei auch keine Begrenzungen oder besondere Einstellungen, die von Seiten des Entwicklers festgelegt werden müssen. Um das Sichtfeld mithilfe dieses Meshs bei Bedarf zu reduzieren, wird stattdessen ein eigener Shader verwendet.

Zum Rendern eines Meshs dieser Art über den gesamten Bildschirm, muss der in Unity verwendete Rendering-Pipeline ein neuer Render-Pass hinzugefügt werden. Dieser Render-Pass wird nur für die Kamera des Spielers durchgeführt und auch nur dann, wenn das Tunneling in der Anwendung aktiviert ist. Der Render-Pass selbst ist dabei nicht sehr komplex, er erstellt lediglich das Mesh und gibt diesem ein Material, das

den erstellten Shader für das Tunneling verwendet. Des Weiteren werden hier auch direkt die Variablen des Tunneling-Shaders aktualisiert. Um den Tunneleffekt zu erreichen, benötigt der Shader mindestens drei Variablen: die Projektions-Matrizen für das linke und rechte Auge des Nutzers und einen Radius für die Stärke des Tunneleffekts. Um das Ganze zudem noch etwas einstellbarer für den Nutzer zu gestalten und den Effekt weniger auffällig zu machen, hat der Shader auch noch eine Variable für das Glätten des Übergangs in der Mitte des Effekts.

Die Projektions-Matrizen werden für die korrekte Darstellung des Effekts auf den Bildschirmen des VR-Headsets benötigt und können durch eine Funktion der VR-Kamera abgefragt werden. Im Shader werden sie genutzt, um den Tunneleffekt ausgehend von der Mitte des Bildschirms darzustellen. Normalerweise wird in 3D-Anwendungen eine sogenannte Model-View-Projection-Matrix genutzt, um die richtigen Koordinaten für das Rendern eines Objekts zu erhalten. Diese setzt sich aus drei einzelnen Matrizen zusammen: der Model-Matrix, der View-Matrix und der Projection-Matrix. Die Model-Matrix transformiert die Koordinaten von den lokalen Modell-Koordinaten in Welt-Koordinaten. Anschließend werden die Welt-Koordinaten in Kamera-Koordinaten durch die View-Matrix umgewandelt. Als letztes wird die Projection-Matrix genutzt, um aus den Kamera-Koordinaten Bildschirm-Koordinaten zu berechnen. Aufgrund dieses letzten Schrittes werden die beiden Projektions-Matrizen der Augen für die korrekte Darstellung benötigt. In der Anwendung wurde Single-Pass-Stereo-Rendering als Stereo-Rendering Methode verwendet, um Rendraufwand bei den Culling- und Schattenberechnungen einzusparen. Bei dieser und anderen Stereo-Rendering Methoden besitzen beide Augen in der virtuellen Welt unterschiedliche Projektions-Matrizen, um sie an die perspektivischen Eigenschaften des Bildschirms anzupassen. Wenn dies bei der Implementation des Shaders nicht beachtet wird, befindet sich die Mitte des Tunneleffekts an leicht unterschiedlichen Stellen für das linke und rechte Auge. Das macht den Effekt unangenehm für den Nutzer, da es das richtige stereoskopische Sehen erschwert und den Eindruck bei dem Nutzer erweckt, dass er seine Augen nicht richtig fokussieren kann. Um die Mitte des Effekts an der richtigen Stelle anzuzeigen, wird daher die inverse Projektions-Matrix des aktuell rendernden Auges genutzt, um die Bildschirmkoordinaten zurück in die Kamera-Koordinaten zu transformieren und damit die Abhängigkeit von der jeweiligen Perspektive der Augen zu entfernen.

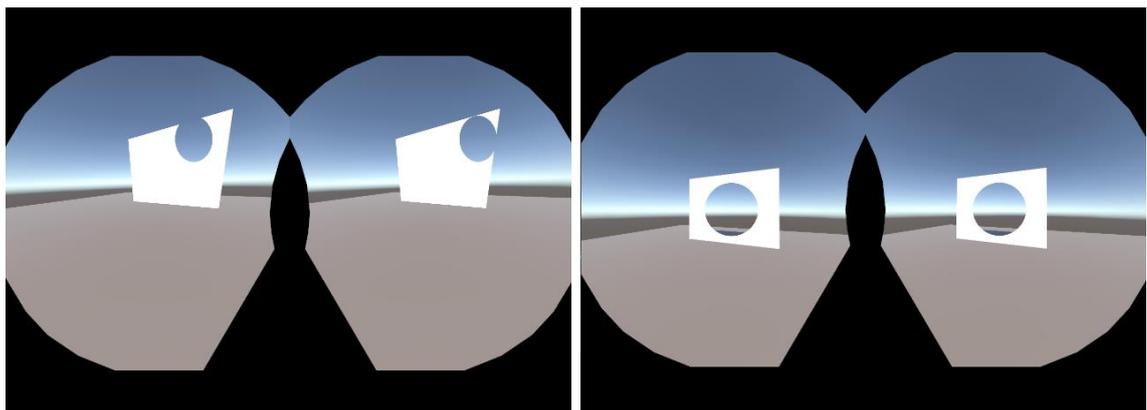


ABBILDUNG 11 VERGLEICH ZWISCHEN DEN UNANGEPASSTEN (LINKS) UND ANGEPASSTEN KOORDINATEN (RECHTS). DIE UNANGEPASSTEN KOORDINATEN FÜHREN DAZU, DASS DER KREIS WEDER ZENTRIERT NOCH AN DER GLEICHEN STELLE FÜR DIE BEIDEN AUGEN DES NUTZERS IST.

Um besser mit den resultierenden Koordinaten arbeiten zu können, werden sie vor der Transformation auch zusätzlich noch von ihrem normalen Wertebereich $[0.0, 1.0]$ auf den Wertebereich $[-1.0, 1.0]$ umgewandelt. Dadurch ist der Mittelpunkt des

Bildschirms gleichzeitig auch der Nullpunkt, was die darauffolgenden Berechnungen vereinfacht. Der Tunneleffekt kann anschließend durch Berechnen der Distanz zum Mittelpunkt erreicht werden. Alle Pixel, die innerhalb des übergebenen Radius liegen, werden dabei mit einem Alpha-Wert von 0 gerendert, wodurch sie transparent werden. Falls nur ein harter Übergang gewünscht ist, könnten an dieser Stelle alle Pixel außerhalb des Radius in der Farbe Schwarz mit einem Alpha-Wert von 1 gerendert werden. Da das den Effekt aber sehr wahrnehmbar macht, wird der Übergang mithilfe der schon erwähnten Glättungsvariable angepasst. Hierzu wird der Wert der Variable auf den Radius addiert und anschließend zwischen dem resultierenden Wert und dem ursprünglichen Radius linear interpoliert, um einen Alpha-Wert zwischen 0 und 1 zu erhalten.

```
half4 frag(VS_OUTPUT input) : SV_Target
{
    //Vorbereiten der Augen Indices für den Fragment Shader
    UNITY_SETUP_STEREO_EYE_INDEX_POST_VERTEX(input);

    //Anpassen des UV-Wertebereichs von [0.0f, 1.0f] auf [-1.0f, 1.0f]
    float2 screenUV = input.uv.xy;
    screenUV -= 0.5f;
    screenUV *= 2.0f;

    //Auswählen der korrekten (inversen) Projektions-Matrix
    //und Anwenden auf die angepassten Bildschirmkoordinaten
    float4x4 eyeMatrix = unity_StereoEyeIndex ? _RightEyeMatrix : _LeftEyeMatrix;
    screenUV = mul(eyeMatrix, float4(screenUV, 1.0f, 1.0f)).xy;

    //Berechnen der Distanz zur Mitte des Sichtfeldes
    float distanceSqr = screenUV.x * screenUV.x + screenUV.y * screenUV.y;
    float distance = sqrt(distanceSqr);

    //Interpolation des Alpha-Werts
    //Distanz < Radius = 0.0f
    //Distanz > (Radius + Glättungsvariable) = 1.0f
    //Distanz zwischen Radius und (Radius + Glättungsvariable) = Interpolation zwischen 0.0f und 1.0f
    distance = smoothstep(_Radius, _Radius + _SmoothingOffset, distance);

    return float4(0, 0, 0, distance);
}
```

ABBILDUNG 12 EIN KURZER AUSSCHNITT DES SHADER-CODES MIT EINIGEN KOMMENTAREN DIE DEN ABLAUF ERKLÄREN.

Der an den Shader übergebene Radius wird anhand der Bewegung des Spielers in der Anwendung und einstellbaren Referenzwerten für den minimalen und maximalen Radius berechnet. Die Bewegung des Spielers wird als Wert im Wertebereich [0.0, 1.0] und in Abhängigkeit eines ausgewählten Modus berechnet. Ein Wert von 0.0 stellt dabei gar keine Bewegung dar, wohingegen 1.0 die maximale Bewegung repräsentiert. Der finale Radius für den Shader wird anschließend durch Interpolation zwischen dem maximalen und minimalen Radius anhand dieses Bewegungs-Wertes festgelegt. Da das Reduzieren des Sichtfelds in der Regel nur bei Bewegungen, die nicht in der echten Welt durchgeführt werden, erwünscht ist, reagieren die verschiedenen Modi nur auf die künstlichen Bewegungen innerhalb der Spielwelt. Beispielsweise tritt dadurch eine FOV-Reduktion auf, während sich der Nutzer auf einer sich bewegenden Plattform befindet, nicht aber wenn er seinen Kopf oder Körper in der echten Welt bewegt. Zudem gibt es eine Einstellung, die dafür sorgt, dass Bewegungen aufgrund der Eingabe des Nutzers auch ignoriert werden. Das ist beispielsweise nützlich, wenn der Tunneleffekt nicht durch Gehbewegungen in der Treadmill auftreten soll.

Insgesamt wurden vier verschiedene Bewegungs-Modi für das Tunneling implementiert. Der simpelste Modus ist hierbei das dauerhafte Übergeben eines Bewegungs-Wertes von 1.0, d.h. es wird immer die maximale FOV-Reduktion durchgeführt. Streng genommen ist dieser Modus zwar nicht von der Bewegung des

Spielers abhängig, er eignet sich aber hervorragend, um die Referenzwerte für den Radius und den Glättungswert einzustellen. Ein weiterer Modus ist das direkte Umschalten zwischen einem Bewegungs-Wert von 0.0 und 1.0, sobald eine Bewegung vollzogen wird. Da bei der Bewegung in der virtuellen Welt leicht ein schneller Wechsel zwischen langsamen Bewegungsgeschwindigkeiten und dem Stillstehen stattfinden kann, werden sehr kleine Bewegungsgeschwindigkeiten ignoriert, um das Flickern des Effektes zu verhindern. Die anderen beiden Modi sind abhängig von der Dauer und der Geschwindigkeit der Bewegung. Bei dem zeitabhängigen Modus wird dabei die Zeit seit dem letzten Frame mit einem Gewichtungsfaktor verrechnet. Je nachdem, ob sich der Spieler in dieser Zeit bewegt hat, wird das Ergebnis auf den aktuellen Bewegungs-Wert addiert oder von diesem subtrahiert. Der Gewichtungsfaktor hängt von einem festgelegten Referenzwert ab, der die Dauer für das Ein- oder Ausblenden des Tunneleffektes festlegt. Der Wertebereich des resultierenden Bewegungs-Wertes wird dabei vor Übergabe an den Shader wieder auf den Bereich [0.0, 1.0] begrenzt. Der vierte Modus ist direkt abhängig von der Geschwindigkeit des Spielers. Dafür wird auch hier ein Referenzwert benötigt. Dieser gibt an, ab welcher Geschwindigkeit ein Bewegungs-Wert von 1.0 erreicht wird. Zum Berechnen des Bewegungs-Wertes wird die aktuelle Geschwindigkeit als Prozentsatz des Referenzwertes angesehen und anschließend wieder als Zahl zwischen 0.0 (0%) und 1.0 (100%) an den Shader übergeben. Auch hier kann ein Flicker-Effekt auftreten, wenn sich die Geschwindigkeit stark ändert (z.B. beim abrupten Stehenbleiben), weshalb zusätzlich die maximale Änderung des Bewegungs-Wertes zwischen den Frames begrenzt wird.



ABBILDUNG 13 DAS TUNNELING IN DER ANWENDUNG.

5.2.2 LEICHT ERKENNBARE REST FRAMES

Neben der Reduktion des Sichtfelds wurden auch leicht erkennbare Rest Frames in die Anwendung integriert. Innerhalb der Anwendung kann der Spieler zwei verschiedene Methoden zur Darstellung dieser auswählen. Die Erste der beiden Methoden kombiniert dabei einen leicht erkennbaren Rest Frame mit dem schon beschriebenen Tunneleffekt zur Verringerung des Sichtfelds. Anstatt den Bereich außerhalb des Tunnel-Radius in Schwarz zu rendern, wird hier stattdessen in diesem Bereich eine separate virtuelle Umgebung angezeigt, in der keine Bewegungen stattfinden, auch wenn sich der Spieler selbst bewegt. In der Anwendung stellt diese Umgebung einen leeren Raum dar, der auf den Wänden, dem Boden und der Decke eine Gitter-Textur hat, um dem Spieler besonders leicht erkennbare Referenzpunkte zu geben. Das Ganze

erzeugt dabei den Anschein, dass sich der Spieler innerhalb eines Käfigs befindet und von der separaten virtuellen Szenerie umgeben ist, weshalb diese Methode in der Anwendung als *Caging* bezeichnet wird. Wie groß dabei der Radius für den Vignetteneffekt ist und wie er sich bei den Bewegungen des Nutzers verhält, wird auf die gleiche Weise bestimmt, wie bei dem Tunneling-Effekt.

Um den Effekt einer separaten stationären Umgebung zu erschaffen, wurde eine zweite VR-Kamera verwendet, die nur für das Rendern dieser zusätzlichen Szenerie verantwortlich ist. Die spezifische Szene, die hier implementiert wurde, ist durch ein einfaches Rechteck realisiert worden. Dieses Rechteck hängt an dem Spieler und ist daher unabhängig von seinen Bewegungen, was den gewünschten Effekt erzielt. Die zweite VR-Kamera hängt direkt an der Hauptkamera der Anwendung und besitzt die gleiche Sichtfeldgröße. Dadurch werden alle Bewegungen des VR-Headsets auch direkt auf die zweite Kamera übertragen und die Ansichten der beiden Kameras hinsichtlich ihrer Perspektive sind identisch. Das Bild der zweiten Kamera wird in eine Textur gerendert, die die vertikale Auflösung eines Bildschirms des VR-Headsets besitzt, aber doppelt so breit ist. Die beiden Hälften dieser Textur repräsentieren dabei jeweils die Ansicht für das linke und rechte Auge des Nutzers. Das Rendern des Kamerabildes in eine separate Textur wird durch einen neu hinzugefügten Render-Pass erreicht, der auch gleichzeitig die resultierende Textur in Form eines Textur-Arrays an den Shader des Bildschirm-Meshs übergibt. Der hierfür verwendete Shader macht grundsätzlich das Gleiche wie der Tunneling-Shader, anstatt jedoch einfach die Farbe Schwarz für die Pixel außerhalb des Radius zu verwenden, wird die Farbe anhand der übergebenen Textur ausgewählt. Da die Textur als Array an den Shader übergeben wurde, kann hier direkt der Index des aktuell rendernden Auges verwendet werden, um auf die richtige Hälfte der Textur zuzugreifen.

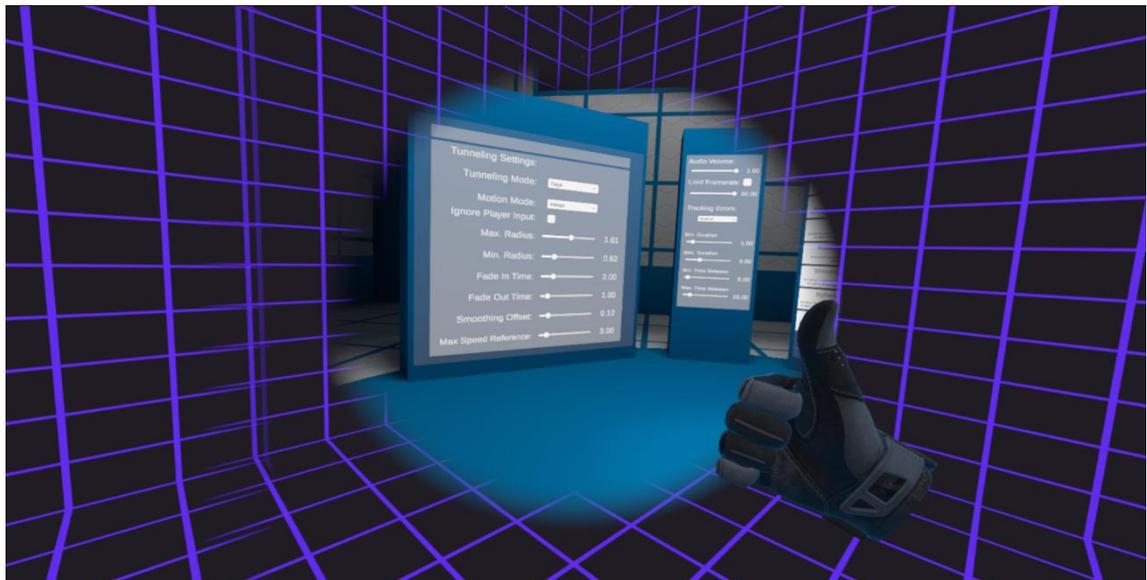


ABBILDUNG 14 DIE SEPARATE SZENERIE UND DER CAGING-EFFEKT INNERHALB DER ANWENDUNG.

Diese Art eines leicht erkennbaren Rest Frames kann zwar in der Theorie performanter implementiert werden (z.B. in Form einer Cube-Map), die hier verwendete Implementierung hat aber dennoch einige Vorteile. Da es sich bei der Caging-Umgebung um echte Objekte in der virtuellen Welt handelt, ist der 3D-Effekt sehr glaubhaft für den Nutzer. Des Weiteren ermöglicht diese Implementation auch das leichte Rendern von virtuellen Objekten über den Caging-Effekt. So sind beispielsweise die Hände des Nutzers und Objekte, die er in diesen hält, immer sichtbar, auch wenn der visuelle Effekt sie eigentlich verdecken würde.

Die zweite Methode, dem Spieler einen einfach erkennbaren Rest Frame zu geben, ist ein aufsetzbarer Schutzhelm. Dieser Ansatz orientiert sich an der virtuellen Nase und dem Metallgitter, die in Kapitel 4.2.6 beschrieben wurden. Hat der Spieler den Schutzhelm aufgesetzt, ragt die Spitze des Helms etwas in das Sichtfeld des Nutzers hinein und ist bei allen Kopfbewegungen an der gleichen Stelle sichtbar. Für den Schutzhelm wurde ein eigenes 3D-Modell erstellt, dem in Unity ein gelbes Material gegeben wurde, um ihm das Aussehen eines klassischen Schutzhelms zu geben. Der Spieler kann den Helm aufsetzen, indem er diesen aufhebt und in die Nähe seines Kopfes bringt. Wird der Helm nahe genug am Kopf des Spielers fallen gelassen, schnappt der Helm automatisch an eine festgelegte Position etwas oberhalb des Kopfes. Um den Schutzhelm abzusetzen, muss der Spieler diesen lediglich greifen und etwas außerhalb des Kopfbereichs fallen lassen. Da das Aufheben von Objekten auf dem Boden gerade bei Nutzung der VR-Treadmill mühsam sein kann, wird der Schutzhelm beim fallen lassen auf seine ursprüngliche Position (liegend auf einem Podest) zurückgesetzt. Da das Absetzen des Helms während des Spielverlaufs dazu führen könnte, dass der Spieler diesen verliert, funktioniert das Absetzen nur innerhalb des Raumes, in dem sich der Helm zu Beginn befindet.



ABBILDUNG 15 DAS 3D-MODELL DES SCHUTZHELMES (LINKS) UND DIE ANSICHT DES NUTZERS, WÄHREND ER IHN TRÄGT (RECHTS).

5.2.3 FRAMERATE UND TRACKING-FEHLER

Die Rest Frames und das Reduzieren des Sichtfelds sind Effekte, die für das Vermeiden von Motion Sickness vorgesehen sind. Um ihre Auswirkungen hinsichtlich der Reduktion von Motion Sickness testen zu können, muss die Krankheit erst einmal zu einem gewissen Grad vorhanden sein. Die verschiedenen Räume der Anwendung besitzen jeweils Elemente, die Motion Sickness auslösen können, jedoch wurden auch zwei Effekte implementiert, die dies unabhängig von dem aktuellen Raum erlauben.

Der erste implementierte Effekt ist das Limitieren der Bildrate der Anwendung. Wie in Kapitel 4.1.3 beschrieben wurde, führen die erhöhten Latenzzeiten zwischen der Bewegung und dem visuellen Feedback auf dem Bildschirm bei einer niedrigen Bildrate zu Konflikten zwischen den Sinnen und damit zur Ausprägung der Krankheit. Das Begrenzen der Framerate stellt daher eine sehr simple Methode zum gezielten Erzeugen von Motion Sickness dar. In herkömmlichen Videospielen und 3D-Anwendungen lässt sich die Framerate üblicherweise durch eine Einstellung der Anwendung oder den Zugriff auf eine Funktion im Code begrenzen. Die Implementierung in Unity bei der Entwicklung einer VR-Anwendung stellt dabei jedoch ein Problem dar. Normalerweise macht es wenig Sinn, die Framerate in VR-Anwendungen manuell zu begrenzen, da dies Motion Sickness als direktes Resultat mit sich bringt. Da es keinen normalen Grund gibt, die Framerate in VR künstlich zu limitieren, bietet Unity bei Verwendung des SteamVR-Plugins keinen direkten Weg, dies zu erreichen.

Um diese Beschränkung zu umgehen, wird die Tatsache ausgenutzt, dass die Framerate direkt abhängig von dem benötigten Rechenaufwand der Anwendung ist. Zum Erhöhen des Rechenaufwands und Verringern der Framerate wird „künstlicher“ Aufwand durch das kurzzeitige Blockieren des Anwendungs-Threads erzeugt. Die Zeitspanne, für die der Thread blockiert wird, ist in der Regel extrem kurz und dient zur künstlichen Verlängerung des aktuellen Frames. Um dabei keine Probleme bei anderen Teilen der Anwendung auszulösen, findet der gesamte Prozess am Ende des aktuellen Frames statt und die Länge des Blockierens ist abhängig von sowohl der aktuellen Framerate als auch der gewünschten Begrenzung der Framerate.

Die Implementierung einer Framerate-Begrenzung auf diese Weise hat bei VR-Anwendungen jedoch ein erhebliches Problem. Bei vielen VR-Headsets und der damit verwendeten Software finden verschiedene Techniken Anwendung, die zwischen einzelnen Frames interpolieren oder die resultierende Bildrate glätten, um damit ein besseres Erlebnis für den Nutzer bereitzustellen. Das kann dazu führen, dass durch das Blockieren des Threads Artefakte entstehen, die sehr unangenehm für den Nutzer sind und unter Umständen auch Motion Sickness auslösen können. Bei einem mit der Anwendung getesteten VR-Headsets haben sich diese Render-Artefakte beispielsweise als eine Art Verzerrungseffekt der virtuellen Umgebung geäußert, der zudem von einem merkbaren Jitter-Effekt begleitet wurde. Bei vielen VR-Geräten kann das Interpolieren der Frames bzw. das Glätten der Bildrate manuell in den Einstellungen deaktiviert werden, dies ist aber nicht immer leicht möglich. Somit ist diese Implementierung stark abhängig von dem verwendeten VR-Headset. Aus diesem Grund macht es in manchen Fällen wahrscheinlich mehr Sinn, die Framerate stattdessen durch externe Programme oder, falls vorhanden, eine direkte Option der Software des Headsets zu begrenzen.

Der zweite implementierte Effekt ist das Simulieren von Fehlern beim Tracking des VR-Headsets. Das akkurate und schnelle Ermitteln der Kopflage ist ein Faktor für das Ausprägen von Motion Sickness, aber gerade große Fehler bei dem Tracking können signifikante Auswirkungen haben, da diese vom Nutzer direkt als passive Bewegungen der Kamera und damit des virtuellen Kopfes wahrgenommen werden. Viele der verfügbaren VR-Headsets besitzen Methoden, die direkte Fehler in der Ermittlung der Lage sehr gut verhindern oder zumindest versuchen, sie bestmöglich handzuhaben, falls sie dennoch auftreten. Eine dieser Methoden ist beispielsweise das Nutzen von inertialen Lagemessungen bei dem kurzzeitigen Verlust des Headsets durch das optische Tracking. Sollte die Lage des Headsets trotzdem nicht erfolgreich ermittelt werden können, wird die Ansicht auf die virtuelle Welt in der Regel durch eine solide Farbe (z.B. Grau) ersetzt, um Sinneskonflikte zu vermeiden. Auch wenn ein Großteil der Tracking-Probleme durch diese Hardware- und Softwaremaßnahmen umgangen werden kann, gibt es dennoch einige Situationen, in denen Fehler auftreten. Beispielsweise kann die Lage des Headsets nicht richtig ermittelt werden, falls die Tracking-Methode nicht richtig kalibriert wurde. Eine weitere Quelle von Fehlern können zudem Elemente der echten Umgebung sein, wie etwa spiegelnde bzw. lichtbrechende Oberflächen (z.B. ein offenes Fenster).

Da sich die resultierenden Tracking-Fehler in der Praxis oft in der Form von driftartigen Bewegungen, also beispielsweise anhaltenden Drehungen oder Bewegungen in eine bestimmte Richtung, äußern, hat sich die Implementation an diesen Driftbewegungen orientiert. Die Länge der Fehlersimulation und Zeitspanne zwischen dem Auftreten kann jeweils anhand eines Minimums und Maximums eingestellt werden, zwischen denen durch Zufall ein spezifischer Wert ausgewählt wird. Insgesamt wurden drei Arten von Tracking-Fehlern implementiert. Die erste Art ist ein Fehler in der Positionserfassung des Headsets. Dazu wird die Positionsänderung seit dem letzten Frame abgespeichert und während der Simulation in jedem Frame auf die aktuelle Position des virtuellen Kopfes addiert. Damit dies den richtigen Effekt erzielt, wird

direkt vor Beginn der Fehlersimulation das normale Tracking der Kopfposition ausgeschaltet, so dass nur noch die Fehlersimulation Einfluss auf die Position hat. Die zweite Fehlerart ist ein Fehler in der Orientierungserfassung des Headsets. Hier wird genauso vorgegangen, wie bei der Simulation des Fehlers in der Positionserfassung, jedoch mit der Rotation des virtuellen Kopfes anstatt der Position. Die Kopfposition des Nutzers wird dabei weiterverfolgt, die Orientierung des Kopfes in der echten Welt jedoch nicht. Die dritte Art ist eine Kombination der Fehler in der Positions- und Orientierungserfassung, welche auf die gleiche Weise simuliert wird, wie die beiden einzelnen Fehler. Dabei wird aber während der Simulation die Lage des Kopfes in der echten Welt überhaupt nicht mehr erfasst.

5.3 RÄUME IN DER ANWENDUNG

Da es schwer ist, alle Faktoren, Effekte und Methoden, die Einfluss auf Motion Sickness haben, gleichzeitig in einem bündigen Spielerlebnis zu präsentieren und dabei sinnvolle Vergleiche zwischen verschiedenen Ansätzen aufzustellen, ist die Anwendung in unterschiedliche Räume eingeteilt. Die Strukturierung des Anwendungsablaufs anhand unterschiedlicher Räume macht die Anwendung zudem sehr leicht erweiterbar, da das Hinzufügen eines neuen Raumes wenig Zeit benötigt und den restlichen Spielablauf nicht weiter beeinflusst. Jeder dieser Räume ist für das Präsentieren eines bestimmten Faktors oder einer Methode für die Vermeidung von Motion Sickness vorgesehen. Welche Räume der Spieler durchläuft, kann in der Anwendung eingestellt werden, was das gezielte Testen verschiedener Aspekte vereinfacht.

Neben einem Raum, der als Hauptmenü fungiert, wurden insgesamt sieben verschiedene Räume mit unterschiedlichen Hindernissen implementiert. Alle dieser Räume sind dafür gedacht, gezielt Motion Sickness hervorzurufen oder Vergleiche zwischen zwei verschiedenen Methoden und Effekten zu veranschaulichen. Um zwischen den einzelnen Räumen zu wechseln, kann der Spieler einen Aufzug verwenden, der ihm erlaubt, in den nächsten und den vorherigen Raum zu gelangen oder in den Menü-Raum zurückzukehren. Das visuelle Design aller implementierten Räume ist sehr ähnlich zueinander. Wie schon erwähnt, kann der wahrnehmbare Detailgrad einer VR-Anwendung durchaus eine Rolle bei dem Auftreten von Motion Sickness spielen. Aus diesem Grund wurde der visuelle Detailgrad in der Anwendung sehr simpel gehalten, was zusätzlich sowohl Zeit als auch Aufwand bei dem Entwickeln der Räume und dem Erstellen von 3D-Modellen eingespart hat. Alle Wände, Böden und Decken der Räume bestehen aus simplen Rechtecken, die eine blau-weiße Gitter-Textur besitzen. Dieses Blau-Weiß-Design ist auch bei den restlichen Objekten der Anwendung aufzufinden. Um es für den Spieler leicht erkennbar zu machen, mit welchen Objekten er interagieren kann, wurden alle interaktiven Objekte (Knöpfe, Schalter, etc.) mit einem roten Material versehen.

Die Interaktionen des Spielers in der Spielwelt sind in der Anwendung entweder physik-basiert (z.B. Drücken eines Knopfes) oder werden durch das Interaktionssystem des SteamVR-Plugins gehandhabt (z.B. Greifen und hochheben eines interaktiven Objekts). Da Hintergrundmusik einen ungewollten Einfluss auf Motion Sickness haben könnte, wurde auf den generellen Einsatz dieser verzichtet. Viele der Hindernisse haben dennoch Audioeffekte, die zu der räumlichen Wahrnehmung des Spielers beitragen. Bei der Auswahl und Implementierung dieser wurde darauf geachtet, dass sie dem Spieler lediglich Informationen zu den erstellten Hindernissen geben und dabei nicht direkt in der Lage sind, das Auslösen von Motion Sickness wahrscheinlicher zu machen.

5.3.1 HAUPTMENÜ

Zu Beginn der Anwendung findet sich der Spieler in einem separaten Raum wieder, der als Hauptmenü für die Anwendung fungiert. Gerade bei VR-Anwendungen bietet sich das Verwenden einer eigenen dreidimensionalen Szene für das Zugreifen auf die verschiedenen Einstellungen der Anwendung an. In der Mitte des Menü-Raums befinden sich drei Wände auf denen unterschiedliche Menüs angezeigt werden. In dem Menü, das sich auf der linken Wand befindet, können alle allgemeinen Einstellungen für die Anwendung getroffen werden. Dazu gehört etwa die Bewegungsgeschwindigkeit, die ausgewählte Fortbewegungsart und das Eingabegerät des Spielers, aber auch die verschiedenen Einstellungen für die Tunneling- und Caging-Effekte. Auf der mittleren Wand kann der Spieler die Einstellungen für die Effekte zur Begrenzung der Bildrate und der Simulation von Tracking-Fehlern auffinden. Diese beiden Effekte werden erst aktiv, sobald der Spieler in einen anderen Raum der Anwendung geht. Dadurch wird verhindert, dass die Effekte es dem Spieler erschweren, sie wieder zu deaktivieren oder andere Einstellungen vorzunehmen. Die rechte Wand besitzt ein Menü, das zur Auswahl der Räume dient. Dazu gehört zum einen eine Liste an verfügbaren Räumen, die durch Ankreuzen den ausgewählten Räumen hinzugefügt werden können und jeweils eine kurze Beschreibung des Inhalts besitzen, aber zum anderen auch raumspezifische Einstellungen, die in Abhängigkeit des momentan angeklickten Raums angezeigt werden. Allgemein kann in diesem Menü ein einzelner Raum oder auch eine Reihe an Räumen ausgewählt werden, die der Spieler anschließend in der ausgewählten oder einer komplett zufälligen Reihenfolge durchläuft. Das Interagieren mit diesen Menüs erfolgt durch Zeigen und Klicken mit einer Art Laserpointer, der sich an der rechten Hand des Nutzers befindet.

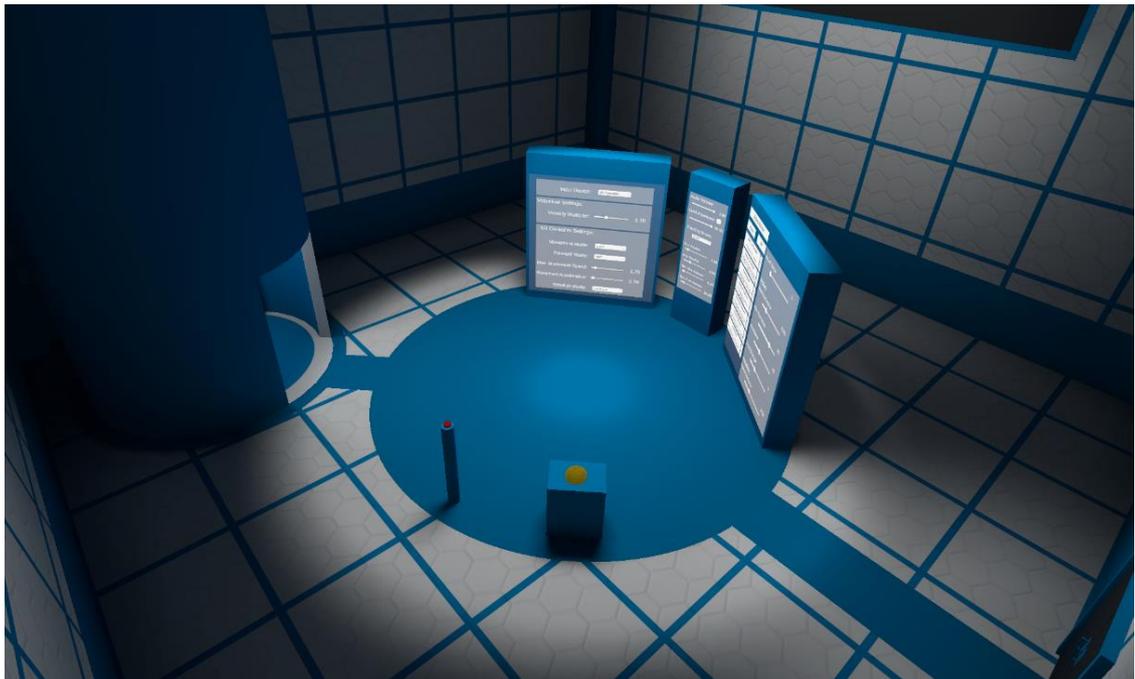


ABBILDUNG 16 ÜBERBLICK ÜBER DEN MENÜ-RAUM IN DEM SICH DER NUTZER ZU BEGINN DER ANWENDUNG BEFINDET.

Neben den Menü-Tafeln befindet sich auch das Podest mit dem schon erwähnten Schutzhelm und eine Anzeigetafel in diesem Raum. Um der Anwendung ein simples spielerisches Element zu geben, wird auf dieser Anzeigetafel festgehalten, wie oft der Spieler an Hindernissen in den Räumen scheitert. Der Raum wurde zudem so ausgelegt, dass der Spieler in ihm genug Platz hat, um sich mit der grundlegenden Steuerung der Anwendung vertraut zu machen, was gerade bei Nutzung der VR-

Treadmill sehr hilfreich ist. Sobald die gewünschten Räume ausgewählt wurden und die verschiedenen Aspekte der Anwendung nach Bedarf eingestellt worden sind, kann der Spieler durch Drücken eines Knopfes in einem Aufzug, der sich in der Ecke des Raumes befindet, in den ersten ausgewählten Raum gelangen.

5.3.2 LOCOMOTION

Drei der implementierten Räume sind für das direkte Testen der Eingabegeräte und ausgewählten Fortbewegungsmethoden gedacht. Das Ziel dieser Räume ist es daher hauptsächlich, von einem Ende ans andere zu gelangen und dabei die spezifischen Hindernisse des jeweiligen Raumes erfolgreich zu absolvieren. Diese drei Locomotion-Räume sind in der Anwendung als *Basic Locomotion*, *Rotating Platforms* und *Sphere Dodging* bezeichnet.

Der *Basic Locomotion*-Raum startet mit einem schmalen Pfad, den der Spieler traversieren muss, um an das andere Ende zu gelangen. Die Hindernisse in diesem Abschnitt des Raumes sind mehrere Pendel, die mit unterschiedlichen Geschwindigkeiten hin und her schwingen. Zwischen den einzelnen Pendeln ist genug Platz, damit der Spieler sich keine Sorgen machen muss, dass ihn dort ein Pendel trifft. Sollte der Spieler es nicht schaffen, einem Pendel auszuweichen und von ihm getroffen werden, verdunkelt sich der Bildschirm nach und nach, bis er komplett schwarz ist und der Spieler anschließend zurück an den letzten Checkpoint teleportiert wird. Zu Beginn ist dieser Checkpoint am Start des Raumes, aber es gibt mehrere weitere Checkpoints, die von dem Spieler schrittweise bei erfolgreicher Absolvierung der Hindernisse erreicht werden. Der Spieler wird auch an den letzten Checkpoint zurückteleportiert, falls er es nicht schafft, auf dem schmalen Pfad zu bleiben und herunterfällt. Der zweite Teil des Raumes besteht aus einer rotierenden Röhre, durch welche der Spieler gehen muss, um zu der anderen Seite zu gelangen. Entlang der Wand der Röhre befinden sich mehrere Öffnungen durch die der Spieler fallen kann und das Ziel ist es daher, diesen auszuweichen. Zudem wird der Spieler nicht durch die Rotation der Röhre bewegt, erfährt also keine passive Bewegung.

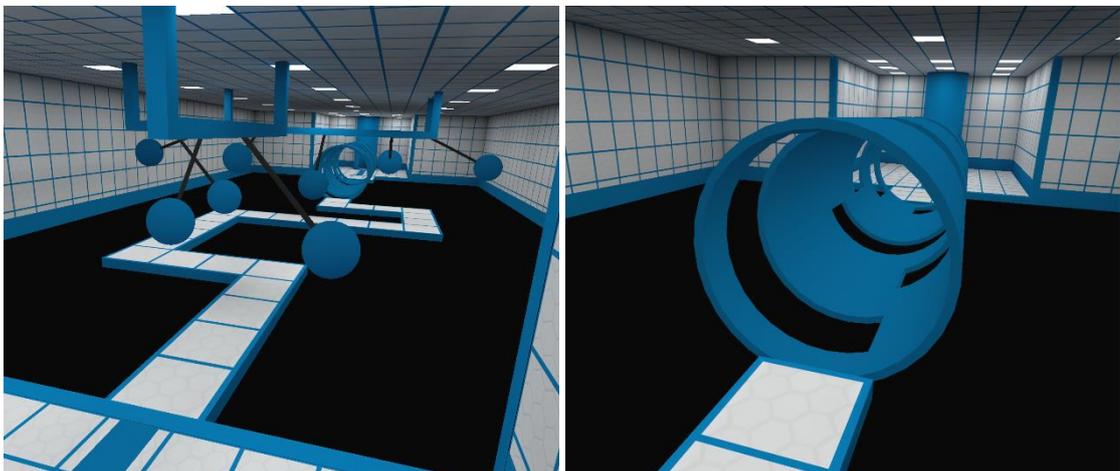


ABBILDUNG 17 DIE HINDERNISSE DES *BASIC LOCOMOTION*-RAUMES. IM LINKEN BILD SIND DIE PENDEL UND IM RECHTEN BILD DIE ROTIERENDE RÖHRE ZU SEHEN.

Das Hindernis im *Rotating Platforms*-Raum ist eine Reihe von rotierenden kreisförmigen Plattformen, die eine passive Rotationsbewegung bei dem Spieler auslösen, sobald er sich auf ihnen befindet. Diese Plattformen bilden dabei eine Art Brücke, die der Spieler traversieren muss, um an das andere Ende des Raumes zu gelangen. Auch hier ist es wieder so, dass herunterfallen von den Plattformen den Spieler an den letzten Checkpoint zurücksetzt und sich der initiale Checkpoint am Beginn des Raumes befindet, mit weiteren Checkpoints entlang des Hindernisses. Je

nachdem, welche Einstellungen getroffen wurden, können sich die Plattformen dabei entweder in die gleiche oder eine zufällige Richtung drehen. Auch die Rotationsgeschwindigkeit kann bei allen Plattformen gleich sein oder in einem festgelegten Intervall variieren. Da die Kontrolle des virtuellen Charakters nicht auf der Physik der virtuellen Welt basiert, muss die Übertragung der Rotationsbewegung an den Spieler manuell getätigt werden. Der Spielercharakter tastet während der Bewegung in der virtuellen Welt jeden Frame den Untergrund, auf dem er sich befindet, ab. Das wird zum einen genutzt, um die Bewegungsrichtung an die Steigung des Untergrunds anzupassen, aber zum anderen auch, um festzustellen, welche Art von Untergrund oder Objekt sich momentan unter dem Spieler befindet. Sobald der Spieler sich auf einer der rotierenden Plattformen befindet, wird er an diese gehangen, was zur korrekten Übertragung der Rotationsbewegung führt. Wenn der Spieler von einer Plattform zu der Nächsten geht, wird die neue Plattform als Parent-Objekt verwendet. Um die Übertragung der Rotationsbewegung zu beenden, sobald der Spieler auf der anderen Seite angekommen ist, wird das Parent-Objekt des Spielercharakters zurückgesetzt. Die Bewegung der Plattformen ist dabei ein direkter Auslöser von Motion Sickness, da sie zu einer passiven Rotationsbewegung des Spielers führt. Zudem trägt die schlagartig wechselnde Rotationsgeschwindigkeit zwischen den einzelnen Plattformen und beim Betreten der ersten bzw. Verlassen der letzten Plattform auch zu dem Auftreten der Krankheit bei. Da das Erahnen der Rotationsgeschwindigkeit und die damit verbundene Vorbereitung auf Seiten des Nutzers (z.B. durch Anpassung der Körperhaltung) von Interesse sein könnten, gibt es zudem die Möglichkeit, die Geschwindigkeit und Rotationsrichtung der Plattformen sichtbar zu machen. Das wird durch die Änderung der Textur auf der Oberseite aller Plattformen erreicht. Die normale Textur besteht aus zwei weißen Kreisen, die jeweils im Mittel- und Außenbereich der Plattform sichtbar sind. Die Texturvariante für das bessere Erkennen der Drehbewegung ist sehr ähnlich, die beiden Kreise haben hierbei aber mehrere kleine Unterbrechungen in ihrem Linienfluss, was zu einem geringen visuellen Unterschied führt, jedoch dafür sorgt, dass der Spieler die Geschwindigkeit und Richtung der Drehbewegung einschätzen kann.

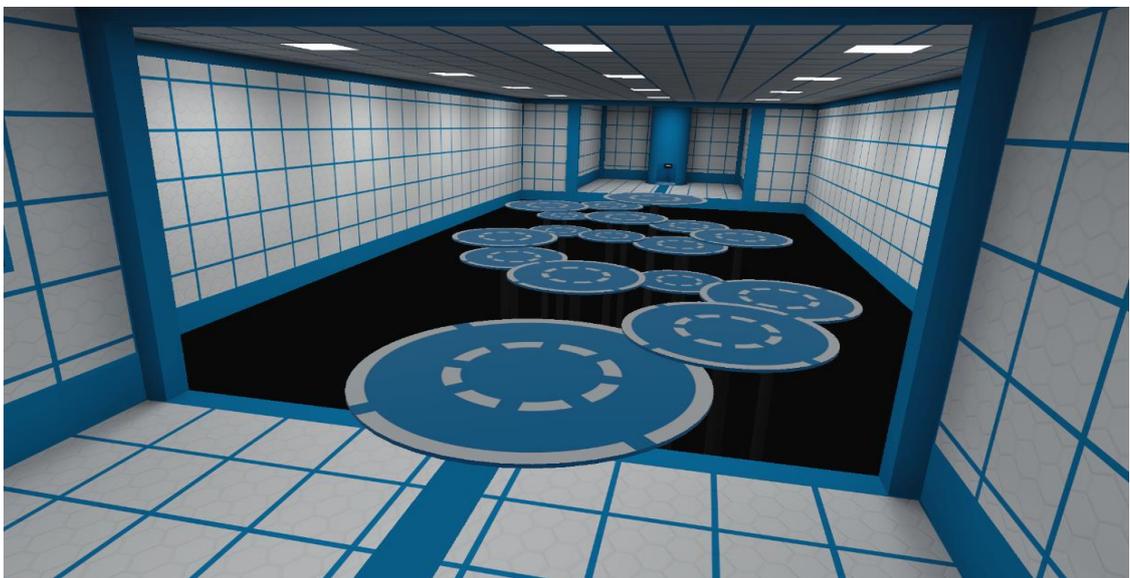


ABBILDUNG 18 ÜBERBLICK ÜBER DEN *ROTATING PLATFORMS*-RAUM DER ANWENDUNG. DIE PLATTFORMEN BESITZEN HIER DIE TEXTURVARIANTE DIE DAS ERKENNEN DER GESCHWINDIGKEIT UND RICHTUNG ERMÖGLICHT.

Im *Sphere Dodging*-Raum muss der Spieler mehreren physik-basierten Kugeln ausweichen, die ihm entgegen gerollt kommen, während er versucht an das Ende des Raumes zu gelangen. Der Raum besitzt dabei eine leichte Steigung, um die Kugeln ins

Rollen zu bringen. Wird der Spieler von einer der Kugeln getroffen, erfolgt das Zurücksetzen seiner Position in den Startbereich des Raumes, wodurch er das gesamte Hindernis von vorne beginnen muss. Durch die Kollision mit der Kugel wird beim Nutzer keine passive Bewegung ausgelöst und er kann diese auch nicht direkt beeinflussen. Um die Kugeln besser im verfügbaren Bereich zu verteilen und dem Spieler Zonen im Raum zu geben, in denen er in Deckung gehen kann, befinden sich im gesamten Raum verteilt mehrere Objekte, die die Richtung der Kugeln ablenken.

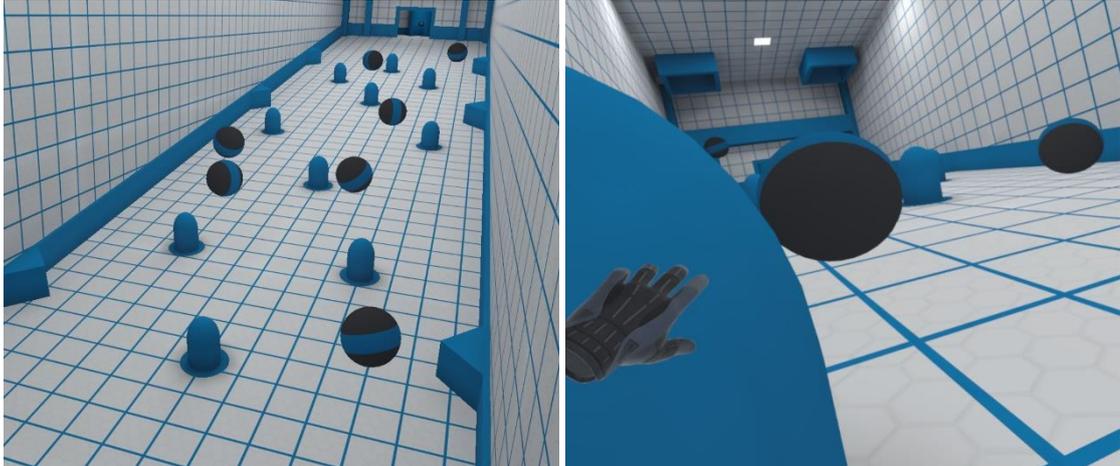


ABBILDUNG 19 ÜBERBLICK ÜBER DEN *SPHERE DODGING*-RAUM DER ANWENDUNG (LINKS) UND EINE AUFNAHME AUS DER SICHT DES SPIELERS (RECHTS).

5.3.3 AKTIVE UND PASSIVE BEWEGUNGEN

Die drei Räume *Shooting Platform*, *Rollercoaster* und *Racetrack* sind darauf ausgelegt, passive und aktive Bewegungen durch verschiedene Methoden darzustellen. Das Ziel bei diesen Räumen ist nicht das Erreichen des anderen Raumes, sondern das Ausführen einer spezifischen Aktivität, die aktive oder passive Bewegung beinhaltet.

Innerhalb des *Shooting Platform*-Raumes hat der Spieler die Aufgabe eine Reihe von Zielen mit einem Bogen abzuschießen, während er sich auf einer sich bewegenden Plattform befindet. Das Ganze stellt dabei einen Rail Shooter dar, ein Videospieldesign, das man regelmäßig in VR-Videospielen auffindet. Im Startbereich des Raumes befindet sich ein Knopf, den der Spieler drücken kann, um auf die bewegliche Plattform teleportiert und dieser angehängt zu werden. Bevor der Spieler diesen Knopf drückt, hat er zudem die Möglichkeit, sich mit der Kontrolle des Bogens und der Flugbahn der Pfeile in einem kleinen Schießstand vertraut zu machen, indem er mit einem Bogen, der direkt daneben liegt, interagiert. Der verwendete Bogen ist ein Objekt, das durch das SteamVR-Plugin zur Verfügung gestellt wird und daher auch das SteamVR-Interaktionssystem verwendet, was die Nutzung des Bogens sehr intuitiv macht. Sobald der Spieler den Knopf neben der Plattform drückt, wird ihm automatisch ein Bogen gegeben und das Spiel startet. Um auch hier wieder ein spielerisches Element zu integrieren, wird die Anzahl der getroffenen Ziele auf einer Anzeigetafel im Startbereich festgehalten. Das gibt dem Spieler zum einen den Anreiz, so viele Ziele wie möglich abzuschießen, aber kann zum anderen auch genutzt werden, um Unterschiede in der räumlichen Wahrnehmung und der Zielgenauigkeit bei verschiedenen visuellen Effekten zu testen. Standardmäßig dreht sich der Spieler nicht bei Drehungen der Plattform mit, es gibt jedoch eine Option, mit der dieses Verhalten aktiviert werden kann. Des Weiteren kann auch die Geschwindigkeit der Plattform im Hauptmenü-Raum angepasst werden. Die bewegliche Plattform ist auf ähnliche Weise wie die drehenden Plattformen im *Rotating Platforms*-Raum implementiert. Bei Betätigung des Knopfes wird die Plattform als Parent-Objekt des Spielers gesetzt, was dazu führt,

dass dieser den Bewegungen der Plattform folgt. Die räumliche Bewegung durch den Spieler wird dabei deaktiviert, um zu verhindern, dass dieser die Fläche der Plattform verlassen kann. Um die Strecke der Plattform festzulegen, wurde ein Spline verwendet, der aus mehreren Bezier-Kurvensegmenten besteht, wodurch sich der Pfad zudem auch sehr einfach anpassen lässt. Wenn der Spieler ein Ziel während der Fahrt erfolgreich abschießt, wird das Material des Ziels ausgetauscht, um zu signalisieren, dass es schon einmal in dieser Runde getroffen wurde. Nach dem Abschließen einer Runde werden alle Ziele und ihre Materialien wieder zurückgesetzt.

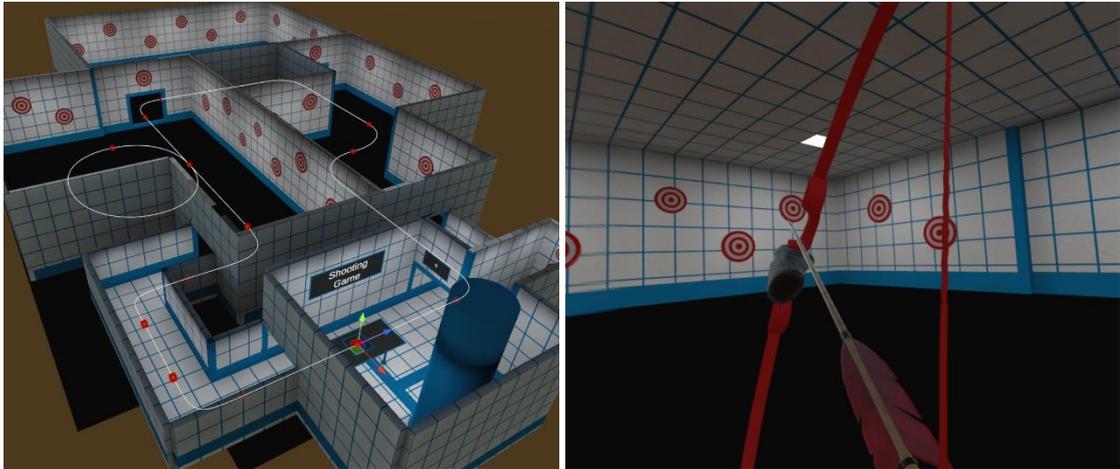


ABBILDUNG 20 IM LINKEN BILD IST DER *SHOOTING PLATFORM*-RAUM MIT DEM PFAD DER PLATTFORM ZU SEHEN. DAS RECHTE BILD ZEIGT DIE ANSICHT DES SPIELERS, WÄHREND ER DEN BOGEN AUF DER PLATTFORM NUTZT.

Der *Rollercoaster*-Raum beinhaltet eine Achterbahn, in der der Nutzer entlang des festgelegten Pfades einer Achterbahnstrecke fährt. Der Spieler startet auch in diesem Raum in einem Startbereich, in dem er einen Knopf drücken muss, um die Achterbahnfahrt zu beginnen. Sobald er den Knopf drückt, wird er auf den Sitz der Achterbahn teleportiert und in die passende Richtung ausgerichtet. Entlang der Achterbahnstrecke erfährt der Spieler mehrere, teils starke Auf- und Abbewegungen, steile Neigungen in den Kurven und allgemeine Streckenelemente, die man auch bei den Achterbahnen in echten Freizeitparks auffinden würde (z.B. ein Looping). Während der Achterbahnfahrt verändert sich die Geschwindigkeit des Wagens je nachdem, auf welchem Streckenabschnitt er sich aktuell befindet. Die Anzahl an zu absolvierenden Runden und die Geschwindigkeit des Wagens können über eine Einstellung im Menü-Raum verändert werden. Sobald alle Runden abgeschlossen sind, stoppt der Wagen im ursprünglichen Startbereich und der Spieler wird zurück teleportiert. Um die Achterbahnstrecke zu erstellen, wird auch hier die schon erwähnte Implementation eines Splines verwendet. Das Objekt des Achterbahnwagens besitzt ein eigenes 3D-Modell und zusätzlich eine Liste an Geschwindigkeiten, die der Wagen versucht, in festgelegten Streckenabschnitten zu erreichen. Wie schon besprochen, ist ein Hauptunterschied zwischen dem Fahrer und Passagieren beim Autofahren, dass der Fahrer sich auf die zukünftigen Bewegungen vorbereiten kann und dadurch weniger Motion Sickness erfährt. Bei einer Achterbahn hat der Passagier indirekt durch den Verlauf der Schienen die Möglichkeit, auch ohne aktive Kontrolle die Bewegungen des Wagens vorherzusehen. Ein Problem, das hier während der Entwicklung der Achterbahnstrecke aufgetreten ist, ist die Synchronisation der Wagenbewegungen mit dem 3D-Modell der Achterbahnschienen. Wenn das Erahnen zukünftiger Bewegungen bei passiver Bewegung und die daraus folgende Anpassung zur Verringerung der auftretenden Motion Sickness führen kann, ist eine mögliche Schlussfolgerung auch, dass das inkorrekte Einschätzen der Bewegung, gefolgt von einer falschen Anpassung an den Stimulus, theoretisch zu mehr Motion Sickness führen kann. Ein Extrembeispiel

wäre hier das Ausführen einer genau gegenteiligen Bewegung als die, auf die sich der Passagier vorbereitet hat. Am Beispiel der Achterbahn wäre das das Ausführen einer Linkskurve, wenn die Schienen eine Rechtskurve vermuten lassen. In der Theorie könnten dabei aber auch schon kleinere Abweichungen einen negativen Einfluss haben. Leider konnten hinsichtlich hierzu keine veröffentlichten Arbeiten gefunden werden, die diesen Effekt bestätigen oder widerlegen, dennoch wurde es als wichtig empfunden, diesen ungewollten Einfluss in der entwickelten Anwendung so gering wie möglich zu halten. Die Synchronisation des 3D-Modells der Achterbahnschienen und des festgelegten Spline-Pfades für den Achterbahnwagen stellt an dieser Stelle hauptsächlich ein Problem dar, da das Modell in einem externen Programm erstellt und der Spline innerhalb der Unity Engine festgelegt wurde. Um das Problem zu lösen, wurde das extern erstellte 3D-Modell der Schienen verworfen und das Mesh stattdessen prozedural generiert. Die Implementierung in der Anwendung ist dabei simpel gehalten, hier wurde ein 2D-Mesh in der Form von zwei nebeneinander liegenden Kreisen entlang des festgelegten Spline-Pfades extrudiert. Das resultierende 3D-Modell der Schienen passt perfekt zu dem festgelegten Spline-Pfad und repräsentiert die Fahrtrichtung des Wagens daher auch auf ideale Weise.

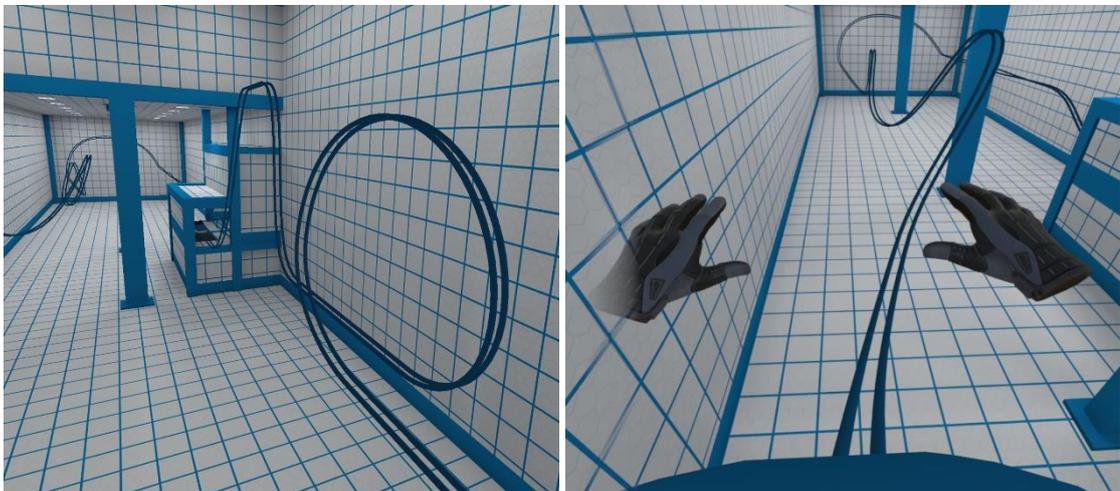


ABBILDUNG 21 DAS LINKE BILD ZEIGT EINEN TEIL DER ACHTERBAHNSTRECKE IM ROLLERCOASTER-RAUM. IM RECHTEN BILD IST DIE ANSICHT DES NUTZERS WÄHREND DER ACHTERBAHNFahrt ZU SEHEN.

Der letzte Raum in dieser Kategorie ist der *Racetrack*-Raum, in dem der Spieler ein Fahrzeug entlang einer Rennstrecke fahren kann. Das verwendete Fahrzeug kann entweder aktiv durch den Spieler gesteuert werden oder einen festgelegten Pfad entlang der Rennstrecke passiv verfolgen. Wie viele Runden der Spieler auf der Rennstrecke vollziehen muss, kann wie bei der Achterbahn im Hauptmenü der Anwendung eingestellt werden. Ähnlich wie bei den anderen Räumen, befindet sich der Spieler zu Beginn des Raumes in einem Startbereich, in dem er die Aktivität durch Drücken eines Knopfes beginnen kann. In diesem Raum stehen ihm jedoch zwei verschiedene Knöpfe zur Verfügung. Ein Knopf startet das aktive Steuern des Fahrzeugs, der andere das passive Durchlaufen der Rennstrecke. In beiden Fällen wird der Spieler nach erfolgreicher Beendigung der festgelegten Runden zurück zum Start des Raumes teleportiert. Die Rennstrecke selbst besitzt sowohl gerade Strecken als auch Kurven, auf die der Spieler beim aktiven Steuern achtgeben muss. Die passive Variante ist sehr ähnlich zu der Achterbahn implementiert worden. Der Spieler drückt den Knopf und wird anschließend in das Fahrzeug mit der korrekten Ausrichtung teleportiert. Der Pfad des Fahrzeugs ist auch hier durch einen Spline festgelegt und wie bei der Achterbahn verändert sich die Geschwindigkeit des Fahrzeugs während dieses den Pfad traversiert. Auch das 3D-Modell des Fahrzeugs ist hier das Gleiche wie bei

dem Wagen der Achterbahn, jedoch wurden für das aktive Kontrollieren des Fahrzeugs ein Lenkrad und ein Hebel hinzugefügt. Bei der aktiven Variante wird der Spieler auch in das Fahrzeug teleportiert und richtig ausgerichtet, muss die Fahrtrichtung und Geschwindigkeit jedoch selbst kontrollieren. Die Fahrtrichtung kann durch Greifen des Lenkrads mithilfe der Grip-Knöpfe des VR-Kontrollers gesteuert werden. Das Rotieren des Lenkrads erfolgt dabei durch Bewegung der Hände, wie bei einem echten Lenkrad. Während der Spieler das Lenkrad festhält, kann über die Trigger-Knöpfe der beiden Controller beschleunigt oder abgebremst werden. Der rechte Controller ist dabei für das Beschleunigen verantwortlich und der Linke für das Abbremsen des Fahrzeugs. Neben dem Lenkrad befindet sich auch noch ein Hebel auf der Armatur, den der Spieler greifen kann, um zwischen der Beschleunigung in die Vorwärts- oder Rückwärtsrichtung zu wechseln. Die Bewegung des Fahrzeugs ist physik-basiert und dieses kann aufgrund dessen auch direkt mit dem Rand der Rennstrecke kollidieren. Um ungewollte passive Bewegung bei Kollisionen zu vermeiden, kann sich die Rotation des Fahrzeugs nicht entlang der lokalen Z- und X-Achsen verändern, was dazu führt, dass sich das Fahrzeug immer flach auf der Oberfläche der Rennstrecke befindet. Das hat den Nachteil, dass das Fahrzeug bei starken Kollisionen mit den Banden der Rennstrecke durch diese hindurch fahren kann und der Spieler damit den vorgesehenen Bereich verlässt. Sollte dies passieren, wird der Spieler und das Fahrzeug zurück an den Start der Rennstrecke teleportiert. Die verschiedenen Fahreigenschaften des Fahrzeugs (z.B. die maximale Geschwindigkeit, Beschleunigung und Bremskraft) können zudem innerhalb des Menü-Raums verändert werden, um das gewünschte Fahrverhalten zu erzeugen und den Schwierigkeitsgrad der Rennstrecke zu beeinflussen.



ABBILDUNG 22 DER RACETRACK-RAUM (LINKS) UND DIE ANSICHT DES SPIELERS BEIM STEuern DES FAHRZEUGS (RECHTS).

5.3.4 ANWENDUNGSDESIGN UND EFFEKTE

Der letzte der sieben Räume veranschaulicht verschiedene Effekte und Designentscheidungen, die bei der Entwicklung einer VR-Anwendung getroffen werden können und bei der Vermeidung von Motion Sickness hilfreich sind. Der Großteil der in diesem Raum präsentierten Aspekte stellt dabei sehr konkrete Designentscheidungen da, die bei der Entwicklung in Betracht gezogen werden sollten. Um diese Aspekte strukturiert darzustellen, ist der Raum in fünf grobe Bereiche unterteilt.

Im ersten Bereich hat der Spieler die Möglichkeit, die Simulation von Tracking-Fehlern und das Begrenzen der Framerate lokal auszuprobieren. Dafür befinden sich zwei kleine Bühnen in diesem Bereich, die jeweiliges einen der Effekte auslösen, sobald der Spieler ihre Fläche betritt. Das Testen der beiden Effekte in den anderen Räumen der

Anwendung kann als sehr unangenehm empfunden werden, da sie schnell Krankheitssymptome auslösen. Für den Fall, dass der Spieler die Effekte nur kurzzeitig erfahren möchte, um sich einen Eindruck über ihre Auswirkungen zu verschaffen, wurden daher diese beiden Bühnen implementiert.

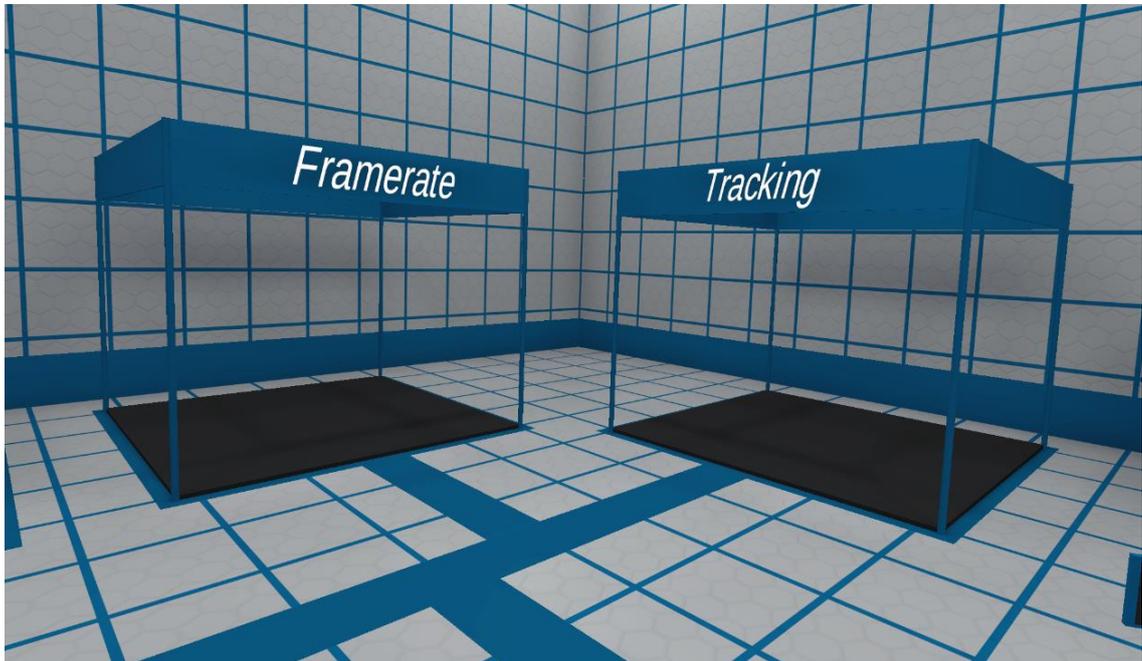


ABBILDUNG 23 DIE BEIDEN BÜHNEN ZUM LOKALEN TESTEN DER EFFEKTE.

Der zweite Bereich veranschaulicht, wie glatte Übergänge und Bewegungen in der virtuellen Welt gegen das Auftreten der Krankheit helfen können. Dafür werden zwei Implementierungen von Treppen verwendet, die zwar auf den ersten Blick identisch sind, jedoch bei Benutzung verschiedene visuelle Bewegungsmuster auslösen. Bei der linken Treppe besitzt jede einzelne Stufe Geometrie, mit der der Spieler kollidieren kann. Das führt dazu, dass die Ansicht des Spielers beim Traversieren der Treppe Auf- und Abbewegungen unterzogen wird, die als passive Bewegung aufgefasst werden können. Hingegen hierzu besitzen die Stufen der rechten Treppe keine eigene Geometrie für die Kollision mit dem Spieler, stattdessen verwendet die Treppe Kollisionsgeometrie in der Form einer Rampe. Dadurch erfährt der Spieler beim Nutzen der Treppe eine glatte Bewegung nach oben bzw. unten und damit keine negativen Effekte aufgrund der passiven Auf- und Abbewegung. Treppen eignen sich gut, um diesen Unterschied darzustellen, da die passiven Bewegungen aufgrund der Stufen schnell nacheinander auftreten. Dorado und Figueroa (2014) haben eine Studie durchgeführt, in der diese beiden Implementierungen von Treppen hinsichtlich ihres Einflusses auf Motion Sickness untersucht wurden. Ihr Grund für diese Studie war, dass ca. 90% der Teilnehmer an einem Experiment vor der Studie Unwohlsein bei der Traversierung einer virtuellen Treppe ohne glatte Kollisionsgeometrie empfunden haben (S. 48). Sie konnten in ihrer Studie einen signifikanten Unterschied feststellen, bei dem die Rampengeometrie rund 40% weniger Motion Sickness bei den Probanden ausgelöst hat (S. 49). Dorado und Figueroa (2014) sehen zwei mögliche Begründungen für das Ergebnis darin, dass zum einen weniger Vektation aufgrund der Rampengeometrie auftritt und zum anderen die Körperhaltung weniger angepasst werden muss, was wiederum zu höherer Stabilität führt (S. 50). Diese Art von glatten Übergängen kann auch auf andere Objekte der virtuellen Welt angewandt werden, um Unwohlsein aufgrund passiver Bewegungen zu vermeiden (besonders auf kleine Hindernisse, wie beispielweise den Bordstein einer virtuellen Straße).

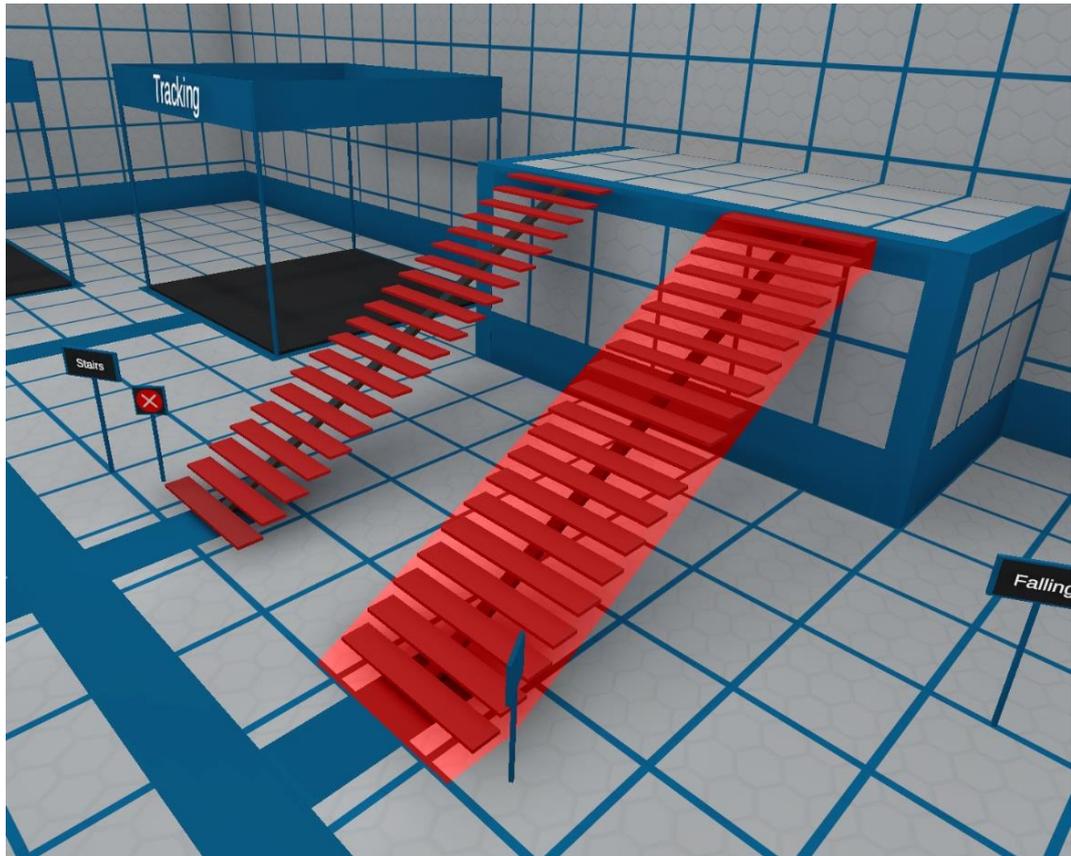


ABBILDUNG 24 VISUALISIERUNG DER KOLLISIONSGEOMETRIE (ROT) DER BEIDEN UNTERSCHIEDLICHEN IMPLEMENTIERUNGEN DER TREPPE.

Der dritte Bereich veranschaulicht, wie die Zeitdauer der erfahrenen Vektion in einer VR-Anwendung die auftretende Motion Sickness beeinflussen kann. Um dies zu zeigen, eignet sich das Fallen in der virtuellen Welt besonders gut, da hierbei leicht Vektion auftritt und dieses Element in den meisten Anwendung nicht leicht umgangen werden kann. Hierfür wurde eine erhöhte Plattform in einer Ecke des Raumes erstellt, von der aus der Spieler mehrere Meter in die Tiefe fallen kann. Je nachdem, auf welcher Hälfte der Plattform sich der Spieler befindet, wenn er von dieser herunterspringt, ändert sich seine Fallgeschwindigkeit. Fällt der Spieler von der vorderen Hälfte der Plattform, erfährt er die normale Fallbewegung mit der festgelegten Schwerkraft. Beim Fallen von der hinteren Hälfte der Plattform wird die Schwerkraft hingegen mit einem einstellbaren Faktor multipliziert. Je höher dabei der Multiplikationsfaktor ist, desto schneller fällt der Spieler und desto kürzer wird die Dauer der wahrnehmbaren Vektion, was wiederum zu weniger Unwohlsein führen kann. Der Extremfall stellt hierbei das Teleportieren von der Plattform auf den darunterliegenden Boden dar. Dadurch führt der Spieler die Fallbewegung in einer nicht wahrnehmbaren Zeitspanne (z.B. innerhalb eines einzelnen Frames) durch und vermeidet direkt das Auftreten visueller Vektion. Der Nachteil dabei ist aber, dass die abrupte Positionsänderung zu einem kurzzeitigen Orientierungsverlusts des Spielers führen kann, was gerade in hektischen Spielesituationen oder bei dem unbeabsichtigten Auslösen der Fallbewegung ein signifikantes Problem für die Spielerfahrung darstellen kann.

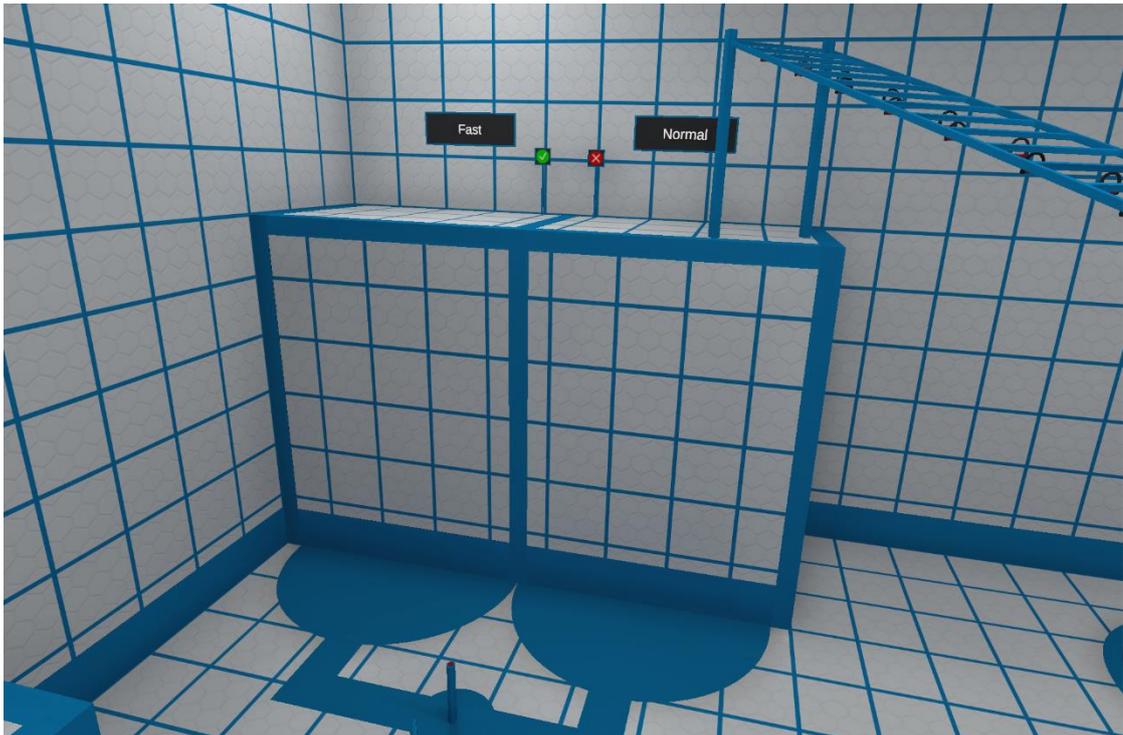


ABBILDUNG 25 DIE PLATTFORM VON DER DER SPIELER HERUNTERFALLEN KANN. AUF DER LINKEN SEITE WIRD DAS FALLEN BESCHLEUNIGT, AUF DER RECHTEN SEITE HINGEGEN NICHT.

Um auf die Plattform zu gelangen, stehen dem Spieler zwei Möglichkeiten zur Verfügung. Die Erste ist das Teleportieren mithilfe eines Knopfes, der sich direkt unterhalb der Plattform befindet. Dies stellt hinsichtlich Motion Sickness eine ideale Methode für die Überbrückung großer vertikaler Distanzen dar, hat jedoch den Nachteil, dass es nicht besonders interaktiv oder interessant für den Nutzer ist, ihn deshalb also nicht weiter in das Anwendungsgeschehen integriert. Gerade bei VR-Videospielen, die darauf ausgelegt sind, dass der Spieler in die Anwendung involviert ist und die virtuelle Umgebung mit starkem Interesse erkundet, ist es daher eine gute Idee, dem Spieler aktivere Wege für das Erkunden anzubieten. In Bezug auf Motion Sickness spielt hierfür besonders das Klettern in der virtuellen Welt eine interessante Rolle. Wie schon beschrieben, ist ein großer Vorteil bei der Verwendung von VR-Treadmills, dass der Nutzer die echte Gehbewegung imitiert und damit den Unterschied zwischen dem Gesehenen und dem Gefühlten verringert. Das Simulieren der Kletterbewegung in der virtuellen Umgebung ist daher interessant, weil es den gleichen Vorteil bietet. Es gibt viele kommerzielle VR-Spiele, die diese Art der vertikalen Fortbewegung verwenden, ohne dabei kostspielige Hardware zu benötigen und stattdessen das Klettern auf Seiten der Software integrieren. Ein gutes Beispiel für solch ein VR-Spiel ist *The Climb*¹⁰ von Crytek¹¹, in dem diese Fortbewegungsmethode als zentrale Spielmechanik verwendet wird. Die zweite Methode, um auf die Plattform zu gelangen, ist daher eine Kletterwand, die sich in der Nähe der Plattform befindet. Durch aufeinanderfolgendes Greifen der Klettergriffe kann sich der Spieler langsam an diesen nach oben und anschließend in Richtung der Plattform aneln. Sobald der Spieler einen Klettergriff greift, wird die Bewegungsänderung des Controllers an den virtuellen Körper des Spielers übertragen, wodurch er sich nach und nach entlang der

¹⁰ Offizielle Webseite von The Climb - <https://www.theclimbgame.com/>

¹¹ Crytek GmbH - <https://www.crytek.com/>

Kletterwand bewegen kann. Solange der Spieler mindestens eine Hand an einem Griff hat, ist die Schwerkraft für den virtuellen Charakter deaktiviert und er kann sich so uneingeschränkt bewegen. Befindet sich keine der beiden Hände mehr an einem Klettergriff, wirkt die Schwerkraft wieder auf dem Spieler ein und er fängt an zu Fallen.

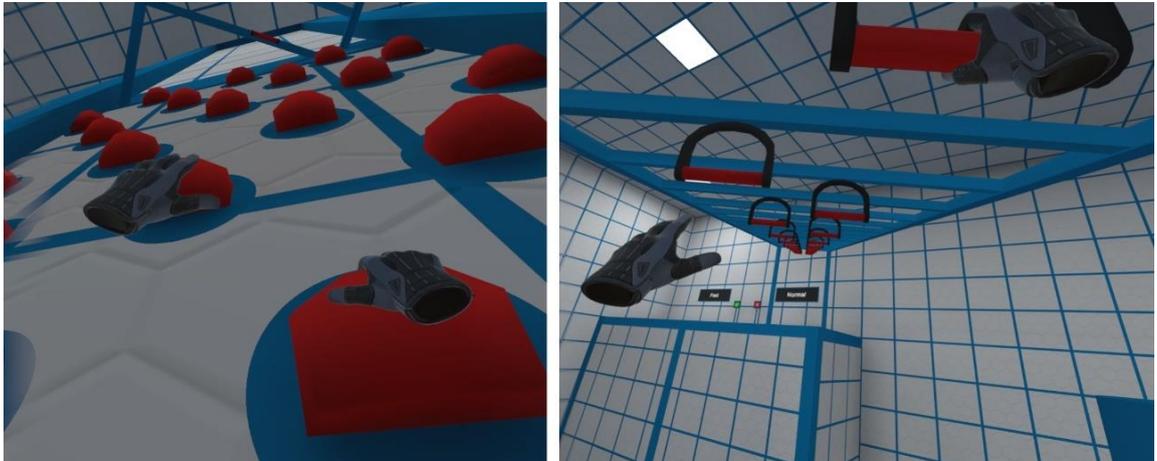


ABBILDUNG 26 DAS KLETTERN AUF DIE PLATTFORM AUS SICHT DES SPIELERS.

Innerhalb des vierten Bereichs wird der Effekt von Vektion auf die Wahrnehmung von Bewegung präsentiert. Dafür gibt es in diesem Bereich zwei Objekte, die gezielt den Anschein von Eigenbewegung aufgrund visueller Stimulation auslösen. Das erste Objekt stellt einen zirkulären Raum in der Form eines Zylinders dar, in dem mithilfe eines Shaders eine sich bewegende Textur auf der Wand dargestellt wird. Die Textur ist schwarz, aber besitzt viele weiße Punkte, die leicht von dem Spieler erkannt werden können. Der Rest des Raumes ist komplett abgedunkelt, damit der Spieler, außer den weißen Punkten, keinerlei Referenzpunkte in seinem Sichtfeld ausfindig machen kann. Da sich die Textur mit einer einstellbaren Geschwindigkeit um den Spieler herumbewegt, wenn dieser in der Mitte des Zylinders steht, kann hier leicht zirkuläre Vektion aufgrund des visuellen Stimulus auftreten. Zusätzlich kann hier auch ein optionaler Soundeffekt aktiviert werden, der sich, ähnlich zu der Textur, in einer kreisförmigen Bewegung um den Spieler bewegt. Bei Nutzung geeigneter Hardware zur Ausgabe des Audioeffekts kann dies zu dem Auftreten von nicht-visueller Vektion führen. Das zweite Objekt in diesem Bereich stellt einen Tunnel dar, in dem die Wand, wie bei dem ersten Objekt, eine sich bewegende Textur besitzt, die visuelle Vektion bei dem Spieler auslösen soll. Hier wird jedoch nicht versucht zirkuläre Vektion auszulösen, sondern lineare Vektion, die dem Spieler das Gefühl gibt, eine Bewegung nach vorne oder hinten auszuführen. Als Textur wird hierfür ein simples Muster verwendet, das aus diagonalen Streifen besteht, die abwechselnd schwarz und weiß sind. Bei Bewegung der Textur gibt dieses Muster den Eindruck einer Spirale. Je nachdem, wie sich der Spieler in diesem Tunnel bewegt, kann er unterschiedliche Arten von Eigenbewegung wahrnehmen. Bleibt er ruhig stehen und schaut an das andere Ende des Tunnels, kann er entweder Bewegung nach vorne oder nach hinten wahrnehmen. Bewegt er sich aktiv durch den Tunnel mit der Flussrichtung des Musters, erhält er den Eindruck, sich schneller zu bewegen, als er das wirklich tut. Wird hingegen eine Bewegung entgegengesetzt der Flussrichtung im Tunnel ausgeführt, kann es sein, dass sich der Spieler so fühlt, als würde er sich kaum vom Fleck bewegen.

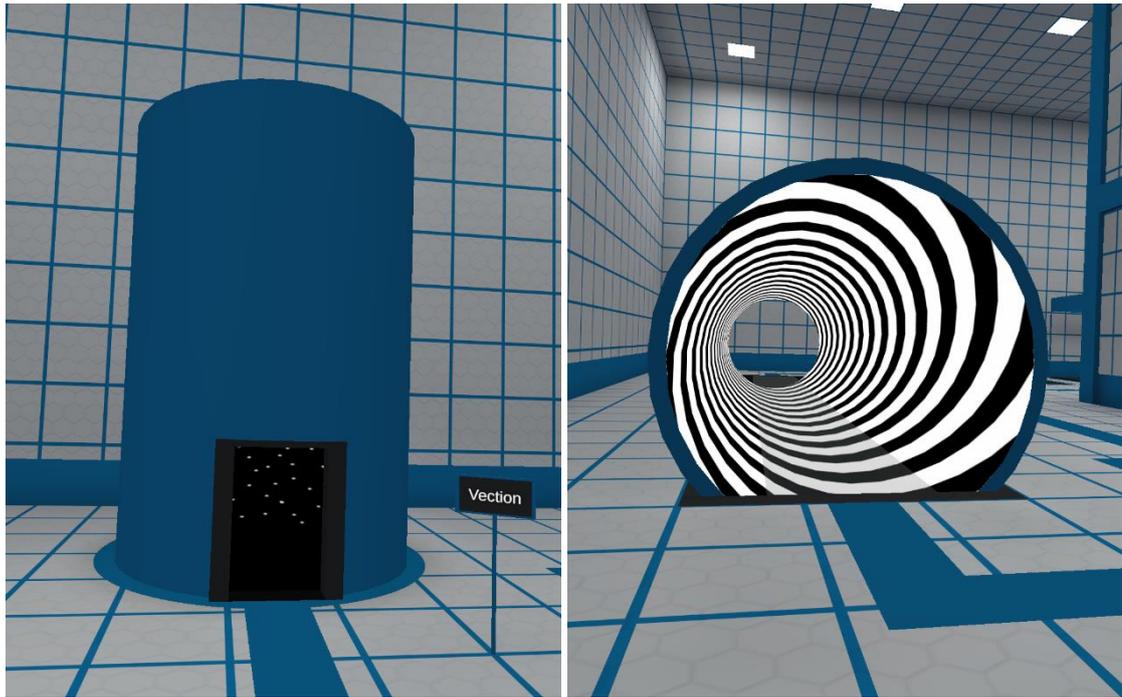


ABBILDUNG 27 DIE BEIDEN OBJEKTE ZUM VERANSCHAULICHEN VON VEKTION.

Der letzte Bereich dieses Raumes zeigt zwei verschiedene Methoden, den Spieler innerhalb des vorgesehenen Bereichs in der VR-Anwendung zu halten. Die Art und Weise, wie der Spieler innerhalb des vorgesehenen Bereichs gehalten wird, kann eine zentrale Designentscheidung sein. In herkömmlichen 3D-Anwendungen wird die Bewegung des Nutzers leicht durch Kollisionen mit Wänden oder Objekten auf den gewollten Bereich begrenzt. Hingegen dazu können diese Kollisionen in VR-Anwendungen schnell kompliziert werden und gegebenenfalls eine Anpassung des Charakterkontrollers mit sich bringen, da der Nutzer in der echten Welt normalerweise keiner der räumlichen Begrenzungen der virtuellen Welt ausgesetzt ist. Das heißt beispielsweise, dass wenn der virtuelle Charakter direkt vor einer Wand steht und nicht durch diese hindurchgehen kann, der Nutzer in der echten Welt trotzdem in der Lage ist, ohne Probleme weitere Schritte in diese spezifische Richtung auszuführen. Der hierbei entstehende Konflikt zwischen der echten und virtuellen Position des Körpers muss von der Anwendung auf geeignete Weise gehandhabt werden. Grundsätzlich gibt es dabei zwei Ansätze, die entweder die Lage des virtuellen Körpers oder die Lage des realen Körpers priorisieren. Die Priorisierung der Lage des virtuellen Körpers stellt dabei das Kollisionsverhalten in herkömmlichen 3D-Anwendungen dar. Sobald eine Kollision stattfindet, bleibt der virtuelle Körper und damit auch die Sicht des Nutzers stehen, kann sich also nicht weiter in die Kollisionsrichtung bewegen. Wenn sich der Spieler in der realen Welt weiter in diese Richtung bewegt, wird der virtuelle Körper als Resultat immer weiter in die entgegengesetzte Richtung verschoben, so dass sich die endgültige Position nicht weiter verändert. Diese Gegenbewegung kann in den Augen des Nutzers als passive Bewegung wahrgenommen werden, stellt daher also einen Auslöser von Motion Sickness dar. Die Priorisierung des realen Körpers kann implementiert werden, indem der virtuelle Körper immer der Position des realen Körpers folgt, auch wenn Kollisionen auftreten. Um trotzdem dafür zu sorgen, dass der Nutzer nicht außerhalb des vorgesehenen Bereichs gehen kann, muss ihm hierbei auf eine andere Weise mitgeteilt werden, dass weitere Bewegungen in die Kollisionsrichtung nicht zulässig sind. Das kann beispielsweise durch das Ausblenden der virtuellen Umgebung geschehen und wird so auch in kommerziellen VR-

Videospielen verwendet. Ein Beispiel dafür ist das VR-Spiel *Half Life: Alyx*¹² von Valve¹³, in dem der Bildschirm des Headsets orange eingefärbt wird, sobald sich der Spieler innerhalb der Umgebungsgeometrie befindet. Da hier keine passive Bewegung stattfindet, stellt diese Methode keinen Auslöser für Motion Sickness dar, jedoch gibt es zwei andere Probleme. Zum einen ist der Effekt nur visuell, d.h. der Spieler kann trotzdem noch außerhalb des Spielbereichs gelangen. Um das zu umgehen, könnte beispielweise eine echte Kollision etwas innerhalb der Bewegungsgeometrie stattfinden, die das weitere Bewegen in die Kollisionsrichtung verhindert, aber aufgrund des visuellen Effekts nicht wahrgenommen wird. Das zweite Problem ist, dass der Spieler sich aufgrund dieser Methode innerhalb der Geometrie verirren kann, falls keine weiteren Indikatoren für die aktuelle Körperlage vorhanden sind. Auch hierbei hilft das Integrieren einer echten Kollision innerhalb der Umgebungsgeometrie, da der Spieler sich dadurch nicht zu weit in die Geometrie bewegen kann. Um diese beiden Arten der Kollisionsverwaltung zu veranschaulichen, besitzt der letzte Bereich zwei große Würfel, die jeweils eine der beiden Methoden verwenden. Der rechte Würfel drückt den Spieler weg, sobald dieser mit ihm kollidiert. Dafür musste kein spezielles Verhalten implementiert werden, da dieses Verhalten auch im Rest der Anwendung aufgrund des Charakterkontrollers verwendet wird. Wenn der Spieler mit dem linken Würfel kollidiert, wird sein Bildschirm hingegen schlagartig ausgeblendet. Für das Ausblenden des Bildschirms wurde auch hier wieder ein Shader und Render-Pass genutzt, um ein einfaches Mesh über den gesamten Bildschirm zu legen und den Alpha-Wert bei Kollision mit dem Würfel auf geeignete Weise anzupassen.

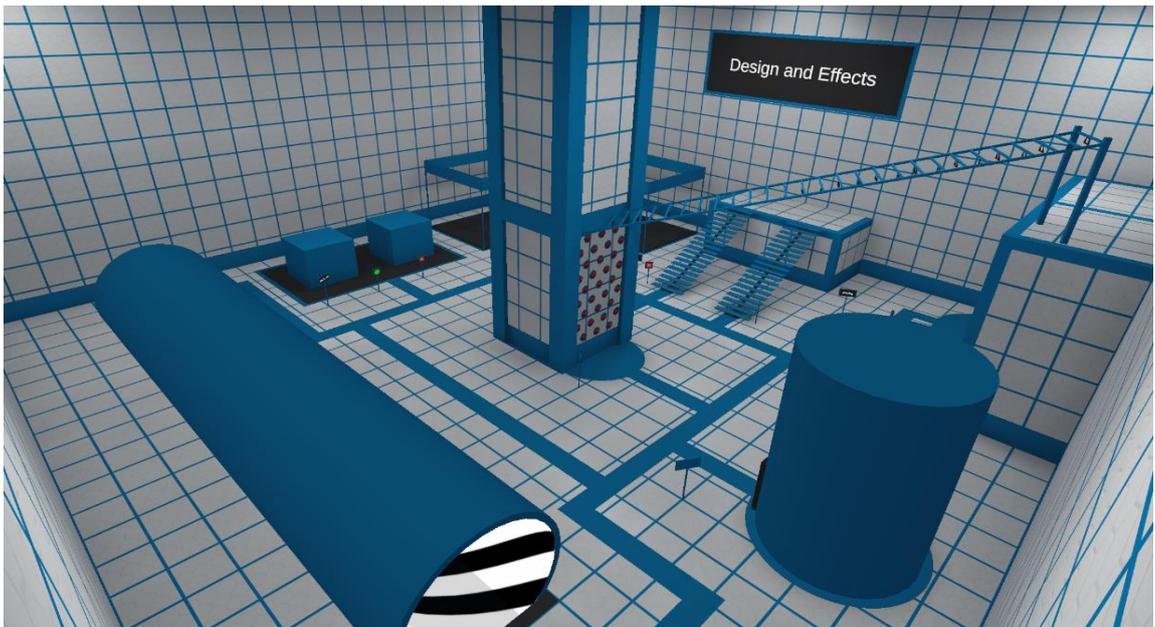


ABBILDUNG 28 EIN ÜBERBLICK ÜBER ALLE BEREICHE DES RAUMES.

6 STUDIE

Mithilfe der entwickelten Anwendung wurde im Rahmen dieser Arbeit auch eine Studie zur Untersuchung der implementierten Effekte und Methoden durchgeführt. Da es sehr aufwändig ist, alle möglichen Methoden zur Vermeidung von Motion Sickness und

¹² Offizielle Webseite von Half Life: Alyx - <https://www.half-life.com/alyx/>

¹³ Valve Corporation - <https://www.valvesoftware.com/>

zusätzlich die Kombinationen dieser zu untersuchen, wurde der Fokus stattdessen auf einen spezifischen Teil dieser Methoden gesetzt. Dabei hat es sich angeboten, den Unterschied zwischen verschiedenen Eingabegeräten zu untersuchen, da für diese Arbeit die Virtualizer Treadmill zur Verfügung stand. Nachdem sich VR-Treadmills über die letzten Jahre aufgrund des VR-Booms immer weiter in Richtung des Konsumerbereichs entwickelt haben und sich sowohl der Preis als auch der für sie benötigte Platz verringert hat, ist es eine interessante Frage, ob diese modernen Treadmills einen bedeutenden Vorteil gegenüber einer gängigen Fortbewegungsmethode in interaktiven VR-Anwendungen bieten. Die Fortbewegung mittels Eingabe über VR-Kontroller stellt heutzutage die verbreitetste Locomotion-Methode dar. Aus diesem Grund ist das erste Ziel der Studie das Klären der Frage, ob die Nutzung einer modernen VR-Treadmill einen Vorteil gegenüber der herkömmlichen Steuerung des virtuellen Charakters durch VR-Kontroller bietet.

Bei der Entwicklung der Anwendung wurden mehrere verschiedene Methoden implementiert, um gegen die Ausprägung von Motion Sickness zu helfen. Diese Methoden bieten etliche Einstellungsmöglichkeiten, die von Seiten des Nutzers verändert werden können. Auch in anderen VR-Anwendungen, die die gleichen oder ähnliche Methoden zur Reduktion der Krankheit nutzen, kann sich die Anzahl der einstellbaren Aspekte schnell vervielfältigen und dafür sorgen, dass der Nutzer den Überblick über diese verliert. Die meisten Nutzer sind sich zudem nicht über die Auswirkungen der einzelnen Methoden im Klaren und können daher nicht direkt einschätzen, welche Methoden am besten für sie in einer spezifischen Anwendungssituation geeignet sind, um Krankheitssymptome zu vermeiden. In herkömmlichen 3D-Anwendungen lassen sich die idealen Einstellungen für den Nutzer durch direktes Ausprobieren finden. Dieser Trial-and-Error-Ansatz funktioniert bei den Einstellungen in VR, die Motion Sickness beeinflussen, jedoch nicht, weil dadurch im schlimmsten Fall starkes Unwohlsein bei den Nutzern auftritt. Aus diesem Grund wäre es vorteilhaft, die Einstellungen der verfügbaren Methoden automatisch anhand eines Referenzwertes für die Stärke der auftretenden Motion Sickness festlegen zu können. Dafür müsste aber bekannt sein, wie stark die Krankheit bei dem Nutzer auftritt, was so direkt nur möglich ist, wenn er sich einer provokativen Situation aussetzt. Die Empfindlichkeit gegenüber Motion Sickness kann jedoch mithilfe unterschiedlicher Fragebögen gemessen werden, ohne dass dafür der Nutzer unter Krankheitsausprägungen leiden muss. Gäbe es einen Zusammenhang zwischen der Empfindlichkeit gegenüber der Krankheit (d.h. wie leicht bzw. oft Motion Sickness erfahren wird) und ihrer Stärke, könnte man einen Referenzwert abschätzen und damit bestimmen, welche Methoden angewandt werden sollten. Daher ist das zweite Ziel der Studie das Untersuchen davon, ob die individuelle Empfindlichkeit einer Person gegenüber Motion Sickness einen Zusammenhang mit der erfahrenen Stärke der Krankheit hat.

6.1 MESSUNG VON MOTION SICKNESS UND EMPFINDLICHKEIT

Das korrekte Messen von Motion Sickness innerhalb einer interaktiven VR-Anwendung stellt eine Herausforderung dar, die man nicht unterschätzen sollte. Wie von McCauley und Sharkey (1992) beschrieben wird, stellen hier nicht nur die vielen möglichen Symptome der Krankheit und die Art ihrer Ausprägung ein Problem dar, sondern auch, dass die Symptome stark von der jeweiligen Person abhängen und sich binnen weniger Minuten oder erst nach einigen Stunden entwickeln können (S. 311). Diese Aspekte stellen zusätzlich auch ein Problem bei dem Bestimmen der Empfindlichkeit gegenüber Motion Sickness dar.

Um die Stärke der Krankheitsausprägung zu messen, gibt es grundsätzlich zwei verschiedene Ansätze. Der Erste ist das objektive Messen durch die Evaluierung biologischer Werte. Dazu gehören beispielsweise die Herzfrequenz, der Blutdruck oder die Leitfähigkeit der Haut. (Cobb et al., 1999, S. 176, Descheneaux et al., 2020, S. 416). In manchen Studien wird zudem auch die Stabilität der Körperhaltung gemessen, was in diesem Zusammenhang auch als objektive Messmethode für Motion Sickness angesehen werden kann. Wie Descheneaux et al. (2020) erwähnen, ist das objektive Messen von Motion Sickness heutzutage jedoch noch nicht weit verbreitet und stattdessen wird meistens der zweite Ansatz verwendet. Dieser Ansatz ist das Quantifizieren der Krankheitsstärke durch subjektive Befragung der betroffenen Person, wobei die Befragung in der Regel die Form eines Fragebogens oder einer simplen Skala annimmt.

6.1.1 SIMULATOR SICKNESS QUESTIONNAIRE

Der in Forschungsarbeiten meistgenutzte Fragebogen zum Messen der Krankheitsstärke ist das sogenannte *Simulator Sickness Questionnaire* (SSQ) von Kennedy et al. (1993). Dieser wird deshalb auch hier für das Auswerten der aufgetretenen Krankheitsstärke verwendet. Der Fragebogen basiert auf dem *Pensacola Motion Sickness Questionnaire* (MSQ), welches zur Messung von traditioneller Motion Sickness (z.B. Flug- und Seekrankheit) verwendet wird. Kennedy et al. (1993) haben das SSQ entwickelt, da sie das MSQ als unzureichend für den Einsatz im Bereich der Simulatoren bzw. Virtual Reality ansahen. Beispielsweise bewertet das MSQ die Krankheitsstärke anhand mehrerer Symptome, die für die Krankheitsausprägungen in Virtual Reality nicht relevant oder irreführend sind (S. 203). Um das SSQ aufzustellen, haben sie über 1000 MSQ-Paare (bestehend aus zwei MSQs, jeweils vor und nach der Immersion in einem Simulator) analysiert (S. 205). Jedes MSQ beinhaltet dabei Bewertungen für 28 Symptome, für das SSQ wurde diese Liste jedoch auf insgesamt 16 Symptome reduziert. Diese 16 Symptome tragen im SSQ zu drei verschiedenen Symptomgruppen bei: *Nausea*, *Oculomotor* und *Disorientation*. Die Gruppe *Nausea* besteht dabei aus Symptomen, die mit Magen- und Darmproblemen assoziiert werden, wie etwa allgemeines Unwohlsein und erhöhte Speichelbildung. *Oculomotor* setzt sich aus den Symptomen zusammen, die in Verbindung mit den Augen auftreten, beispielsweise Kopfschmerzen oder unscharfes Sehen. Zu der Gruppe *Disorientation* tragen Symptome bei, die im Zusammenhang mit dem vestibulären System vorkommen. Dazu gehören zum Beispiel Schwindelgefühle und Gleichgewichtsstörungen. (Kennedy et al., 1992, S. 297). Beim Ausfüllen des SSQs bewertet die betroffene Person die Stärke dieser 16 Symptome anhand einer Skala, die Antworten von 0 („Tritt gar nicht auf“) bis 3 („Tritt stark auf“) zulässt. Mithilfe des ausgefüllten Fragebogens lassen sich anschließend vier verschiedene Werte berechnen: je ein gewichteter Wert für jede der drei Symptomgruppen und ein Gesamtwert, der in der Regel als Stärke der aufgetretenen Motion Sickness interpretiert wird. Dieser Gesamtwert, auch als *Total Score* bezeichnet, kann theoretisch im Bereich zwischen 0 und etwas über 230 variieren, jedoch sehen Kennedy et al. (1992) bereits Werte zwischen 15 und 20 als sehr problematisch an (S. 297). Um die Werte der Symptomgruppen (*N*, *O*, *D*) zu erhalten, wird die Summe der zu der jeweiligen Gruppe beitragenden Symptombewertungen (S_N, S_O, S_D) mit einem Gewichtungsfaktor verrechnet und ähnlich ist es auch für den Gesamtwert (*Total Score*):

$$\text{Nausea } N = S_N \times 9.54$$

$$\text{Oculomotor } O = S_O \times 7.58$$

$$\text{Disorientation } D = S_D \times 13.92$$

$$\text{Total Score} = (S_N + S_O + S_D) \times 3.74$$

Das SSQ ist zwar heutzutage der verbreitetste Fragebogen für das subjektive Messen von Motion Sickness im VR-Bereich, jedoch gibt es auch valide Kritik an diesem. Wie von Bimberg et al. (2020) erklärt wird, ist ein Problem beispielsweise, dass die Bevölkerungsgruppe, die für das Entwickeln des Fragebogens und der Analyse der einzelnen Symptomfaktoren verwendet wurde, ausschließlich aus Militärpersonal, genauer genommen Piloten, bestand, die Erfahrung mit Flugsimulatoren hatten. Diese Bevölkerungsgruppe könnte daher theoretisch allgemein weniger anfällig für Motion Sickness sein als die Zivilbevölkerung. Ein weiteres Problem des SSQs ist, dass die verwendeten Begriffe für die Symptome nicht immer eindeutig sind und leicht von den Probanden falsch verstanden werden könnten. Zum Beispiel ist nicht jedem Teilnehmer direkt klar, was mit *Stomach Awareness* gemeint ist oder was der genaue Unterschied zwischen *Vertigo* und *Dizziness* ist. (Bimberg et al., 2020, S. 465).

6.1.2 EMPFINDLICHKEITS-FRAGEBOGEN

Auch für das Bewerten der Empfindlichkeit gibt es verschiedene subjektive Fragebögen. Im Vergleich zu den Fragebögen für das Evaluieren der Krankheitsstärke, hat sich hier aber kein spezifischer Fragebogen besonders stark etabliert. Zwei dieser Fragebögen sind die kurze Version des Motion Sickness Susceptibility Questionnaires (MSSQ) von Golding (2006) und das Visually Induced Motion Sickness Susceptibility Questionnaire (VIMSSQ) von Keshavarz et al. (2019). Wie die beiden Namen schon vermuten lassen, werden diese jeweils zum Messen der Empfindlichkeit gegenüber allgemeiner Motion Sickness und visuell induzierter Motion Sickness verwendet.

Bei dem MSSQ bewertet der Proband, wie oft bei ihm in der Vergangenheit Motion Sickness in vorgegebenen Situationen aufgetreten ist. Ähnlich wie bei dem SSQ wird zur Bewertung der Situationen eine Skala zwischen 0 („Es ist noch nie Motion Sickness aufgetreten“) und 3 („Motion Sickness tritt regelmäßig auf“) verwendet, jedoch gibt es hier auch die Möglichkeit, dass der Proband die Situation noch nie erlebt hat und deswegen keine Aussage dazu treffen kann. Insgesamt werden in dem Fragebogen neun Situationen präsentiert. Diese Situationen sind beispielsweise „Im Auto“, „Auf einem kleinen Boot“ oder „Bei Nutzung einer Schaukel“. Zudem muss der Proband die Frequenz des Auftretens in den Situationen zu zwei verschiedenen Zeitperioden in seiner Vergangenheit bewerten: einmal als er ein Kind war und einmal als Bewertung hinsichtlich der letzten zehn Jahre. (Golding, 2006, S. 240). Das Hauptproblem dieses Fragebogens für die hier durchgeführte Studie ist, dass die aufgelisteten Situationen keinen Bezug zum VR-Bereich haben und sich stattdessen nur auf Situationen fokussieren, die mit traditioneller Motion Sickness assoziiert werden.

Das VIMSSQ basiert auf dem MSSQ, ist jedoch darauf ausgelegt, nur die Empfindlichkeit gegenüber visuell ausgelöster Motion Sickness zu evaluieren. (Keshavarz et al., 2019, S. 2267). Grundsätzlich ist der Ablauf der Bewertung dabei der gleiche wie bei dem MSSQ: Der Proband bewertet das Vorkommen von Motion Sickness in der Vergangenheit in bestimmten Situationen, jeweils auf einer Skala von 0 bis 3, wobei es auch sein kann, dass bestimmte Situationen noch nie erlebt wurden. Im Gegensatz zu dem MSSQ stellen die Situationen dabei aber hauptsächlich Situationen mit rein-visueller Stimulation dar. So bewertet der Teilnehmer hierbei etwa das Auftreten von Motion Sickness beim Anschauen von Filmen im 2D und 3D Kino oder während des Spielens von Videospiele auf einem herkömmlichen Monitor. Die Bewertungen werden dabei für jeweils fünf Unterkategorien von Symptomen durchgeführt (Übelkeit, Müdigkeit, Schwindel, Überanstrengung der Augen und Kopfschmerzen). (Keshavarz et al., 2019, S. 2268). Das VIMSSQ hat das genau gegenteilige Problem des MSSQs: es werden nur Situationen bewertet, die in der Vergangenheit VIMS ausgelöst haben und in der Regel keine Bewegung der betroffenen Person beinhalten.

Da die beiden Fragebögen nur traditionelle Motion Sickness oder VIMS bewerten, wurde basierend auf ihnen ein neuer Fragebogen erstellt, der die für diese Arbeit geeigneten Elemente der Beiden kombiniert. Der resultierende Fragebogen präsentiert den Probanden mit insgesamt 11 Situationen, die er anhand von fünf Symptomkategorien wie bei dem VIMSSQ bewerten muss. Die spezifischen Situationen und Symptomkategorien wurden dabei etwas angepasst und teilweise umformuliert. Beispielsweise wurden die Symptomkategorien des VIMSSQs mit den Symptomen Übelkeit, Kopfschmerzen, Überanstrengung der Augen, Gleichgewichtsstörung und Schwindelgefühl ersetzt. Zur Auswertung des Fragebogens wird die gleiche Formel wie bei dem VIMSSQ verwendet (siehe Keshavarz et al., 2019, S. 2268). Die verwendete Formel ist dabei die folgende:

$$E = \frac{N_S}{N_S - n_{n/a}} \times \sum_{i=1}^{N_S} S_i$$

Diese Formel gewichtet die Summe der abgegebenen Bewertungen in den Situationen (S_i) in Abhängigkeit von der Anzahl an Situationen (N_S) und der Anzahl an noch nie erlebten Situationen ($n_{n/a}$), um einen Wert für die Empfindlichkeit (E) zu erhalten. Mithilfe dieser Formel kann entweder ein einzelner Empfindlichkeits-Wert pro Symptomgruppe oder ein Gesamtwert für die Empfindlichkeit berechnet werden.

6.2 AUFBAU UND DESIGN

Beim Designen einer Studie zum Untersuchen spezifischer Aspekte von Motion Sickness können drei wesentliche Probleme auftreten, die während der Ausarbeitung des Studiendesigns beachtet werden müssen. Das erste Problem ist die Anpassung der Probanden an den provokativen Stimulus. Wie in Kapitel 4.1.1 beschrieben wurde, kann bei separaten Sitzungen des Nutzers ein Anpassungseffekt auftreten, der dafür sorgt, dass weniger Motion Sickness auftritt. Das kann die Ergebnisse von Studien, bei denen die Probanden in kurzer Zeit (z.B. direkt nacheinander oder über wenige Tage verteilt) mehrere Immersionen in die VR-Anwendung durchlaufen, verfälschen. Allgemein gibt es jedoch keinen Konsens dafür, wie lange zwischen den einzelnen Sitzungen gewartet werden sollte, um eine Anpassung zu verhindern. (Rebenitsch & Owen, 2014, S. 311). Manche Studien warten nur eine Handvoll an Tagen zwischen den Sitzungen (z.B. Reed-Jones et al., 2007, S. 536), obwohl beispielsweise Stanney und Kennedy (1997) eine Zeitspanne von maximal fünf Tagen als ideal für das Auftreten eines Anpassungseffekts ansehen (S. 68). Laut Howarth und Hodder (2008) weisen viele der veröffentlichten Forschungsarbeiten darauf hin, dass eine Zeitspanne von etwa einer Woche dafür sorgen kann, dass keine signifikante Anpassung an den provokativen Stimulus stattfindet (S. 117). Das zweite und dritte Problem sind zum einen die Abbruchrate der Probanden und zum anderen das Finden von Personen, die überhaupt an der Studie teilnehmen möchten. Diese beiden Probleme gehen Hand in Hand und sind auf die Tatsache zurückzuführen, dass solche Studien immer mit dem gezielten Auslösen von Krankheitssymptomen verbunden sind. Aufgrund dessen kann es schwer sein, Personen zu finden, die dazu bereit sind, sich mit Absicht provokativen Situationen auszusetzen. Auch Probanden die sich zu Beginn dafür bereit erklären, können ihre Meinung leicht ändern, sobald sie einem sehr provokativen Stimulus in der VR-Anwendung ausgesetzt wurden. Das führt dazu, dass sie unter Umständen die Sitzung abbrechen oder nicht bereit sind, für Folgesitzung zu erscheinen. Dadurch wird die Auswertung der erhaltenen Daten erschwert oder diese Daten komplett unbrauchbar gemacht. Besonders Übelkeit und die damit in Verbindung stehenden Symptome sind hierbei Auslöser für das frühzeitige Beenden einer Sitzung. (Balk et al., 2017, S. 263). Wie stark das Unwohlsein den Probanden beeinflusst, hängt natürlich

von dessen individuellen Fähigkeiten und den Eigenschaften der Anwendung ab, aber beispielsweise im Bereich der Fahrzeugsimulatoren kann die Abbruchrate laut Smyth et al. (2021) mehr als die Hälfte der Teilnehmer ausmachen, weshalb sie die Faustregel empfehlen, dass man eine Abbruchrate von ungefähr 25% in den Ablauf der Studie einplanen sollte. (Smyth et al., 2021, S. 8). Diese Faustregel lässt sich auch gut auf den allgemeinen VR-Bereich ausweiten, da dort regelmäßig ähnlich hohe Abbruchraten vorkommen (z.B. Keshavarz & Hecht, 2014, Saredakis et al., 2020, Stanney et al., 2003).

Die Studie dieser Arbeit wurde an der Hochschule Kempten¹⁴ durchgeführt und die Studienpopulation besteht daher aus Studenten der Hochschule, die sich im Alter zwischen 20 und 30 Jahren befinden. Aufgrund ihres Alters kann davon ausgegangen werden, dass sie gute Kenntnisse und Erfahrung mit elektronischen Medien (z.B. Smartphones und Computern) haben. Darauf basierend kann auch davon ausgegangen werden, dass sie Vorerfahrung mit interaktiven 3D-Anwendungen (z.B. Videospielen) haben und gegebenenfalls auch Vorkenntnisse im VR-Bereich besitzen.

Wie schon beschrieben, gibt es in dieser Studie zwei Ziele. Das Erste ist das Untersuchen davon, ob das Nutzen einer VR-Treadmill gegenüber normalen VR-Kontrollern dabei helfen kann, Motion Sickness zu vermeiden. Das zweite Ziel ist das Aufzeigen eines möglichen Zusammenhangs zwischen der Krankheitsstärke und der Empfindlichkeit gegenüber der Krankheit. Die Stärke der aufgetretenen Motion Sickness wird pro Probanden durch das SSQ gemessen und die Empfindlichkeit gegenüber der Krankheit wird anhand des erstellten Empfindlichkeits-Fragebogens evaluiert. Grundsätzlich wurde die Studie auf eine Teilnehmeranzahl zwischen 10 und 30 Probanden ausgelegt. Zur Vermeidung eines Anpassungseffekts wurde die Studie so konzipiert, dass die Probanden in zwei Gruppen eingeteilt werden können und dadurch die Anwendung nur ein einziges Mal durchlaufen müssen. Die beiden Gruppen verwenden jeweils eines der Eingabegeräte und werden daher mit *VR Treadmill* und *VR Kontroller* bezeichnet. Um die Ziele der Studie anhand dessen formal festzulegen, wurden die folgenden Nullhypothesen (H_0) und Alternativhypothesen (H_a) aufgestellt:

$H_{0,o}$: Es gibt keinen Unterschied in der gemessenen Stärke der aufgetretenen Motion Sickness zwischen den beiden Gruppen *VR Treadmill* und *VR Kontroller*.

$H_{a,o}$: Die gemessene Stärke der aufgetretenen Motion Sickness in der Gruppe *VR Treadmill* ist geringer als die der Gruppe *VR Kontroller*.

$H_{0,i}$: Es gibt keine Korrelation zwischen der Empfindlichkeit der Probanden gegenüber Motion Sickness und der gemessenen Stärke der aufgetretenen Motion Sickness.

$H_{a,i}$: Es gibt eine positive Korrelation zwischen der Empfindlichkeit der Probanden gegenüber Motion Sickness und der gemessenen Stärke der aufgetretenen Motion Sickness.

Da der Fokus der Studie auf den Effekten der Fortbewegung in der virtuellen Welt durch unterschiedliche Eingabegeräte liegt, wurden die drei Räume der Anwendung, die speziell auf das Testen von Locomotion ausgelegt sind (*Basic Locomotion*, *Rotating Platforms* und *Sphere Dodging*), für die Verwendung in der Studie ausgewählt. Dabei durchlaufen die Probanden der beiden Gruppen diese drei Räume jeweils mithilfe des

¹⁴ Hochschule für angewandte Wissenschaften Kempten - <https://www.hs-kempten.de>

zugeordneten Eingabegeräts. Um einen fairen Vergleich zwischen den beiden Eingabegeräten zu ermöglichen, wurden die Fortbewegung und die Effekte in der Anwendung passend eingestellt. Da bei Verwendung der Treadmill in der Regel alle Bewegungen selbst in der realen Welt initialisiert werden und keine visuellen Effekte zur Vermeidung von Motion Sickness (z.B. das Tunneling) nötig sind, wurde auch bei der Steuerung durch normale VR-Kontroller darauf verzichtet. Ein weiterer Grund keine der visuellen Methoden zu nutzen ist zudem, dass der Fokus der Studie alleinig auf der Fortbewegung durch die Eingabegeräte liegt und das Resultat des Vergleichs durch Nutzung der anderen Reduktionsmethoden in der Anwendung verfälscht werden könnte. Die drei verwendeten Räume benötigen nicht viel Zeit, um von den Probanden durchlaufen zu werden, weswegen die Probanden jeweils zwei Runden durch diese Räume vollziehen. In beiden Runden wird die Reihenfolge, in der die Räume dem Spieler präsentiert werden, durch Zufall entschieden. Für die Steuerung durch die Kontroller wird die Bewegungsart ohne Beschleunigung und die kontinuierliche Rotationsmethode verwendet, um einen fairen Vergleich mit der Treadmill zu ermöglichen. Zudem ist das Teleportieren während des Durchlaufens der Räume nicht erlaubt.

Bevor der Nutzer in die VR-Anwendung eintaucht, muss er zwei Fragebögen ausfüllen. Der Erste dient zur Erfassung von allgemeinen Daten, wie etwa dem Alter und Geschlecht des Probanden, aber enthält auch Fragen, die dafür gedacht sind, festzustellen, ob der Proband tatsächlich in die geplante Studienpopulation fällt (siehe Anhang 4). Der zweite Fragebogen ist ein SSQ das genutzt wird, um den Zustand des Probanden vor der Immersion in die Anwendung festzuhalten. Es gibt keine Garantie, dass die Probanden vollkommen gesund und in Topform sind, wenn sie an der Studie teilnehmen. Das Durchführen eines SSQs vor der Immersion kann daher helfen, potenzielle externe Effekte ausfindig zu machen und diese in die späteren Berechnungen einzubeziehen. Die hierbei verwendete Version des SSQs ist ins Deutsche übersetzt worden und zusätzlich wurden kurze Erklärungen für einige Symptome hinzugefügt (siehe Anhang 5). Nach Abschluss der beiden Runden durch die Räume, wird der Empfindlichkeits-Fragebogen (siehe Anhang 6) und ein zweites SSQ ausgefüllt, dass die aufgetretene Motion Sickness beim Durchlaufen der Anwendung bewertet. Da das SSQ jedoch nur die Krankheitsstärke nach dem Durchlaufen der Anwendung evaluiert, wird zusätzlich während der Immersion regelmäßig das aktuelle Unwohlsein des Probanden abgefragt, um den zeitlichen Verlauf der Krankheit und den Einfluss der einzelnen Räume festzuhalten. Dazu wird der Proband nach erfolgreichem Beenden jedes Raumes aufgefordert, seinen aktuellen Zustand auf einer Skala von 0 bis 10 zu bewerten. Ein Wert von 0 bedeutet dabei, dass es ihm einwandfrei geht und er keinerlei Unwohlsein empfindet. Ein Wert von 10 bedeutet hingegen, dass dem Probanden sehr übel ist und er das Durchlaufen der Anwendung abbrechen möchte. Zusätzlich wird auch die vergangene Zeit vom Start der ersten Runde bis zum Ende der zweiten Runde festgehalten und die Anzahl an *Respawns* (Situationen, in denen der Spieler zurückgesetzt wird, weil er an einem Hindernis gescheitert ist) vermerkt.

6.3 DURCHFÜHRUNG DER STUDIE

Das Durchführen der Studie hat über zwei Wochen verteilt an der Hochschule Kempten stattgefunden. Insgesamt haben in dieser Zeit zwölf Probanden an der Studie teilgenommen und die Anwendung durchlaufen. Nach dem Ausfüllen des allgemeinen Fragebogens und des ersten SSQs wurde ihnen eine kurze Einführung in die Anwendung und ihren Ablauf gegeben. Zu diesem Zeitpunkt wussten die Probanden noch nicht, was die genauen Ziele der Studie sind, jedoch wurden sie darüber informiert, dass es sehr wahrscheinlich ist, zumindest ein moderates Maß an Motion Sickness während des Durchlaufens der Anwendung zu erfahren und sie deshalb jeder

Zeit abrechnen können. Die Einteilung der Probanden in die beiden Gruppen ist anhand ihrer Reihenfolge durchgeführt worden. Der erste Teilnehmer wurde dabei der Gruppe *VR Treadmill* zugewiesen, der zweite Teilnehmer der Gruppe *VR Kontroller* und so weiter. Den Probanden der Treadmill-Gruppe wurde zudem eine kurze Demonstration des Virtualizers gegeben, die ihnen zeigt, wie man sich innerhalb der Treadmill bewegen muss, um den virtuellen Charakter zu steuern und einen sicheren Umgang zu gewährleisten.



ABBILDUNG 29 ZWEI STUDENTEN BEIM DURCHLAUFEN DER ANWENDUNG MITHILFE DES VIRTUALIZERS.

Da die Halterung des Virtualizers die Bewegungen der Person beschränkt und sie zudem indirekt stützt, was wiederum die Stabilität der Körperhaltung und damit unter Umständen Motion Sickness beeinflussen kann, wurden die Probanden der Kontroller-Gruppe auch darum gebeten, sich während des Durchlaufens der Anwendung in der Halterung des Virtualizers zu befinden. Den Probanden wurde vor Betreten des ersten Raumes etwas Zeit zur Verfügung gestellt, sich innerhalb des Menü-Raums an die Steuerung des virtuellen Charakters durch das jeweilige Eingabegerät zu gewöhnen. Die hierfür benötigte Zeit war den Probanden überlassen und wurde hauptsächlich von der Treadmill-Gruppe benötigt, da die Steuerung durch den VR-Kontroller bereits ein familiäres Konzept für die meisten Probanden dargestellt hat. Anschließend haben die Probanden die zwei Runden durch die drei festgelegten Räume vollzogen, wobei nach Vollendung jedes Raumes das aktuelle Unwohlsein abgefragt worden ist. Falls die Probanden dabei eine hohe Bewertung (7 - 10) abgegebenen haben, wurden sie gefragt, ob sie das Durchlaufen der Anwendung abbrechen möchten. Diese Situation kam nur bei zwei der zwölf Probanden vor und keiner der Beiden wollte deshalb die Anwendung verlassen. Nach den beiden Runden haben die Teilnehmer das VR-Headset abgesetzt, die Halterung der Treadmill verlassen und wurden im Anschluss darum gebeten, das zweite SSQ und den Empfindlichkeits-Fragebogen auszufüllen.

6.4 EVALUIERUNG DER ERGEBNISSE

Von den zwölf Probanden der Studie waren zehn Probanden männlich, eine Person weiblich und eine Person hatte ein diverses Geschlecht. Alle Probanden waren Bachelor- bzw. Masterstudenten der Hochschule Kempten oder ehemalige Studenten, die erst vor kurzer Zeit dort ihr Studium vollendet haben. Ihr Alter lag zwischen 20 und 27 Jahren, mit einem durchschnittlichen Alter von 24 Jahren ($SD = 2.59$). Der Großteil der Teilnehmer hat angegeben, im Durchschnitt mehr als 2 Stunden pro Tag in Videospiele zu investieren, wobei fünf Probanden zwischen 2 und 5 Stunden und vier Probanden mehr als 5 Stunden mit dieser Art von interaktivem Medium verbringen. Von den restlichen drei Personen verbringen zwei Probanden nur 1 bis 2 Stunden pro Tag mit Videospiele und der letzte Proband hat angegeben, mit diesen weniger als eine Stunde pro Tag zu verbringen. Die Vertrautheit mit interaktiven Medien hat sich auch bei der Vorerfahrung mit Virtual Reality gezeigt. Insgesamt hatten zehn der zwölf Probanden schon einmal ein VR-Headset verwendet, um eine interaktive VR-Anwendung zu nutzen, bevor sie an der Studie teilgenommen haben. Die meisten Probanden nutzen die Technologie laut ihren Angaben dennoch nur sehr unregelmäßig (50%) oder fast nie (30%). Nur 20% von ihnen haben angegeben, Virtual Reality regelmäßig bzw. alle paar Wochen mindestens einmal zu verwenden. Sieben der Teilnehmer besitzen selbst ein eigenes VR-Headset. Die ursprüngliche Oculus Rift ist hierbei mit drei Personen das verbreitetste Modell, gefolgt von der HTC Vive mit zwei Personen. Die anderen beiden Teilnehmer besitzen die Oculus Rift S und Oculus Quest 2. Trotz der hohen Anzahl an Teilnehmern, die Vorerfahrung mit Virtual Reality haben und selbst ein VR-Headset besitzen, hatten nur drei von ihnen vor der Studie schon einmal eine VR-Treadmill genutzt.

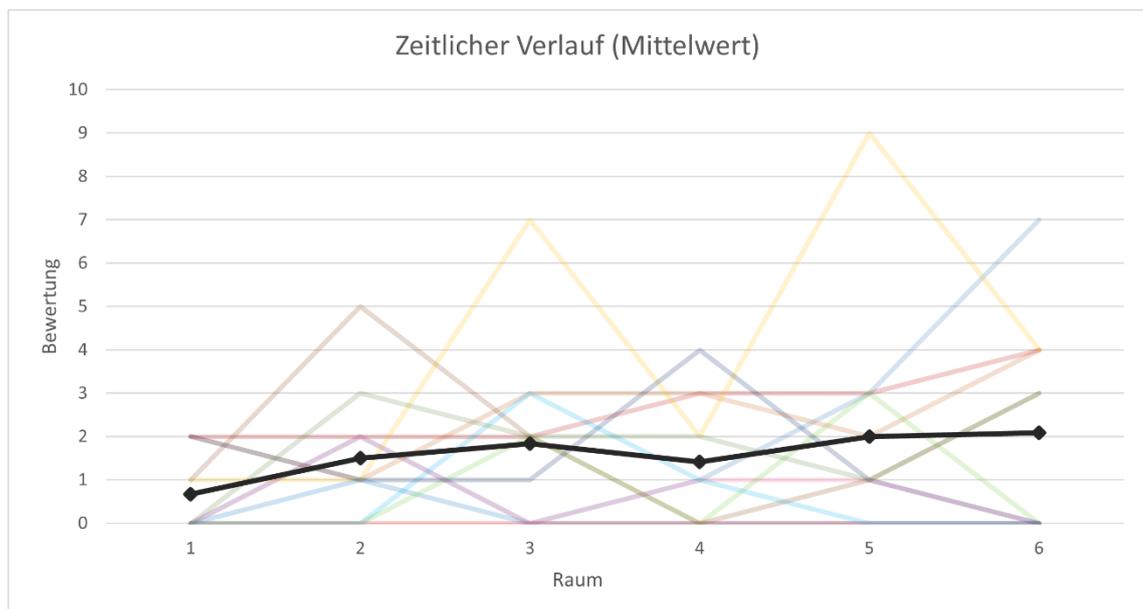


ABBILDUNG 30 ZEITLICHER VERLAUF DER DURCHSCHNITTlichen KRANKHEITSSTÄRKE ALLER BEWERTUNGEN (SCHWARZ) BEIM DURCHLAUFEN DER ANWENDUNG. IM HINTERGRUND SIND DIE BEWERTUNGEN DER EINZELNEN PROBANDEN ZU SEHEN.

Wie an dem zeitlichen Verlauf der Krankheitswerte während des Durchlaufens der Anwendung in Abbildung 30 zu erkennen ist, hat sich die Krankheit bei den Teilnehmern mit längerer Immersion immer weiter ausgeprägt. Der höchste Wert, der bei einem der Probanden aufgetreten ist, war 9. Die durchschnittlichen Werte der einzelnen Räume sind jedoch vergleichsweise gering, haben aber wie auch in Abbildung 30 zu sehen ist, teils merkbar variiert. Der Raum mit der höchsten Bewertung war der

Rotating Platforms-Raum mit einer durchschnittlichen Bewertung von 2.46 ($SD = 1.89$, $Min = 0$, $Max = 7$), gefolgt von dem *Basic Locomotion*-Raum mit 1.29 ($SD = 1.99$, $Min = 0$, $Max = 9$) und dem *Sphere Dodging*-Raum mit 1.00 ($SD = 1.35$, $Min = 0$, $Max = 4$). Zum Durchlaufen der Räume haben alle Teilnehmer zwischen 12:25 min und 20:21 min benötigt, mit einem Mittelwert von 15:08 min ($SD = 2:44$ min). Ein einzelner Proband hat es geschafft, alle Räume zu beenden, ohne dabei an einem Hindernis zu scheitern. Der Teilnehmer mit den meisten *Respawns* wurde hingegen dazu 16-mal zurückgesetzt. Im Durchschnitt gab es 6.83 *Respawns* bei jedem Probanden ($SD = 4.65$). Es ist hierbei auch interessant, die Werte für die einzelnen Gruppen zu betrachten. Die Controller-Gruppe hat im Durchschnitt nur 13:18 min benötigt, um alle sechs Räume zu durchlaufen ($SD = 0:42$ min, $Min = 12:25$ min, $Max = 14:16$ min). Die Probanden dieser Gruppe mussten zwischen 2- und 7-mal zurückgesetzt werden ($M = 4.5$, $SD = 1.87$). Dahingegen war der Mittelwert für die Länge der benötigten Zeit bei der Treadmill-Gruppe 16:58 min ($SD = 2:49$ min, $Min = 12:36$ min, $Max = 20:21$ min) und die Anzahl an *Respawns* lag zwischen 0 und 16 ($M = 9.17$, $SD = 5.56$).

Die Werte des ersten SSQs zeigen, dass viele der Probanden bereits vor der Immersion in die Anwendung milde Symptome aufgezeigt haben. Sieben der Teilnehmer hatten hier *Müdigkeit*, fünf Teilnehmer *Schweißausbrüche*, drei Teilnehmer *Überanstrengung der Augen* und zwei Teilnehmer *Konzentrationschwierigkeiten* mit einem Wert größer null bewertet. Des Weiteren traten auch einige andere Symptome vereinzelt auf, wie in Abbildung 31 zu sehen ist. Nach der Immersion hatte das zweite SSQ einen deutlichen Anstieg der Symptome von Motion Sickness bei fast allen Teilnehmern angezeigt. Lediglich bei zwei der Probanden haben sich keine Symptome aufgrund der Immersion in die virtuelle Welt entwickelt.

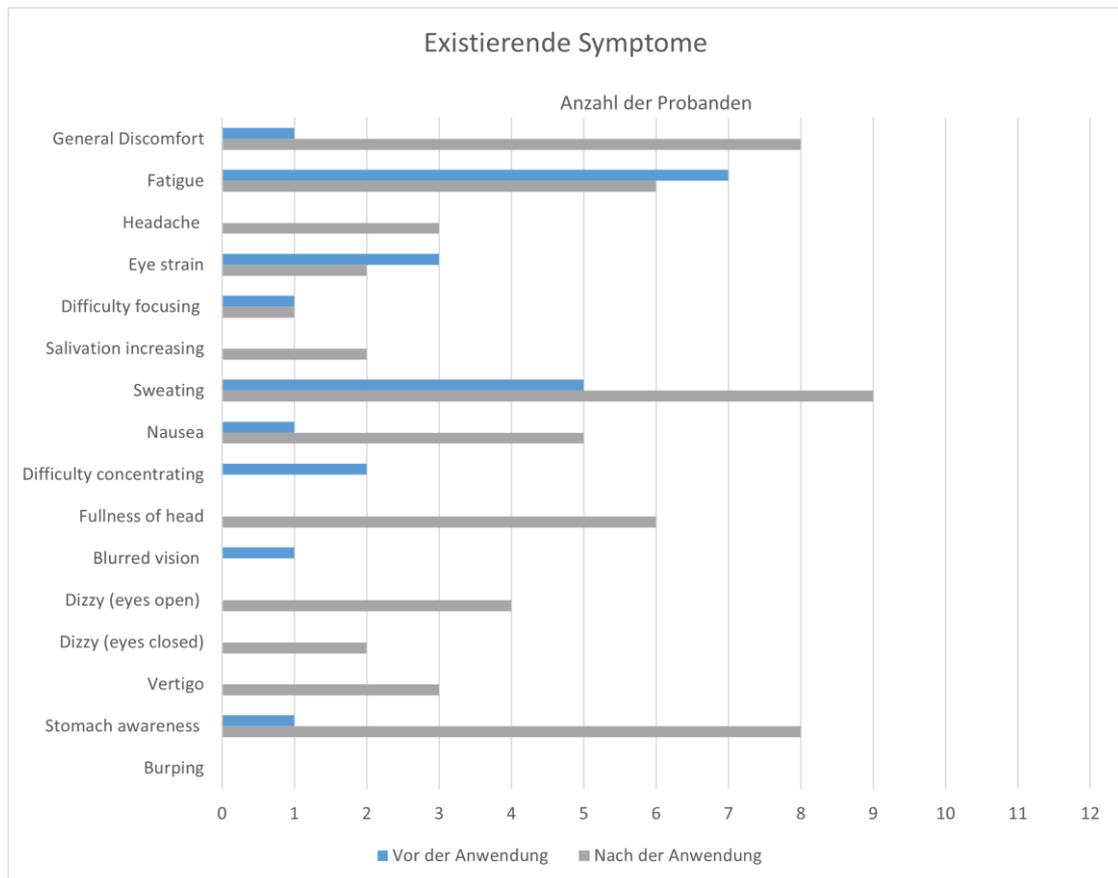


ABBILDUNG 31 ANZAHL DER EXISTIERENDEN SYMPTOME BEI DEN PROBANDEN JEWEILS VOR UND NACH DEM DURCHLAUFEN DER ANWENDUNG.

Um die Symptomwerte vor dem Durchlaufen der Anwendung in das Ergebnis mit einzubeziehen, werden diese von den Symptomwerten, die direkt nach der Immersion festgehalten wurden, abgezogen. Das Resultat ist die Differenz der Symptome vor und nach der Immersion. Diese korrigierten Werte stellen den Anstieg der Symptome aufgrund des Durchlaufens der VR-Anwendung dar und werden für die restliche Auswertung der Studie verwendet. Ein Vergleich zwischen den Mittelwerten aller Symptome für die beiden SSQs und der korrigierten Version kann in Anhang 3 gefunden werden. Die stärkste Ausprägung nach der Korrektur hatte das Symptom *Magenbewusstsein*, gefolgt von *Schweißausbrüche*, *Allgemeines Unwohlsein* und *Übelkeit*. Um den *Total Score* und die Werte für die drei unterschiedlichen Symptomkategorien zu berechnen, wurden die dafür von Kennedy et al. (1993) vorgesehenen Formeln verwendet. Der durchschnittliche Wert des *Total Scores* war hierbei 19.95 ($SD = 16.75$, $Min = 0.00$, $Max = 52.36$). Die Werte der *Nausea*-Symptomkategorie waren am höchsten ($M = 24.65$, $SD = 20.12$, $Min = 0.00$, $Max = 57.24$), knapp gefolgt von den Werten der *Disorientation*-Symptomkategorie ($M = 24.36$, $SD = 27.92$, $Min = 0.00$, $Max = 83.52$). Ausprägungen der Symptome in der Kategorie *Oculomotor* sind hingegen vergleichsweise niedrig ausgefallen ($M = 7.58$, $SD = 6.46$, $Min = 0.00$, $Max = 15.16$).

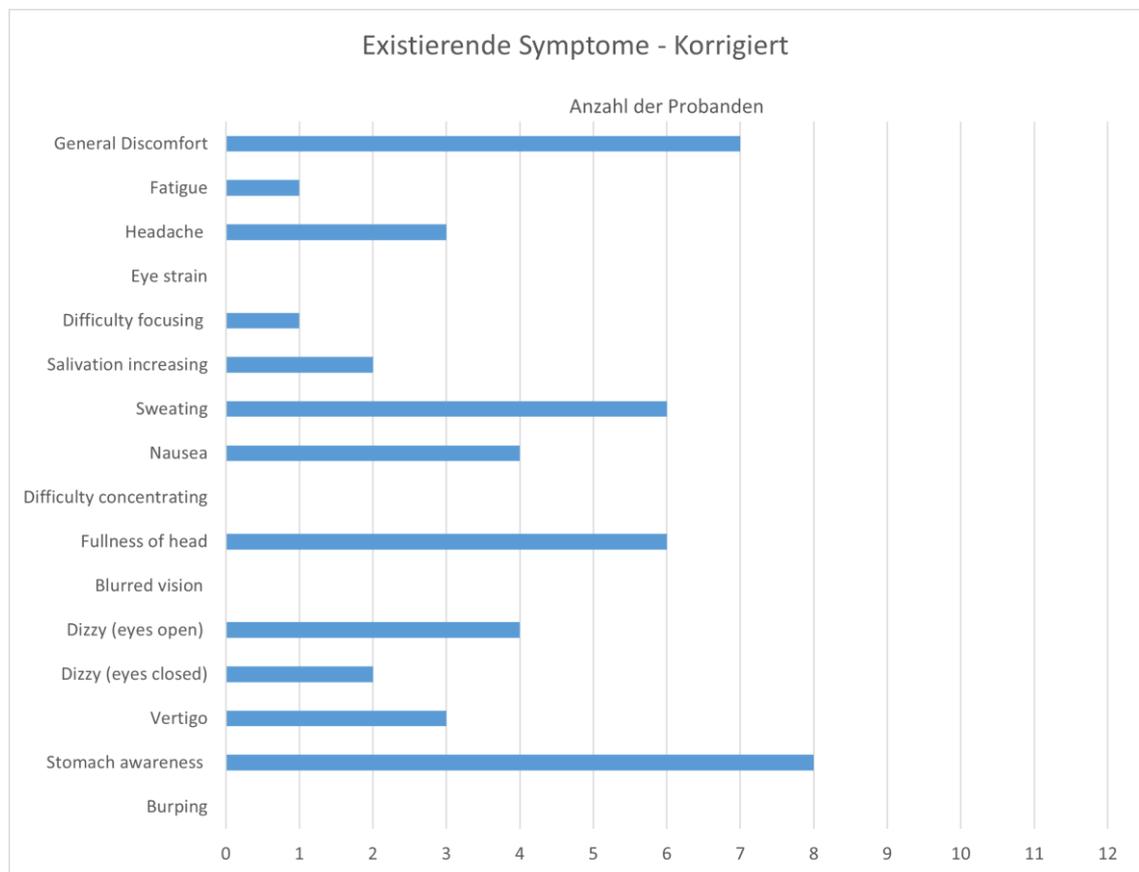


ABBILDUNG 32 ANZAHL DER EXISTIERENDEN SYMPTOME NACH DER KORREKTUR (SYMPTOME DIE DIREKT DER ANWENDUNG ZUGRUNDE LIEGEN).

Zum Vergleichen der beiden Gruppen müssen die korrigierten SSQs anhand dieser aufgeteilt werden. Durch diese Aufteilung kommt bei dem *Total Score* ein Mittelwert von 26.80 ($SD = 17.61$, $Min = 11.22$, $Max = 52.36$) für die Gruppe *VR Kontroller* und 13.09 ($SD = 13.94$, $Min = 0$, $Max = 33.66$) für die Gruppe *VR Treadmill* zustande. Bei der Kontroller-Gruppe ist die Verteilung der Symptomkategorien wie folgt: die Kategorie *Disorientation* hat den höchsten Wert ($M = 39.44$, $SD = 29.75$, $Min = 13.92$, $Max = 83.52$), gefolgt von *Nausea* ($M = 28.62$, $SD = 20.90$, $Min = 0.00$, $Max = 57.24$)

und *Oculomotor* ($M = 10.11$, $SD = 6.19$, $Min = 0.00$, $Max = 15.16$). Hingegen dazu ist die Verteilung bei der Treadmill-Gruppe etwas anders: *Nausea* hat hier den höchsten Wert ($M = 20.67$, $SD = 20.39$, $Min = 0.00$, $Max = 47.70$), gefolgt von *Disorientation* ($M = 9.28$, $SD = 16.86$, $Min = 0.00$, $Max = 41.76$) und *Oculomotor* ($M = 5.05$, $SD = 6.19$, $Min = 0.00$, $Max = 15.16$).

Die *Empfindlichkeits*-Werte der Probanden wurden nach der Formel in Kapitel 6.1.2 berechnet. Hierbei hat sich ein Mittelwert von 22.38 ($SD = 9.34$), mit einem Minimum von 2.2 und einem Maximum von 36.67 ergeben. Die Aufteilung anhand der beiden Gruppen ist zwar nicht direkt für die Ziele der Studie relevant, aber es ist dennoch interessant zu sehen, dass die Werte der Kontroller-Gruppe ($M = 22.02$, $SD = 6.74$, $Min = 9.90$, $Max = 28.00$) und der Treadmill-Gruppe ($M = 22.61$, $SD = 12.10$, $Min = 2.2$, $Max = 36.67$) relativ nahe beieinander liegen. Von den 11 aufgelisteten Situationen auf dem Empfindlichkeits-Fragebogen hat das Nutzen von Attraktionen in Freizeitparks oder Volkfesten zu den meisten Symptomen von Motion Sickness in der Vergangenheit der Probanden geführt. An zweiter Stelle war hier das Konsumieren von interaktiven Medien mithilfe von VR- oder AR-Headsets, gefolgt von dem Autofahren als Beifahrer und der Schifffahrt. Die Situationen, die am häufigsten noch nie von den Probanden erlebt wurden, sind das Konsumieren von Medien in Kopplung mit der Simulation von physischen Bewegungen (z.B. ein 4D-Kino) mit vier Probanden und das Fliegen in einem Flugzeug mit drei Probanden.

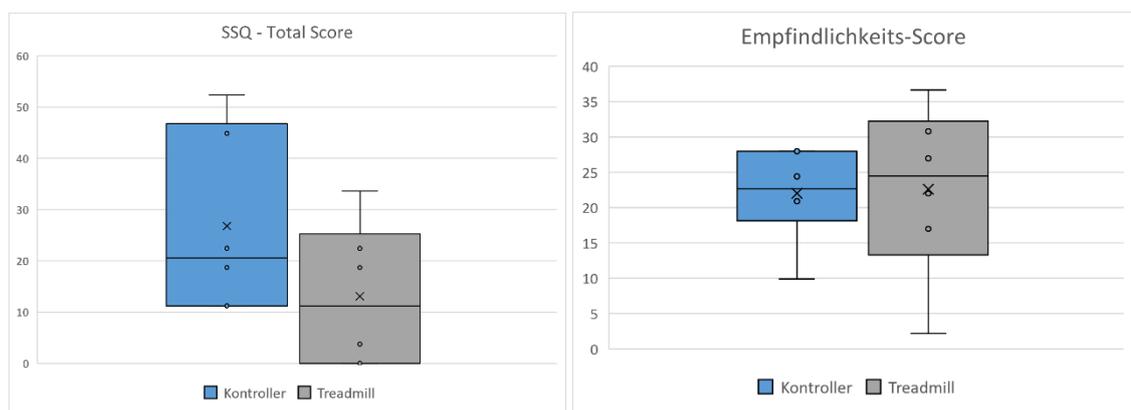


ABBILDUNG 33 VERGLEICHE ZWISCHEN DEN TOTAL SCORE-WERTEN UND DEN EMPFINDLICHKEITS-WERTEN DER BEIDEN GRUPPEN.

Das erste Ziel der Studie ist es, herauszufinden, ob das Nutzen einer Treadmill einen Vorteil hinsichtlich Motion Sickness gegenüber normalen VR-Kontrollern verschafft, also bei den Probanden in der Treadmill-Gruppe weniger Motion Sickness auftritt als bei den Probanden in der Kontroller-Gruppe. Um das zu verifizieren, wurde ein Zweistichproben-T-Test für unabhängige Stichproben auf die *Total Score*-Werte der beiden Gruppen angewendet. Da spezifisch danach gefragt war, ob das Nutzen der Treadmill weniger Motion Sickness verursacht, war der T-Test einseitig. Als Signifikanzniveau für den T-Test (und alle anderen verwendeten Tests der Studie) wurde hier $\alpha = 0.05$ genutzt. Um das korrekte statistische Verfahren zu wählen, ist auf Normalverteilung und gleiche Varianz bei den Werten der beiden Gruppen geprüft worden. Weder die Schiefe noch die Kurtosis haben darauf hingewiesen, dass die Werte der beiden Gruppen nicht normalverteilt sind. Zudem wurde jeweils ein Shapiro-Wilk-Test zum Prüfen der Normalverteilung durchgeführt. Dieser hat aber auch weder bei der Gruppe *VR Kontroller* ($W(6) = 0.85$, $p = .148$) noch bei der Gruppe *VR Treadmill* ($W(6) = 0.88$, $p = .273$) darauf hingewiesen, dass die Verteilung der Werte von der Normalverteilung abweicht. Für das Testen auf Gleichheit der Varianzen wurde ein Levene-Test verwendet. Dieser Test hat darauf hingewiesen, dass die Varianzen gleich sind ($F(1, 10) = 0.53$, $p = .483$). Aufgrund dieser Tests wurde davon ausgegangen, dass

die Werte der beiden Gruppen sowohl normalverteilt sind als auch annäherungsweise gleiche Varianzen besitzen. Folglich wurde ein Students-T-Test verwendet, um die Hypothese zu prüfen. Dieser T-Test hat keinen signifikanten Unterschied zwischen den beiden Gruppen feststellen können ($t(10) = 1.50, p = .083$). Folglich kann an dieser Stelle $H_{o,o}$ nicht widerlegt und damit $H_{a,o}$ nicht belegt werden.

Das gleiche Verfahren wurde zudem auch für die Werte der Symptomkategorien des SSQs durchgeführt. Für *Nausea* und *Oculomotor* wurde aufgrund des Shapiro-Wilk-Tests bei den Werten beider Gruppen eine Normalverteilung angenommen. Für die Kategorie *Disorientation* haben sowohl die Schiefe, Kurtosis und der Shapiro-Wilk-Test ($W(6) = 0.67, p = .003$) darauf hingedeutet, dass die Werte der Treadmill-Gruppe nicht normalverteilt sind. Die Varianzen aller drei Symptomkategorien wurden aufgrund des Levene-Tests als annähernd gleich betrachtet. Die genauen Werte für die einzelnen Shapiro-Wilk- und Levene-Tests für die Symptomkategorien sind in Anhang 1 zu finden. Für den Vergleich der Kategorien *Nausea* und *Oculomotor* wurde folglich auch ein Students-T-Test verwendet. Weder für *Nausea* ($t(10) = 0.67, p = .260$) noch *Oculomotor* ($t(10) = 1.41, p = .094$) konnte hier ein signifikanter Unterschied festgestellt werden. Aufgrund der nicht-normalverteilten Werte der *Disorientation*-Kategorie wurde zum Vergleich der Gruppen hier die Mann-Whitney Variante des T-Tests genutzt. Dabei konnte ein signifikanter Unterschied zwischen den beiden Gruppen festgestellt werden ($U = 31.00, p = .020$).

Das zweite Ziel der Studie ist das Feststellen eines möglichen Zusammenhangs zwischen der Stärke der Motion Sickness und der Empfindlichkeit der Probanden gegenüber der Krankheit. Aufgrund der Schiefe, Kurtosis und eines Shapiro-Wilk-Tests wird zwar sowohl bei den *Total Score*-Werten des SSQs ($W(12) = 0.93, p = .328$) als auch bei den *Empfindlichkeits*-Werten ($W(12) = 0.95, p = .603$) davon ausgegangen, dass diese normalverteilt sind, jedoch ist es mithilfe einer grafischen Darstellung durch die kleine Probandenzahl schwer zu entscheiden, ob die Werte eine lineare oder monotone Beziehung zueinander haben. Aus diesem Grund wird auf Korrelation mithilfe eines Spearman-Tests geprüft. Anhand dieses Tests konnte zwar eine positive Korrelation zwischen den Werten festgestellt werden, jedoch war diese nicht statistisch signifikant ($r_s(10) = 0.31, p = .328$). Dadurch kann also $H_{o,i}$ nicht zugunsten von $H_{a,i}$ abgelehnt werden.

7 DISKUSSION UND AUSBLICK

Bei der Durchführung der Studie war die Anwendung durchaus in der Lage, Ausprägungen von Motion Sickness bei den Probanden zu erzeugen. Alle Teilnehmer fielen in die geplante Studienpopulation. Die Probanden waren junge Erwachsene in ihren Zwanzigern, die fast alle einen bedeutenden Teil ihrer Freizeit mit interaktiven Medien verbringen. Beim Durchlaufen der Anwendung hat sich der kumulative Effekt der Krankheit, wenn auch nur leicht, erkennbar gemacht. Da die Räume in jeder der beiden Runden in zufälliger Reihenfolge durchlaufen wurden, ist dies also ein klares Indiz dafür, dass eine längere Zeit in der VR-Anwendung zu mehr Motion Sickness bei den Probanden geführt hat. Das der *Rotating Platforms*-Raum dabei das stärkste Unwohlsein hervorgerufen hatte, ist nicht überraschend, da in diesem direkte passive Drehbewegungen auf den Probanden einwirken. Das Unwohlsein im *Basic Locomotion*-Raum kann anhand der benötigten Kopfbewegungen zum Erfassen der schwingenden Pendel erklärt werden. Im *Sphere Dodging*-Raum mussten sich die Probanden beim Durchqueren des Raumes hingegen weniger stark umschauchen, weshalb dieser den geringsten Wert hatte. An der Zeitdauer für das Durchlaufen der sechs Räume und der Anzahl an *Respawns* kann abgelesen werden, dass die Treadmill das Steuern des virtuellen Charakters erschwert hat. Die Probanden der Kontroller-

Gruppe waren im Durchschnitt fast vier Minuten schneller als die Probanden der Treadmill-Gruppe und haben dabei nur ungefähr die Hälfte an *Respawns* benötigt. Ein gewisser Teil der längeren Zeitdauer kann durch die größere Anzahl an *Respawns* erklärt werden, da der Proband dadurch etwas zurückgesetzt wird. Ob damit aber der gesamte Zeitunterschied erklärt werden kann, ist fragwürdig. Während des Durchführens der Studie konnte beobachtet werden, dass einige Probanden der Treadmill-Gruppe Probleme mit der Gehbewegung innerhalb des Virtualizers hatten. Sie konnten zwar den virtuellen Charakter durch ihre echte Gehbewegung steuern, haben aber aufgrund ihrer Gangart immer wieder unbeabsichtigte Bewegungen in der Spielwelt ausgelöst oder es nicht geschafft, ihre echte Bewegung auf den Charakter zu übertragen. Da den Probanden zu Beginn der Anwendung beliebig viel Zeit gegeben wurde, um sich an die Steuerung zu gewöhnen und sie den ersten Raum erst betreten haben, sobald sie sich „bereit“ gefühlt hatten, kann dies unter Umständen auf die benötigte Gehbewegung innerhalb des Virtualizers zurückgeführt werden. Auch wenn zum Steuern des virtuellen Charakters durch die Treadmill eine relativ natürliche Gehbewegung genutzt wird, erfordert diese dennoch eine Anpassung von Seiten des Nutzers, die vielleicht nicht für alle Personen in kurzer Zeit einfach umsetzbar ist. Gegebenenfalls kann dieser Effekt vermieden werden, indem den Probanden eine längere Einweisung in die Handhabung des Virtualizers gegeben wird, beispielsweise in Form einer separaten Anwendung, in der sie sich mit dem Gerät über längere Zeit vertraut machen können.

Für die Stärke der aufgetretenen Motion Sickness konnte kein signifikanter Unterschied zwischen den beiden Gruppen festgestellt werden. Das heißt also, es konnte nicht gezeigt werden, dass das Nutzen einer modernen VR-Treadmill einen Vorteil hinsichtlich der Krankheitsstärke gegenüber herkömmlichen VR-Kontrollern hat. Auch bei den einzelnen Symptomkategorien gab es mit Ausnahme der Kategorie *Disorientation* keinen signifikanten Unterschied. An den Mittelwerten der einzelnen SSQ-Werte kann hingegen jedoch erkannt werden, dass die Nutzung der Treadmill einen, wenn auch nicht statistisch signifikanten, positiven Einfluss hatte. Der *Total Score* der Treadmill-Gruppe ist nur etwa die Hälfte des *Total Scores* der Kontroller-Gruppe. Ähnlich ist es auch bei den Mittelwerten der Symptomkategorien *Nausea* und *Oculomotor*, mit einem Unterschied von rund 30% bei *Nausea* und ungefähr 50% bei *Oculomotor*. Zwischen der Empfindlichkeit der Probanden hinsichtlich Motion Sickness und der gemessenen Stärke der Krankheit konnte bei den Teilnehmern der Studie in dieser Arbeit keine Korrelation nachgewiesen werden.

Grundsätzlich widerspricht das Resultat, dass das Nutzen der Treadmill nicht zu bedeutend weniger Motion Sickness bei den Probanden geführt hat, den theoretischen Vorteilen, die durch Verwendung einer Treadmill bei der Fortbewegung in VR-Anwendungen entstehen. Da der p-Wert des Students-T-Testes für die *Total Scores* der beiden Gruppen relativ nahe an der Signifikanzgrenze liegt und das Nutzen der Treadmill dennoch einen leichten, aber erkennbaren, positiven Effekt hatte, könnte das vielleicht darauf hindeuten, dass dieses Resultat aufgrund eines Problems mit dem Aufbau oder dem Design der Studie zustande gekommen ist. Zum einen ist hier natürlich die kleine Probandenzahl ein Faktor, aber auch die schon erwähnten Probleme mit der Kontrolle über den virtuellen Charakter bei Verwendung des Virtualizers könnten hier eine Rolle gespielt haben. Die unbeabsichtigten Bewegungen haben zum einen die Zeit innerhalb der Anwendung verlängert, aber könnten zum anderen auch direkt zu einer stärkeren Ausprägung der Krankheit führen.

Die Reihenfolge der Symptomkategorien des SSQs hatte bei den zwei Gruppen einen deutlichen Unterschied. Bei der Kontroller-Gruppe traten vor allem starke Symptome in Verbindung mit Orientierungslosigkeit auf ($D > N > O$), bei der Treadmill-Gruppe hingegen besonders Symptome im Zusammenhang mit Übelkeit ($N > D > O$). Ein Grund hierfür könnte eine Limitation des SSQs sein. Das SSQ wurde ursprünglich

mithilfe der Krankheitsausprägungen bei Piloten in Flugsimulatoren entwickelt. Die Nutzer von Flugsimulatoren müssen sich im Normalfall nicht sehr stark bewegen, weshalb es eine logische Annahme ist, dass beispielsweise das Symptom *Schweißausbrüche* des SSQs auf das Schwitzen durch Unwohlsein und die Krankheit selbst bezogen ist, nicht etwa auf das Schwitzen durch körperliche Anstrengung. Bei der Verwendung einer Treadmill muss sich der Nutzer mehr bewegen als bei der Nutzung von Controllern und hat daher eine grundsätzlich höhere körperliche Anstrengung, was wiederum bedeutet, dass er natürlicherweise mehr schwitzt. Anhand der korrigierten Werte des SSQs kann auch in der Studie gesehen werden, dass das Nutzen der Treadmill zu höheren Bewertungen des Symptoms *Schweißausbrüche* geführt hat ($M = 0.83$, $SD = 0.98$) als das Fortbewegen durch VR-Kontroller ($M = 0.50$, $SD = 0.55$). Da es schwer ist herauszufinden, welcher Anteil des Schwitzens der Krankheit selbst zuzuschreiben ist und welcher Anteil der körperlichen Anstrengung, könnte das bedeuten, dass das SSQ gegebenenfalls kein geeigneter Fragebogen für das Evaluieren von Motion Sickness bei VR-Treadmills ist.

Das Resultat, dass keine Korrelation zwischen der Empfindlichkeit und der Krankheitsstärke nachgewiesen werden konnte, steht im Widerspruch mit den Ergebnissen existierender Forschungsarbeiten in diesem Bereich. Sowohl in den Arbeiten von Rebenitsch und Owen (2014) als auch Stanney et al. (2003) wurde eine Korrelation zwischen der Empfindlichkeit gegenüber der Krankheit und der Krankheitsstärke gefunden. (Rebenitsch & Owen, 2014, S. 314, Stanney et al., 2003, S. 516f). Auch hier könnte die kleine Anzahl an Probanden ein Faktor gewesen sein, da die Studien in diesen beiden Forschungsarbeiten deutlich mehr Probanden hatten. Beispielsweise hatte die Studie von Stanney et al. (2003) etwas über 1100 Teilnehmer (S. 507). Die Studienpopulation bestand zusätzlich aus Studenten mit einem Durchschnittsalter von etwa 21 Jahren, war also in Hinsicht auf ihr Alter sehr ähnlich zu der Studienpopulation der Studie in dieser Arbeit. Ein weiterer möglicher Grund für den Unterschied könnte sein, dass die beiden Studien vor dem VR-Boom und zu Beginn dieses durchgeführt wurden. Deshalb kann es sein, dass die Teilnehmer dieser Studien, im Vergleich zu den Teilnehmern der Studie in dieser Arbeit, weniger Erfahrung mit VR-Anwendungen und interaktiven Medien in der Form von Videospiele hatten.

Da die geringe Anzahl an Probanden eine zentrale Limitation der Studie dargestellt hat, kann es durchaus sein, dass zukünftige Forschungsarbeiten in diesem Bereich einen signifikanten Unterschied und Korrelationen auffinden, falls sie eine größere Anzahl an Probanden besitzen. Die Weiterentwicklung und Etablierung von Messmethoden, die Motion Sickness objektiv erfassen können, kann hier auch dafür sorgen, dass die spezifischen Eigenschaften und Nachteile von subjektiven Fragebögen keinen direkten Einfluss auf das Resultat haben. Allgemein ist das objektive Messen von Motion Sickness auch interessant für die einzelnen Methoden zur Vermeidung der Krankheit. Viele dieser Methoden stellen einen Einflussfaktor für die gefühlte Immersion und Präsenz des Nutzers in der virtuellen Welt dar. Aufgrund dessen wäre es von Vorteil, sie nur dann zu nutzen, wenn sie auch wirklich benötigt werden. Aktuell werden solche Situationen hauptsächlich anhand der Bewegung des virtuellen Charakters evaluiert. Würden das verwendete VR-Headset oder andere externe Hardware über Sensoren verfügen, die Motion Sickness objektiv messen, könnten zum Festlegen dieser Situationen und der einzelnen Werte der Methoden (z.B. die Stärke der Sichtfeldreduktion) stattdessen die biologischen Anzeichen der Krankheit verwendet werden. Beispielsweise können verbaute Sensoren innerhalb einer VR-Treadmill oder einer kompakten Matte, auf der sich der Nutzer befindet, genutzt werden, um die Stabilität der Körperhaltung zu erfassen. Grundsätzlich könnten solche Sensoren auch verwendet werden, um die existierenden Methoden zur Vermeidung der Krankheit zu verbessern. Ein gutes Beispiel ist hier das Erfassen der Blickrichtung des Nutzers, auch Eye-Tracking genannt. Bei der Reduktion des Sichtfelds und anderen visuellen Effekten, die

von den Eigenschaften der Peripherie des Sichtfelds Gebrauch machen, kann Eye-Tracking genutzt werden, um die Effekte an die Blickrichtung anzupassen. Dadurch werden sie weniger bemerkbar für die betroffene Person und können, je nach Effekt, auch effektiver gegen die Symptome der Krankheit helfen. Eye-Tracking ist zudem eine Technologie, die man heutzutage in immer mehr kommerziell erhältlichen VR-Headsets auffindet, weil sie für das Optimieren der visuellen Darstellung der virtuellen Umgebung genutzt wird (z.B. in der Form von Foveated-Rendering). Das kann wiederum auch die Performanz der Anwendung erhöhen und dadurch zur Vermeidung von Motion Sickness beitragen.

8 ABBILDUNGSVERZEICHNIS

| | |
|---|----|
| ABBILDUNG 1 DIE VIRTUALIZER ELITE 2 TREADMILL VON CYBERITH. (EIGENE ABBILDUNG)..... | 7 |
| ABBILDUNG 2 DAS VERWENDETE VIVE PRO 2 HMD VON HTC. (EIGENE ABBILDUNG)..... | 8 |
| ABBILDUNG 3 DIE EINTEILUNG DER VERSCHIEDENEN MOTION SICKNESS-KATEGORIEN IN DIESER ARBEIT. (EIGENE ABBILDUNG)..... | 11 |
| ABBILDUNG 4 EIN KURZER ÜBERBLICK ÜBER DIE NUTZERABHÄNGIGEN FAKTOREN VON MOTION SICKNESS. (EIGENE ABBILDUNG)..... | 25 |
| ABBILDUNG 5 EIN KURZER ÜBERBLICK ÜBER DIE HARDWAREABHÄNGIGEN FAKTOREN VON MOTION SICKNESS. (EIGENE ABBILDUNG)..... | 28 |
| ABBILDUNG 6 EIN KURZER ÜBERBLICK ÜBER DIE SOFTWAREABHÄNGIGEN FAKTOREN VON MOTION SICKNESS. (EIGENE ABBILDUNG)..... | 32 |
| ABBILDUNG 7 DARSTELLUNG DER PROBLEMATISCHEN ZEITRÄUME (ROT) BEI DER LOCOMOTION MIT BESCHLEUNIGUNG. (EIGENE ABBILDUNG)..... | 39 |
| ABBILDUNG 8 VERANSCHAULICHUNG DER PERIPHERIE BEI DER BETRACHTUNG EINER VIRTUELLEN UMGEBUNG. DER RÖTLICHE BEREICH AUßERHALB DES KREISES STELLT DIE PERIPHERIE DES SICHTFELDS DAR. (EIGENE ABBILDUNG) | 39 |
| ABBILDUNG 9 VERANSCHAULICHUNG DES TUNNELEFFEKTS ZUR REDUKTION DER STIMULATION IN DER PERIPHERIE. (EIGENE ABBILDUNG)..... | 40 |
| ABBILDUNG 10 VERANSCHAULICHUNG DES UNSCHÄRFEFFEKTS ZUR REDUKTION DER STIMULATION IN DER PERIPHERIE. (EIGENE ABBILDUNG)..... | 41 |
| ABBILDUNG 11 VERGLEICH ZWISCHEN DEN UNANGEPASSTEN (LINKS) UND ANGEPASSTEN KOORDINATEN (RECHTS). DIE UNANGEPASSTEN KOORDINATEN FÜHREN DAZU, DASS DER KREIS WEDER ZENTRIERT NOCH AN DER GLEICHEN STELLE FÜR DIE BEIDEN AUGEN DES NUTZERS IST. (EIGENE ABBILDUNG)..... | 46 |
| ABBILDUNG 12 EIN KURZER AUSSCHNITT DES SHADER-CODES MIT EINIGEN KOMMENTAREN DIE DEN ABLAUF ERKLÄREN. (EIGENE ABBILDUNG)..... | 47 |
| ABBILDUNG 13 DAS TUNNELING IN DER ANWENDUNG. (EIGENE ABBILDUNG) | 48 |
| ABBILDUNG 14 DIE SEPARATE SZENERIE UND DER CAGING-EFFEKT INNERHALB DER ANWENDUNG. (EIGENE ABBILDUNG) ... | 49 |
| ABBILDUNG 15 DAS 3D-MODELL DES SCHUTZHELMES (LINKS) UND DIE ANSICHT DES NUTZERS, WÄHREND ER IHN TRÄGT (RECHTS). (EIGENE ABBILDUNG)..... | 50 |
| ABBILDUNG 16 ÜBERBLICK ÜBER DEN MENÜ-RAUM IN DEM SICH DER NUTZER ZU BEGINN DER ANWENDUNG BEFINDET. (EIGENE ABBILDUNG)..... | 53 |
| ABBILDUNG 17 DIE HINDERNISSE DES <i>BASIC LOCOMOTION</i> -RAUMES. IM LINKEN BILD SIND DIE PENDEL UND IM RECHTEN BILD DIE ROTIERENDE RÖHRE ZU SEHEN. (EIGENE ABBILDUNG)..... | 54 |
| ABBILDUNG 18 ÜBERBLICK ÜBER DEN <i>ROTATING PLATFORMS</i> -RAUM DER ANWENDUNG. DIE PLATTFORMEN BESITZEN HIER DIE TEXTURVARIANTE DIE DAS ERKENNEN DER GESCHWINDIGKEIT UND RICHTUNG ERMÖGLICHT. (EIGENE ABBILDUNG)..... | 55 |
| ABBILDUNG 19 ÜBERBLICK ÜBER DEN <i>SPHERE DODGING</i> -RAUM DER ANWENDUNG (LINKS) UND EINE AUFNAHME AUS DER SICHT DES SPIELERS (RECHTS). (EIGENE ABBILDUNG) | 56 |
| ABBILDUNG 20 IM LINKEN BILD IST DER <i>SHOOTING PLATFORM</i> -RAUM MIT DEM PFAD DER PLATTFORM ZU SEHEN. DAS RECHTE BILD ZEIGT DIE ANSICHT DES SPIELERS, WÄHREND ER DEN BOGEN AUF DER PLATTFORM NUTZT. (EIGENE ABBILDUNG)..... | 57 |
| ABBILDUNG 21 DAS LINKE BILD ZEIGT EINEN TEIL DER ACHTERBAHNSTRECKE IM <i>ROLLERCOASTER</i> -RAUM. IM RECHTEN BILD IST DIE ANSICHT DES NUTZERS WÄHREND DER ACHTERBAHNFAHRT ZU SEHEN. (EIGENE ABBILDUNG)..... | 58 |
| ABBILDUNG 22 DER RACETRACK-RAUM (LINKS) UND DIE ANSICHT DES SPIELERS BEIM STEuern DES FAHRZEUGS (RECHTS). (EIGENE ABBILDUNG)..... | 59 |
| ABBILDUNG 23 DIE BEIDEN BÜHNEN ZUM LOKALEN TESTEN DER EFFEKTE. (EIGENE ABBILDUNG)..... | 60 |
| ABBILDUNG 24 VISUALISIERUNG DER KOLLISIONSGEOMETRIE (ROT) DER BEIDEN UNTERSCHIEDLICHEN IMPLEMENTIERUNGEN DER TREPPE. (EIGENE ABBILDUNG) | 61 |
| ABBILDUNG 25 DIE PLATTFORM VON DER DER SPIELER HERUNTERFALLEN KANN. AUF DER LINKEN SEITE WIRD DAS FALLEN BESCHLEUNIGT, AUF DER RECHTEN SEITE HINGEGEN NICHT. (EIGENE ABBILDUNG) | 62 |
| ABBILDUNG 26 DAS KLETTERN AUF DIE PLATTFORM AUS SICHT DES SPIELERS. (EIGENE ABBILDUNG) | 63 |
| ABBILDUNG 27 DIE BEIDEN OBJEKTE ZUM VERANSCHAULICHEN VON VEKTION. (EIGENE ABBILDUNG) | 64 |
| ABBILDUNG 28 EIN ÜBERBLICK ÜBER ALLE BEREICHE DES RAUMES. (EIGENE ABBILDUNG)..... | 65 |
| ABBILDUNG 29 ZWEI STUDENTEN BEIM DURCHLAUFEN DER ANWENDUNG MITHILFE DES VIRTUALIZERS. (EIGENE ABBILDUNG)..... | 72 |

| | |
|--|----|
| ABBILDUNG 30 ZEITLICHER VERLAUF DER DURCHSCHNITTLICHEN KRANKHEITSTÄRKE ALLER BEWERTUNGEN (SCHWARZ) BEIM DURCHLAUFEN DER ANWENDUNG. IM HINTERGRUND SIND DIE BEWERTUNGEN DER EINZELNEN PROBANDEN ZU SEHEN. (EIGENE ABBILDUNG)..... | 73 |
| ABBILDUNG 31 ANZAHL DER EXISTIERENDEN SYMPTOME BEI DEN PROBANDEN JEWEILS VOR UND NACH DEM DURCHLAUFEN DER ANWENDUNG. (EIGENE ABBILDUNG) | 74 |
| ABBILDUNG 32 ANZAHL DER EXISTIERENDEN SYMPTOME NACH DER KORREKTUR (SYMPTOME DIE DIREKT DER ANWENDUNG ZUGRUNDE LIEGEN). (EIGENE ABBILDUNG) | 75 |
| ABBILDUNG 33 VERGLEICHE ZWISCHEN DEN TOTAL SCORE-WERTEN UND DEN EMPFINDLICHKEITS-WERTEN DER BEIDEN GRUPPEN. (EIGENE ABBILDUNG) | 76 |

9 LITERATURVERZEICHNIS

- Balk S., Bertola M. & Inman V. (2017). Simulator Sickness Questionnaire: Twenty Years Later. *Proceedings of the Seventh International Driving Symposium on Human Factors in Driver Assessment, Training and Vehicle Design*, pp. 257-263.
- Budhiraja P., Miller M., Modi A. & Forsyth D. (2017). Rotation Blurring: Use of Artificial Blurring to Reduce Cybersickness in Virtual Reality First Person Shooters.
- Burks N. (2018). Effects of HUD Presence on Cybersickness.
- Bimberg P., Weissker T. & Kulik A. (2020). On the Usage of the Simulator Sickness Questionnaire for Virtual Reality Research. *2020 IEEE Conference on Virtual Reality and 3D User Interfaces Abstracts and Workshops (VRW)*, pp. 464-467.
- Biocca F. (1992). Will Simulation Sickness Slow Down the Diffusion of Virtual Environment Technology?. *Presence: Teleoperators and Virtual Environments*, 1(3), pp. 334-343.
- Bonato F., Bubka A., Palmisano S., Phillip D. & Moreno G. (2008). Vection Change Exacerbates Simulator Sickness in Virtual Environments. *Presence*, 17, pp. 283-292.
- Bos J., Houben M. & Lindenberg J. (2012). Optimising human performance by reducing motion sickness and enhancing situation awareness with an artificial 3D Earth-fixed visual reference. *MAST Europe 2012*, pp. 1-10.
- Cao Z., Jerald J. & Kopper R. (2018). Visually-Induced Motion Sickness Reduction via Static and Dynamic Rest Frames. *2018 IEEE Conference on Virtual Reality and 3D User Interfaces (VR)*, pp. 105-112.
- Chattha U., Janjua U., Anwar F., Madni T., Cheema M. & Janjua S. (2020). Motion Sickness in Virtual Reality: An Empirical Evaluation. *IEEE Access*, 8, S. 130486-130499.
- Cobb S., Nichols S., Ramsey A. & Wilson J. (1999). Virtual Reality-Induced Symptoms and Effects (VRISE). *Presence: Teleoperators and Virtual Environments*, 8(2), pp. 169-186.
- Darken R., Cockayne W. & Carmein D. (1997). The Omni-Directional Treadmill: A Locomotion Device for Virtual Worlds. *Proceedings of UIST '97*, pp. 213-221.
- Davis S., Nesbitt K. & Nalivaiko E. (2015). Comparing the onset of cybersickness using the Oculus Rift and two virtual roller coasters. *Proceedings of the 11th Australasian Conference on Interactive Entertainment*, pp. 3-14.
- Dennison M. & Krum D. (2019). Unifying Research to Address Motion Sickness. *2019 IEEE Conference on Virtual Reality and 3D User Interfaces (VR)*, pp. 1858-1859.
- Descheneaux C., Reinerman-Jones L., Moss J., Krum D., Hudson I., Chen J. & Fragomeni G. (2020). Negative Effects Associated with HMDs in Augmented and Virtual Reality. In: *Virtual, Augmented and Mixed Reality. Design and Interaction*, pp. 410-428. Cham: Springer International Publishing.
- Dobie, T. (2019). *Motion Sickness. A Motion Adaptation Syndrome*. Cham: Springer International Publishing.

- Dong X., Yoshida K. & Stoffregen T. (2011). Control of a virtual vehicle influences postural activity and motion sickness. *Journal of Experimental Psychology: Applied*, 17(2), pp. 128–138.
- Dorado J. & Figueroa P. (2014). Ramps are better than stairs to reduce cybersickness in applications based on a HMD and a Gamepad. *2014 IEEE Symposium on 3D User Interfaces (3DUI)*, pp. 47-50.
- Emmerik M., De Vries S. & Bos J. (2011). Internal and external fields of view affect cybersickness. *Displays*, 32, pp. 169-174.
- Fernandes A. & Feiner S. (2016). Combating VR sickness through subtle dynamic field-of-view modification. *2016 IEEE Symposium on 3D User Interfaces (3DUI)*, pp. 201-210.
- Farmani Y. & Teather R. (2018). Viewpoint Snapping to Reduce Cybersickness in Virtual Reality. *Proceedings of the 44th Graphics Interface Conference*, pp. 145-152.
- Farmani Y. & Teather R. (2020). Evaluating discrete viewpoint control to reduce cybersickness in virtual reality. *Virtual Reality*, 24(4), pp. 645-664.
- Frissen I., Campos J., Sreenivasa M. & Ernst M. (2013). Enabling Unconstrained Omnidirectional Walking Through Virtual Environments: An Overview of the CyberWalk Project. In: *Human Walking in Virtual Environments: Perception, Technology, and Applications*, pp. 113-144. Heidelberg: Springer Verlag.
- Gavvani A., Walker F., Hodgson D. & Nalivaiko E. (2018). A comparative study of cybersickness during exposure to virtual reality and “classic” motion sickness: are they different?. *Journal of Applied Physiology*, 125(6), pp. 1670-1680.
- Gemert T. & Bergstrom J. (2021). Evaluating VR Sickness in VR Locomotion Techniques. *2021 IEEE Conference on Virtual Reality and 3D User Interfaces Abstracts and Workshops (VRW)*, pp. 380-382.
- Golding J. (2006). Predicting individual differences in motion sickness susceptibility by questionnaire. *Personality and Individual Differences*, 41(2), pp. 237–248.
- Golding J. (2016). Motion sickness. In: *Handbook of Clinical Neurology*, pp. 371-390. Amsterdam: Elsevier.
- Graybiel A. (1988). Motion Sickness. In: *Sensory Systems: II. Readings from the Encyclopedia of Neuroscience*, pp. 44-47. Boston: Birkhäuser.
- Groth C., Tauscher J., Heesen N., Castillo S. & Magnor M. (2021). Visual Techniques to Reduce Cybersickness in Virtual Reality. *2021 IEEE Conference on Virtual Reality and 3D User Interfaces Abstracts and Workshops (VRW)*, pp. 486-487.
- Guedry F. (1991). Factors Influencing Susceptibility: Individual Differences and Human Factors. In: *AGARD Lecture Series 175 Motion sickness. Significance in aerospace operations and prophylaxis*, Article 5.
- Hettinger L., Berbaum K., Kennedy R., Dunlap W. & Nolan M. (1990). Vection and simulator sickness. *Military Psychology: The Official Journal of the Division of Military Psychology*, 2(3), pp. 171-180.
- Hettinger L. & Riccio G. (1992). Visually Induced Motion Sickness in Virtual Environments. *Presence: Teleoperators and Virtual Environments*, 1(3), pp. 306-310.

- Howarth P. & Hodder S. (2008). Characteristics of habituation to motion in a virtual environment. *Displays*, 29(2), pp. 117-123.
- Jaeger B. & Mourant R. (2001). Comparison of Simulator Sickness Using Static and Dynamic Walking Simulators. *Proceedings of the Human Factors and Ergonomics Society Annual Meeting*, 45(27), pp. 1896-1900.
- Jung S., Oh S. & Whangbo T. (2017). 360° Stereo image based VR motion sickness testing system. *2017 International Conference on Emerging Trends Innovation in ICT (ICEI)*, pp. 150-153.
- Kao G., Hong J., Perusse M. & Sheng W. (2020). The Rise and Fall of Virtual Reality. In: *Turning Silicon into Gold*, pp. 133-139. Berkeley: Apress.
- Kennedy R., Berbaum K., Lilienthal M., Dunlap W. & Mulligan B. (1987). Guidelines for Alleviation of Simulator Sickness Symptomatology.
- Kennedy R., Lane N., Lilienthal M., Berbaum K. & Hettinger L. (1992). Profile Analysis of Simulator Sickness Symptoms: Application to Virtual Environment Systems. *Presence: Teleoperators and Virtual Environments*, 1(3), pp. 295-301.
- Kennedy R., Lane N., Lilienthal M. & Berbaum L. (1993). Simulator Sickness Questionnaire: An Enhanced Method for Quantifying Simulator Sickness. *The International Journal of Aviation Psychology*, 3(3), pp. 203-220.
- Kennedy R. S., Drexler J. & Kennedy R. C. (2010). Research in visually induced motion sickness. *Applied Ergonomics*, 41(4), pp. 494-503.
- Kemeny A., Reymond G. & Dagdelen M. (2002). Analysis of the visual compensation in the renault driving simulator. *DSC2002*, pp. 109-119.
- Kemeny A. (2014). From driving simulation to virtual reality. *Proceedings of the 2014 Virtual Reality International Conference*, pp. 1-5.
- Kemeny A., Chardonnet J. & Colombet F. (2020). *Getting Rid of Cybersickness. In Virtual Reality, Augmented Reality, and Simulators*. Cham: Springer International Publishing.
- Keshavarz B. & Hecht H. (2014). Pleasant music as a countermeasure against visually induced motion sickness. *Applied Ergonomics*, 45(3), pp. 521-527.
- Keshavarz B., Hettinger L. Kennedy R. & Campos J. (2014). Demonstrating the Potential for Dynamic Auditory Stimulation to Contribute to Motion Sickness. *PLOS ONE*, 9(7), e101016, pp. 1-9.
- Keshavarz B., Riecke B., Hettinger L. & Campos J. (2015). Vection and visually induced motion sickness: how are they related?. *Frontiers in Psychology*, 6, Article 472.
- Keshavarz B., Saryazdi R., Campos J. & Golding J. (2019). Introducing the VIMSSQ: Measuring susceptibility to visually induced motion sickness. *Proceedings of the Human Factors and Ergonomics Society Annual Meeting*, 63(1), pp. 2267-2271.
- Kim H., Park J., Choi Y. & Choe M. (2018). Virtual reality sickness questionnaire (VRSQ): Motion sickness measurement index in a virtual reality environment. *Applied Ergonomics*, 69, pp. 66-73.
- Kolasinski E. (1995). Simulator Sickness in Virtual Environments (Technical Report 1027). U.S. Army Research Institute for the Behavioral and Social Sciences.

- Kovalev A., Klimova O., Klimova M. & Drozhdev A. (2020). The effects of optokinetic nystagmus on vection and simulator sickness. *Procedia Computer Science*, 176, pp. 2832-2839.
- Kwok K., Ng A. & Lau H. (2018). Effect of Navigation Speed and VR Devices on Cybersickness. *2018 IEEE International Symposium on Mixed and Augmented Reality Adjunct (ISMAR-Adjunct)*, pp. 91-92.
- LaViola J. (2000). A discussion of cybersickness in virtual environments. *ACM SIGCHI Bulletin*, 31(1), pp. 47-56.
- Lim K., Lee J., Won K., Kala N. & Lee T. (2021). A novel method for VR sickness reduction based on dynamic field of view processing. *Virtual Reality*, 25(2), pp. 331-340.
- Lin J., Duh H., Parker D., Abi-Rached H. & Furness T. (2002). Effects of field of view on presence, enjoyment, memory, and simulator sickness in a virtual environment. *Proceedings of the IEEE Virtual Reality 2002 (VR'02)*, S. 164-171.
- Liu S., Yu M., Chan L., Peng Y., Sun W. & Chen M. (2019). PhantomLegs: Reducing Virtual Reality Sickness Using Head-Worn Haptic Devices. *2019 IEEE Conference on Virtual Reality and 3D User Interfaces (VR)*, pp. 817-826.
- Lou R. & Chardonnet J. (2019). Reducing Cybersickness by Geometry Deformation. *2019 IEEE Conference on Virtual Reality and 3D User Interfaces (VR)*, pp. 1058-1059.
- McCauley M. & Sharkey T. (1992). Cybersickness: Perception of Self-Motion in Virtual Environment. *Presence*, 1, pp. 311-318.
- Monteiro D., Liang H., Wang J., Chen H. & Baghaei N. (2020). An In-Depth Exploration of the Effect of 2D/3D Views and Controller Types on First Person Shooter Games in Virtual Reality. *2020 IEEE International Symposium on Mixed and Augmented Reality (ISMAR)*, pp. 713-724.
- Munafo J., Diedrick M. & Stoffregen T. (2017). The Virtual Reality Head-Mounted Display Oculus Rift Induces Motion Sickness and Is Sexist in Its Effects. *Experimental Brain Research*, 235(3), pp. 889-901.
- Nesbitt K. & Nalivaiko E. (2018). Cybersickness. In: *Encyclopedia of Computer Graphics and Games*, pp. 1-6. Cham: Springer International Publishing.
- Oculus VR, LLC. (2017). *Oculus Best Practices Version 310-30000-02*.
- Oman C. (1990). Motion sickness: a synthesis and evaluation of the sensory conflict theory. *Canadian Journal of Physiology and Pharmacology*, 68(2), pp. 294-303.
- Palmisano S. & Constable R. (2022). Reductions in sickness with repeated exposure to HMD-based virtual reality appear to be game-specific.
- Prothero J. (1998). The Role of Rest Frames in Vection, Presence and Motion.
- Prothero J. & Parker D. (2003). A unified approach to presence and motion sickness. In: *Virtual and adaptive environments: Applications, implications, and human performance issues*, pp. 47-66. Mahwah: Lawrence Erlbaum Associates Publishers.
- Reason J. & Brand J. (1975). *Motion Sickness*. London: Academic Press.
- Reason J. (1978). Motion sickness adaptation: a neural mismatch model. *Journal of the Royal Society of Medicine*, 71(11), pp. 819-829.

- Rebenitsch L. & Owen C. (2014). Individual variation in susceptibility to cybersickness. *Proceedings of the 27th annual ACM symposium on User interface software and technology*, pp. 309-317.
- Rebenitsch L. & Owen C. (2016). Review on cybersickness in applications and visual displays. *Virtual Reality*, 20(2), pp. 101-125.
- Reed-Jones R., Reed-Jones J., Trick L. & Vallis L. (2007). Can Galvanic Vestibular Stimulation Reduce Simulator Adaptation Syndrome?. *Proceedings of the 4th International Driving Symposium on Human Factors in Driver Assessment, Training, and Vehicle*, pp. 534-540.
- Regan C. (1995). An investigation into nausea and other side-effects of head-coupled immersive virtual reality. *Virtual Reality*, 1(1), pp. 17-31.
- Riccio G. & Stoffregen T. (1991). An ecological Theory of Motion Sickness and Postural Instability. *Ecological Psychology*, 3(3), pp. 195-240.
- Risi D. & Palmisano S. (2019). Effects of postural stability, active control, exposure duration and repeated exposures on HMD induced cybersickness. *Displays*, 60, pp. 9-17.
- Rolnick A. & Lubow R. (1991). Why is the driver rarely motion sick? The role of controllability in motion sickness. *Ergonomics*, 34(7), pp. 867-879.
- Saredakis D., Szpak A., Birkhead B., Keage H., Rizzo A. & Loatscher T. (2020). Factors Associated With Virtual Reality Sickness in Head-Mounted Displays: A Systematic Review and Meta-Analysis. *Frontiers in Human Neuroscience*, 14, Article 96.
- Sharples S., Cobb S., Moody A. & Wilson J. (2008). Virtual reality induced symptoms and effects (VRISE): Comparison of head mounted display (HMD), desktop and projection display systems. *Displays*, 29(2), pp. 58-69.
- Shibata T., Kim J., Hoffman D. & Banks M. (2011). Visual discomfort with stereo displays: Effects of viewing distance and direction of vergence-accommodation conflict. *Proceedings of SPIE*, 7863, pp. 1-9.
- Smyth J., Jennings P., Bennett P. & Birrell S. (2021). A novel method for reducing motion sickness susceptibility through training visuospatial ability – A two-part study. *Applied Ergonomics*, 90, 103264.
- So R., Lo W. & Ho A. (2001). Effects of Navigation Speed on Motion Sickness Caused by an Immersive Virtual Environment. *Human Factors*, 43(3), pp. 452-461.
- Soek K., Kim Y., Son W. & Kim Y. S. (2021). Using Visual Guides to Reduce Virtual Reality Sickness in First-Person Shooter Games: Correlation Analysis. *JMIR Serious Games*, 9(3), e18020, pp. 1-9.
- Stanney K. & Kennedy R. (1997). The psychometrics of cybersickness. *Communications of the ACM*, 40(8), pp. 66-68.
- Stanney K., Kennedy R. & Drexler J. (1997). Cybersickness is Not Simulator Sickness. *Proceedings of the Human Factors and Ergonomics Society Annual Meeting*, 41(2), pp. 1138-1142.
- Stanney K., Hale K., Nahmens I. & Kennedy R. (2003). What to expect from immersive virtual environment exposure: influences of gender, body mass index, and past experience. *Human Factors*, 45(3), pp. 504-520.

- Tal D., Gonen A., Wiener G., Bar R., Gil A., Nachum Z. & Shupak A. (2012). Artificial Horizon Effects on Motion Sickness and Performance. *Otology & Neurotology*, 33(5), pp. 878–885.
- Treisman M. (1977). Motion sickness: an evolutionary hypothesis. *Science*, 197(4302), pp. 493-495.
- Trutoiu L., Mohler B., Schulte-Pelkum J. & Bühlhoff H. (2009). Circular, linear, and curvilinear vection in a large-screen virtual environment with floor projection. *Computers & Graphics*, 33(1), pp. 47-58.
- Unity Technologies (2021). (last accessed on 21.08.2022). *Unity3D*. (<https://docs.unity3d.com/2018.4/Documentation/Manual/VROverview.html>)
- Wang J., Shi R., Xiao Z., Qin X. & Liang H. (2022). Effect of Render Resolution on Gameplay Experience, Performance, and Simulator Sickness in Virtual Reality Games. *Proceedings of the ACM on Computer Graphics and Interactive Techniques*, 5, pp. 1-15.
- Webb N. & Griffin M. (2003). Eye movement, vection, and motion sickness with foveal and peripheral vision. *Aviation Space and Environmental Medicine*, 74, pp. 622-625.
- Weißker T., Kunert A., Fröhlich B. & Kulik A. (2018). Spatial Updating and Simulator Sickness During Steering and Jumping in Immersive Virtual Environments. *2018 IEEE Conference on Virtual Reality and 3D User Interfaces (VR)*, pp. 97-104.
- Whittinghill D., Ziegler B., Case T. & Moore B. (2015). (last accessed on 21.08.2022). Nasum virtualis: A simple technique for reducing simulator sickness. *GDCVault*, (<https://www.gdcvault.com/play/1022287/Technical-Artist-Bootcamp-Nasum-Virtualis>).
- Zaidi S. & Male T. (2018). Experimenting novel virtual-reality immersion strategy to alleviate cybersickness. *Proceedings of the 24th ACM Symposium on Virtual Reality Software and Technology*, pp. 1-2.
- Zhang Q., Yamamura H., Baldauf H., Zhang D., Chen K., Yamaoka J. & Kunze K. (2021). Tunnel Vision – Dynamic Peripheral Vision Blocking Glasses for Reducing Motion Sickness Symptoms. *ISWC '21: 2021 International Symposium on Wearable Computers*, pp. 48-52.
- Zhao J., Allison R., Vinnikov M. & Jennings S. (2017). Estimating the motion-to-photon latency in head mounted displays. *2017 IEEE Virtual Reality (VR)*, pp. 313-314.

10 ANHANG

| | |
|---|----|
| ANHANG 1 ZUSAMMENFASSUNG DER HYPOTHESENTESTS FÜR DEN VERGLEICH DER KRANKHEITSSTÄRKE DER BEIDEN GRUPPEN. (EIGENE ABBILDUNG) | 90 |
| ANHANG 2 ZUSAMMENFASSUNG DER HYPOTHESENTESTS FÜR DIE KORRELATION ZWISCHEN KRANKHEITSSTÄRKE UND EMPFINDLICHKEIT. (EIGENE ABBILDUNG) | 91 |
| ANHANG 3 ÜBERBLICK ÜBER DIE MITTELWERTE DER SYMPTOMSTÄRKE FÜR DIE BEIDEN SSQS UND NACH DER KORREKTUR. (EIGENE ABBILDUNG) | 92 |
| ANHANG 4 ALLGEMEINER FRAGEBOGEN. (EIGENE ABBILDUNG) ¹⁵ | 93 |
| ANHANG 5 SIMULATOR SICKNESS QUESTIONNAIRE. (EIGENE ABBILDUNG) ¹⁵ | 94 |
| ANHANG 6 EMPFINDLICHKEITS-FRAGEBOGEN. (EIGENE ABBILDUNG) ¹⁵ | 96 |

¹⁵ Bei der Durchführung der Studie haben die Probanden die drei unterschiedlichen Fragebögen mithilfe von Google Forms ausgefüllt. Dafür wurde jedoch der gleiche Aufbau und die gleichen Fragen wie bei den Fragebögen im Anhang verwendet.

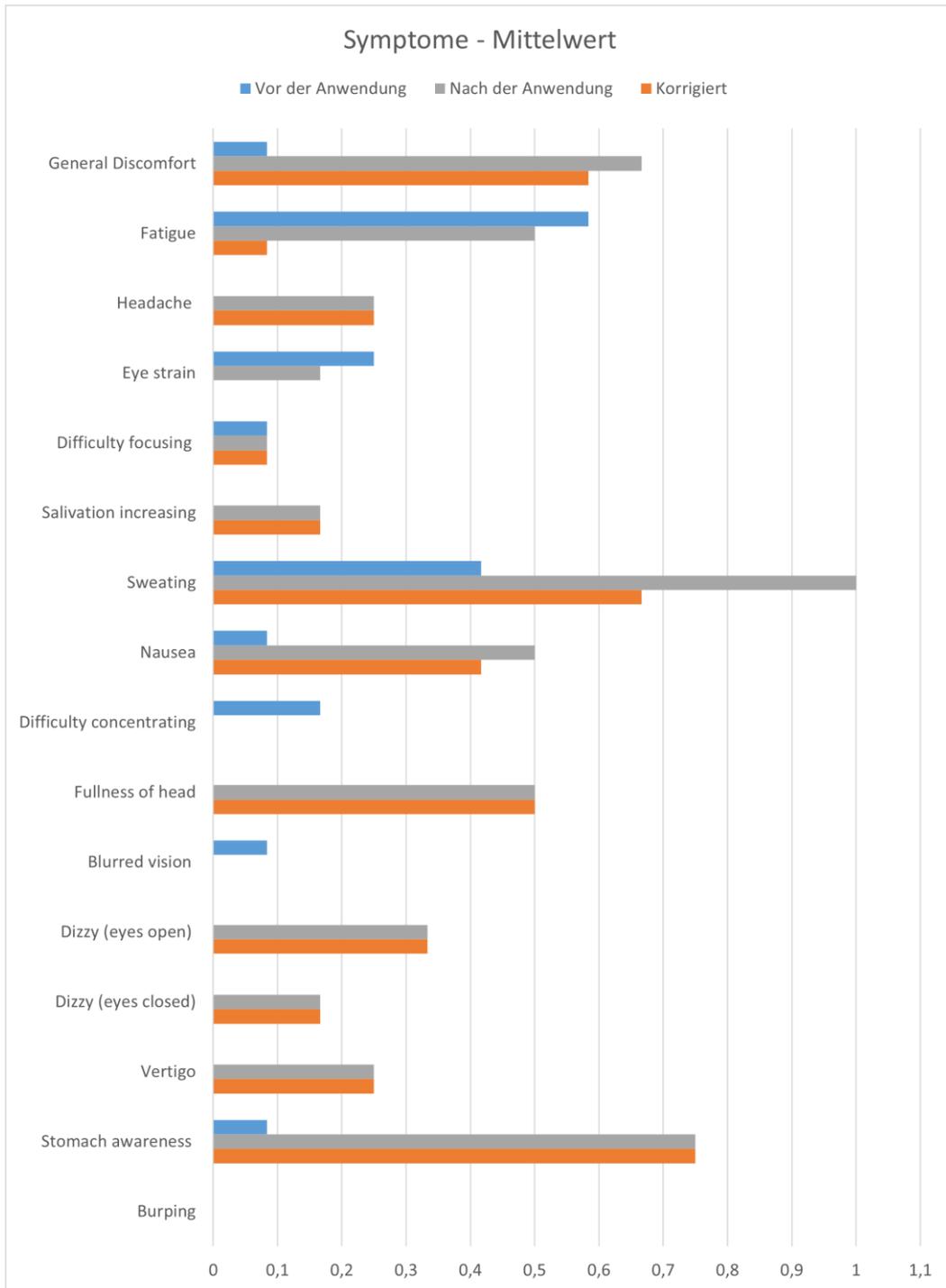
ANHANG 1 ZUSAMMENFASSUNG DER HYPOTHESENTESTS FÜR DEN VERGLEICH DER KRANKHEITSTÄRKE DER BEIDEN GRUPPEN.

| Controller vs. Treadmill - SSQ Scores | | | | | | | | | | | |
|---|------------|-----------|------------|-----------|------------|----------------|------------|-----------|--------------------|-----------|--|
| SSQ-Total | | | SSQ-Nausea | | | SSQ-Oculomotor | | | SSQ-Disorientation | | |
| | Controller | Treadmill | Controller | Treadmill | Controller | Treadmill | Controller | Treadmill | Controller | Treadmill | |
| Mean | 26,803 | 13,090 | 28,620 | 20,670 | 10,107 | 5,053 | 39,440 | 9,280 | 29,747 | 16,858 | |
| SD | 17,608 | 13,944 | 20,901 | 20,387 | 6,189 | 6,189 | 29,747 | 16,858 | 13,920 | 0,000 | |
| Minimum | 11,220 | 0,000 | 0,000 | 0,000 | 0,000 | 0,000 | 13,920 | 0,000 | 83,520 | 41,760 | |
| Maximum | 52,360 | 33,660 | 57,240 | 47,700 | 15,160 | 15,160 | 83,520 | 41,760 | | | |
| Normal Distribution & Equality of Variances | | | | | | | | | | | |
| SSQ-Total | | | SSQ-Nausea | | | SSQ-Oculomotor | | | SSQ-Disorientation | | |
| | Controller | Treadmill | Controller | Treadmill | Controller | Treadmill | Controller | Treadmill | Controller | Treadmill | |
| Skewness | 0,792 | 0,486 | 0,171 | 0,232 | -0,857 | 0,857 | 0,874 | 1,952 | 0,845 | 0,845 | |
| Std. Error of Skewness | 0,845 | 0,845 | 0,845 | 0,845 | 0,845 | 0,845 | 0,845 | 0,845 | 0,845 | 0,845 | |
| Kurtosis | -1,474 | -1,546 | -0,781 | -2,150 | -0,300 | -0,300 | -1,344 | 3,657 | 1,741 | 1,741 | |
| Std. Error of Kurtosis | 1,741 | 1,741 | 1,741 | 1,741 | 1,741 | 1,741 | 1,741 | 1,741 | 1,741 | 1,741 | |
| Alpha | 0,05 | 0,05 | 0,05 | 0,05 | 0,05 | 0,05 | 0,05 | 0,05 | 0,05 | 0,05 | |
| Shapiro-Wilk W | 0,847 | 0,881 | 0,955 | 0,892 | 0,822 | 0,822 | 0,824 | 0,666 | 0,824 | 0,666 | |
| Shapiro-Wilk P-Value | 0,148 | 0,273 | 0,783 | 0,331 | 0,091 | 0,091 | 0,096 | 0,003 | 0,096 | 0,003 | |
| Alpha | 0,05 | 0,05 | 0,05 | 0,05 | 0,05 | 0,05 | 0,05 | 0,05 | 0,05 | 0,05 | |
| Levene's F | 0,532 | 0,083 | 0,083 | 0,083 | 1,61E-33 | 3,668 | 3,668 | 3,668 | 3,668 | 3,668 | |
| Levene's df ₁ | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | |
| Levene's df ₂ | 10 | 10 | 10 | 10 | 10 | 10 | 10 | 10 | 10 | 10 | |
| Levene's P-Value | 0,483 | 0,779 | 0,779 | 0,779 | 0,084 | 0,084 | 0,084 | 0,084 | 0,084 | 0,084 | |
| One-Tailed Independent Sample Tests | | | | | | | | | | | |
| SSQ-Total | | | SSQ-Nausea | | | SSQ-Oculomotor | | | SSQ-Disorientation | | |
| | Controller | Treadmill | Controller | Treadmill | Controller | Treadmill | Controller | Treadmill | Controller | Treadmill | |
| Alpha | 0,05 | 0,05 | 0,05 | 0,05 | 0,05 | 0,05 | 0,05 | 0,05 | 0,05 | 0,05 | |
| Student t | 1,496 | 0,667 | 0,667 | 1,414 | 1,414 | 1,414 | - | - | - | - | |
| Student df | 10 | 10 | 10 | 10 | 10 | 10 | 10 | 10 | 10 | 10 | |
| Student P-Value | 0,083 | 0,260 | 0,260 | 0,094 | 0,094 | 0,094 | - | - | - | - | |
| Mann-Whitney U | - | - | - | - | - | - | 31,000 | 31,000 | 31,000 | 31,000 | |
| Mann-Whitney P-Value | - | - | - | - | - | - | 0,020 | 0,020 | 0,020 | 0,020 | |

ANHANG 2 ZUSAMMENFASSUNG DER HYPOTHESENTESTS FÜR DIE KORRELATION ZWISCHEN KRANKHEITSTÄRKE UND EMPFINDLICHKEIT.

| SSQ Total-Score & Susceptibility-Score - Correlation | | |
|---|------------------------|-----------------------------------|
| | SSQ-Total Score | Susceptibility Score |
| Mean | 19,947 | 22,318 |
| SD | 16,751 | 9,343 |
| Minimum | 0,000 | 2,200 |
| Maximum | 52,360 | 36,667 |
| Normal Distribution | | |
| | SSQ-Total Score | Susceptibility Score |
| Skewness | 0,713 | -0,825 |
| Std. Error of Skewness | 0,637 | 0,637 |
| Kurtosis | -0,185 | 0,900 |
| Std. Error of Kurtosis | 1,232 | 1,232 |
| Alpha | 0,05 | 0,05 |
| Shapiro-Wilk W | 0,925 | 0,948 |
| Shapiro-Wilk P-Value | 0,328 | 0,603 |
| Correlation - Spearman | | |
| | SSQ-Total Score | & Susceptibility Score |
| Alpha | 0,050 | |
| Spearman's rho | 0,309 | |
| Spearman - R² | 0,095481 | |
| Spearman - P-Value | 0,328 | |

ANHANG 3 ÜBERBLICK ÜBER DIE MITTELWERTE DER SYMPTOMSTÄRKE FÜR DIE BEIDEN SSQS UND NACH DER KORREKTUR.



ANHANG 4 ALLGEMEINER FRAGEBOGEN.

| | | | |
|-------------|--|---------------|--|
| Nr.: | | Alter: | |
|-------------|--|---------------|--|

| | | | |
|--------------------|----------|----------|--------|
| Geschlecht: | Männlich | Weiblich | Divers |
|--------------------|----------|----------|--------|

| | | |
|----------------|---------------|-----------------------|
| Gruppe: | VR Kontroller | Virtualizer Treadmill |
|----------------|---------------|-----------------------|

Im Durchschnitt, wie viel Zeit investieren Sie in Videospiele (pro Tag)?

| | | | | |
|----------------------------------|-------------------------|---------------|---------------|--------------------|
| Sehr unregelmäßig oder gar nicht | Weniger als eine Stunde | 1 - 2 Stunden | 2 - 5 Stunden | Mehr als 5 Stunden |
|----------------------------------|-------------------------|---------------|---------------|--------------------|

Haben Sie Vorerfahrung mit Virtual Reality-Headsets im Kontext von interaktiven Anwendungen?

Ja Nein

Falls Sie bereits Vorerfahrung mit Virtual Reality haben, wie oft nutzen Sie VR?

| | | | | |
|----------------|------------------------------------|------------------------------|--------------------------------------|----------------------------|
| So gut wie nie | Unregelmäßig, ein paar Mal im Jahr | Regelmäßig, alle paar Wochen | Häufig, mehr als einmal in der Woche | Sehr oft, meistens täglich |
|----------------|------------------------------------|------------------------------|--------------------------------------|----------------------------|

Falls Sie VR regelmäßig nutzen, wie lange ist bei Ihnen im Durchschnitt eine Sitzung?

| | | | | |
|------------------|-----------------|-----------------|---------------|----------------------|
| Unter 10 Minuten | 10 - 30 Minuten | 30 - 60 Minuten | 1 - 2 Stunden | Länger als 2 Stunden |
|------------------|-----------------|-----------------|---------------|----------------------|

**Besitzen Sie selbst ein VR-Headset?
Falls ja, bitte geben Sie zusätzlich an, welches Headset Sie besitzen.**

Ja Nein

Haben Sie Vorerfahrung im Umgang mit Virtual Reality-Treadmills?

Ja Nein

ANHANG 5 SIMULATOR SICKNESS QUESTIONNAIRE.

Bitte markieren Sie, wie stark die folgenden Symptome im Moment bei Ihnen auftreten.

| | Gar nicht | Leicht | Moderat | Stark |
|---|-----------------------|-----------------------|-----------------------|-----------------------|
| Allgemeines Unwohlsein | <input type="radio"/> | <input type="radio"/> | <input type="radio"/> | <input type="radio"/> |
| Müdigkeit | <input type="radio"/> | <input type="radio"/> | <input type="radio"/> | <input type="radio"/> |
| Kopfschmerzen | <input type="radio"/> | <input type="radio"/> | <input type="radio"/> | <input type="radio"/> |
| Überanstrengung der Augen Äußert sich normalerweise in der Form von brennenden, juckenden oder trockenen Augen. | <input type="radio"/> | <input type="radio"/> | <input type="radio"/> | <input type="radio"/> |
| Probleme mit der Akkommodation (dem Scharfstellen) der Augen | <input type="radio"/> | <input type="radio"/> | <input type="radio"/> | <input type="radio"/> |
| Erhöhte Speichelbildung | <input type="radio"/> | <input type="radio"/> | <input type="radio"/> | <input type="radio"/> |
| Schweißausbrüche | <input type="radio"/> | <input type="radio"/> | <input type="radio"/> | <input type="radio"/> |
| Übelkeit | <input type="radio"/> | <input type="radio"/> | <input type="radio"/> | <input type="radio"/> |
| Konzentrationschwierigkeiten | <input type="radio"/> | <input type="radio"/> | <input type="radio"/> | <input type="radio"/> |

| | Gar nicht | Leicht | Moderat | Stark |
|---|-----------------------|-----------------------|-----------------------|-----------------------|
| <p>Druck im Kopf Ein allgemeiner Druck im Kopf, der zum Beispiel auftritt, wenn man unter Stress steht oder anderweitig angespannt ist. Kann auch ohne Schmerzen im Kopf auftreten.</p> | <input type="radio"/> | <input type="radio"/> | <input type="radio"/> | <input type="radio"/> |
| <p>Unscharfes Sehen</p> | <input type="radio"/> | <input type="radio"/> | <input type="radio"/> | <input type="radio"/> |
| <p>Schwindelgefühl mit offenen Augen Gehen fällt schwer, man hat das Gefühl bei Bewegungen umzufallen und/oder man hat wackelige Beine.</p> | <input type="radio"/> | <input type="radio"/> | <input type="radio"/> | <input type="radio"/> |
| <p>Schwindelgefühl mit geschlossenen Augen Gehen fällt schwer, man hat das Gefühl bei Bewegungen umzufallen und/oder man hat wackelige Beine.</p> | <input type="radio"/> | <input type="radio"/> | <input type="radio"/> | <input type="radio"/> |
| <p>Gleichgewichtsstörung Man hat das Gefühl, dass sich die Umgebung (oder man selbst) dreht oder bewegt.</p> | <input type="radio"/> | <input type="radio"/> | <input type="radio"/> | <input type="radio"/> |
| <p>Magenbewusstsein Ein mulmiges Gefühl oder Flattern im Bauchraum, das als unangenehm empfunden werden kann.</p> | <input type="radio"/> | <input type="radio"/> | <input type="radio"/> | <input type="radio"/> |
| <p>Aufstoßen</p> | <input type="radio"/> | <input type="radio"/> | <input type="radio"/> | <input type="radio"/> |

ANHANG 6 EMPFINDLICHKEITS-FRAGEBOGEN.

Bitte kreuzen Sie an, wie oft bei Ihnen in den folgenden Situationen die angegebenen Symptome von Motion Sickness auftreten.

Falls Sie keine Erfahrungen bezüglich der angegebenen Situation haben, lassen Sie die Felder bitte leer und überspringen die Frage.

| | Beim Autofahren, als Fahrer | | | | Beim Autofahren, als Beifahrer | | | |
|---------------------------|-----------------------------|-----------------------|-----------------------|-----------------------|--------------------------------|-----------------------|-----------------------|-----------------------|
| | Noch nie | Selten | Regelmäßig | Oft | Noch nie | Selten | Regelmäßig | Oft |
| Übelkeit | <input type="radio"/> | <input type="radio"/> | <input type="radio"/> | <input type="radio"/> | <input type="radio"/> | <input type="radio"/> | <input type="radio"/> | <input type="radio"/> |
| Kopfschmerzen | <input type="radio"/> | <input type="radio"/> | <input type="radio"/> | <input type="radio"/> | <input type="radio"/> | <input type="radio"/> | <input type="radio"/> | <input type="radio"/> |
| Überanstrengung der Augen | <input type="radio"/> | <input type="radio"/> | <input type="radio"/> | <input type="radio"/> | <input type="radio"/> | <input type="radio"/> | <input type="radio"/> | <input type="radio"/> |
| Gleichgewichtsstörung | <input type="radio"/> | <input type="radio"/> | <input type="radio"/> | <input type="radio"/> | <input type="radio"/> | <input type="radio"/> | <input type="radio"/> | <input type="radio"/> |
| Schwindelgefühl | <input type="radio"/> | <input type="radio"/> | <input type="radio"/> | <input type="radio"/> | <input type="radio"/> | <input type="radio"/> | <input type="radio"/> | <input type="radio"/> |

| | Als Passagier im Zug | | | | Als Passagier auf einem Boot oder Schiff | | | |
|---------------------------|-----------------------|-----------------------|-----------------------|-----------------------|--|-----------------------|-----------------------|-----------------------|
| | Noch nie | Selten | Regelmäßig | Oft | Noch nie | Selten | Regelmäßig | Oft |
| Übelkeit | <input type="radio"/> | <input type="radio"/> | <input type="radio"/> | <input type="radio"/> |
| Kopfschmerzen | <input type="radio"/> | <input type="radio"/> | <input type="radio"/> | <input type="radio"/> |
| Überanstrengung der Augen | <input type="radio"/> | <input type="radio"/> | <input type="radio"/> | <input type="radio"/> |
| Gleichgewichtsstörung | <input type="radio"/> | <input type="radio"/> | <input type="radio"/> | <input type="radio"/> |
| Schwindelgefühl | <input type="radio"/> | <input type="radio"/> | <input type="radio"/> | <input type="radio"/> |

| | Als Passagier in einem Flugzeug | | | | Bei Attraktionen in Freizeitparks oder Volksfesten, z.B. Achterbahnen | | | |
|---------------------------|---------------------------------|-----------------------|-----------------------|-----------------------|---|-----------------------|-----------------------|-----------------------|
| | Noch nie | Selten | Regelmäßig | Oft | Noch nie | Selten | Regelmäßig | Oft |
| Übelkeit | <input type="radio"/> | <input type="radio"/> | <input type="radio"/> | <input type="radio"/> | <input type="radio"/> | <input type="radio"/> | <input type="radio"/> | <input type="radio"/> |
| Kopfschmerzen | <input type="radio"/> | <input type="radio"/> | <input type="radio"/> | <input type="radio"/> | <input type="radio"/> | <input type="radio"/> | <input type="radio"/> | <input type="radio"/> |
| Überanstrengung der Augen | <input type="radio"/> | <input type="radio"/> | <input type="radio"/> | <input type="radio"/> | <input type="radio"/> | <input type="radio"/> | <input type="radio"/> | <input type="radio"/> |
| Gleichgewichtsstörung | <input type="radio"/> | <input type="radio"/> | <input type="radio"/> | <input type="radio"/> | <input type="radio"/> | <input type="radio"/> | <input type="radio"/> | <input type="radio"/> |
| Schwindelgefühl | <input type="radio"/> | <input type="radio"/> | <input type="radio"/> | <input type="radio"/> | <input type="radio"/> | <input type="radio"/> | <input type="radio"/> | <input type="radio"/> |

| | Beim Anschauen von 2D Filmen im Kino | | | | Beim Anschauen von 3D Filmen im Kino | | | |
|---------------------------|--------------------------------------|-----------------------|-----------------------|-----------------------|--------------------------------------|-----------------------|-----------------------|-----------------------|
| | Noch nie | Selten | Regelmäßig | Oft | Noch nie | Selten | Regelmäßig | Oft |
| Übelkeit | <input type="radio"/> | <input type="radio"/> | <input type="radio"/> | <input type="radio"/> | <input type="radio"/> | <input type="radio"/> | <input type="radio"/> | <input type="radio"/> |
| Kopfschmerzen | <input type="radio"/> | <input type="radio"/> | <input type="radio"/> | <input type="radio"/> | <input type="radio"/> | <input type="radio"/> | <input type="radio"/> | <input type="radio"/> |
| Überanstrengung der Augen | <input type="radio"/> | <input type="radio"/> | <input type="radio"/> | <input type="radio"/> | <input type="radio"/> | <input type="radio"/> | <input type="radio"/> | <input type="radio"/> |
| Gleichgewichtsstörung | <input type="radio"/> | <input type="radio"/> | <input type="radio"/> | <input type="radio"/> | <input type="radio"/> | <input type="radio"/> | <input type="radio"/> | <input type="radio"/> |
| Schwindelgefühl | <input type="radio"/> | <input type="radio"/> | <input type="radio"/> | <input type="radio"/> | <input type="radio"/> | <input type="radio"/> | <input type="radio"/> | <input type="radio"/> |

| | Beim Konsum von Medien in Kopplung mit der Simulation von physischen Bewegungen, z.B. durch bewegliche Plattformen oder im „4D“ Kino | | | | Beim Konsum von interaktiven Medien, wie z.B. Videospiele, auf einem herkömmlichen Fernseher oder Monitor | | | |
|---------------------------|--|-----------------------|-----------------------|-----------------------|---|-----------------------|-----------------------|-----------------------|
| | Noch nie | Selten | Regelmäßig | Oft | Noch nie | Selten | Regelmäßig | Oft |
| Übelkeit | <input type="radio"/> | <input type="radio"/> | <input type="radio"/> | <input type="radio"/> | <input type="radio"/> | <input type="radio"/> | <input type="radio"/> | <input type="radio"/> |
| Kopfschmerzen | <input type="radio"/> | <input type="radio"/> | <input type="radio"/> | <input type="radio"/> | <input type="radio"/> | <input type="radio"/> | <input type="radio"/> | <input type="radio"/> |
| Überanstrengung der Augen | <input type="radio"/> | <input type="radio"/> | <input type="radio"/> | <input type="radio"/> | <input type="radio"/> | <input type="radio"/> | <input type="radio"/> | <input type="radio"/> |
| Gleichgewichtsstörung | <input type="radio"/> | <input type="radio"/> | <input type="radio"/> | <input type="radio"/> | <input type="radio"/> | <input type="radio"/> | <input type="radio"/> | <input type="radio"/> |
| Schwindelgefühl | <input type="radio"/> | <input type="radio"/> | <input type="radio"/> | <input type="radio"/> | <input type="radio"/> | <input type="radio"/> | <input type="radio"/> | <input type="radio"/> |

| | Beim Konsum von interaktiven Medien mithilfe eines Virtual Reality- oder Augmented Reality-Headsets | | | |
|---------------------------|---|-----------------------|-----------------------|-----------------------|
| | Noch nie | Selten | Regelmäßig | Oft |
| Übelkeit | <input type="radio"/> | <input type="radio"/> | <input type="radio"/> | <input type="radio"/> |
| Kopfschmerzen | <input type="radio"/> | <input type="radio"/> | <input type="radio"/> | <input type="radio"/> |
| Überanstrengung der Augen | <input type="radio"/> | <input type="radio"/> | <input type="radio"/> | <input type="radio"/> |
| Gleichgewichtsstörung | <input type="radio"/> | <input type="radio"/> | <input type="radio"/> | <input type="radio"/> |
| Schwindelgefühl | <input type="radio"/> | <input type="radio"/> | <input type="radio"/> | <input type="radio"/> |

11 ERKLÄRUNGEN

11.1 SELBSTSTÄNDIGKEITSERKLÄRUNG

Hiermit erkläre ich, dass ich die Masterarbeit selbstständig verfasst und keine anderen als die angegebenen Quellen und Hilfsmittel benutzt und die aus fremden Quellen direkt oder indirekt übernommenen Gedanken als solche kenntlich gemacht habe.

Die Arbeit habe ich bisher keinem anderen Prüfungsamt in gleicher oder vergleichbarer Form vorgelegt. Sie wurde bisher nicht veröffentlicht.

Ort, Datum

Unterschrift

11.2 ERMÄCHTIGUNG

Hiermit ermächtige ich die Hochschule Kempten zur Veröffentlichung einer Kurzzusammenfassung sowie Bilder/Screenshots und ggf. angefertigte Videos meiner studentischen Arbeit z.B. auf gedruckten Medien oder auf einer Internetseite der Hochschule Kempten zwecks Bewerbung des Bachelorstudiengangs „Game Engineering“ und des Masterstudiengangs „Game Engineering und Visual Computing“.

Dies betrifft insbesondere den Webauftritt der Hochschule Kempten inklusive der Webseite des Zentrums für Computerspiele und Simulation. Die Hochschule Kempten erhält das einfache, unentgeltliche Nutzungsrecht im Sinne der §§ 31 Abs. 2, 32 Abs. 3 Satz 3 Urheberrechtsgesetz (UrhG).

Ort, Datum

Unterschrift